

コンクリートの施工の良否が材料劣化に  
及ぼす影響に関する調査研究委員会

報 告 書

- 構造物別にみる施工に起因する不具合による材料劣化
- 施工による不具合がコンクリート構造物の安全性に及ぼす影響に関する解析的検討

2023年3月



公益社団法人 日本コンクリート工学会 東北支部

コンクリートの施工の良否が材料劣化に及ぼす影響に関する調査研究委員会

## コンクリートの施工の良否が材料劣化に及ぼす影響に関する調査研究委員会

### 委員会名簿

委員長	子田 康弘	(日本大学)	
幹事長	上原子 晶久	(弘前大学)	
幹事	飯土井 剛	((株)復建技術コンサルタント)	
委員	阿波 稔	(八戸工業大学)	
	石川 雅美	(東北学院大学)	
	音道 薫	(上北建設(株))	
	小山田 哲也	(岩手大学)	
	倉持 尚子	(東日本高速道路(株))	
	齋藤 俊克	(日本大学)	
	迫井 裕樹	(八戸工業大学)	
	佐藤 和徳	(日本大学)	
	桶本 智	(東日本高速道路(株))	
	堀川 真之	(日本大学)	
	三井 功如	(西松建設(株))	
	国土交通省	東北地方整備局	道路部
	国土交通省	東北地方整備局	東北技術事務所
	旧委員	高橋 裕道	(東日本高速道路(株))
高橋 良輔		(北海学園大学)	

(50音順, 敬称略)

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. 構造物別にみる施工に起因する不具合による材料劣化.....	4
2.1 概説.....	4
2.2 施工に起因する不具合.....	6
2.2.1 豆板.....	6
2.2.2 コールドジョイント.....	7
2.2.3 内部欠陥.....	8
2.2.4 砂すじ.....	9
2.2.5 表面気泡.....	10
2.2.6 外部拘束による温度ひび割れ.....	10
2.3 東北地方におけるコンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼす主な劣化.....	12
2.3.1 凍結防止剤由来の塩害.....	12
2.3.2 ASR.....	16
2.3.3 凍害.....	23
2.4 施工の影響を大きく受けるコンクリート部材.....	29
2.4.1 RC床版.....	29
2.4.2 トンネル覆工.....	43
2.5 施工の影響による不具合の事例.....	48
2.5.1 PC上部構造.....	48
2.5.2 橋梁下部構造（橋台および橋脚）.....	55
2.5.3 RC床版.....	74
2.5.4 トンネル覆工.....	80
2.6 まとめ.....	104
3. 施工による不具合がコンクリート構造物の安全性に及ぼす影響に関する解析的検討.....	105
3.1 概説.....	105
3.2 共通解析.....	105
3.2.1 解析条件と対象構造物.....	105
3.2.2 解析コード間の検証.....	106
3.2.3 妥当性確認.....	107
3.3 施工による不具合と構造性能.....	113
3.3.1 K橋における温度応力解析に基づくひび割れ発生位置の評価.....	113
3.3.2 A橋における初期欠陥が常時ならびに地震時挙動に及ぼす影響.....	127
3.3.3 C橋とB橋における初期欠陥が曲げ耐荷性状に及ぼす影響.....	133
4. おわりに.....	138
付録1 橋梁等構造物の現地調査結果.....	139
付録2 トンネル覆工調査結果.....	149

## 1. はじめに

東北地方は、そのほとんどが積雪寒冷地域であり、冬期には凍結防止剤の大量散布が行われ、沿岸部、内陸部問わず塩化物イオンの影響を受けている。そのため、コンクリート構造物は、非常に過酷な環境に曝されているため、塩化物イオンの影響を強く受ける凍害、塩害、アルカリシリカ反応が発生し、激しい材料劣化が顕在化する状況にある。我が国におけるコンクリート構造物の維持管理に関する学術的かつ実務的な体系は、供用開始時のコンクリートの品質には不具合がなく、劣化因子が経年的に蓄積され劣化が進行する前提の上、適切な補修によって性能が回復するという考え方で成り立っている。しかし、既設コンクリート構造物の劣化および補修の実態は、補修しても同じ劣化が度重なるよう何度も発生する、いわゆる再劣化が頻繁に起きている。このようなコンクリート構造物の不具合は、耐久設計の誤り、または適切な点検診断とその補修という維持管理の基本を怠ったためと、短絡的に結論付けられることはできない。仮にコンクリート構造物が置かれる環境条件などの確に要求性能を定めた精度の高い耐久設計と、供用期間 100 年を想定し経年劣化のシミュレーションを実施した上での維持管理計画が立案され実行したが、供用後 10 年も経たずして劣化が顕在化したコンクリート構造物が眼前にあったとしたら、我々土木技術者は設計と維持管理の方法に疑念を持つこともある。

果たして、設計と維持管理を直接結び付けることが正しいのか、このこと自体を考えるべきではないだろうか。設計と維持管理の間には、“施工”が介在する。換言すれば、劣化が顕在化したコンクリート構造物の施工は、設計理念や思想を完全に反映されているのかと考えたことがあるのだろうか。

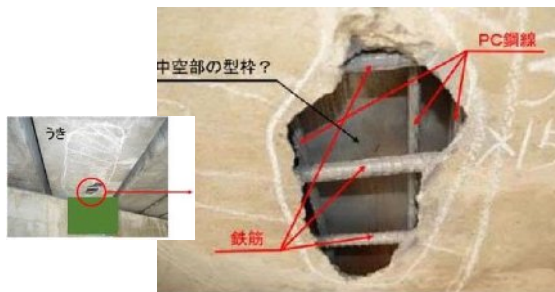
国土交通省東北地方整備局では、産学官連携で構造物の定期点検結果から劣化の原因を分析し、その結果を復興道路・復興支援道路などの新設構造物の品質・耐久性確保につなげるという壮大な取り組みが行われた。この試みの肝は、施工に重点を置いたことにある。筆者は、品質確保の取り組みに加わり活動するにつれて、既設コンクリート構造物の劣化の有り様が目にとまるようになった。十数年経たずして劣化が顕在化した箇所は、概ね図-1.1 に示すような施工の不具合箇所と一致するケースが多いことに気付かされることになった。すなわち、丁寧な施工を確実にやり、品質・耐久性確保を目指したコンクリート構造物を目の当たりにした結果、コンクリート構造物の著しい材料劣化は、施工由来の場合が多々あるという考えに至った。しかしながら、そもそも施工の良否が材料劣化に及ぼす影響を定量的に評価した研究や、これに着眼点をおいた実構造物の調査は皆無に近く、この種の問題を整理する必要性が動機となって本委員会の立ち上げに至った。図-1.2 は施工由来の劣化と考えられる事例(詳細は次章以降にて述べる)である。図より、充填不良、締固め不足、不適切な打ち重ね、または打込み管理不足などが、竣工当初は不具合としては目立たないが、時間の経過とともにそこを起点とした劣化が急激に加速している状況に見て取れる。

本委員会は、施工が良い箇所と悪い箇所では、何が違うのかを施工状況の推定や点検調書の精査とともに考察する構造物調査 WG と、施工の不具合に起因する劣化がコンクリート構造物の安全性にどのように影響するかを解析的アプローチによってその影響度を事例を分析することで評価した解析 WG の 2 つの WG により構成された。本委員会の成果は、まずは東北地方における既存コンクリート構造物の材料劣化に関する点検・診断に際し、施工上の不具合を考慮した評価の参考となる資料を提供することにある。次に、東北各地で実践されるコンクリートの品質確保の取り組みの重要性を材料劣化の観点から広く施工者に啓蒙するための有用な資

料になる。ひいては東北地方における品質確保に関する取り組みの重要性を裏付ける資料といっても過言ではない。



図-1.1 コールドジョイント，砂筋，不適切な打ち重ね(ボックスカルバート側)



P C中空床版橋の材料劣化事例



P C T桁橋の材料劣化事例



下部構造の材料劣化事例



R C床版の材料劣化事例

図-1.2 施工由来と考えらるコンクリート構造物の劣化

本論文の構成は、委員会を構成するWGと同じく、施工による不具合に起因する材料劣化に関する章(2章)と、施工による不具合が安全性に及ぼす影響を解析的に検討した章(3章)で成り立っている。具体的には、2章において、まず施工に起因する不具合を明示し、その発生要因を解説した。材料劣化としては、塩害、ASR、凍害という凍結防止剤散布環境下において顕在化している材料劣化を取り上げ、これらと施工に起因する不具合が劣化の進行に及ぼす影響について現地調査結果に基づき解説を行った。また、特に材料劣化という事象が構造物の安全性に影響する床版と第3者被害に影響するトンネル覆工コンクリートについて、調査結果に基づき施工の不具合を引き金とした劣化の実状について考察した点は、本報告書の一つの目玉とも言える。次に、3章はFEM解析による検討であるが、施工の不具合と構造物の安全性を結び付け、不具合をモデル化し解析を試みたものである。様々な解析上の課題をWG内で議論し、現段階の解析技術の範疇において報告できる範囲の成果を示した。解析モデルは、施工調査WGの調査結果から選択した実構造物をベースとした解析であることも、本報告書の成果の特徴の一つである。

ここで、本報告書における施工の不具合とは、ひび割れの他、豆板、コールドジョイント、打重ね線という打込み、締固め時で生じる不具合、またバイブレータの挿入間隔や挿入時間の設定が不適正でおこる過度な表面気泡、ブリージング水の処理を怠ったことで生じる砂すじといった表面近傍の不具合を指す。

[担当 子田]

## 2. 構造物別にみる施工に起因する不具合による材料劣化

### 2.1 概説

本章は、国土交通省東北地方整備局の協力のもと、既往の橋梁およびトンネル点検調書と現地状況の調査結果から、東北地方におけるコンクリート構造物の施工に起因した不具合によって生じる材料劣化についてとりまとめたものである。

東北地方は積雪寒冷地域であり、冬期には交通の安全性を確保するため、図-2.1.1 に示すように、すべての路線で塩化ナトリウム(NaCl)を主成分とした凍結防止剤が散布される。図に示した凍結防止剤の散布量は、平成 27～29 年度の除雪工区毎の凍結防止剤の平均散布量であり、橋梁区間は必ず凍結防止剤を散布することに着目し、標準散布量と薬剤散布車の出動回数から、橋面上の平均散布量に換算したものである。

このような寒冷な気象条件下では、凍害による劣化が生じやすく、また凍結防止剤に含まれる NaCl がこの劣化をさらに進行させる。また、コンクリートのアルカリ骨材反応(ASR)は、この NaCl によって促進されることが近年の研究で明らかとなっており、これらの劣化は特に漏水や飛散などによって水分が供給される部位で顕著に発生している。このような厳しい環境下において、コンクリート構造物の耐久性を確保するためには、主たる劣化因子である水分および塩化物の浸透に対する抵抗性を確保する必要がある。

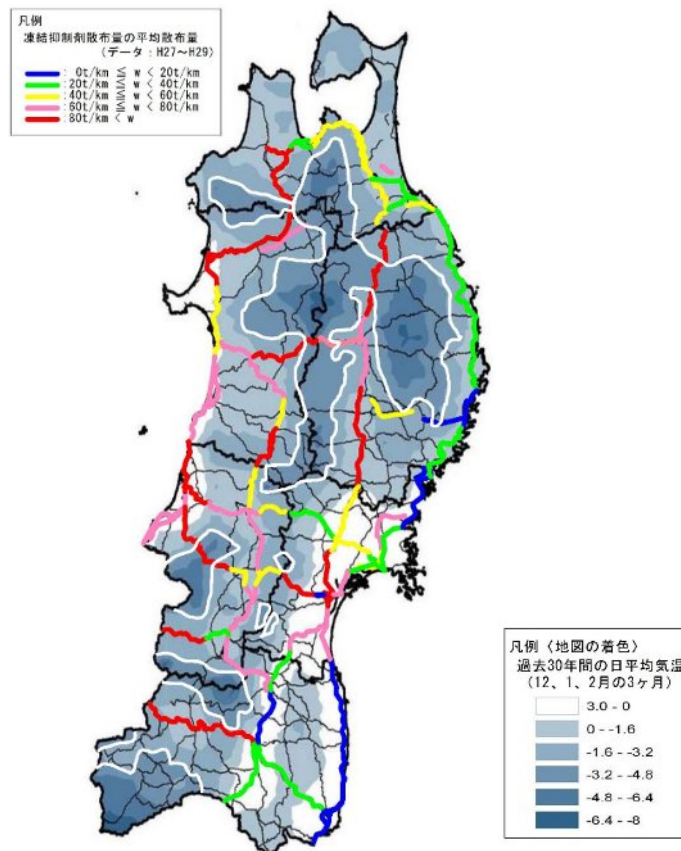


図-2.1.1 橋梁橋面上の凍結防止剤の平均散布量

また、コンクリート内部の鋼材腐食は、水分と塩化物の供給によって生じる。鋼材を保護するかぶりコンクリートの厚さが不足する場合や、十分な密実性を確保できていない場合、またはひび割れが生じている場合は劣化因子が浸透しやすく、設計で想定した以上よりも早期に劣化が生じる場合もある。

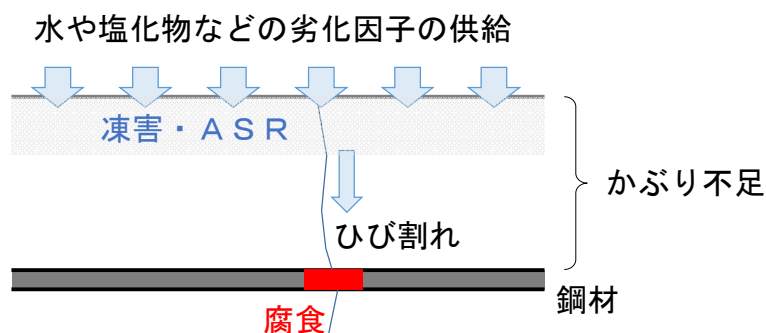


図-2.1.2 コンクリートの耐久性の低下

これらのコンクリートの耐久性に影響する不具合は、施工時の影響を受けやすく、設計で期待した耐久性を確保するためには、施工において適切な品質を確保することが求められる。

このようなことから、本章ではまず初めに2.2で施工に起因して生じる代表的な不具合を示すとともに、2.3では東北地方の環境条件で課題となる凍結防止剤由来の塩害、ASR、凍害の劣化要因について詳述した。また、2.4では特有の構造物の劣化として、RC床版、および劣化によって第三者被害が生じる可能性の高いトンネル覆工について記述し、2.5では各構造物別の施工に起因する不具合の事例を紹介している。

[担当 飯土井 剛]



## 2. 2 施工に起因する不具合

コンクリートの変状は、1) 初期欠陥、2) 経年劣化、3) 構造的変状に分類できる。

初期欠陥の主なものとして、①豆板、②コールドジョイント、③内部欠陥、④砂すじ、⑤表面気泡（あばた）、⑥温度ひび割れ、がある。

また経年劣化としては、①ひび割れ・浮き・剥落、②錆汁、③エフロレッセンス、④汚れ（変色）、⑤すりへり、がある。

構造的変状としては、①たわみ、②変形、③振動、がある。

ここでは、施工に起因する不具合となる初期欠陥の変状について、1) 定義（意味）、2) 発生要因、3) 発生しやすい部位または条件などについて述べる。

### 2. 2. 1 豆板

#### (1) 定義

豆板とは、打込んだコンクリートの一部がセメントペースト、モルタルの廻りが悪く粗骨材が多く集まってできた空隙の多い不良部分や、打込み時にコンクリートが鉄筋やセパレータなどにぶつかって材料分離が生じモルタル分が少なく粗骨材が多く集まってできた空隙の多い不良箇所をいう（写真-2.2.1.1 参照）。



写真-2.2.1.1 豆板

#### (2) 発生要因

豆板は、コンクリートを打込むときの材料の分離、締固め不足、型枠下端や継ぎ目からのセメントペーストの漏れなどによって生じる。

#### (3) 発生しやすい部位または条件

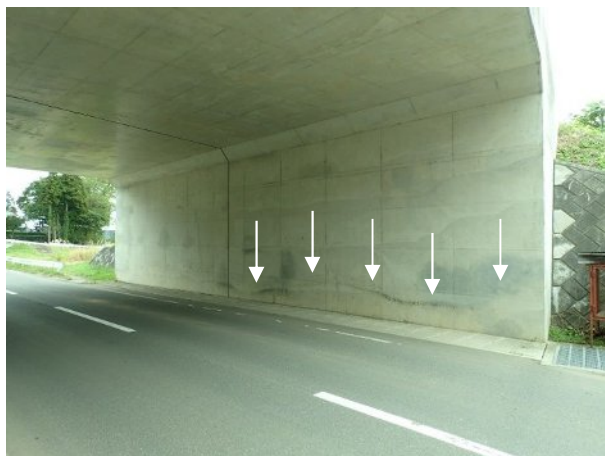
豆板が生じやすいのは、設備の埋込み金物や配管などの下部や開口部下部、壁脚部、薄い部材、過密配筋部、隅角部などコンクリートが打込みにくい場所である。

また、1回の打込み高さが5mを超える場合や、コンクリートの落下高さが大きい場合は締固め不足や材料分離により豆板が発生しやすくなる。この他にも、薄い部材で深い位置に打込む場合は、打込み箇所が暗くて良く見えないため、締固め不足が生じやすいので注意が必要である。

## 2.2.2 コールドジョイント

### (1) 定義

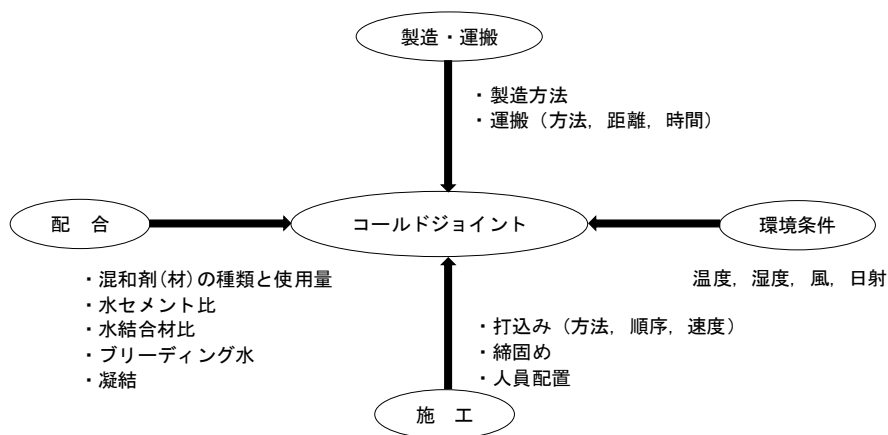
施工時の打込み段階で生じるコールドジョイントは、打継ぎ目とは異なり、コンクリートを打重ねる時間の間隔を過ぎて打込んだ場合に、先に打込まれたコンクリートの上に後から重ねて打込まれたコンクリートが一体化しない状態となって、打重ねた部分に不連続な面が生じることをいう（写真－2.2.1.2 参照）。この面のコンクリートは脆弱であり、ひび割れが生じることが多く、構造物の耐荷性、耐久性、水密性を低下させる原因となる。



写真－2.2.1.2 コールドジョイント

### (2) 発生要因

コールドジョイントの発生は、写真－2.2.1.2 に示すように、先に打込まれたコンクリートの硬化程度（凝結程度）が最大の原因であり、この硬化程度はコンクリートの配(調)合、温度・湿度等の環境条件、養生方法、コンクリートの練混ぜから打込み終了までの製造および運搬、打込みおよび締固め等の施工方法の影響を受ける。コールドジョイントの発生要因を図－2.2.1.1 に示す。



図－2.2.1.1 コールドジョイントの発生要因

### (3) 発生しやすい部位または条件

コールドジョイントが生じやすいのは、打込み面積の大きな部材（床版やスラブなど）や、打込み量が大きな部材などで先に打込んだ箇所に打重ねる時間間隔が大きい場合である。特に、気温の高い時期は凝結時間が早くなるためコールドジョイントが発生しやすい。また、打込み面積や打込み量の大きな部材ではコンクリートを連続して打込むことが重要となるが、輸送・運搬計画、打込み方法、打込み順序の計画が不十分な場合や、適正な人員と設備の配置ができない場合などでは、打重ねる時間が大きくなるため注意が必要である。その他には、何らかのトラブルで打込みが一時的に中断した場合にもコールドジョイントが発生しやすい。

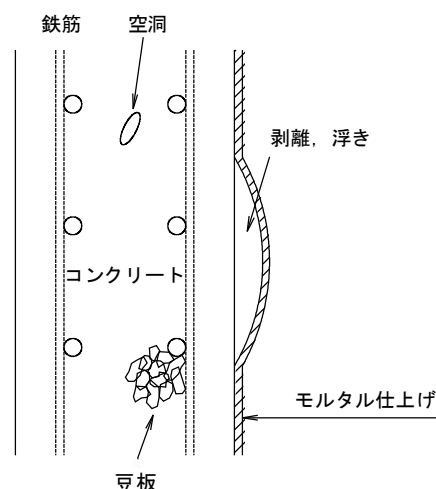
## 2.2.3 内部欠陥

### (1) 定義

内部欠陥とは、トンネル構造物における覆工コンクリートの背面空洞や PC 構造物におけるシース管内の空洞（写真－2.2.1.2 参照）、建築物のタイル仕上げやモルタル塗仕上げを施した場合に、コンクリートとモルタルとの界面浮き・剥離あるいはコンクリートとタイル張付けモルタルとの界面浮き・剥離など（図－2.2.1.3 参照）で、コンクリート構造物の内部に生じた豆板や空洞のことをいう。



写真－2.2.1.2 シース管内部の充填不良



図－2.2.1.3 内部欠陥

### (2) 発生要因

コンクリート内部に生じる豆板や空洞は施工不良に主な原因があり、鉄筋の腐食、水密性およびコンクリート構造物の維持管理上の問題となる。空洞が生じる施工不良には、材料分離の生じやすいコンクリートの打込み、締固め不足、型枠からのセメントペーストの漏れなどによって生じる。

### (3) 発生しやすい部位または条件

トンネルの覆工コンクリート天端付近や柱や梁などの過密配筋部では、締固め不足や打込み時に鉄筋にコンクリートが当たって材料分離が発生して内部空洞や豆板が発生しやすい。

PC 構造物におけるシース管内ではグラウト材の注入方法や注入材料の分離抵抗性、流動性等の品質不良により充填不良が生じやすい。

建築物では、タイル仕上げやモルタル塗仕上げ部分において、直射日光や降雨などの影響により乾湿を繰り返すことによって、仕上げ層のムーブメント（動き）とコンクリートのムーブメントの差（相対ムーブメント）によって生じる応力によって浮き・剥離が生じやすい。さらに、地震動やその他の荷重が躯体に強制的に発生する変形・ひずみや面外方向の慣性力などにより貼付け界面に発生する応力によって浮き・剥離が生じる場合がある。

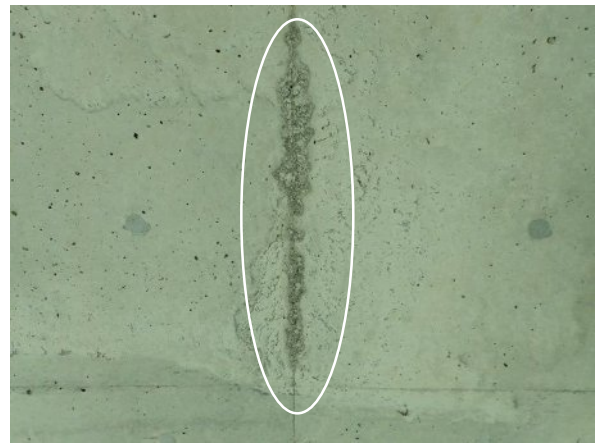
## 2.2.4 砂すじ

### (1) 定義

砂すじには面的に発生するものと、せき板の継ぎ目部分に局所的に発生するものと2種類ある。面的な砂すじは、せき板に接するコンクリート表面に、コンクリート中の水分が分離して上に流れ出す場合に生じ、コンクリート表面に細骨材が縞状に露出したものであり（写真－2.2.1.4 参照）、ブリーディング水の多いコンクリートに生じる。せき板の継ぎ目部分に局所的に発生する砂すじは、バイブレータの振動によってセメントペーストが漏れることによって、細骨材が露出した状態のものである（写真－2.2.1.5 参照）。



写真－2.2.1.4 面的な砂すじ



写真－2.2.1.5 せき板継ぎ目部の砂すじ

### (2) 発生要因

面的な砂すじは、ブリーディング水の多いコンクリートの浮き水を取り除かないで打ち足した場合や、軟練りコンクリートを過度に締固めた場合に生じる。さらに、型枠面はコンクリート内部に比べ摩擦の影響が小さく、そのためブリーディング水は型枠面を這い上がり、面的な砂すじが生じる。

せき板の継ぎ目部分に局所的に発生する砂すじは、継ぎ目近傍でバイブレータによる締固めを行った時に、振動によって継ぎ目から強制的にセメントペーストが排出されることによって生じる。また、型枠の組立精度が悪く、継ぎ目に隙間が生じている場合に発生しやすいので注意が必要である。

### (3) 発生しやすい部位または条件

1回の打込み量が大きい部材や打込みリフトが大きい場所、過密配筋部などでは下層部分に滞水したブリーディング水を排除しにくいいため、面的な砂すじが生じやすい。また、隅角部や複雑な形状部分では型枠継ぎ目に隙間ができやすいため局所的な砂すじが発生しやすい。

## 2.2.5 表面気泡

### (1) 定義

表面気泡は、せき板に接するコンクリート表面にコンクリート打込み時に巻き込んだ空気あるいはエントラップドエアがなくならずに残って露出し、硬化したものである（写真-2.2.1.6参照）。

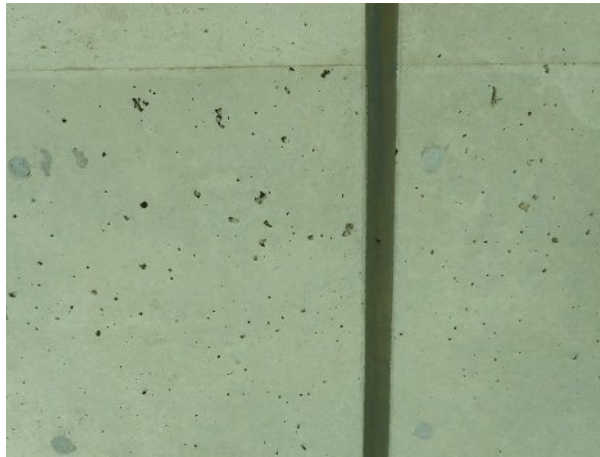


写真-2.2.1.6 表面気泡

### (2) 発生要因

コンクリート構造物を施工する際に、傾斜を有する型枠面をもつ場合などでは、十分な締固めを行っても材料分離した余剰水や空気泡が抜けきれずに、型枠脱型後にコンクリート表面に水泡や空気泡が発生する。また、コンクリートの温度が高い場合には凝結が早くなるため、気泡が上昇できないまま硬化してしまい表面気泡となることが多い。さらに、打込むコンクリートのスランプが大きいほど発生しやすいので注意が必要である。

### (3) 発生しやすい部位または条件

表面気泡が発生しやすい構造物の部位は、ダム堤体、擁壁、水路、橋梁アーチ部分など主に傾斜面（テーパ部分）を有する場所に発生しやすい。

## 2.2.6 外部拘束による温度ひび割れ

### (1) 定義

コンクリートの水和発熱が降下する際、コンクリートは収縮する。この時、既設コンクリートや硬い地盤などに拘束されていると、収縮が妨げられ部材内部に引張応力が発生する。この外部拘束を受けた状態で、部材内部の引張応力がコンクリートの引張強度以上になるとひび割れが発生する（写真-2.2.1.7、図-2.2.1.3参照）。

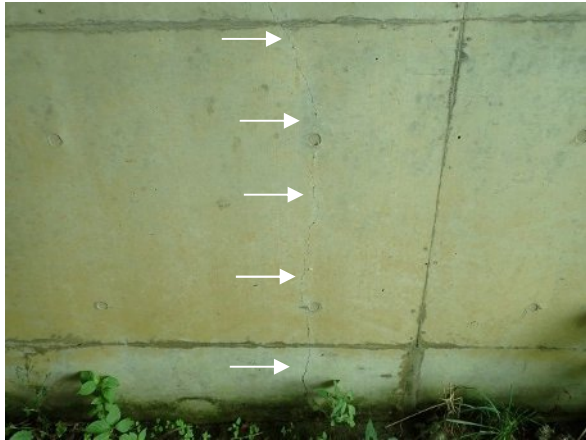


写真-2.2.1.7 外部拘束による温度ひび割れ

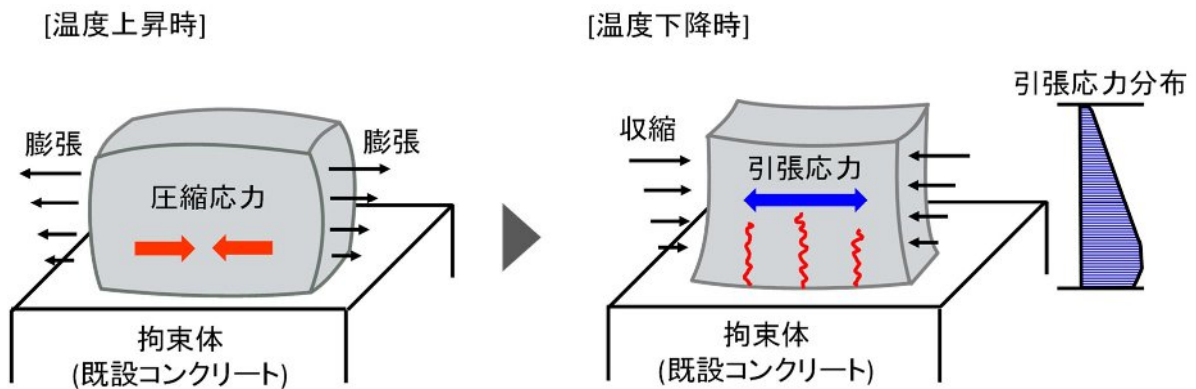


図-2.2.1.3 外部拘束による温度ひび割れのイメージ図

(2) 発生要因

温度ひび割れは、コンクリート構造物の部材寸法が大きく、温度上昇量が大きい場合に発生しやすい。また、締固めが不十分な場合、コンクリート品質が不均一になるため、このようなコンクリートでは、温度ひび割れが発生しやすいので注意が必要である。

(3) 発生しやすい部位または条件

スラブではおおよそ厚さ 80~100 cm 以上、下端が拘束された壁では厚さ 50 cm 以上のマスコンクリート部材で発生しやすい。そのため、橋台、橋脚、函渠工、擁壁工、樋門などの壁に発生しやすい。

[担当 音道 薫]

## 2. 3 東北地方におけるコンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼす主な劣化

### 2. 3. 1 凍結防止剤由来の塩害

#### (1)劣化の特徴とメカニズム

コンクリート構造物に生じる塩害とは、コンクリート中の塩化物イオンの存在により、コンクリート中の鋼材の腐食が進行し、腐食生成物の体積膨張によってコンクリートのひび割れや剥離が生じるものである。これがさらに進行すると、鋼材の断面減少によって構造物の耐荷性能が低下する劣化である。写真-2.3.1.1に、塩害による劣化の事例を示す。この構造物は汀線付近に位置する構造物であり、海からの飛来塩分の影響を受け塩害による劣化が進行したものである。



写真-2.3.1.1 塩害の事例（汀線付近の橋梁）

一方で、東北地方では冬期に散布される凍結防止剤に含まれる塩化物の影響により、同様の塩害による劣化が生じている。写真-2.3.1.2の構造物は山間部に位置する構造物であり、内部鋼材の腐食膨張によりコンクリートのひび割れや剥離が生じたものとなっている。このような劣化は、図-2.3.1.1に示すように、特に凍結防止剤を含む路面水の漏水や飛散の影響を受ける部位で発生するのが特徴的となっている<sup>1)</sup>。



写真-2.3.1.2 塩害の事例（山間部の橋梁）

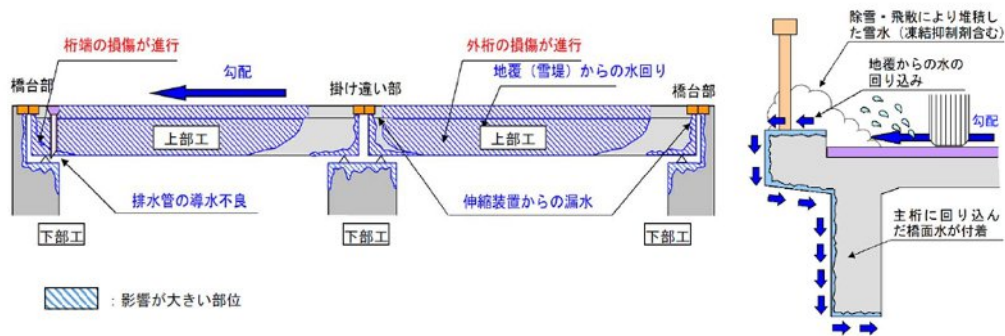


図-2.3.1.1 路面水の漏水や飛散の影響を受けやすい部位<sup>1)</sup>

コンクリート中に存在する細孔溶液は、空気中の二酸化炭素などによって中性化していない場合は一般に pH=12 以上の高いアルカリ性を示す。このような環境であればコンクリート内部の鋼材は不動態皮膜により保護されているため腐食しにくいですが、塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>) がコンクリート中に浸入し、塩化物イオンが一定の濃度に達すると鋼材表面を保護していた不動態皮膜が破壊される。不動態皮膜が破壊されると鋼材から鉄イオン (Fe<sup>2+</sup>) が細孔溶液中に溶け出す

(アノード反応)。このアノード反応により鋼材中の電子 ( $e^-$ ) が酸素と水に反応し、水酸化物イオン ( $OH^-$ ) が生成される (カソード反応)。コンクリート内部の鋼材に生じる錆 ( $Fe(OH)_2$ ) は、これらアノード反応によって生成された鉄イオン ( $Fe^{2+}$ ) とカソード反応によって生成された水酸化物イオン ( $OH^-$ ) が反応することにより生成される (図-2.3.1.2)。

またコンクリート中の塩化物イオンの拡散は、細孔溶液中の塩化物イオンの濃度勾配や細孔溶液中の水の移動が重なって生じるため、コンクリートの組成構造や乾湿繰り返しによる水の移動が大きく関係する。



図-2.3.1.2 鋼材腐食による塩害のメカニズム

## (2) 施工に起因する不具合

塩害は、コンクリート中の鋼材表面の塩化物イオンが高濃度となることによる劣化であり、塩害による劣化を回避するためには、鋼材位置における塩化物イオン濃度を、目標とした供用期間において発錆限界値以下に抑える必要がある。そのためには、塩化物イオンの浸透に対する適切なかぶり厚を確保することや、コンクリート表面の密実性を高めることが重要である。

コンクリートの打込みにおいて、スペーサーのずれや型枠の変形などにより設計上の所定のかぶり厚が確保されないと、早い段階で鋼材の塩化物イオン濃度が高くなり、鋼材の腐食が早期に生じることになる (写真-2.3.1.3)。



写真-2.3.1.3 鋼材のかぶり不足

コンクリート内部への塩化物イオンの拡散は、コンクリートの密実性も大きく影響する。コンクリート打込み時の締固め不足や養生が不十分な場合は、密実性が低いことから塩化物イオンが浸透しやすく劣化の進行は早い。

また、ひび割れを有するコンクリート構造物では、さらに塩化物イオンが浸透しやすい。施工時の温度応力によるひび割れや、打継ぎ・打重ねの処理が適切に行われなかったことに起因するひび割れは、塩化物イオンが浸透しやすい状況にあり、ひび割れが生じている部位での内部鋼材の腐食は早期に生じるといえる (写真-2.3.1.4)。



写真-2.3.1.4 ひび割れ部の鋼材の腐食



### (3) 施工に起因する不具合による劣化の進行

塩害によるコンクリート構造物の劣化過程は、**図-2.3.1.3**に示すように潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分けられる。潜伏期は、コンクリート内部の鋼材の腐食が開始するまでの期間であり、この期間は鋼材の不動態皮膜によって保護されている。進展期は、塩化物イオンの拡散によって鋼材表面の不動態皮膜が破壊され、鋼材の腐食生成物の膨張によってひび割れが生じるまでの期間、加速期は腐食ひび割れの発生によって、さらに塩化物イオンが供給されやすい状態となり鋼材の腐食速度が増大する期間である。

さらに劣化が進行することで鋼材の腐食量が増加し、耐荷力の低下が顕著となる劣化期となる。塩害の場合は、コンクリート中の鋼材の腐食が始まってから腐食ひび割れの劣化が顕在化するまでの期間が短いという特徴がある。

**写真-2.3.1.5**に東北地方の山間部において、塩害によって劣化した上部構造の事例を示す。東北地方におけるコンクリート構造物の塩害は、海からの飛来塩分だけではなく、凍結防止剤に含まれる塩化物の影響によって、ほとんどの地域で発生する可能性が高い。

特に、山間部など凍結防止剤の散布量が多い地域では、漏水などによって構造物に供給される塩化物の影響は海岸部の飛来塩分の影響に匹敵するレベルである可能性が高い。しかし、このような厳しい塩化物の作用をうける環境下であるにもかかわらず、現時点では、海岸付近に建設される構造物のような塩害対策をとり入れるまでには至っていない。

このような構造物で、前述のかぶり不足や密実性が低い場合、または施工に起因する不具合によってひび割れが生じている場合は、塩化物イオンの拡散によって、鋼材位置の塩化物イオン濃度が発錆限界に達する期間が短く、早期に劣化が顕在化する可能性が高い。

### (4) 材料劣化を回避するための対応状況

国内の塩害橋に対する最初の技術指針として、1984年に「道路橋の塩害対策指針」が制定されている。この指針では「塩害対策地域の明示」「海岸線からの距離に応じた塩害対策の設定」および「地域ごとのかぶりの増加」をはじめとする塩害対策が示されている。また、水セメント比は上部構造で50%以下、下部構造で55%以下とするなども規定されている。

しかし、東北地方日本海沿岸部では、厳しい塩害環境であったこともあり、1965年代に建設された15橋のコンクリート道路橋が竣工後わずか5年で塩害による劣化が顕在化し、早期架替えに至っている。

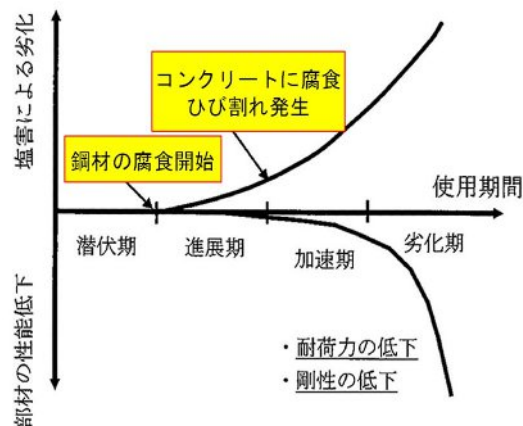


図-2.3.1.3 塩害による劣化の進行過程



写真-2.3.1.5 塩害による上部構造の劣化  
(山間部の橋梁)

この地域ではこれら早期劣化に至った道路橋の架替えにあたり「塩害 PC 橋対策技術検討特別委員会（委員長；東北大学三浦尚教授（当時）」の検討結果をふまえた塩害対策(図-2.3.1.4, 写真-2.3.1.6)が導入されている<sup>2)</sup>。

一方で、このような十分な塩害対策を導入して架替えが行われたにもかかわらず、施工の不具合に起因する性能の低下が疑われる上部構造も存在しており<sup>2)</sup>、設計で求めた性能を担保するためには、設計思想を実現するための施工によって品質を確保することが極めて重要であるといえる。

東北地方整備局で制定した「コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）（橋脚，橋台，函渠，擁壁編）」は、施工段階での不具合の発生を抑制することで、設計で求めた耐久性を担保することを目指したものであり、施工の不具合に起因する材料劣化を回避するためには効果的な取り組みとなっている。

塩害対策の方針	具体的内容
高耐食材料の導入	エポキシ樹脂塗装鉄筋
	表面被覆PC鋼材
	ポリエチレンシース
構造上の配慮	閉断面箱桁形式の採用
	鋼材の純かぶり [外面]5.0cm [内面]3.5cm
	コンクリートの配合 ・W/C45%以下，空気量6.0%以下 ・単位セメント量330kg/m <sup>3</sup> 以上
	透水性型枠の使用 ゴム支承，埋設型伸縮装置の採用

図-2.3.1.4 道路橋の塩害対策<sup>2)</sup>



写真-2.3.1.6 高耐食材料の導入<sup>2)</sup>

#### 参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局道路部・東北技術事務所：東北地方における道路橋の維持・補修の手引き（案）【改訂版】，2017
- 2) 上田洋，飯土井剛，子田康弘，佐伯竜彦，岩城一郎，鈴木基行：厳しい塩害環境において架替え後 15 年が経過した PC 道路橋の詳細調査および今後の維持管理に関する提案，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.71，No.2，161-180，2015

〔担当 飯土井 剛〕

## 2. 3. 2 ASR

### (1)劣化の特徴とメカニズム

写真-2.3.2.1に、橋台に発生したASRの事例を示した。このようにASRを起こしたコンクリート構造物には、多くの場合、亀甲状のひび割れが確認される。また、ひび割れからゲル状物質の析出も見られる場合が多い。



写真-2.3.2.1 橋台に発生したASRの事例

ASRは、図-2.3.2.1に示すようにコンクリート内部のアルカリにより反応性の高いシリカ( $\text{SiO}_2$ )などがゲル状物質に変化し、ゲルが吸水により膨張し、コンクリート構造物に亀甲状のひび割れを発生させる現象である。したがってASRが発生するためには、コンクリート中のアルカリ量が一定以上であること、骨材にASRを起こすような反応性鉱物が含まれていること、反応性鉱物が変化したゲル状物質が膨張するための水が供給されることが必要となる。

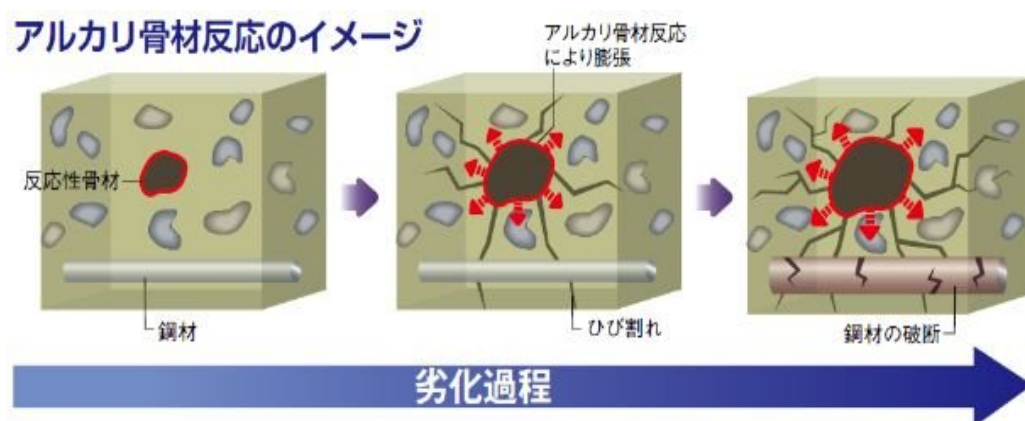


図-2.3.2.1 ASRの劣化進行過程

図-2.3.2.2に同一橋台における雨掛かりの有無によるASRのひび割れの発生状況の違いを示した。雨掛かりのない橋台前面には亀甲状のひび割れがほとんど見られない。一方、雨掛かりのある橋台側面には亀甲状のひび割れが入っているのがわかる。同一橋台のため、使用されている骨材は同じであるにも関わらず、このように水の供給の有無によってASRの顕在化の仕方が異なることがわかる。このため、反応性鉱物の量も多く、水が十分供給される環境ではASRによる膨張力も大きくなり、下部工の鉄筋破断に至った事例も報告されている。このように、場合によっては耐荷力にも影響を与える可能性があるのがASRである。

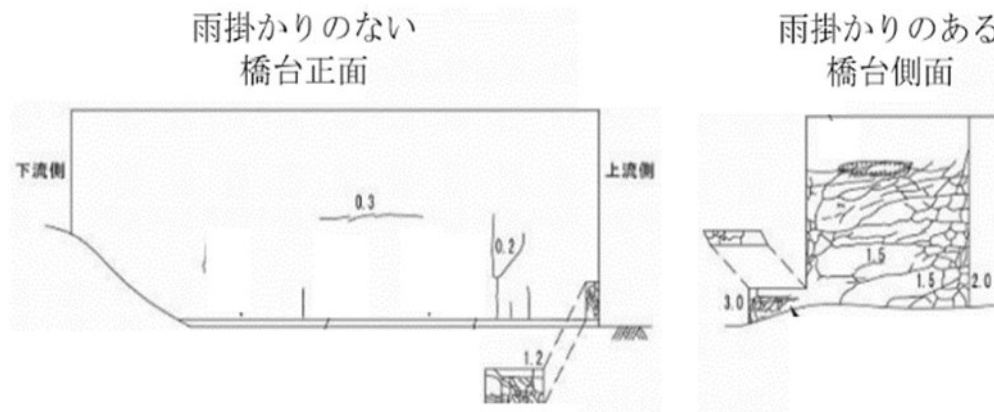


図-2.3.2.2 雨掛かりの有無によるひび割れ発生状況の違い

写真-2.3.2.2にASRを起こした橋台の補修履歴を示した。ASRによる残存膨張量の予測がほぼ収束していると判定されたため断面修復を行ったが、実際にはASRによる膨張が収束しておらず、ひび割れが再発したため、3年後にひび割れ注入を行っている。しかし、4年後にひび割れ注入箇所に沿って再びひび割れが確認された。このように、ASRは膨張が収束していないうちに補修してもすぐ再劣化してしまうのが特徴である。



側壁の状況

縦壁のひび割れの状況

2007年：ASRと判定。残存膨張量0.1%未満で膨張は収束との見解  
 2009年：ポリマーセメントモルタルによる断面修復  
 2012年：断面修復部に2方向ひび割れ発生のためひび割れ注入実施  
 2016年：ひび割れ注入箇所に沿って新たなひび割れ確認0.15～0.3mm

写真-2.3.2.2 ASRを起こした橋台の補修履歴の例

## (2) 施工に起因する不具合

ASR は、アルカリを含む NaCl（塩化ナトリウム）によって促進されることが知られており、飛来塩分の影響を受ける地域や、東北地方のように NaCl を主成分とする凍結防止剤を散布する地域では、NaCl の影響を受ける構造物の部位で、ASR が促進される事例が報告されている。

図-2.3.2.3 は、伸縮装置からの漏水の有無による ASR の進行状況の違いを示したものである。P1 は掛け違い橋脚のため橋脚上に伸縮装置があり、その伸縮装置からの漏水によって橋脚梁部の張り出し部分に ASR によるひび割れが発生している。一方、P2 は連続桁の中間支点上の橋脚のため伸縮装置がなく、漏水の影響を受けないため、橋脚梁部の張り出し部分に ASR らしいひび割れは見られない。雨掛かりの程度は P1 も P2 もほぼ同等と思われるが、凍結防止剤混じりの漏水の影響によって P2 より先に P1 の張り出し部分に ASR が顕在化したものと思われる。

東北地方のように伸縮装置からの漏水が影響する部位では、漏水に凍結防止剤が含まれているため、反応性骨材が使用されていると ASR が顕在化する可能性が高い。

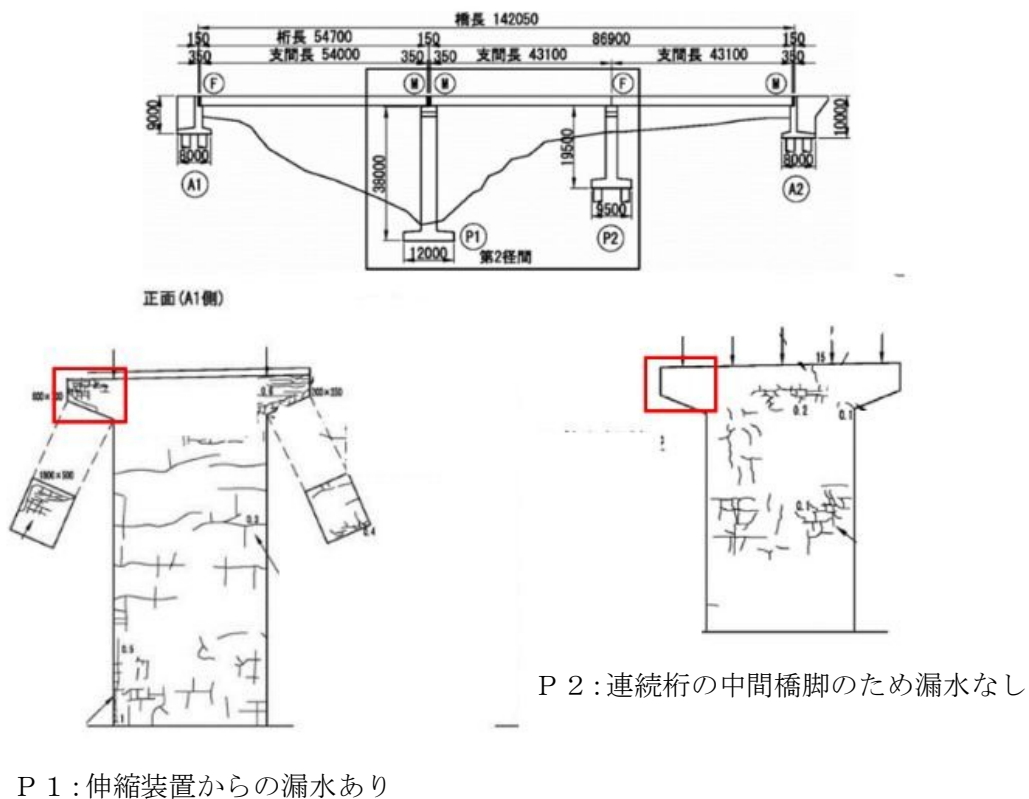


図-2.3.2.3 伸縮装置からの漏水の有無による ASR の進行状況の違い

図-2.3.2.4 は伸縮装置の橋軸直角方向の断面図である。伸縮装置から漏水が発生する一番の原因は止水機能の低下である。しかし、伸縮装置の後打ちコンクリートの充填不良によっても漏水は発生する。施工の不具合によって ASR が発生するとすれば伸縮装置の後打ちコンクリートの充填不良が考えられる。

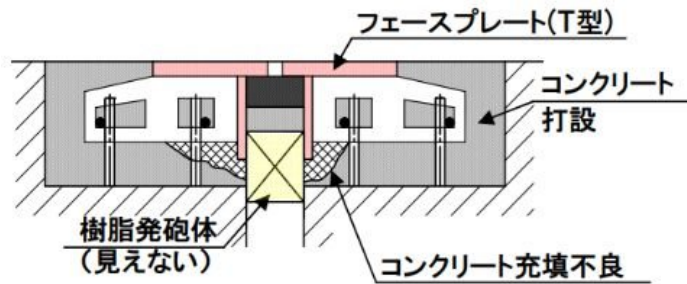


図-2.3.2.4 伸縮装置の断面図

### (3) 施工に起因する不具合による劣化の進行

橋梁の点検調書に伸縮装置からの漏水の記載があっても、それが止水機能の低下なのか後打ちコンクリートの充填不良によるものなのかは記載されていないため判別できない。このため、後打ちコンクリートの充填不良で伸縮装置から漏水が発生したと仮定して、ASR の進行状況の例を示すことにする。

写真-2.3.2.3は伸縮装置からの漏水による橋脚張り出し部の ASR の進行状況を示したものである。2005年4月よりも2009年9月の方がひび割れも明瞭になっており、錆汁も見られるようになった。これは、ASR で生じたひび割れから凍結防止剤混じりの水が浸入し、内部鋼材が腐食したため生じた錆汁と思われる。このような状況のため2011年には断面修復が行われた。その後の状況写真が点検調書にはないため、現時点では再劣化にはいたっていないものと思われる。



2005年 4月



2009年 9月

注)2011年 橋脚断面修復

写真-2.3.2.3 伸縮装置からの漏水による ASR の進行状況

#### (4) 材料劣化を回避するための対応状況

ASR を抑制するため、伸縮装置の後打ちコンクリートからの漏水を施工方法の改善によって解消できたとしても、伸縮装置の止水機能の低下によっていずれ漏水が発生する可能性がある。このため、伸縮装置からの漏水はいずれ発生するという前提で ASR の抑制を考える必要がある。また、雨掛かり部など、設計上これを避けることが困難な部位もあるため、そもそも雨掛かり部であっても、凍結防止剤混じりの漏水が予想される部位であっても、ASR を抑制できる対応を取る必要がある。

国土交通省から ASR の抑制のため、表-2.3.2.1 に示すように対策が示されている。対策の中身は、①アルカリ総量規制、②ASR 抑制効果のある混合セメントの使用、③試験により無害とされた骨材の使用であり、これを1つ以上採用して ASR の抑制を目指すものとなっている。

ただし、凍結防止剤散布環境下では、凍結防止剤の主成分がアルカリを含んでいる NaCl なので、アルカリ総量規制を行っても、凍結防止剤散布によってアルカリが追加供給されるため、対策の効果には限界があると言える。

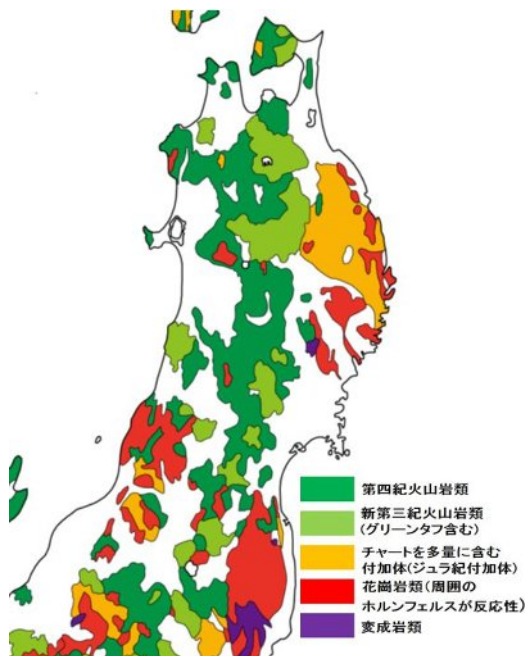
表-2.3.2.1 国土交通省から通知されたアルカリ骨材抑制対策の概要

年月	通知名	主な内容
1986年6月 (昭和61年)	アルカリ骨材反応暫定通知について	骨材の選定（試験方法：化学法、モルタルバー法）、低アルカリ型セメント、抑制効果のある混合セメント、アルカリ総量規制
1989年7月 (平成元年)	アルカリ骨材反応抑制対策について	1986年6月の暫定通知のうち、抑制効果のある混合セメントの使用、化学法、モルタルバー法の小改訂
2002年8月 (平成14年)	アルカリ骨材反応抑制対策	対策の優先度を規定。 ①アルカリ総量規制 ②抑制効果のある混合セメントの使用 ③試験により無害とされた骨材の使用

※この他、2001年「グリーン購入法」の関係で高炉セメントが標準となる

一方、図-2.3.2.5に示すように東北地方は、ASRを起こす可能性のある鉱物を含む岩体が広く分布しているため、試験により無害とされた骨材を採用しようとする、遠方からの骨材の調達によるコストの上昇や骨材の地産地消という生コンクリートのメリットをなくしてしまう恐れがある。

このため、凍結防止剤を散布する東北地方では、ASR抑制効果のある混合セメントを使用するのがよい。具体的には、高炉セメントB種を採用するか、普通セメントにセメント質量の20%程度のフライアッシュを混和材として使用したフライアッシュコンクリートを使用するのがよい。



(データ提供：金沢大学 鳥居名誉教授)

### 主な反応性骨材と ASR

奥羽脊梁山地から日本海側の地域にかけて、安山岩をはじめとする火山岩類が広く分布し、太平洋側でも仙台市・名取市付近をかすめる。東北地方では、このような火山岩類の碎石利用や砂利・砂への混入による急速膨張性 ASR の発生事例が非常に多い。

### その他の主な反応性骨材

北部北上山地にはチャートを頻繁に挟む地層が分布。阿武隈山地南部には変成岩類が広く分布。東北地方南部～北関東にはチャートを頻繁に挟む地層が分布、またこれを起源とする山砂利の骨材利用もある（福島県いわき市付近）。これらの遅延膨張性骨材による ASR の発生については詳細不明である。

図-2.3.2.5 ASR を起こす可能性のある鉱物を含む岩体の分布



一方、写真-2.3.2.4は、飛来塩分の影響を受ける箇所に架橋されたPC箱桁橋である。この橋は、詳細調査によってASRであることが確認されている。PC桁の場合、橋軸方向にプレストレスが導入されているため、ASRによる膨張はプレストレスの影響のない上下方向に生じる。このため、ASRによるひび割れは亀甲状とはならず、橋軸方向の水平ひび割れが発生し、ASRゲルも析出しているのが確認出来る。

PC桁のセメントの標準はASRの抑制効果のない早強セメントであり、凍結防止剤の散布環境下や飛来塩分の影響を受けるPC桁で、将来的にASRが確認される可能性がある。このため、PC桁であっても早期にASR抑制効果のある混合セメントの使用に踏み切る必要があると言える。



写真-2.3.2.4 飛来塩分の影響を受けたPC箱桁のASRの事例

〔担当 佐藤 和徳〕

## 2. 3. 3 凍害

### (1)劣化の特徴とメカニズム

凍害は、東北地方のコンクリート構造物の劣化の主たる要因の一つである。凍害劣化の典型例は、内部損傷（内部ひび割れ）、表面損傷（スケーリング）、ポップアウト、崩壊の4つに分類される。

写真-2.3.3.1に見られる内部損傷は、コンクリートの内部組織の弛緩すなわち内部ひび割れによって顕在化する。提唱されているメカニズムは大別して水圧説、浸透圧説、氷晶生成説の3つが代表的である。水圧説および浸透圧説を図-2.3.3.1<sup>1)</sup>により説明する。

水圧説では、図-2.3.3.1中の①のようにコンクリート硬化体内部の水和に寄与せずに残存する水分、すなわち毛細管空隙に存在する水が凍結により体積膨張し、近隣の水を押しつけて発生する水圧が硬化体の引張強度を上回った場合に、内部組織を弛緩させる現象と説明されている。

浸透圧説では図-2.3.3.1の②のように水圧説とは水の移動が逆向きとなる。毛細管空隙中の凍結した氷に対して、未凍結水は自由エネルギーが高い状態にあり、これがエネルギーの低い氷側に集まることにより水圧が高まって周辺組織の弛緩を助長すると考えたものである。



写真-2.3.3.1 内部損傷

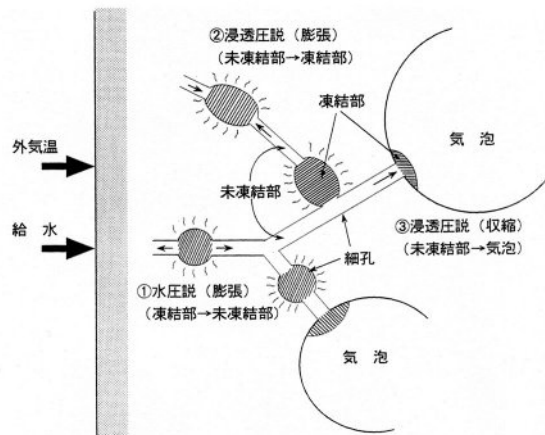


図-2.3.3.1 内部破壊のメカニズム(水圧説浸透圧説)

氷晶生成説は、霜柱と同様に氷の結晶が周辺の水を集めて粗大化すると考えたものであり、これまで毛細管空隙を有するコンクリートには適用されにくいと考えられてきた。ただし近年の研究によれば、図-2.3.3.2<sup>2)</sup>に示すように凍結時にはセメントペースト中のゲル空隙から毛細管空隙へ水が移動して毛細管内部で凍結が生じ、融解時には毛細管空隙からゲル空隙へ凍結水の逆流があることによっていずれも組織の弛緩に繋がるとの説明もある。いずれのメカニズムでも凍結融解の繰返しが多い程、劣化損傷は助長される。

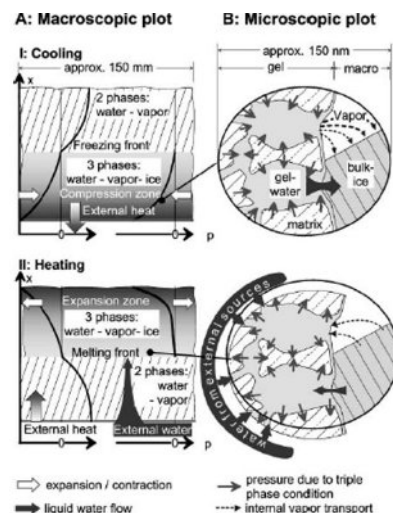


図-2.3.3.2 Micro-Ice-Lens Formation

表面損傷は、写真-2.3.3.2のようにコンクリート表層がフレーク状に剥離する現象であり、図-2.3.3.1の②のような浸透圧説を援用することにより説明が可能であると考えられてきた。古くから凍結防止剤環境下で凍害劣化が大きくなることが分かっている。水溶液がセメントペースト内で凍結する際には純水が形成され、未凍結水の溶液濃度は高まる。氷晶はより大きな毛細管空隙から形成されるが濃度平衡が崩れており、高濃度となった溶液は、低濃度の周囲の水を引き寄せようとする。この化学ポテンシャルの相違により発生する膨張圧がコンクリートの組織を崩壊させる。



写真-2.3.3.2 表面損傷

それ以外にも熱衝撃、水酸化ナトリウムの溶脱、Glue-Spall theory 等による説明がなされている。凍結防止剤 (NaCl) は水溶の際にコンクリートから熱を吸収してコンクリート表面の温度は急激に低下する。この温度低下によりコンクリートの表面温度が局所的に低下して、はく離に至るとい理論が熱衝撃によるスケーリングである。

水酸化カルシウムの溶脱は、ほとんどの凍結防止剤水溶液とコンクリートの接触により確認される。カルシウムが溶脱することにより表層の組織が脆弱となり劣化が促進されると説明されている。

Glue-Spall theory<sup>3)</sup> とは、図-2.3.3.3のように説明される。コンクリート表層に氷が生成しさらに温度が低下する場合、表層の氷の熱膨張係数はコンクリートのそれより大きいため、大きく収縮しようとする。純水の場合、クリープにより応力が緩和されるが、凍結防止剤を含む溶液では、純氷と未凍結水の不均質な状態となる。さらに温度が下がると、不均質な氷は収縮に耐えられなくなって破壊が生じ、この衝撃がコンクリートに伝わって、表層をはぎ取る。

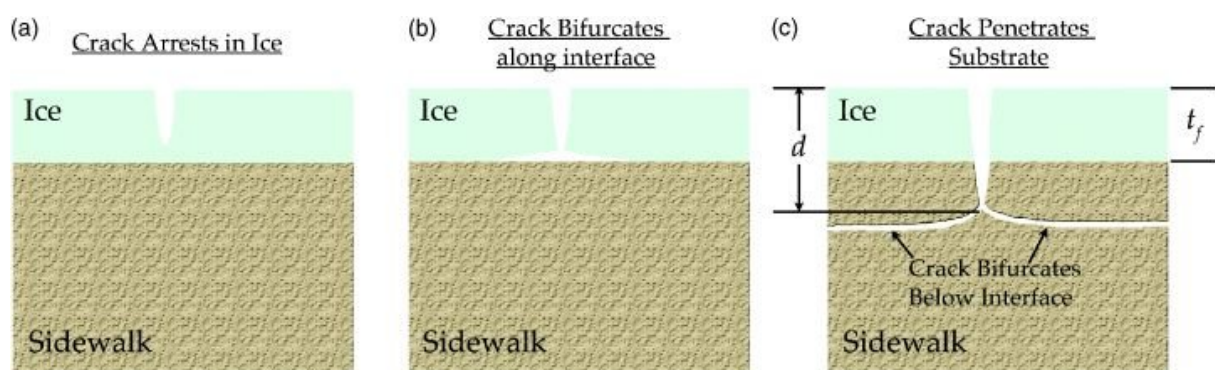


図-2.3.3.3 Glue-Spall theory

ポップアウトは写真-2.3.3.3のように、表面付近にある骨材が凍結により膨張して、骨材のかぶりコンクリートを押し出すことによって顕在化する劣化である。吸水率が大きい骨材で発生することから、骨材の規格では、骨材の吸水率と絶乾密度の限界が決められている。



写真-2.3.3.3 ポップアウト

図-2.3.3.3に示す崩壊は、文字通り全体の組織が緩んで崩壊する現象である。詳しい研究は行われるに至っていないが、蒸気養生された工場製品に多いことから、コンクリート中に潜在的に形成された微細ひび割れが凍結膨張することによって生じるものと考えられている。

## (2) 施工に起因する不具合

施工による不具合は、アジテータトラックによる長時間の運搬、高圧力による圧送、過剰な振動締固め、打込んだコンクリートの場内運搬等、連行空気が抜けることにより発生する。微細気泡の連行が十分でないコンクリートでは、環境条件によって前述の内部損傷、表面損傷が発生する。特にブリーディングを伴う構造物の天端部や打重ね部、水掛かり部に劣化が集中して発生する。

施工工程に関する空気量の変化を図-2.3.3.4<sup>4)</sup>に示す。工場から出荷されたコンクリートの空気量は、その時間経過および施工工程に影響を受け増減する。

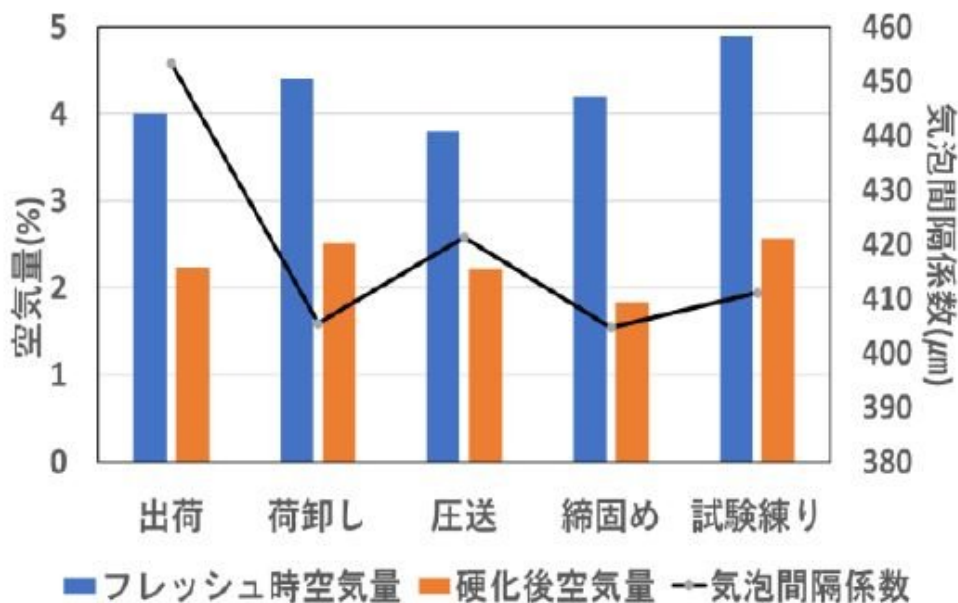


図-2.3.3.4 施工工程に伴うコンクリート中の空気量の変化

図-2.3.3.4のそれぞれの施工工程から採取したコンクリートの表面損傷の促進試験結果を図-2.3.3.5に示す。荷卸し, 圧送, 締固めと施工工程が進むにつれ, 表面損傷量が多くなることが分かる。

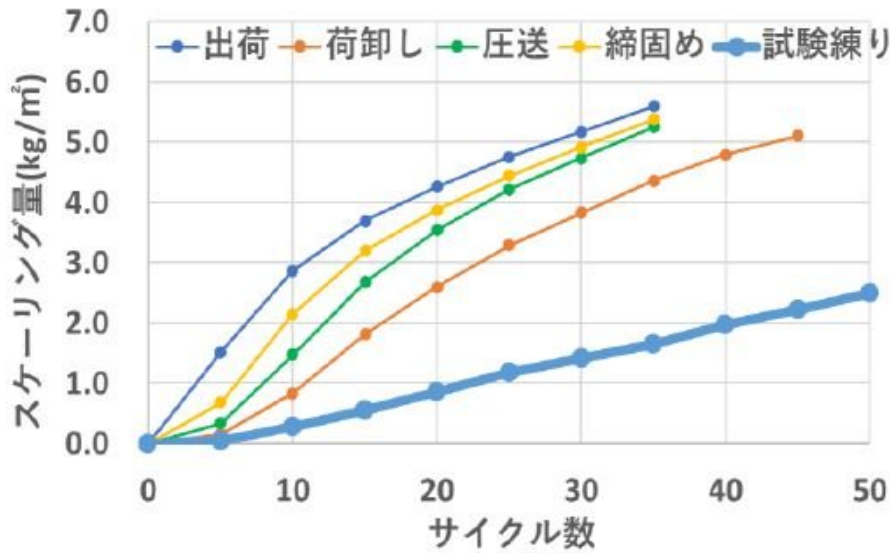


図-2.3.3.5 施工工程に伴うコンクリートの表面損傷量の相違

### (3) 施工に起因する不具合による劣化の進行

凍害の発生には水の凍結が必須であり, 水掛りが無い場所には凍害は起こらない。凍害劣化が生じたコンクリートはそもそも水に接している。また凍害が発生しているコンクリートは共通して微細空気の連行が不十分である。風雪に晒される土木構造物でひとたび凍害が発生すると, 劣化が加速的に進行する。組織の弛緩が新たな進行を助長するためであり, 内部損傷, 表面損傷に関わらず劣化の進行は状況が悪化の一途を辿る。どちらも最終的には崩壊と同等な状況を呈すると考えられる。

#### (4) 材料劣化を回避するための対応状況

コンクリートの耐凍害性の確保に有効とされるのは、組織の緻密化と連行空気の導入である。

組織の緻密化については、巨視的視点と微視的視点が必要である。巨視的視点では、ひび割れの抑制が重要な対策となる。大小にかかわらず、目視できるひび割れは、毛細管空隙より大きい。これに水が入って凍結すれば、水の体積膨張によりくさびを貫入するのと同様にひび割れを拡大する。ひび割れの原因は数多くあるが、施工によるひび割れの発生を抑える努力が必要である。

コンクリートのワーカビリティやひび割れの抑制の観点から、水和に必要とされる以上の水が練混ぜ水として混合される。水和に関わらない水は毛管水として、セメント硬化体に残る。毛管水は膨張の原動力であり、極力少なくすべきである。具体的には単位水量の低下によるそもそもの水量の低減、あるいは水結合材比の低下が考えられる。水結合材比を小さくすることにより、引張強度を高めながら組織を緻密化でき、有効な手段と考えられている。また組織の緻密化にあたっては、養生も重要となる。湿潤期間をなるべく多くとることがセメントの水和に必要となることは言うまでも無く、追加養生等の配慮が必要と考えられる。これらが微視的視点である。

コンクリート中の AE 剤による連行空気の導入は、内部損傷、表面損傷のどちらにも有効な方法である。水圧説による水の流れは、理論的な解釈であったが、近年では、図-2.3.3.6<sup>5)</sup> のように SEM 画像により確認されている。特に表面損傷は連行空気敏感であり、図-2.3.3.7<sup>6)</sup> に示すようにより多くの微細空気を硬化コンクリートに残すことが望ましい。

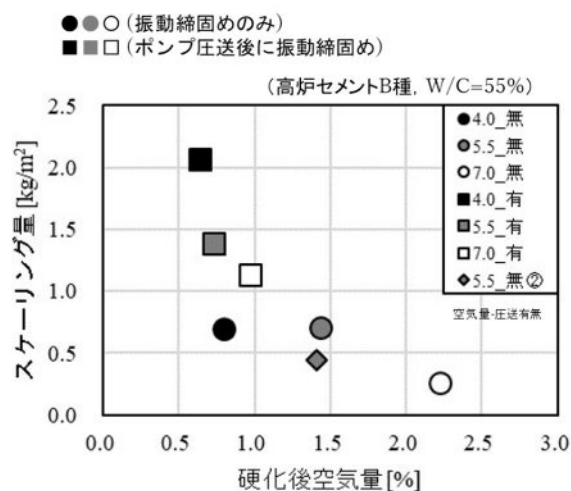
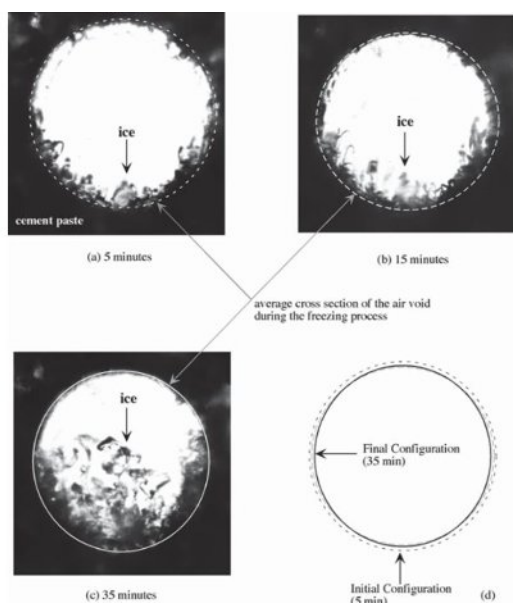


図-2.3.3.7 直径 150 $\mu$ m 以下の空気量とスケーリング量の関係

図-2.3.3.6 凍結による連行空気中の氷の生成

コンクリート中の連行空気は、浮力による打込み面からの散逸や加圧による溶液への溶解等、不安定である。またコンクリートが動くことにより、気泡同士が合一して、浮力を高めることにもなる。使用材料やコンクリートのコンシステンシーの相違による気泡径分布の違い等、系統的な研究の取組みが必要であると考え、凍害の抑制は、硬化コンクリート中の微細気泡量が支配的であることを意識する必要がある。コンクリート中の空気量の適切な判断材料としては、一

般に気泡間隔係数が用いられている。内部損傷の場合、わが国では250 $\mu\text{m}$ を目標とすることが多いが、表面損傷の場合にはさらに微細空気を多くして200 $\mu\text{m}$ とする努力が望まれる。施工による連行空気の変動は、運搬、圧送、締固め等の様々な工程で生ずる可能性が指摘されており、それぞれに細心の注意が必要である。ただし、それらを注意するばかりに施工をおろそかにして欠陥を作るのは本末転倒であり、連行空気の挙動を理解した上で正しく恐れる必要がある。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：2. 融雪剤の影響を受けたコンクリートの凍害，融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書論文集，p.26，1999.11
- 2) Max J. Setzer: Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 243, Issue 1, pp. 193-201, 2001
- 3) John J. Valenza II, George W. Scherer: A review of salt scaling: II. Mechanisms, Cement and Concrete Research 37, pp.1022-034, 2007
- 4) 小山田哲也ほか：施工の各種工程がトンネル覆工コンクリートの連行空気とその耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.526-531，2022
- 5) R Piltner, Paulo J.M Monteiro：Stress analysis of expansive reactions in concrete, Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 6, pp. 843-848, 2000
- 6) 小山田哲也，平戸謙好，山本英和：コンクリートのスケーリング劣化に及ぼす施工による空気量の変化の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.803-808，2019

[担当 小山田 哲也]

## 2. 4 施工の影響を大きく受けるコンクリート部材

### 2. 4. 1 RC 床版

#### (1)劣化の特徴とメカニズム

写真-2.4.1.1にRC床版の砂利化の事例を示した。RC床版の砂利化は、床版のコンクリートが部分的に砂利状または土砂状になる現象で、劣化の初期段階では舗装の異常という形で顕在化する。RC床版の砂利化は、はじめは舗装の部分的な凹みの補修が必要となり、次に舗装の補修箇所から白や茶色の噴出物が確認されるようになる。そのまま砂利化が進行すると、RC床版の抜け落ちに進展し、走行車両の損傷や事故の誘発といった第三者被害の発生につながる可能性がある。



舗装補修箇所からの噴出物



砂利化して抜け落ちた RC 床版

写真-2.4.1.1 RC 床版の砂利化の事例

図-2.4.1.1に、砂利化の推定メカニズムを示した<sup>1)</sup>。RC床版上面に水が存在し、その上を車両のタイヤが走行すると、コンクリート内部の細孔空隙内の水に、非常に大きな水圧がかかり、この水圧によってコンクリートのモルタル分が破壊されるため、コンクリートが土砂状または砂利状になるというのが、現在有力とされている砂利化の推定メカニズムである。

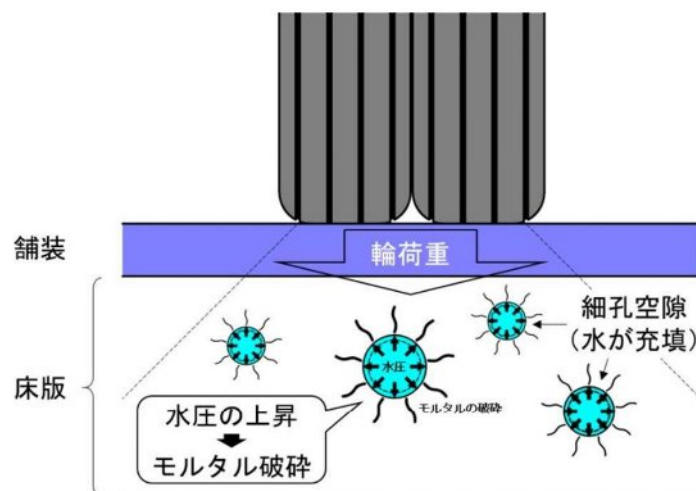
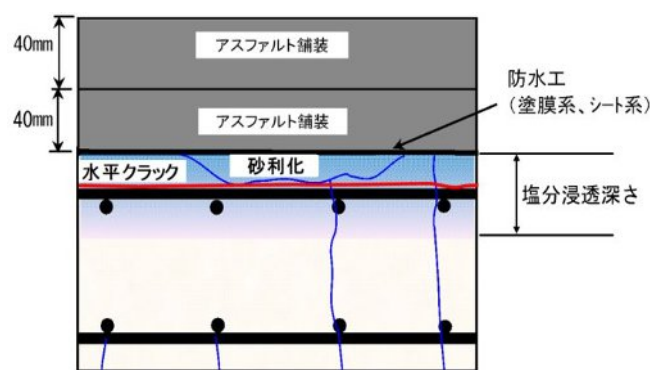


図-2.4.1.1 砂利化の推定メカニズム<sup>1)</sup>



図-2.4.1.2 に、凍結防止剤混じりの水が浸入した RC 床版に生じる関連する劣化を示した。劣化のため撤去した RC 床版にはほとんどの場合水平ひび割れが確認されている。凍結防止剤混じりの水が RC 床版上面に作用すると、コンクリート中に凍結防止剤の主成分である塩分(NaCl)が浸透していくほか、水平ひび割れを伝って凍結防止剤混じりの水が RC 床版内部に浸透していくこととなる。凍結防止剤の主成分である塩分は、塩害だけでなく、凍害のスケーリングを促進するほか、アルカリの外部供給により ASR も促進する。このため、RC 床版の水平ひび割れに囲まれたコンクリートは、凍結防止剤混じりの水の作用で、塩害、凍害、ASR が促進されるほか、走行車両の輪荷重の繰り返し作用による疲労の作用も受けることになる。このため、東北地方のように凍結防止剤を散布する地域の RC 床版は、他の地域に比べて厳しい環境に置かれていると言える。



(資料提供：日本大学 岩城 一郎教授)

図-2.4.1.2 凍結防止剤混じりの水が浸入した RC 床版に生じる関連する劣化

写真-2.4.1.2 に、走行軌跡上の連続した噴出物の事例を示した。これは走行軌跡に沿って、連続して砂利化が発生していることを示している。このような事象が確認される理由を図-2.4.1.3 に示した。砂利化は、主桁である鋼箱桁と縦桁で支持された床版支間中央付近で起きていることがわかる。この状態は橋軸方向に連続しているため、砂利化が走行軌跡上に連続して発生しているのである。



写真-2.4.1.2 走行軌跡上の連続した噴出物の事例

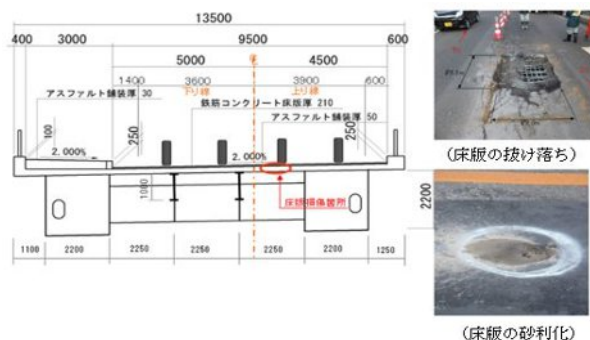


図-2.4.1.3 走行軌跡上に連続して噴出物が見られる理由

表-2.4.1.1に,東北地方における劣化形態別,交通量別のRC床版打替えまでの年数を示した。橋梁1は,日交通量約24,000台で,交通荷重による疲労により供用後45年でRC床版の打替えを行った橋梁である。しかし,橋梁2~5は,橋梁1よりも少ない交通量と短い年数で砂利化によりRC床版の打替えが行なわれていることがわかる。このように,交通荷重による疲労でRC床版の打替えを行った橋梁よりも短い期間で,砂利化によりRC床版の打替えが行なわれており,しかも,交通荷重による疲労を起こしたRC床版の1/2~1/3程度の交通量で砂利化が発生していることがわかる。

表-2.4.1.1 劣化形態別,交通量別のRC床版打替えまでの年数

橋梁名	劣化形態	交通量(台/日)	打替えまでの年数
橋梁1	交通荷重による疲労	約24,000台	45年
橋梁2	砂利化	約12,000台	36年
橋梁3	砂利化	約8,000台	42年
橋梁4	砂利化	約9,000台	35年
橋梁5	砂利化の疑い	約16,000台	36年

## (2) 施工に起因する不具合

ここでは、RC床版の砂利化を誘発または促進する施工の影響による不具合の事例を示す。

### 1) 防水機能の不具合

写真-2.4.1.3に、供用7年目でRC床版下面に漏水が確認された事例を示した。この橋梁の初回点検では漏水は確認されていなかった。しかし供用7年目の点検で漏水が確認され、供用12年目の点検では漏水の範囲が拡大していることがわかる。

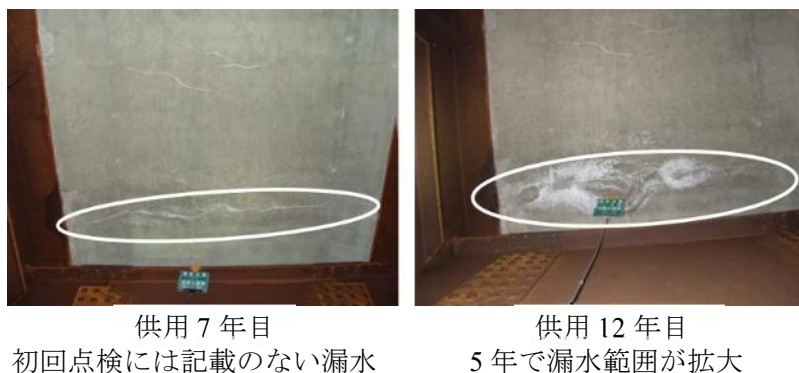
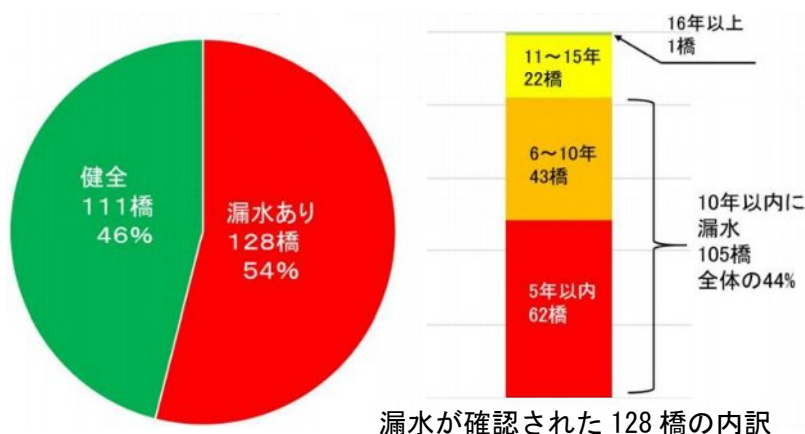


写真-2.4.1.3 供用7年目でRC床版下面に漏水が確認された事例

図-2.4.1.4に、点検結果による防水層の効果の調査結果を示した<sup>1)</sup>。この調査は、東北地方整備局が2004年から2016年までに建設したB活荷重対応239橋を対象に、床版の漏水に着目して防水層の効果を検査したものである。漏水が確認されたうち105橋が10年以内に漏水が確認されている。239橋のうち44%にあたる105橋は10年以内に漏水が発生する結果となっている。では、なぜこのような結果になったのか、防水工の施工の実態に着目して原因を推定してみたい。



注)2004年から2016年までに建設したB活荷重対応239橋を対象に床版の漏水に着目して調査を実施

図-2.4.1.4 点検結果による防水層の効果の調査結果<sup>1)</sup>

写真-2.4.1.4 に、床版の防水シート施工時に生じたヨレなどによる空気泡の事例を示した。このような空気泡はシート系防水（常温接着型）の施工では根絶するのが難しいため、この空気泡部分にカッターなどで穴をあけて、空気泡をつぶして加熱アスファルトで補修する方法が一般的に取られている。写真-2.4.1.5 に、防水シートに生じた空気泡をカッターで穴をあけた後、加熱アスファルトで補修した状況を示した。空気泡の数が多いと防水シートに穴をあける箇所も多くなり、適切に加熱アスファルトで補修されないと漏水の原因となる。



写真-2.4.1.4 床版の防水シート施工時に生じたヨレなどによる空気泡



写真-2.4.1.5 防水シートに生じた空気泡をカッターで穴をあけた後加熱アスファルトで補修した状況

写真-2.4.1.6 に、防水シートのオーバーラップ部分に生じた剥がれの状況を示した。防水シート表面に付着している珪砂が施工時に落ちて、防水シート裏面の接着面に珪砂が付着して接着力が落ちて、風などで剥がれが生じたものと思われる。このように剥がれが生じた場所も加熱アスファルトで補修することになるが、補修方法が適切ではない、あるいは実際には剥がれまでにはいたらなくても、接着力が落ちている箇所があると思われる、その箇所が補修されないと漏水の原因となる。



写真-2.4.1.6 防水シートのオーバーラップ部分に生じた剥がれ

写真-2.4.1.7 に、舗装作業時にこぼれた碎石を重機が踏んで防水シートに穴をあけたと思われる事例を示した。防水シート施工後、アスファルトによる舗装を行うが、アスファルト運搬時のこぼれた碎石、またはアスファルトフィニッシャーからこぼれた碎石をダンプ等の重機が踏むことで、防水シートに穴があく可能性が高い。この穴は通常放置されている場合が多いので、施工時にこぼれた碎石を除去する作業員を配置する等、防水機能の確保に向けた配慮が必要である。

図-2.4.1.5 に、シート系防水(常温接着型)における漏水可能性箇所を示した。今までに示した漏水の可能性のある箇所のほかにも、地覆、縁石、排水柵周りなどの端部の防水シートの施工が不十分で隙間があると、その箇所から漏水を起こす可能性がある。

このように、防水シートには施工段階で適切に施工または補修されないと、早い段階から漏水が発生し、RC床版の砂利化を誘発する直接の原因となるので注意が必要である。

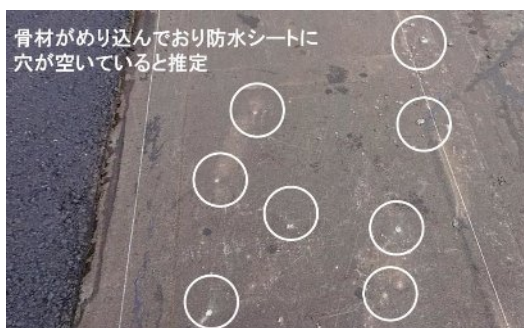


写真-2.4.1.7 舗装作業時にこぼれた碎石を重機が踏んで防水シートに穴をあけたと思われる事例

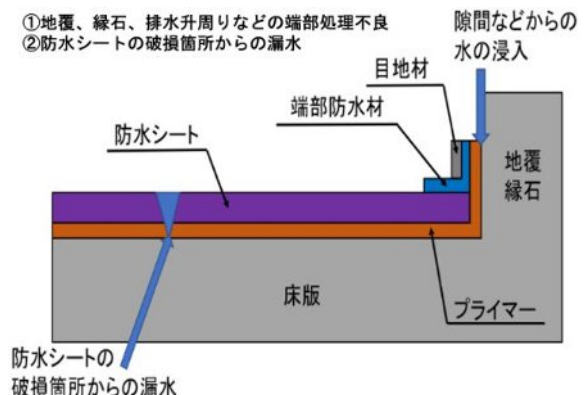


図-2.4.1.5 シート系防水(常温接着型)における漏水可能性箇所

## 2) RC 床版の施工の不具合

写真-2.4.1.8 に、床版の仕上げ不良の例を示した。左の写真は、作業員用に単管足場による通路を設置したが、仕上げ機械のトロウエルが単管足場の通路の下に入らず、その部分の仕上げがうまくいかなかったものと思われる。右の写真は、夏場の施工で生コンクリートの凝結が早く、仕上げ作業の途中でコンクリートが硬化してしまい、本来手コテで消すはずの仕上げ機械のトロウエルの跡が消せなくなったものと思われる。このような不具合が発生すると、床版表面が平坦ではないため、防水シートの接着性が低下し、かつ平坦に貼ることも難しいため、ヨレなどによる空気泡が多く発生し、防水機能の低下をまねきやすい。



写真-2.4.1.8 床版の仕上げ不良の例

写真-2.4.1.9 は、床版の平坦性不足による滞水の例である。橋梁の縦断勾配の低い方の排水柵に水が流れるはずであるが、排水柵の手前で滞水が発生している。このように床版の平坦性が低下し、床版の上に滞水するようになると、その部分に砂利化が発生しやすくなる。砂利化の防止のためには、RC 床版の品質確保、特に平坦性の確保が重要である。



写真-2.4.1.9 床版の平坦性不足による滞水の例

## 3) 橋面舗装の耐久性

RC 床版の砂利化の抑制のためには、防水層の寿命を長くする必要がある。しかし、写真-2.4.1.10 に示すように、橋面舗装の全面切削が行われた時点で、RC 床版表面も切削されるため防水層の更新が必要となる。また、橋面舗装の打替えは通常片側交互通行で行うため、規制時間の範囲内で交通開放する必要があるなど制約が多いため、切削後の床版の平坦性の確保や上下線の防水層のラップ部分の防水機能が不確実になるなど、RC 床版の砂利化抑制には不利な状態となることが多い。



写真-2.4.1.10 橋面舗装の全面切削の例

なるべく長期間にわたって橋面舗装の全面切削を防ぐためには、橋面舗装施工時に適切な転圧管理を行い、品質確保を図るとともに、維持管理においても橋面舗装の基層の打替えが不要となる時期に表層のみの打替えを行うなど、橋面舗装の基層の耐久性を確保するような、施工時点および維持管理時点での適切な対応が必要である。

### (3) 施工の不具合に起因する劣化の進行

写真－2.4.1.11 に、砂利化の進行状況を示した。2011年に砂利化が発生した箇所の舗装を部分的に補修したが、2016年には噴出物が確認され、2018年には噴出物の量や範囲が拡大している。このように砂利化は一旦発生すると、繰り返して発生するケースが多く、しかも劣化の速度が早いのが特徴である。このため、車両の走行軌跡上に連続して砂利化が発生するようになると、頻繁に RC 床版の部分打替えを繰り返すようになり、いずれは RC 床版の全面打替えが必要となる場合が少なくない。



写真－2.4.1.11 砂利化の進行の状況

写真－2.4.1.12 に、砂利化で RC 床版の緊急打替えを行った橋梁を示した。この橋は、写真－2.4.1.13 に示すように、2012年11月に砂利化した RC 床版の部分打替えを行ったが、半年後の2013年4月に補修箇所の RC 床版の抜け落ちが発生し、別の箇所でも噴出物が確認され、舗装を撤去してみると砂利化が起きており、このような砂利化の疑いのある箇所が車両の走行軌跡に沿って複数確認されたため、RC 床版の緊急打替えを行ったものである。橋長約 260m の RC 床版を PC 床版に取り換える工事を行ったが、約半年間の片側交互通行による渋滞と、多額の打替え費用が必要となった。



写真－2.4.1.12 砂利化で RC 床版の緊急打換えをした橋梁



写真－2.4.1.13 砂利化の発生状況

写真-2.4.1.14 に、RC 床版の水平ひび割れの上下における劣化状況の違いを示した。水平ひび割れよりも上のコンクリートはかなり劣化しているのに、水平ひび割れよりも下のコンクリートは比較的健全であることがわかる。これは、凍結防止剤混じりの水の影響を受ける水平ひび割れよりも上のコンクリートが、凍害、塩害、ASR や車両の走行による繰り返し荷重による疲労の複合劣化を受けているためと思われる。



資料提供：日本大学 岩城一郎教授

写真-2.4.1.14 RC 床版の水平ひび割れの上下における劣化状況の違い

写真-2.4.1.15 に、凍害を受けた床版の劣化の進行状況を示した。床版上面で凍害が生じると、①のように層状のひび割れが発生し、それが進行すると②のように層状のひび割れが内部に進展し、最終的には③のように床版上面の砂利化に至っている。このように、RC 床版に凍害が発生すると舗装の下で劣化が進行し、あるとき舗装の変状という形で表面化するが、その時には RC 床版のコンクリートの劣化もかなり進んでいる恐れがある。

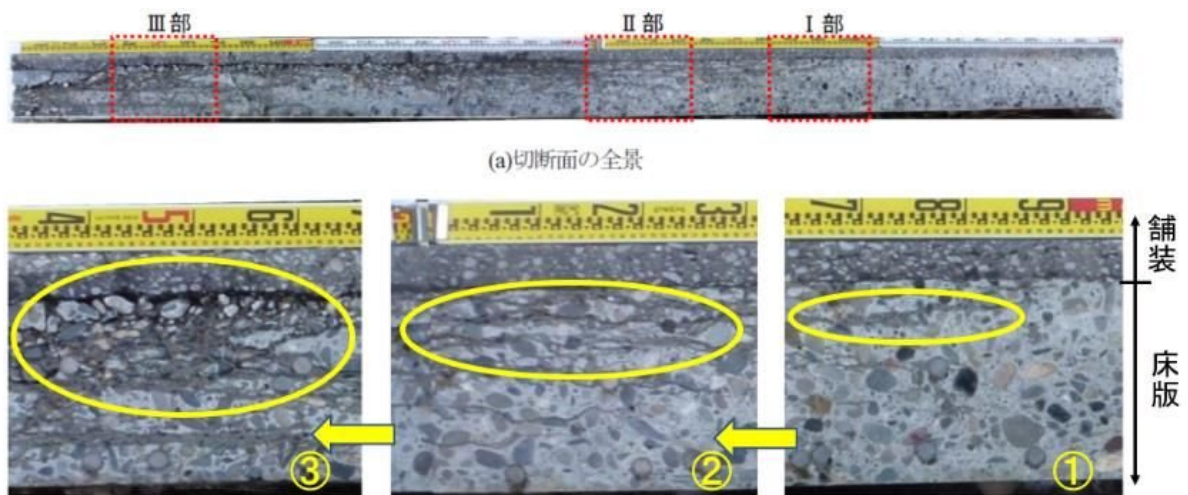


写真-2.4.1.15 凍害を受けた床版の劣化の進行状況



写真－2.4.1.16 に、砂利化を起こした RC 床版の鉄筋の腐食状況を示した。カーブの内側の車線で中央線から近い方の鉄筋の腐食状況やコンクリートの劣化の程度が大きい事がわかる。これは、中央線には舗装の施工ジョイントがあり、この部分から凍結防止剤混じりの水が浸入し、カーブの内側の横断勾配の低い方へ流れたため、カーブの内側の車線で中央線から近い方が、塩害による鉄筋の腐食状況が激しく、コンクリートの劣化の程度も大きくなったものと思われる。

写真－2.4.1.17 に、ASR を起こした RC 床版の状況を示した。この ASR を起こした床版は、車輪の走行軌跡の箇所だけでなく、RC 床版全面のコンクリートが脆弱化し、鉄筋が露出している箇所も見られる。ASR を起こした RC 床版は、鉄筋による拘束が少ない上下方向に膨張していることがわかる。これは蛍光塗料含浸法によってコンクリートコアに水平方向のひび割れが多数発生していることでもわかる。



写真－2.4.16 砂利化を起こした RC 床版の鉄筋の腐食状況



写真－2.4.17 ASR を起こした RC 床版の状況

このように砂利化は、一旦発生すると進行が早く、しかも補修しても繰り返し発生し、凍結防止剤の影響で、凍害、塩害や ASR との複合劣化が進行し、RC 床版の打替えが必要になるほど劣化が進行すると、片側交互通行による工事渋滞や、多額の打替え費用が必要になるなど、社会的にも経済的にもダメージの大きい劣化である。

#### (4) 材料劣化を回避するための対応状況

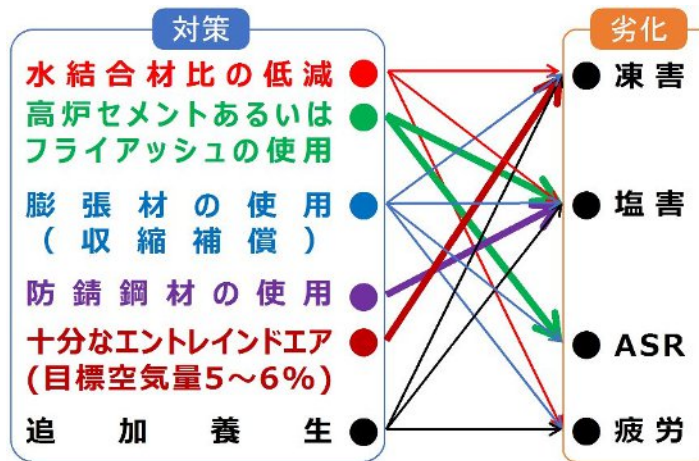
このような劣化の実態や補修上の問題を踏まえ、砂利化による床版の緊急打換えを避けるため、凍結防止剤散布下における RC 床版は、

- ①床版本体の品質を確保し、凍害、塩害、ASR を抑制し、
- ②防水層の丁寧な施工による防水性を確保し、
- ③橋面舗装の耐久性を向上させて、防水層の寿命を伸ばす

など、床版、防水層、橋面舗装の三位一体で長寿命化が図れるように設計、施工することが重要である。以下に、RC 床版の砂利化を回避するための対応について記載する。

### 1) RC 床版本体の耐久設計と品質確保

図-2.4.1.6に、RC床版の耐久設計に用いられる複合防御網を示した。これは凍結防止剤散布下のRC床版本体は、凍結防止剤の主成分である塩分による、凍害、塩害、ASRや、車両の走行の繰り返しによる疲労の影響による複合劣化を起こす恐れがあることから、一つの劣化に対して一つの対策で対応するのではなく、一つの劣化に対して複数の対策が効果を上げるように、対策の種類を選定して、RC床版本体の複合劣化を複合防御網で抑制しようとするものである。このRC床版の耐久性設計に用いられる複合防御網の考え方は、「東北地方におけるRC床版の耐久性確保の手引き(案) 令和5年3月 東北地方整備局<sup>1)</sup>」に採用されている。



凍結防止剤の散布量が 20ton/km 以上の場合は防錆鋼材を採用

図-2.4.1.6 RC床版の耐久設計に用いられる複合防御網<sup>1)</sup>

図-2.4.1.7に、このようなハイスペックの対策を行った場合のRC床版のコスト比較<sup>1)</sup>を示した。従来のRC床版のコストを1.00とした時、複合防御網の考え方を採用し、フライアッシュコンクリートを用い、防錆鉄筋を使用したFA床版のコストは1.26と大きくコストアップする。しかし、砂利化により供用後40年程度で打替えとなり、PC床版に交換したコストは旧床版の撤去費を含めて4.11となっている。このため、RC床版の本体を複合防御網の考え方で整備して初期コストが従来の1.26倍になったとしても、従来仕様の床版が40年程度で打替えになり、その際の費用が4.11倍も必要となるため、十分費用対効果が得られる対策であることがわかる。

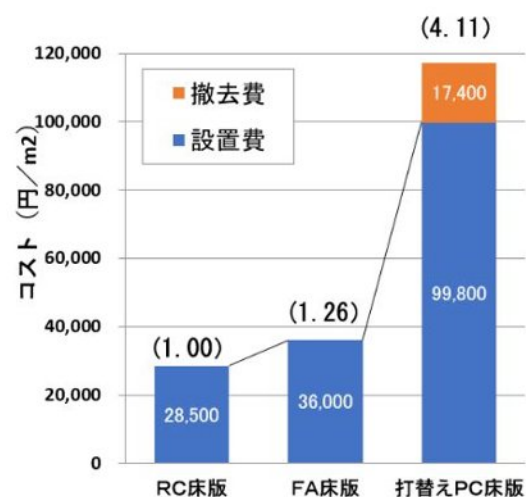


図-2.4.1.7 RC床版のコスト比較<sup>1)</sup>

表-2.4.1.2に、RC床版用施工状況把握チェックシートの抜粋を示した。これは、RC床版の生コンクリートの施工時に、施工の基本事項の遵守を目指す施工計画の立案や、打設日の施工の基本事項の遵守の程度を受発注者双方で把握し、施工による不具合を抑制するために作成されたものである<sup>1)</sup>。

表-2.4.1.2 RC床版用施工状況把握チェックシート(抜粋)<sup>1)</sup>

施工段階	チェック項目
準備	型枠面は湿らせているか
"	打設計画は作業員に周知されているか
運搬	練り混ぜてから打ち終わるまでの時間は適切であるか
打込み	ポンプや配管内の潤滑性を確保するため、先送りモルタルの圧送などの処置を施しているか
"	打込み時のコンクリート温度は出来るだけ低くし5~20℃としているか
"	左官工と打合せて、適切な時期に左官仕上げがなされているか
締固め	バイブレータを鉛直に挿入し、挿入間隔は50cm以下となるように管理されているか
"	バイブレータの振動時間は試験施工で決定した振動時間とし、速やかに締固めしているか
養生	湿潤状態を保つ期間は適切であるか

このRC床版用の施工状況把握チェックシートを用いて、品質確保に配慮した施工事例を写真-2.4.1.18に示した。バイブレータの挿入間隔を50cm毎とするため、ロープに50cm間隔で桃色のリボンを結び付け、その位置を目印に作業員がバイブレータをかけている。また、バイブレータの振動時間を8秒とするため、振動時間を管理する人を施工現場において、その人の合図でバイブレータの挿入と引抜きを行っている。一連の作業が終わると、桃色の目印がついたロープを50cm移動させ、また同じ作業を繰り返すことによって、RC床版の品質確保を目指している。



写真-2.4.1.18 RC床版用の施工状況把握チェックシートを用いた品質確保に配慮した施工事例

## 2) 防水層の不具合の抑制

東北地方整備局では、防水層を、空気泡が出やすいシート系防水（常温接着型）から、比較的空気泡が出にくいシート系防水（流し貼り型）に変更した上で、表-2.4.1.3に示す橋面防水工（流し貼り型）の施工上の留意点を活用して、防水層の丁寧な施工による不具合の抑制を目指している<sup>1)</sup>。

表-2.4.1.3 橋面防水工（シート系防水流し貼り型）の施工上の留意点<sup>1)</sup>

工種	番号	チェック項目	確認
下地処理	1	ゴミや埃をコンプレッサー等を用いてきれいに掃除しているか	
	2	床版の水分量は10%以下であることを確認しているか(目標は5%以下が望ましい)	
	3	残存アスは除去されているか	
	4	レイトンスなどの脆弱部は除去されているか	
	5	目視確認できる被膜養生材は除去されているか	
	6	断面補修材により補修された箇所がある場合はジョイント部にプライマーを二度塗りしているか	
	7	(キメ深さが1mm以下であるか)	
	8	プライマーの塗布量は適切であるか	
	9	地覆等の端部垂直面や排水樹周りのプライマーが薄塗りとならないようにしているか	
	10	床版ひび割れ箇所は、事前にケイ酸塩系含浸材で補修しているか(無害なひび割れ)	
	11	プライマーは完全に乾燥しているか	
	12	床版ひび割れ箇所は、プライマーが二度塗りとなるように施工しているか	
防水シート	1	防水シートは勾配の低い方から敷設しているか	
	2	防水シートは定められた重ね幅を取っているか(10cm以上)	
	3	防水シートの横断重ね位置を1.0m以上ずらしているか	
	4	防水シートは施工線に沿って貼れるかを確認し、巻き戻してから貼り付けているか	
	5	貼り付け用アスファルトの温度は適切か(特に冬季)	
	6	貼付け用アスファルトを入れた缶などをシート上に置くなどしてシートを破損(溶解)させていないか。	
	7	シート貼付直後、シート上を歩いていないか(足跡によりシートの寄れ等が生じていないか)	
	8	シートを貼り付ける際、ロール芯や鉄棒等を用いて均等な力で押せているか。	
	9	シート貼付け時に、シート端部から貼付け用アスファルトがはみ出しているか(シート全面にアスファルトが回っているか)	
	10	防水シートからはみ出たアスファルトは刷毛で均一に均しているか(はみ出た量は適量か)	
	11	貼り付け用アスファルトは均一な量(厚さ)で流し込めているか	
	12	空気泡処理箇所を適切に補修しているか	
端部処理	1	端部処理剤(シルバーメッシュテープ)は端部の直角面に沿って敷設されているか	
	2	貼り付け用アスファルトは、垂直面が薄塗りとならないように施工しているか	
	3	導水パイプは端部に敷設し、端末を排水樹に挿入しているか	
舗設準備	1	伸縮装置や後打ちコンクリートを適切に保護しているか	
	2	防水シート上を施工機械が移動する時、こぼれた合材や異物を清掃しているか	
	3	成型目地用のプライマーは隙間なく塗布されているか	
	4	プライマーは完全に乾燥しているか	
	5	表層施工前に貼り付ける成型目地材は剥がれたり、隙間無く貼られているか	
	6	成型目地材の継ぎ目は重ねて貼っているか。また、縦断勾配の高い方が上になるように重ねて貼っているか。	
	7	基層の定規型枠は防水シートを傷付けないよう釘固定はしていないか	
	8	使用するアスファルトフィニッシャのタイヤにアスコン等付着していないか	
舗装端部の転圧	1	基層合材の到着、敷き均し、転圧の温度管理は適切か	
	2	表層合材の到着、敷き均し、転圧の温度管理は適切か	
	3	端部への合材の敷き均しは適切に行われているか	
	4	端部の転圧は適切に行われているか(必要に応じてプレートを使用する)	
	5	合材と成型目地はしっかり一体化しているか	

※ 表中の\_の項目は「流し貼り型」追加項目

### 3) 橋面舗装の長寿命化

図-2.4.1.8に、東北地方整備局が実施する、耐久性を確保する RC 床版の工事で採用されている、橋面舗装の長寿命化策を示した<sup>1)</sup>。これは橋面舗装の劣化による全面切削によって、防水層の更新が必要となることを出来るだけ回避するために、従来よりも基層の耐久性が上がるようにアスファルト合材の種類を変更し、表層は従来よりも補修がしやすいアスファルト合材に変更したものとなっている。このようにすると、橋面舗装の長寿命化を図り、同時に防水層の更新頻度を下げて、橋面舗装の全面切削時に生じる防水層更新時の不具合の発生を出来るだけ回避しようとするものである。

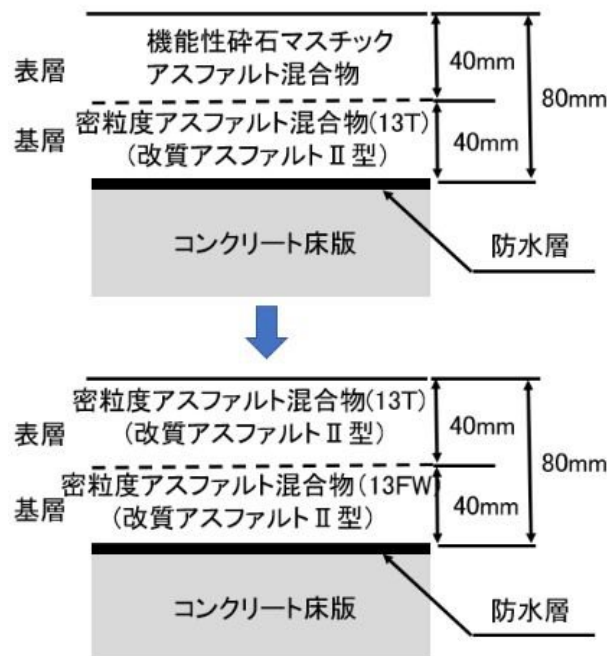


図-2.4.1.8 橋面舗装の長寿命化策<sup>1)</sup>

#### 参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局道路部：東北地方における RC 床版の耐久性確保の手引き(案) 2023年改訂版，2023

[担当 佐藤 和徳]

## 2. 4. 2 トンネル覆工

### (1) 概要

トンネル覆工の材料劣化の要因は、覆工コンクリートの施工に起因する不具合が材料劣化に進展する要因の大部分をしめているのが実態である。施工目地部の目地材の設置不良、締固め不足、ブリーディング水やノロの排出不足により発生するうきやひび割れが、はく離・はく落に進展する事例や打重ね不良により発生する打重ね線がひび割れに進展する事例が数多く見受けられる。このため、施工時に品質確保の取り組みを確実に行って施工に起因する不具合を無くし、コンクリート本来の品質・耐久性を確保することが、材料劣化を抑制するうえで先決である。

東北地方の覆工コンクリートは、特に坑口から約100mの区間で積雪・寒冷の立地条件・気象条件から凍結防止剤散布による塩害や凍害という材料劣化の発生リスクが高い。施工に起因する不具合が存在する場合は、劣化進行が早まる原因にもなるため、他の温暖な地域に比べ、品質確保の取り組みの重要性が高いことを認識する必要がある。

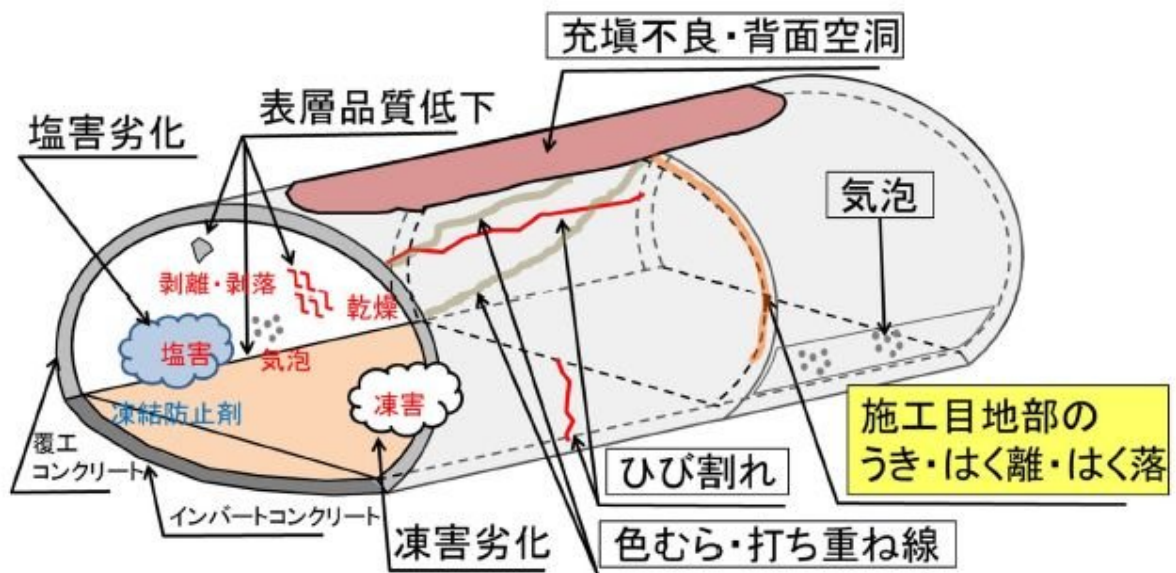


図-2.4.2.1 覆工コンクリートの劣化しやすい部位と不具合の発生部位

(コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)(トンネル覆工コンクリート編), 令和5年3月, 東北地方整備局より引用)

施工に起因する不具合が材料劣化に進展した事例を写真-2.4.2.1と2.4.2.2に示す。



写真-2.4.2.1 施工目地不良がはく離・はく落に進展した事例



写真-2.4.2.2 打重ね線がひび割れに進展した事例

## (2) 凍害

トンネル坑内の温度は、トンネルの延長、標高、方向等により一概には言えないが、図-2.4.2.2に示すとおり、坑口から約100mの区間で外気温の影響が大きいとの報告がある。

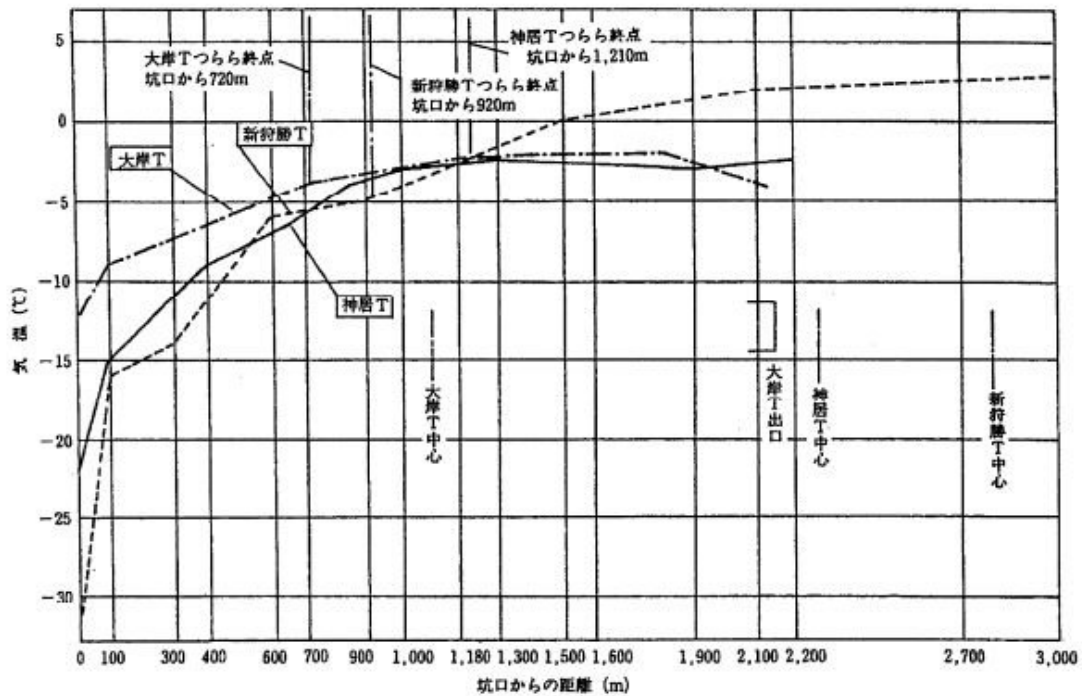


図-2.4.2.2 トンネル坑内温度の分布  
(北海道開発局道路設計要領 第4集 トンネルより引用)

坑口付近の覆工コンクリートの施工目地部に凍害が発生した事例を写真-2.4.2.3に示す。東北地方のトンネルは、坑口から100mまでの区間の施工目地部や漏水を伴う箇所凍害が発生するリスクが高いため、留意が必要である。



写真-2.4.2.3 凍害が発生した事例 (施工目地部付近の脆弱部)



### (3) 塩害

東北地方は、福島県の一部を除き、ほとんどの地域が積雪寒冷地であり、凍結防止剤の散布が行われている。トンネル坑内への散布は行われませんが、坑口付近に散布された凍結防止材がタイヤにより内部まで運搬、巻き上げられることにより側壁部に付着し、塩害を発生させている。また、凍結防止剤は、凍害も促進させる要因となる。トンネル坑内の付着塩分量の分布を図-2.4.2.3に示す。特に坑口から約100mまでの区間で付着塩分量が高く、坑内まで影響していることが解る。

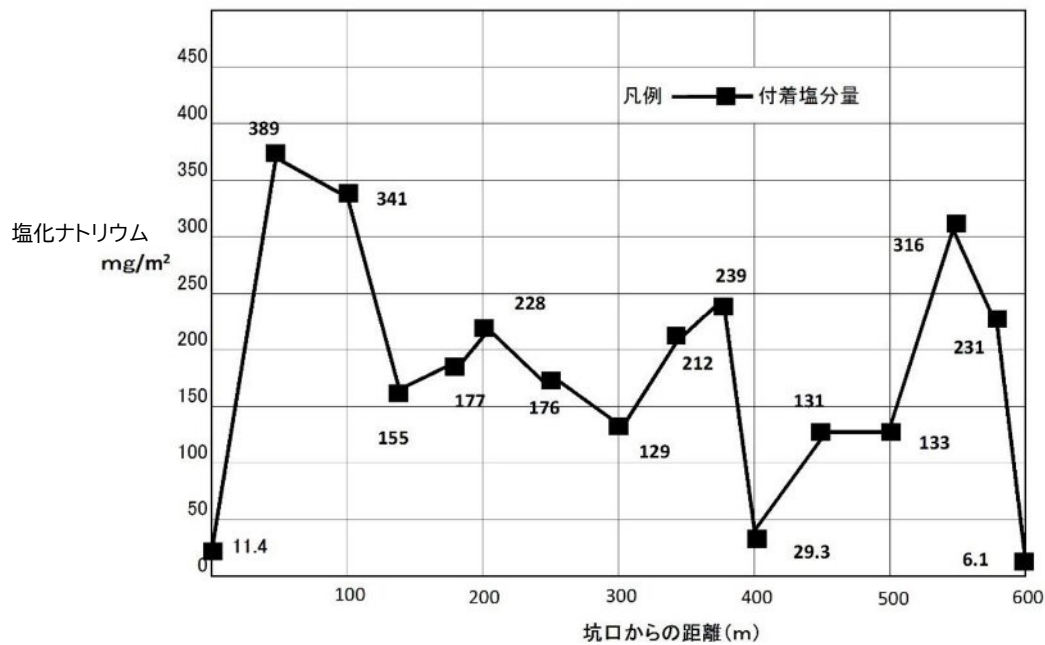


図-2.4.2.3 トンネル坑内の付着塩分量の分布  
(東北技術事務所より提供)

坑口付近の覆工コンクリートの施工目地部に塩害が発生した事例を写真-2.4.2.4に示す。東北地方のトンネルでは、坑口から100mまでの区間で環境が厳しく、塩害・凍害の複合劣化が発生するリスクが高いため、留意が必要である。



写真－2.4.2.4 塩害・凍害の複合劣化が発生した事例（施工目地部）

〔担当 三井 功如〕

## 2. 5 施工の影響による不具合の事例

### 2. 5. 1 PC 上部構造

#### (1) プレテン PC 床版橋 (中空)

図-2.5.1.1 に、プレテン PC 床版橋(中空)の橋梁断面の例を示した。プレテン PC 床版橋(中空)の桁断面は四角く、内部に中空部分をつくって軽量化を図っている。また、桁は工場で作られる時点でプレストレスを導入するプレテンション方式である。この桁を架橋地点まで運搬し、桁架設後に現場にて間詰めコンクリートを打設して、横締め PC 鋼材で一体化して橋梁とする形式である。この形式の橋に、施工の影響により、どのような不具合が発生する可能性があるか以下に記載する。

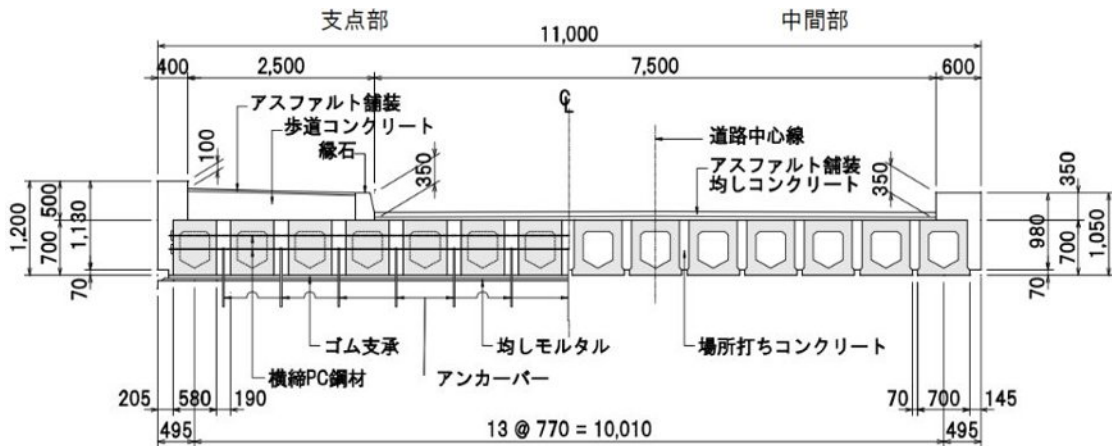


図-2.5.1.1 プレテン PC 床版橋(中空)の橋梁断面図の例

#### 1) 桁製作時のコンクリートの充填不良

プレテン PC 床版橋(中空)の桁断面を図-2.5.1.2 に示した。この桁断面には中空部分があるため、桁の上下フランジやウェブが狭小断面となっており、その狭小断面に鉄筋や PC 鋼より線が配置されているため、特に下フランジでコンクリートの充填不良が発生しやすい。

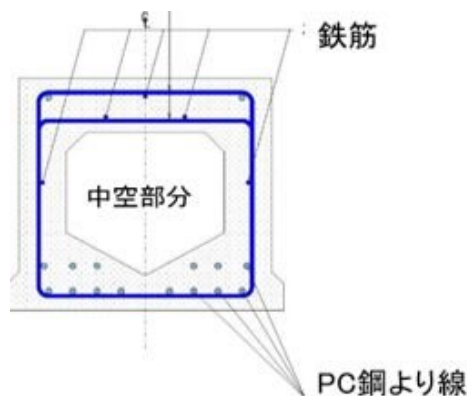


図-2.5.1.2 主桁断面

写真-2.5.1.1に、桁製作時に下フランジにコンクリートの充填不良が生じた桁の橋梁点検時の写真を示した。下フランジにコンクリートの充填不良がある桁は、点検ではまずうきが確認され、その後かぶりコンクリートのはく落に進展する場合がある。充填不良箇所に凍結防止剤混じりの漏水の影響が重なると、中空部分や充填不良箇所への滞水の発生や、凍結防止剤の影響で内部鋼材が腐食する場合があり、健全な桁よりも早期に劣化する場合がある。

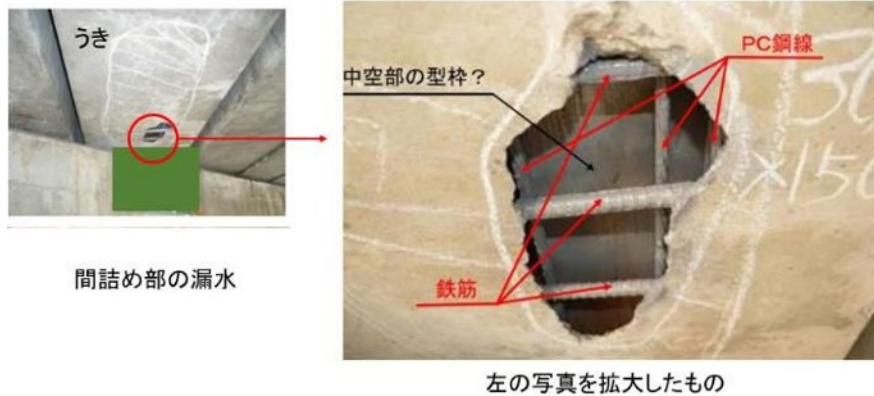


写真-2.5.1.1 桁製作時にコンクリートの充填不良が生じた桁の例

## 2) 間詰め部からの漏水

間詰めコンクリートに締固め不足や充填不良があると、間詰め部から漏水が発生する。写真-2.5.1.2に、間詰め部からの錆汁混じりの漏水の状況を示した。東北地方の道路橋の場合、間詰め部からの漏水には凍結防止剤が混じっているため、凍害やASRの促進、内部鋼材の腐食による塩害へと劣化が進展しやすい。写真-2.5.1.3に、間詰め部からの漏水により、凍害が進行してコンクリートのはく離に至った事例を示した。



写真 2.5.1.2 間詰め部からの漏水の例



写真 2.5.1.3 間詰め部の漏水の影響で凍害によるはく離が発生した例

### 3) 中空部分への滞水

現在は桁の中空部分には発泡スチロールの充実断面の型枠が使用されており、中空部分に滞水することはないが、かつては中空部分を形成するために木製型枠が使用されていたため、この中空部分に滞水が生じる可能性がある。図-2.5.1.3に、間詰め部からの漏水がウェブに浸透し、中空部分への滞水を引き起こす可能性を示した。写真-2.5.1.4に、中空部分に凍結防止剤混じりの水が滞水し、桁内部から塩害を起こし、下フランジコンクリートの抜け落ちや PC 鋼より線が破断し架替に至った事例を示した。このように、中空部分への滞水は、橋梁の架替に至るような重大な劣化に進行する可能性がある。しかも不可視部分で劣化が進行するため、劣化が顕在化した場合には、相当劣化が進行している可能性がある。このため、下フランジに漏水が見られた場合には、中空部分への滞水を疑う必要がある。

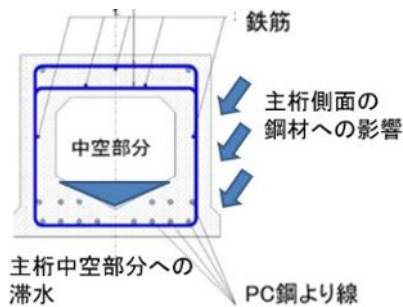
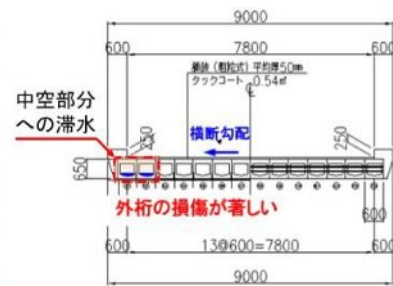


図-2.5.1.3 間詰め部の漏水の影響



写真-2.5.1.4 桁内部の滞水により塩害を起こした例



### 4) 横桁定着部のうき、漏水、はく離

写真-2.5.1.5に、横桁定着部のうきの事例を示した。横桁は桁架設後に現場で施工するため、締固め不足や充填不良があると、うきが発生する可能性がある。これに加えて、伸縮装置からの漏水があると、凍結防止剤混じりの漏水の影響で、内部鋼材が腐食しコンクリートのはく離が発生する可能性がある。また、横桁定着部から錆汁混じりの漏水が確認されると、横締め PC 鋼棒の腐食を疑う必要がある。横締め PC 鋼棒の腐食が進行すると、いずれは破断に至って PC 鋼棒の抜け出しによる第三者被害の発生などの可能性があるので注意が必要である。



写真-2.5.1.5 横桁定着部のうきの例

[担当 佐藤 和徳]

## (2) ポストテンション方式 PCT 桁橋

ポストテンション方式 PCT 桁橋は、ポストテンション方式によってプレストレスを与えられた T 桁を並列して架設し、主桁と主桁の間の床版、および横桁を現場でコンクリートを打込み、横方向のプレストレスを与えて一体化させる形式である(図-2.5.1.4)。ここでは、この形式で施工の影響によって発生する可能性がある不具合について紹介する。

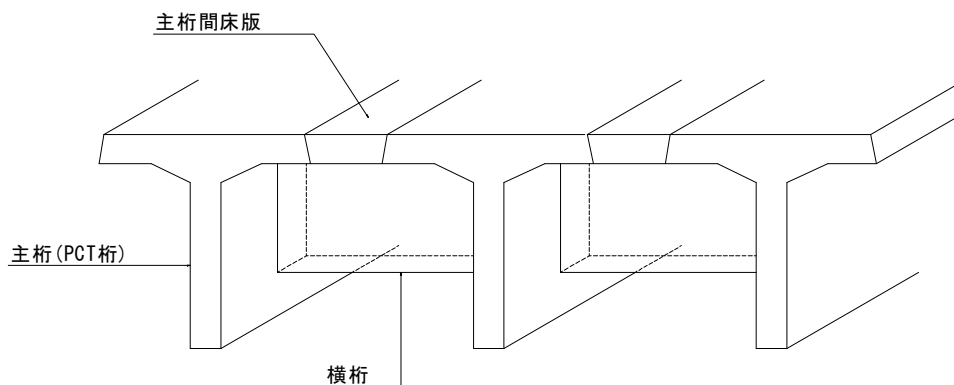


図-2.5.1.4 ポストテンション方式 PCT 桁の概要

### 1) 桁製作時のコンクリートの充填不良

ポストテンション方式 PCT 桁橋の桁断面の例を図-2.5.1.5 に示す。この形式では、主桁にプレストレスを導入するための鋼材およびシースが配置されるため、バイブレータによる締固めがしにくく、特に主桁下面での充填不良が生じやすい。写真-2.5.1.6 はこの形式で主桁下面に充填不良による豆板が生じた事例である。このような充填不良があると、橋軸方向にひび割れが生じ、これが水みちとなって漏水や遊離石灰の析出を伴うこともあるため注意が必要である。

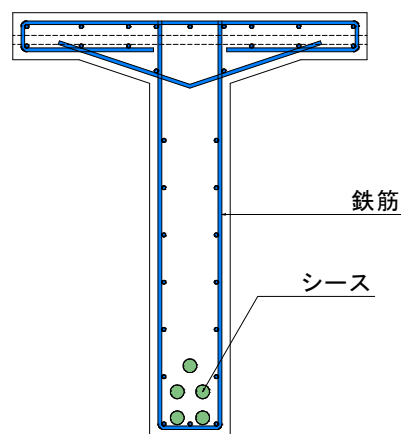


図-2.5.1.5 主桁断面の例



写真-2.5.1.6 主桁下面の充填不良の事例

## 2) 間詰コンクリートからの漏水

この形式では、主桁の上フランジ間の床版間詰コンクリートは、現場で打込みが行われるため、締固め不足や充填不良があると、主桁上フランジと間詰床版の境界部から漏水や遊離石灰の析出が生じる可能性がある(写真-2.5.1.7)。橋面の防水工が十分でなく、床版の横締に鋼製のシーブが使われている場合は、路面からの水や凍結防止剤に含まれる塩分によって横締め鋼材の腐食が生じ、床版の耐荷性にも影響する劣化に進行する。シーブ内部のグラウトが不十分な場合は、さらに横締め鋼材の腐食が生じやすい環境となる。



写真-2.5.1.7 間詰コンクリートの不具合の事例

床版間詰部は、これらの劣化の進行により抜け落ちが生じることもある。図-2.5.1.6に示すように、昭和44年以降の標準設計が使われる以前の橋では、主桁と間詰部の定着鉄筋が配置されておらず、また形状も逆台形となっていないため、劣化の進行により抜け落ちが生じやすい構造であるといえる。

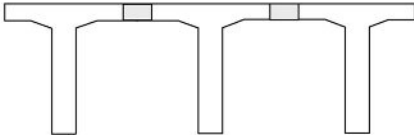
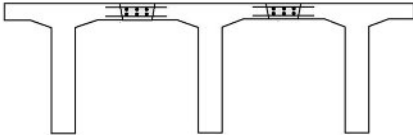
昭和43年以前	昭和44年以降 (建設省標準設計：昭和44年)
	
・ 間詰部の形状は長方形	・ 間詰部の形状は台形 ・ 間詰部の定着鉄筋を配置 ※間詰部の幅が30cm以下の場合、現在でも定着鉄筋は配置されていない

図-2.5.1.6 間詰コンクリートの構造の変遷

### 3) PC鋼材に沿ったひび割れ

ポストテンション方式のPC部材では、PC鋼材の腐食防止と部材同士の付着を生じさせるため、PC鋼材とシースの間に、セメント系の材料によるグラウト工を行う。グラウト作業はPC鋼材とシース管の狭い隙間を、片側からPC鋼材の全延長にわたって注入しなければならないが、またPC鋼材が曲線に配置されていることもあり、充填不良が生じやすい作業であるといえる。

シース内部に充填不良(写真-2.5.1.8)が存在すると、写真-2.5.1.9に示すようにシース内部に水が浸入することでPC鋼材の腐食が生じ、部材外面に漏水や錆汁が発生する場合もある。PC鋼材の腐食が顕著な場合は、所定のプレストレス力が期待できないため、耐荷性にも影響することになる。



写真-2.5.1.8 シース内部のグラウトの充填不良の事例



写真-2.5.1.9 PC鋼材に沿ったひび割れの事例

図-2.5.1.7に示すように、昭和54年以前に設計されたポストテンション方式のPCT桁では、主桁の橋軸方向のPC鋼材の定着部が上縁定着方式となっており、橋面防水工や定着部の間詰コンクリートに不具合があると、路面から水や凍結防止剤に含まれる塩分が浸透しやすい。

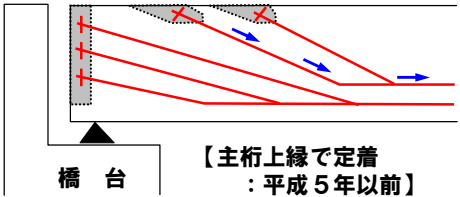
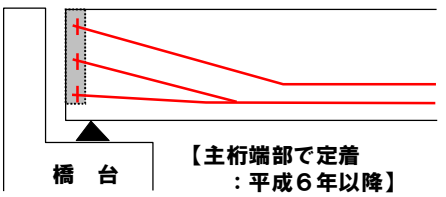
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 昭和54年以前</li> <li>・ 昭和55年～平成5年：支間長27m以下の橋梁</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 昭和55年～平成5年：支間長28m以上の橋梁</li> <li>・ 平成6年以降の橋梁</li> </ul>
 <p>橋台 【主桁上縁で定着：平成5年以前】</p>	 <p>橋台 【主桁端部で定着：平成6年以降】</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主ケーブルを桁端と上縁に分散して定着</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主ケーブルをすべて桁端に定着</li> </ul>

図-2.5.1.7 PC鋼材の定着方式の変遷



#### 4) 横締め定着部のコンクリートの浮き

横桁定着部のコンクリートは、横桁の鋼材の緊張作業後に施工を行うため、主桁コンクリートとの付着が十分でない場合は、隙間が生じることによって浮きが生じる事例が多い(写真-2.5.1.10)。この隙間に水分や塩化物が浸入すると、内部の横締め定着部鋼材の腐食により錆汁を伴うこともある。さらに腐食が進行した場合は、鋼材の腐食膨張によって定着部コンクリートの剥離に至り、場合によっては第三者被害が生じる可能性もある。



写真-2.5.1.10 横締め定着部の不具合の事例

また、横桁は現場施工のコンクリートであるため、充填不良や主桁との付着不良によって隙間が生じると、水分や塩分の浸透によってこれらの劣化因子がPC鋼材にまで到達し、腐食による破断が生じる可能性もある。横締めPC鋼材には緊張力が作用しているため、破断によって横桁定着部コンクリートの破壊を伴うPC鋼材の飛び出しが生じる場合もある(写真-2.5.1.11)ため注意が必要である。



写真-2.5.1.11 PC鋼材が突出した事例

[担当 飯土井 剛]

## 2.5.2 橋梁下部構造（橋台および橋脚）

橋台、橋脚などの下部構造に一般的に多く見られる、施工に起因する不具合は、打継ぎ、打重ね（コールドジョイントや締固め不足、不適切な巻出し厚）、砂すじ、表面気泡、温度ひび割れなどが挙げられる。なかでも、コンクリートの経年劣化を早め構造耐力を低下させる打継ぎ、打重ね、温度ひび割れは発生させないよう施工計画段階から対策を考え実装できるよう、しっかり準備をする必要がある。

初期欠陥の変状についての定義、発生要因、発生しやすい部位や条件は、「2.2 施工に起因する不具合」で記述しているため、この章では、施工調査 WG で東北地方の実構造物を調査した中から施工に起因する不具合が経年劣化によって劣化進行した事例、および施工に起因する不具合を抑制するための対策について事例を含めて紹介する。

### (1) 施工に起因する不具合による劣化の進行

ここでは、施工調査 WG で東北地方の実構造物を調査した際に、1) 打継ぎの不具合、2) 打重ねの不具合、3) 砂すじ、4) 表面気泡、5) 温度ひび割れなど、施工に起因する不具合が経年劣化によって劣化進行している事例を示す。

#### 1) 打継ぎの不具合

打継ぎの不具合事例として、A 橋を写真-2.5.2.1～写真-2.5.2.3、B 橋を写真-2.5.2.4 と写真-2.5.2.5 に示す。A 橋は、1997 年に完成しており建設後 26 年が経過している。また、B 橋は 1978 年に完成しており建設後 45 年が経過している。この A 橋の A2 逆 T 式橋台では、打継ぎ箇所の一体化不良によって背面盛土から水が浸入し、コンクリート中の水酸化カルシウムと反応しエフロッセンスが析出した事例である。さらに、雨が降るたびに背面盛土から水が浸入してくるため、エフロッセンスがこぶ状になっている。また、B 橋の P2 壁式橋脚においては、水の浸入はないものの凍害環境下であるため打継ぎ箇所の脆弱部分において顕著に剥離・剥落が経年劣化した事例である。



写真-2.5.2.1 打継ぎの不具合の A1 逆 T 式橋台



写真-2.5.2.2 打継ぎ箇所からエフロレッセンスの析出



写真-2.5.2.3 打継ぎ箇所からエフロレッセンスの析出（接写）



写真-2.5.2.4 打継ぎの不具合のP2 壁式橋脚



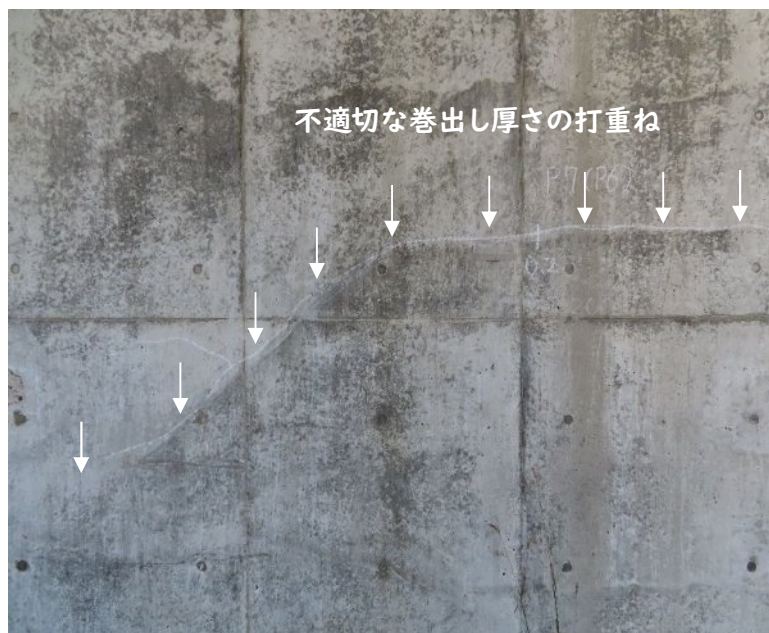
写真-2.5.2.5 打継ぎ箇所のひび割れ，剥離・剥落

## 2) 打重ねの不具合

打重ねの不具合事例として、C橋を写真-2.5.2.6~写真-2.5.2.7、D橋を写真-2.5.2.8~写真-2.5.2.11に示す。C橋は、1995年に完成しており建設後28年が経過している。D橋は、2015年に完成しており建設後8年が経過している。このC橋のP7張出橋脚およびD橋のP2柱式橋脚（中空断面）では、不適切な巻出し厚さにより下層コンクリートへのパイプレータの挿入不足や、ブリーディング水の処理が不十分だったことに起因した一体化不良が生じている。そのため、経年によって打重ね線に沿って、乾燥収縮によるひび割れが発生した事例である。



写真-2.5.2.6 打重ねの不具合のP7張出橋脚



写-2.5.2.7 不適切な打重ね

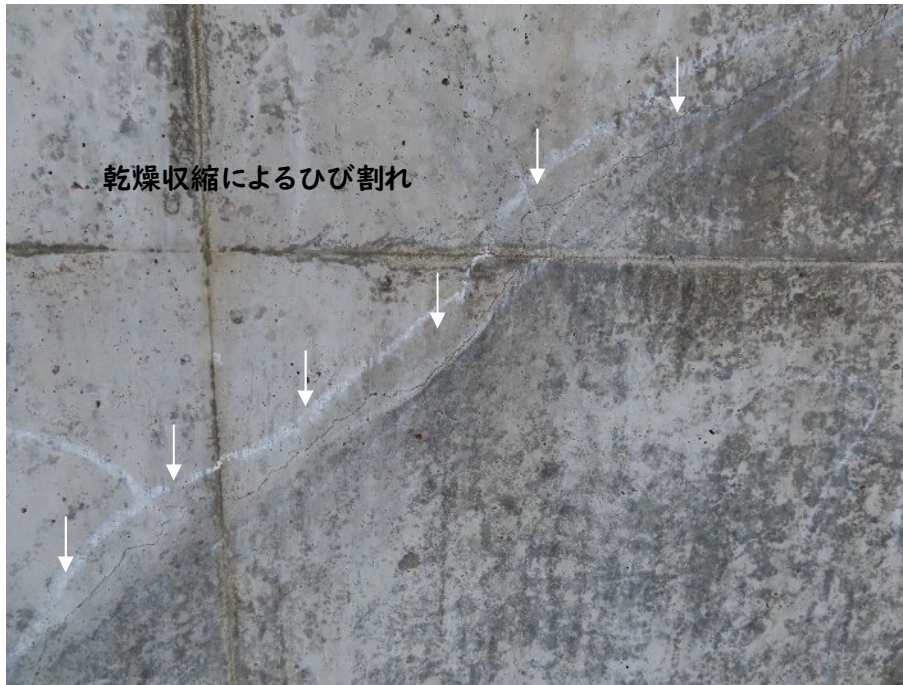


写真-2.5.2.8 打重ね箇所のひび割れ

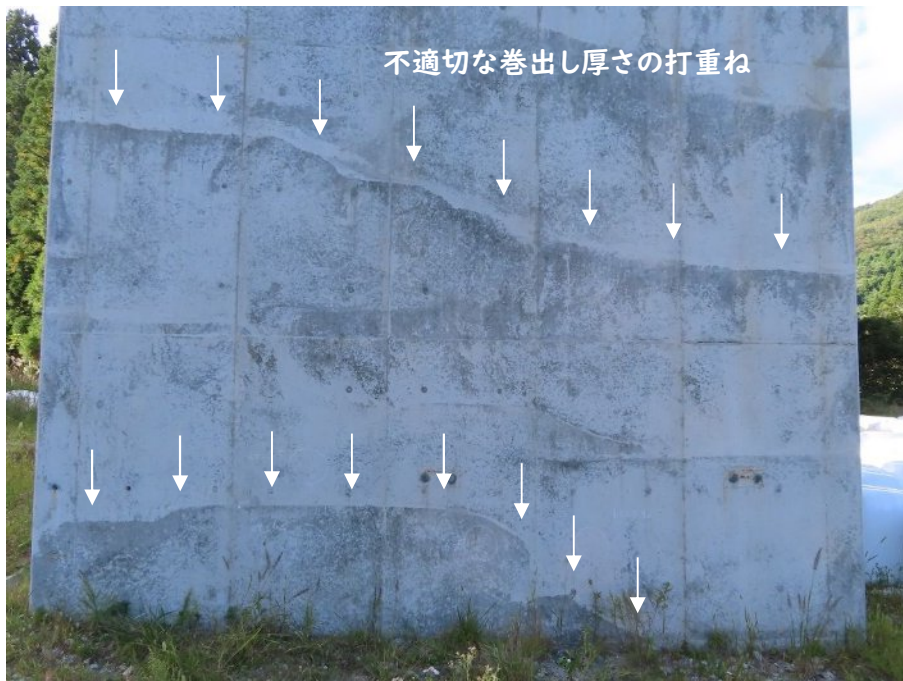


写真-2.5.2.9 打重ねの不具合の P2 柱式橋脚（中空断面）

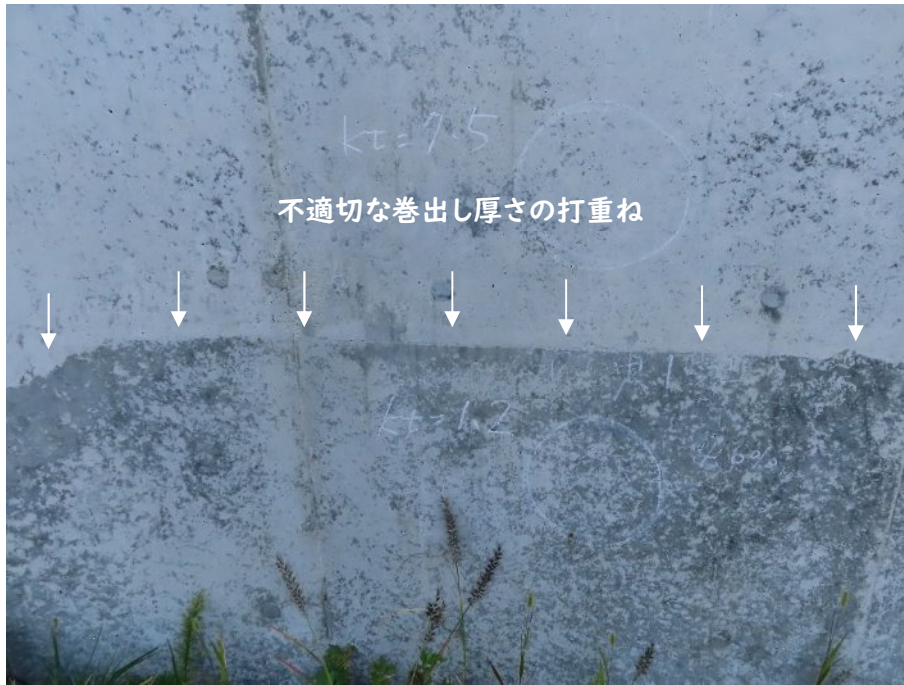


写真-2.5.2.10 打重ね箇所の一体化不良

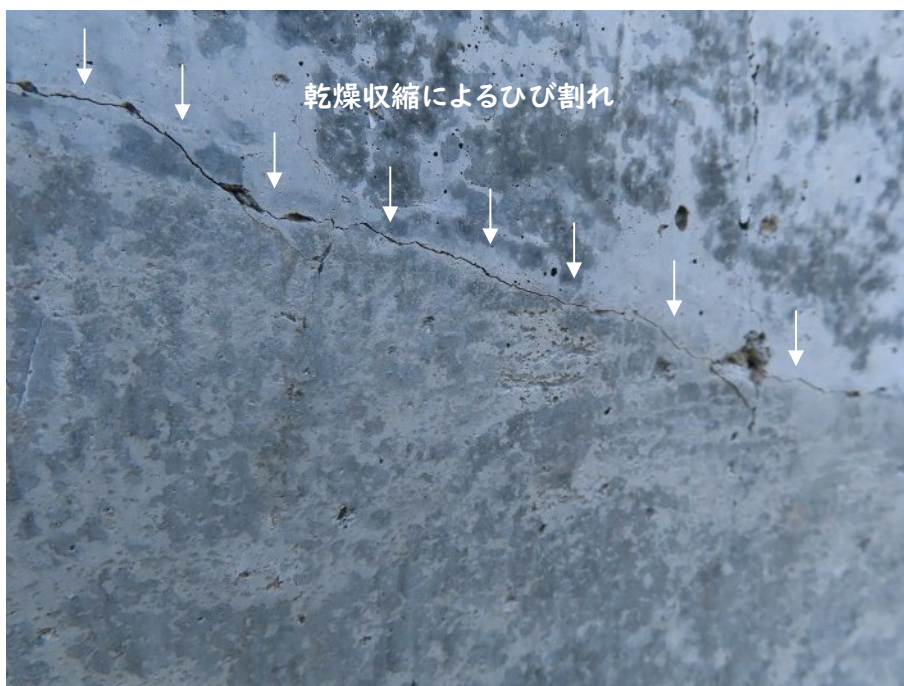


写真-2.5.2.11 打重ね箇所のひび割れ

### 3) 砂すじ

砂すじの発生事例として、E橋を写真-2.5.2.12と写真-2.5.2.13、F橋を写真-2.5.2.14に示す。E橋は、2020年に完成し建設後3年が経過、F橋は1978年に完成し建設後45年が経過している。この、E橋のA2ラーメン式橋台の函渠部側壁に局部的に締固めが不十分な箇所があり、その部分にブリーディング水が集まり面的な砂すじが発生している。また、F橋下り線の

P1 T型橋脚の梁部分に型枠継ぎ目の砂すじが発生している。砂すじは、構造耐力に影響を与えるほどの不具合ではないが、その部分から劣化因子の侵入や美観の低下が問題となる。

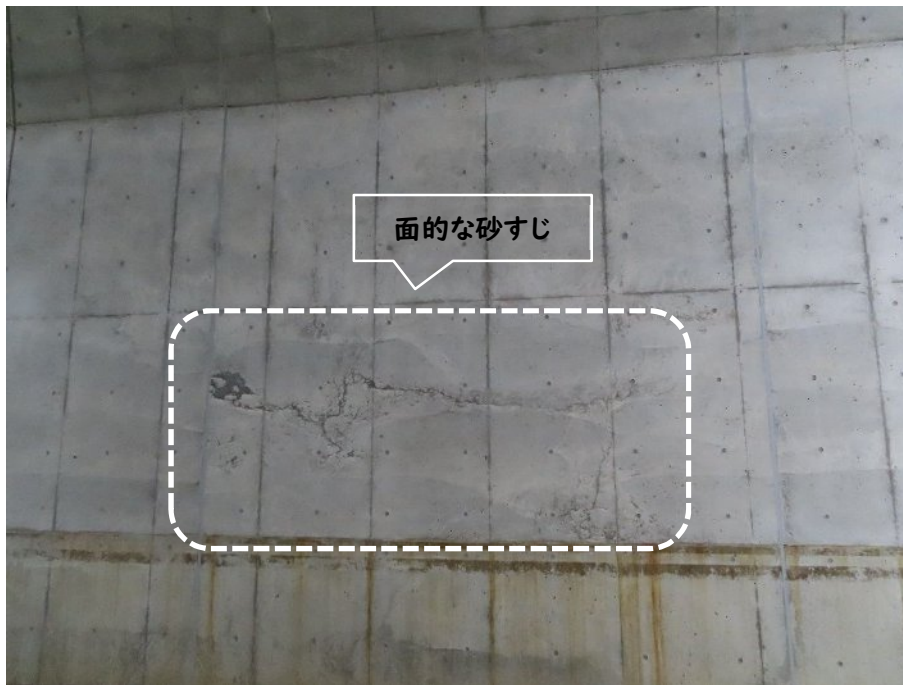


写真-2.5.2.12 面的な砂すじ



写真-2.5.2.13 面的な砂すじ（接写）



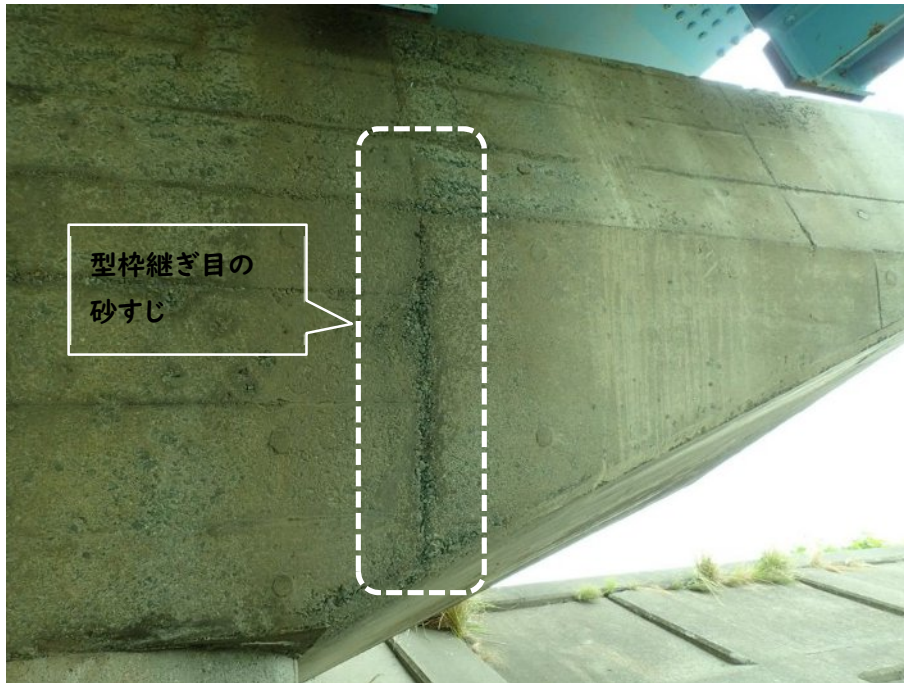


写真-2.5.2.14 型枠継ぎ目の砂すじ

#### 4) 表面気泡

表面気泡の発生事例として、H橋を写真-2.5.2.15、I橋を写真-2.5.2.16と写真-2.5.2.17に示す。H橋は、2016年に完成し建設後7年が経過しI橋は、1985年に完成し建設後38年が経過している。このH橋のA2箱式橋台とI橋のA2控え壁式橋台の縦壁に表面気泡が発生している。表面気泡は砂すじ同様に、構造耐力に影響を与えるほどの不具合ではないが、その部分から劣化因子の侵入や美観の低下が問題となる。



写真-2.5.2.15 H橋の面全体に発生した表面気泡（あばた）



写真-2.5.2.16 表面気泡が発生している A2 控え壁式橋台



写真-2.5.2.17 I 橋の面全体に発生した表面気泡

#### 5) 温度ひび割れ

温度ひび割れの発生事例として、J 橋を写真-2.5.2.18 と写真-2.5.2.19, K 橋を写真-2.5.2.20 と写真-2.5.2.21 に示す。J 橋は、1998 年に完成しており建設後 25 年が経過している。K 橋の A2 橋台は、2017 年に施工し建設後 6 年が経過している。この J 橋の A1 逆 T 式橋台の堅壁に温度ひび割れが発生している。また、K 橋の A2 箱式橋台の堅壁にも温度ひび割れが発生している。温度ひび割れには、コンクリート打込み後、早い段階（数日後）でひび割れが発生する内部拘束温度ひび割れと、数週間後に発生する外部拘束温度ひび割れがある。前者のひび割れは、表層部のひび割れとなるが後者のひび割れは場合によって貫通ひび割れとなること

がある。貫通ひび割れは、劣化因子の侵入が容易となり鉄筋腐食を促進するため構造耐力の低下に影響を与えることがある。さらに、橋台では背面盛土の水がひび割れから浸入し、エフロレッセンスを析出させるケースも多い。また、橋脚に比べ橋台は鉄筋比が小さいため、温度ひび割れが発生しやすいことも知られている。このように、設計由来による温度ひび割れもあるが、締固め不足や養生不足に起因したひび割れ、さらに早期脱型による温度差によるひび割れもあり、これらは施工由来のひび割れである。

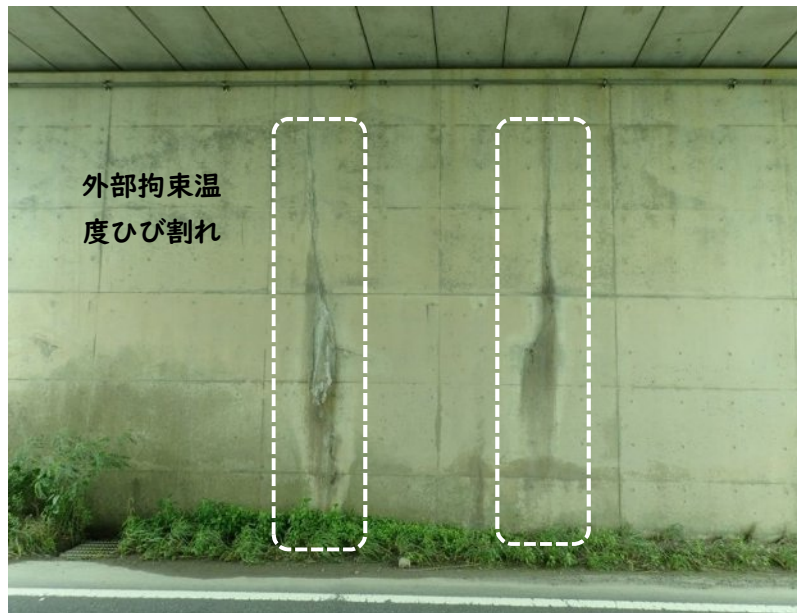


写真-2.5.2.18 外部拘束温度ひび割れ（貫通ひび割れ）



写真-2.5.2.19 上記写真 左側のひび割れ（接写）

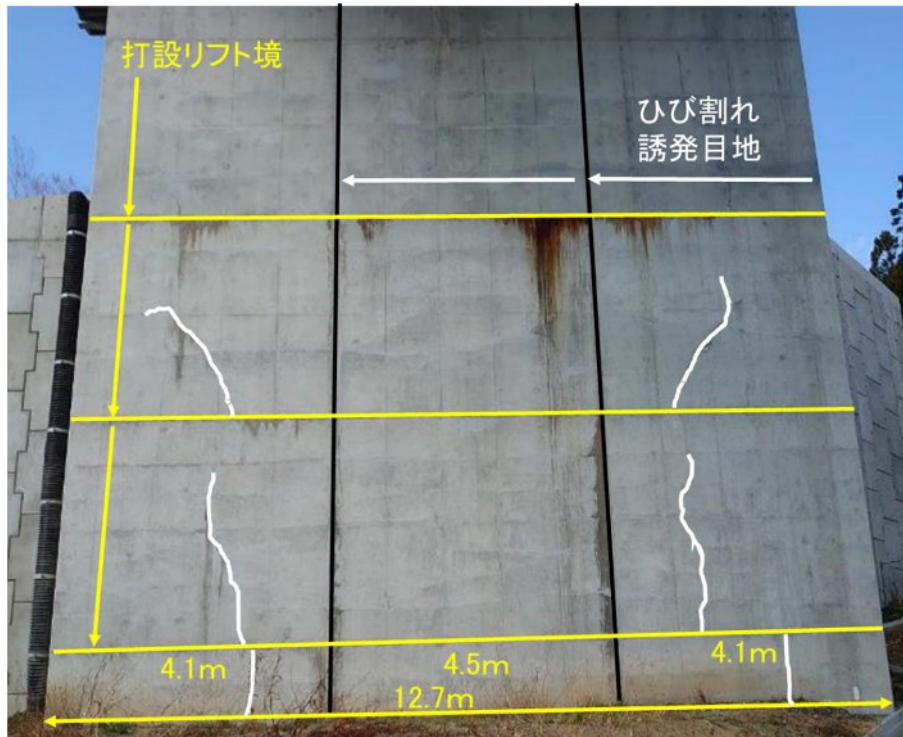


写真-2.5.2.20 外部拘束温度ひび割れ



写真-2.5.2.21 上記写真 右上のひび割れ（接写）

令和3年9月29日にK橋のA2橋台で目視調査および表層透気試験を実施した。その際の、測定箇所は写真-2.5.2.22に示し、結果は表-2.5.2.1に示す。なお、目視調査と表層透気試験結果から、以下に考察を述べる。ひび割れ誘発目地は縦壁を3分割して2箇所を設置してい

るが、それとは全く別の位置に外部拘束温度ひび割れが発生している。また、部分的に不適切な巻出し施工がなされたと思われる打ち重ね線が確認されること。打継ぎ処理が不適切だったため、打継ぎ箇所から錆汁を伴う漏水があること。さらに、P コン部分に多くの沈みひび割れが確認されたことや目視評価点数（図-2.5.2.1）も全ての項目で2.5点以下であることから、施工の基本事項が確実に遵守されておらず、かつ締固めも不十分だったと考えられる。そのため、ひび割れ誘発目地とは別の箇所に温度ひび割れが発生したと考える。また、沈みひび割れも締固め不足に起因する施工の不具合である。その他、表層透気試験結果も、表-2.5.2.1に示したとおりだが表層品質が悪いため測定不可の部分もあるなど、密実性・緻密性が得られていない結果となった。如何に、施工の基本事項を遵守することが大切かが分かる。また、施工に起因した不具合が発生すると、他の健全な部分と比較して劣化速度が速くなる。さらには、単なる施工の不具合に留まらず、経年劣化とともに環境要因による材料劣化が複合的に影響することで、さらに劣化の進行が早まるため維持管理を圧迫することになる。このことから、施工に起因した初期不具合を発生させないことが、如何に大事かを理解する必要がある。



写真-2.5.2.22 表層透気試験の測定箇所

表-2.5.2.1 表層透気試験の結果

測定箇所	表層透気係数 [ $\times 10^{-16} \text{m}^2/\text{S}$ ]	評価グレード
①	0.209	一般
②	3.150	劣
③	6.960	劣
④	3.210	劣
⑤	測定不可	極劣

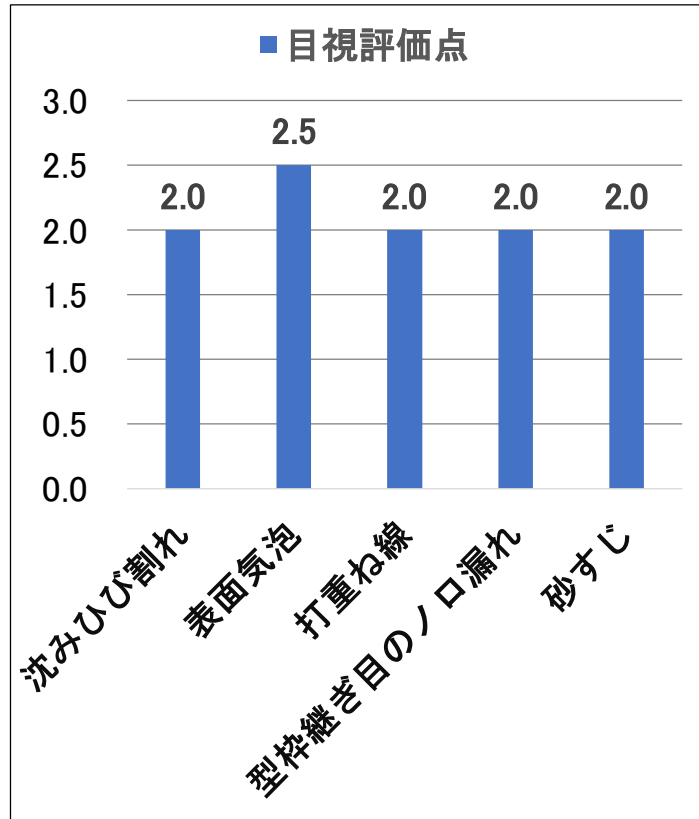


図-2.5.2.1 目視評価の結果

なお、K 橋の A2 橋台に発生した温度ひび割れについて、解析 WG にてひび割れ発生原因に対する数値解析を行っているので、写真-2.5.2.20 と対比して見て頂きたい。解析結果は、「3.3 施工に起因する不具合と構造性能」にて紹介する。

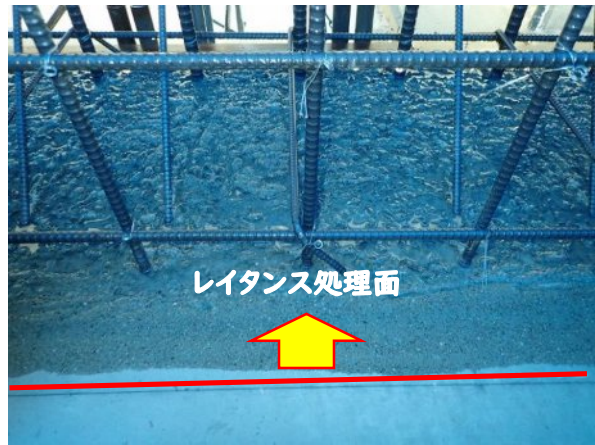
## (2) 材料劣化を回避するための対応状況

### 1) 打継ぎの不具合の抑制対策

打継ぎの不具合は、先打ちコンクリートに新たにコンクリートを打継ぐ際、打継ぎ面の処理が不適切な状態や先送りモルタルが混ざった状態のコンクリートが打継がれることで一体化不良や脆弱層を形成し不具合が生じる。そのため、打継ぎ面の処理は原則としてハイウォッシャー等を使用してレイトンス処理（写真－2.5.2.23 と写真－2.5.2.24）を行うのがよい。また、打継ぎ処理剤を使用する場合、製品によって散布面の湿潤状態や散布時期に違いがあるため、予め試験施工により施工方法を確立するとともに、コア採取による引張試験を行いレイトンス処理と同等の引張強度を確認する必要がある。



写真－2.5.2.23 レイトンス処理状況



写真－2.5.2.24 レイトンス処理完了

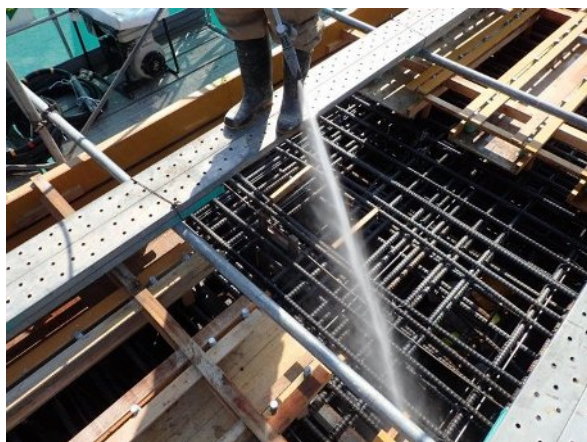
ポンプ車による打込みの際は、先送りモルタルやコンクリート誘導剤を躯体外部に完全に排出させたことを確認してから打込みを行う（写真－2.5.2.25 と写真－2.5.2.26）。また、打継ぎ面が乾燥していると新たに打込んだコンクリートが馴染まず付着力の低下を招くため、確実に湿潤状態にしてから打込む必要がある。ただし、夏場は乾燥しやすく冬場は場合によっては凍結の恐れがあるので施工環境を見極めたうえで適切に散水処理（写真－2.5.2.27）を行うことが大事である。



写真－2.5.2.25 先送りモルタルの返送



写真－2.5.2.26 コンクリート誘導剤排出



写真－2.5.2.27 打継ぎ面の散水処理

## 2) 打重ねの不具合の抑制対策

打重ねの不具合には、コールドジョイントのほか、締固め不足や不適切な巻出し厚に起因する一体化不良や脆弱層の形成などがある。そのため、コールドジョイントを防ぐには適切に打重ね時間間隔を遵守する必要がある。特に、暑中コンクリート施工となる場合は、予想以上に凝結時間が早くなることがあるため、2.0 時間以内に打重ねれば良しとするのではなく、できるだけ早い時間で打重ねられるよう打設計画を行うことが重要である。

締固め不足はコンクリートの密実性・緻密性が低下するばかりでなく、下層と上層コンクリートが一体化されず不具合の原因となる。そのため、試験施工などで決定した締固め時間を遵守するよう時間計測を行いながら合図を出す者を配置するとよい。また、打設回数を 2 回・3 回と行っていくうちに、バイブレータの担当者は自己計測による管理でも大きな時間誤差がな



くなるため、常に時間計測を行う人を配置する必要はない。しかし、定期的に施工管理者がチェックを行うことは重要である。また、下層と上層コンクリートの一体性を確保するためにも、バイブレータの先端は下層へ10cm以上挿入させる必要がある。これについては、バイブレータに巻出し層に合せたマーキング（写真-2.5.2.28と写真-2.5.2.29）を行うことで管理が容易となる。巻出し厚が一定でないと、締固めに不均一な箇所が生じるためコンクリートの密実性も不均一な状態となりやすい。そのため、この様な不具合を抑制するには構造鉄筋とは別に、巻出し厚をマーキングした鉄筋（写真-2.5.2.30）の設置、あるいは定規棒や計測スタッフ（写真-2.5.2.31）などで巻出し厚を管理するとよい。



写真-2.5.2.28 バイブレータへのマーキング



写真-2.5.2.29 下層への10cm挿入を可視化



写真-2.5.2.30 巻出し厚のマーキング



写真-2.5.2.31 打設高さ管理用定規

### 3) 砂すじの抑制対策

砂すじによる不具合には、面的に発生する砂すじと局所的に型枠継ぎ目に発生する砂すじがある。前者の面的な砂すじを抑制するには、配合面ではできるだけ単位水量を減らす。また、吸水率の小さな骨材を使用する工夫が挙げられる。施工面では、型枠面から躯体中央部に向かって（外側から内側に向かって）打込み、浮き上がったブリーディング水をしっかり処理することが大事である（写真-2.5.2.32）。なぜなら、ブリーディング水は摩擦力の小さい型枠面を這い上がるため、型枠面に近い位置にブリーディング水を溜めないよう躯体中央で処理するこ

とが面的な砂すじを抑制するには有効である。

後者の型枠継ぎ目に発生する砂すじはバイブレータの振動によって、型枠の継ぎ目からノロが漏れ出すことでセメントペーストを失い骨材が洗われたような状態で発生する現象である。この砂すじを抑制するには、型枠の縦目地部にバイブレータを差し込まないように型枠に目印を付けるとよい（写真－2.5.2.33）。その他には、市販されているノロ止めテープ（写真－2.5.2.34）を型枠継ぎ目に貼り付けることでノロ漏れを抑制できる。さらに、型枠の水平継ぎ目については型枠の外側に粘着テープ（写真－2.5.2.35）を貼り付けることでノロ漏れを抑制することができる。この時、できるだけ粘着力の強いテープを使用した方が効果的である。



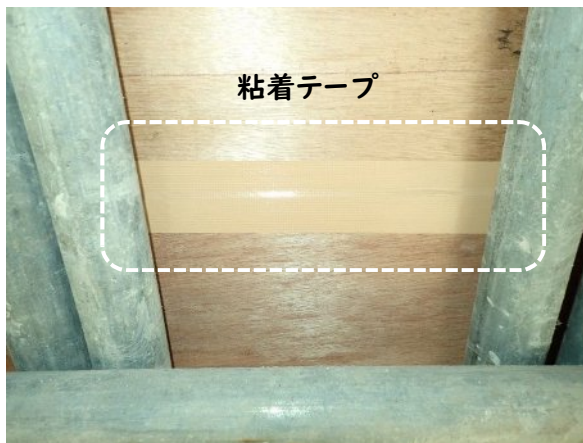
写真－2.5.2.32 ブリーディング水処理



写真－2.5.2.33 バイブレータ挿入禁止の目印



写真－2.5.2.34 ノロ止めテープ設置



写真－2.5.2.35 粘着テープ設置

#### 4) 表面気泡の抑制対策

表面気泡は、打込み時に巻き込んだ空気やエントラップドエアが抜けきらずに硬化したものである。特に、型枠に傾斜がある部分や型枠天端に面木を設置した近傍に発生しやすい。そのため、一般的な垂直面の表面気泡を抜くには、型枠近傍を公称径 30mm 程度の仕上げバイブレ

ータ（写真－2.5.2.36）で締固めを行うとよい。また、型枠バイブレータ（写真－2.5.2.37）にて型枠に振動を与えることで、気泡が排出されるため表面気泡の発生を抑制することができる。その他にも、透明型枠（写真－2.5.2.38）を部分的に使用することで表面気泡の抜け具合を目視確認しながら施工できる利点がある。

傾斜のある型枠部分では、どれだけ入念に締固めを行っても表面気泡を排除することは難しいので透水型枠（写真－2.5.2.39）の使用やスペーシングを型枠面に挿入するとよい。また、型枠天端の面木などが支障となり気泡が抜けにくい場所では、木槌などで型枠を叩くとよい。



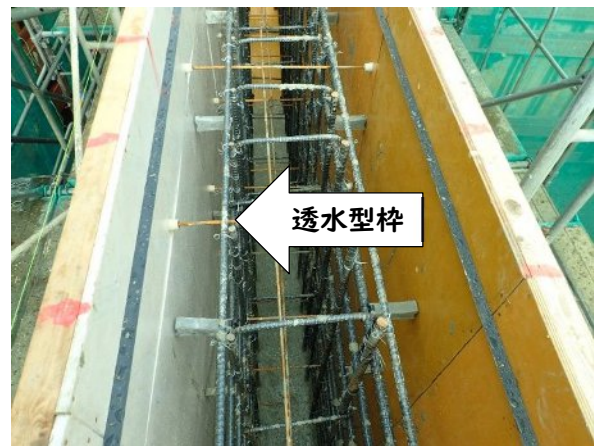
写真－2.5.2.36 仕上げバイブレータ



写真－2.5.2.37 型枠バイブレータ



写真－2.5.2.38 透明型枠



写真－2.5.2.39 透水型枠

## 5) 温度ひび割れの抑制対策

温度ひび割れには内部拘束によるひび割れと、外部拘束によるひび割れがある。外部拘束による温度ひび割れは、貫通ひび割れとなるリスクが高いため、事前にひび割れ抑制対策を検討する必要がある。この温度ひび割れには、設計に起因したものもあるため、丁寧な施工を行っても防ぎきれないものがある。しかし、丁寧な施工を行うことでひび割れ幅を制御できることを認識する必要がある。

具体的な対策として、先行リフトから打継ぎ間隔を短くすることで、内部温度やヤング係数

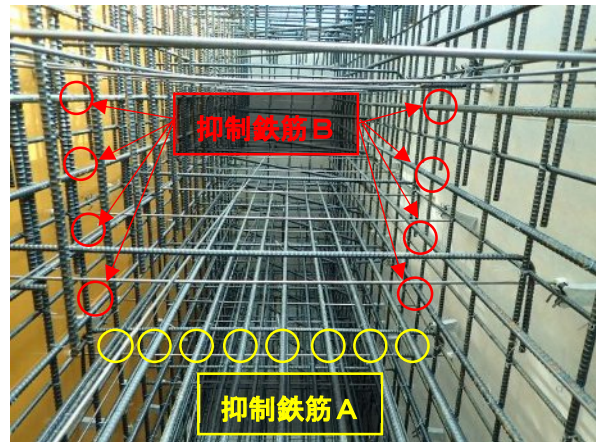
の変化を抑制できるため、外部拘束力が小さくなりひび割れ抑制効果が期待できる。

さらに、温度応力解析の結果を踏まえ、ひび割れ誘発目地（写真－2.5.2.40）を使用することで、誘発目地部にひび割れを誘導し、それ以外の部分にはひび割れを発生させない方法もある。しかし、誘発目地を使用しても適切な締固めがなされていないと、誘発目地ではない箇所にひび割れが発生することもあるので十分な注意が必要である。さらに、この誘発目地はコンクリート構造体に違う素材が入るため長期的には、そこを起点とした劣化に繋がる可能性があることも示唆されているので使用に当たっては十分な検討が必要である。

その他には、構造鉄筋とは別にひび割れ抑制鉄筋（写真－2.5.2.41）を追加することで、ひび割れを分散し有害とまらないひび割れ幅や目標値未満に制御する方法がある。なお、抑制鉄筋による対策を行う場合は、既往の実績による評価を行うことが基本である。ここでいう、既往の実績とは山口県の「コンクリート構造物品質確保ガイド 2021」のコンクリート施工記録のデータベースを照査に活用することである。但し、既往の施工実績やデータベースの範囲内に該当しない場合には、温度応力解析による照査を行う必要がある。



写真－2.5.2.40 ひび割れ誘発目地



写真－2.5.2.41 ひび割れ抑制鉄筋

〔担当 音道 薫〕

### 2. 5. 3 RC床版

ここでは、橋梁に用いられる床版のうち、場所打ちの鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版とよぶ）について、施工に起因する不具合の事例を紹介する。

RC床版は、図-2.5.3.1のように橋面の輪荷重を主とした作用力に対し、引張力を鉄筋で、圧縮力をコンクリートで支持する構造である。RC床版は、全ての作業が現場施工(写真-2.5.3.1)であるため、曲線や斜角など複雑な形状にも対応でき、初期コストに優れていることから、これまで鋼橋で多く用いられてきた。しかし、現場施工であるが故に、施工に起因する不具合の影響を受けやすく、供用後の輪荷重の繰り返し作用による疲労に加え、水や塩化物の浸透によって劣化が進行しやすい部材ともいえる。以下に、RC床版で施工に起因する不具合により劣化が進行した事例を紹介する。

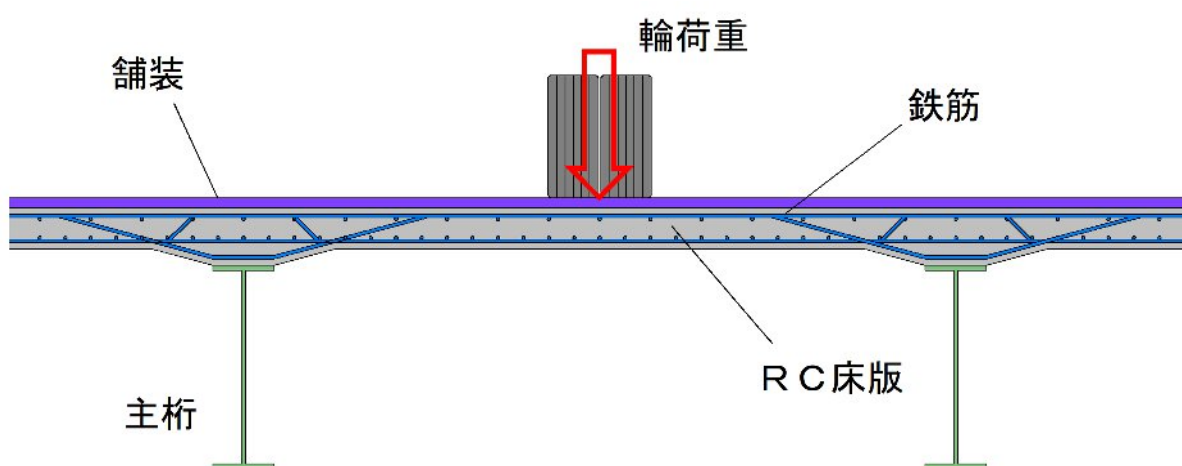


図-2.5.3.1 RC床版の構造



写真-2.5.3.1 RC床版の施工

### (1) ひび割れ

鋼主桁により支持された RC 床版は、コンクリート打設後の温度応力や乾燥収縮が鋼主桁により拘束されるため床版に引張応力が発生する。この引張応力がコンクリート打設後の強度発現過程における引張強度を上回るとひび割れが発生することになる。とくに、コンクリート打設時の締固めが不十分な場合は、ひび割れが生じやすい。

写真-2.5.3.2は、供用から2年後に RC 床版の下面で漏水を伴うひび割れが確認された事例である。このひび割れは、中央分離帯が施工された範囲の直下にだけ発生しており、他の一般部には発生していない。RC 床版の施工では、床版を打設した後に中央分離帯のコンクリートを施工するため、中央分離帯の乾燥収縮などの影響によって、中央分離帯下の床版にひび割れが生じたものと考えられる。

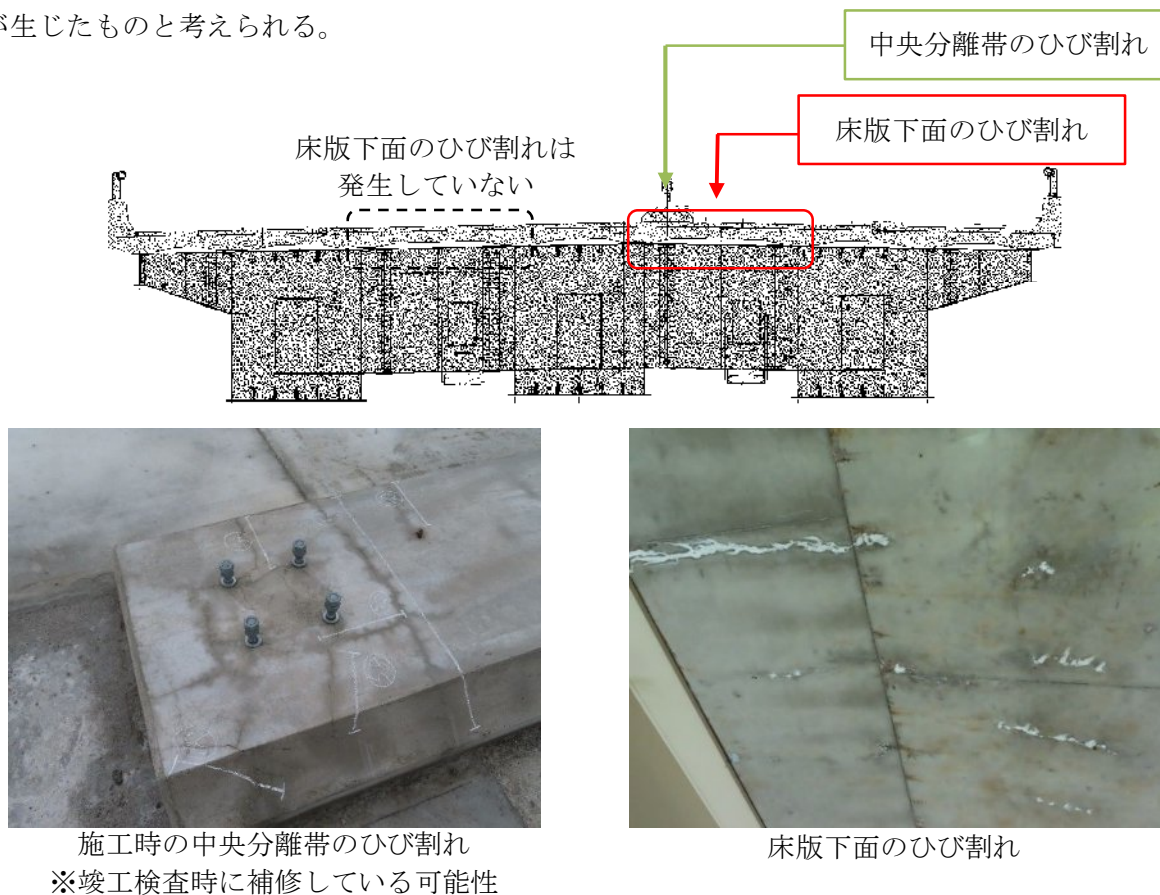


写真-2.5.3.2 中央分離帯下の床版のひび割れ事例

また、中央分離帯を有する RC 床版のコンクリート施工時には、中央分離帯の鉄筋が組み上がっており、この範囲の締固めは鉄筋が支障となって施工がしにくく、締固め不足が生じやすいと考えられる。また、床版の締固め作業は、中央分離帯を境に2班編成により行われることが多い。このとき、中央分離帯を挟んで配置される締固め作業員のどちらが中央分離帯範囲を締固めるかを決めていないと、どちらの作業員ともに片方が締固め作業を行ったと思ひ込み、締固めが行われない可能性もある。そのような悪条件が重なると、締固め不足によりコンクリートにひび割れが生じやすくなるため、施工にあたっては十分な締固めを行うための事前の計画が重要であるといえる。

## (2) 打設ブロック打継ぎの不具合

RC 床版の施工は、日あたりの施工限界から橋長をある程度分割してブロックごとの施工を行うのが一般的である。このとき、各ブロック同士の打継処理が十分でない場合、路面からの水や塩分の浸透によって、内部鋼材に腐食が生じる場合もある。

写真-2.5.3.3 は、床版下面で打設ブロック境界に見られる漏水の事例である。この橋梁は、山間部にかかる橋梁で冬期には凍結防止剤が散布される橋梁であるため、床版防水が十分に機能しない場合は路面から水や塩化物が打継ぎ目に生じたひび割れを介して内部鉄筋に到達する。内部鉄筋の腐食が進行すると、写真-2.5.3.4 のように鋼材の腐食膨張圧によって床版下面のコンクリート片の剥落にもつながる劣化である。



写真-2.5.3.3 打設ブロック境界からの漏水事例

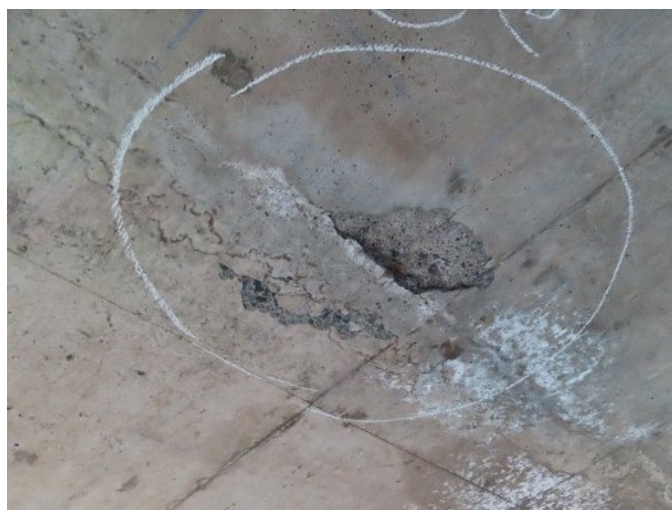


写真-2.5.3.4 鋼材の腐食膨張による剥離の事例

### (3) 充填不良

一般的な RC 床版には、路面排水を処理するため排水柵が設置されている。排水柵は複雑な形状となっており、さらに床版の配筋を切断するため補強鉄筋が配置されている(写真-2.5.3.5)。この様な部位では、バイブレータによる締固めを十分に行うことが困難なため、コンクリートの充填不良が生じやすい。

写真-2.5.3.6 は排水柵の下面に遊離石灰を伴う漏水が確認された事例である。このようなひび割れはその後の乾燥収縮などによってさらに進展しやすく、床版の耐久性低下につながる劣化である。



写真-2.5.3.5 RC床版の排水柵



写真-2.5.3.6 排水柵部のひび割れ事例



#### (4) 養生の不具合によるひび割れ

写真-2.5.3.7は、1997年に竣工した2径間連続鋼鈑桁のRC床版において、供用後わずか15年で床版下面に幅0.5mm、間隔0.3m格子状のひび割れが確認された事例である。交通量は約20,000台/昼間12時間(大型車混入率15%)と比較的多いが、平成6年の道路橋示方書を適用しB活荷重により設計された床版である。

この床版の施工時期は2月～3月の冬期であり、施工記録の調査によれば、養生不足、あるいはその後の急激な乾燥によって竣工直後から微細なひびわれが発生し、その後の乾燥収縮によって早期の格子状のひび割れの発達に至った可能性が考えられる。

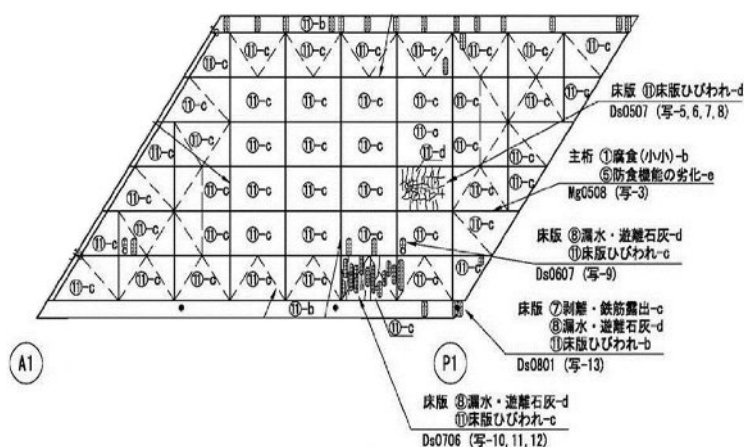


図-2.5.3.2 床版下面の損傷状況

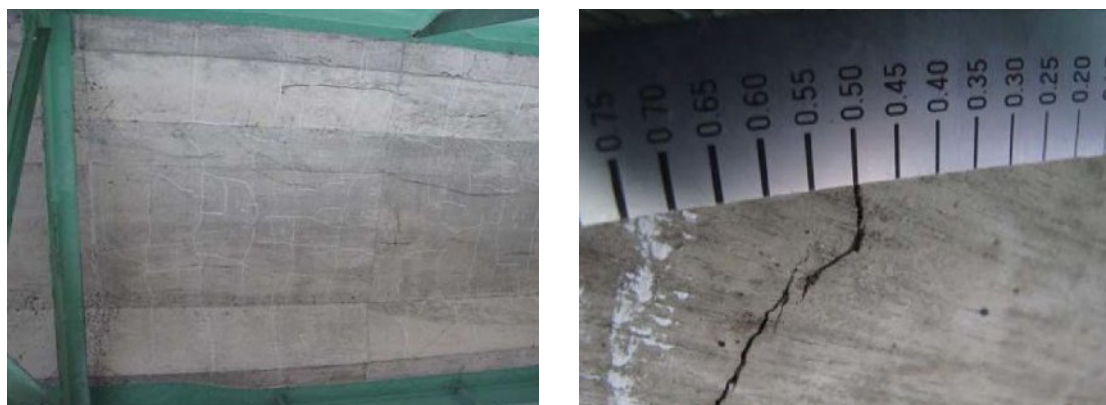


写真-2.5.3.7 床版下面のひび割れ事例

#### (5) 床版上面の平坦性の不具合

RC床版の砂利化は、床版上面に水が存在することで生じる劣化である。写真-2.5.3.8のように、床版コンクリート施工時に床版上面の平坦性が不足する場合や、排水が適切でない場合は、その部分に滞水が生じ、輪荷重の繰り返し载荷によってその部分に砂利化が発生しやすくなる。床版に砂利化が進行すると最終的には床版の抜け落ちに至り、第三者被害の発生につながる劣化である。



写真-2.5.3.8 床版上面の平坦性の不具合

写真-2.5.3.9は床版上面に砂利化が発生した事例である。この橋梁では、砂利化した上面の範囲を補修したが、その後再び砂利化が生じ、最終的には床版全厚で打替えが行われている。このように床版上面の砂利化は再劣化が生じやすく、維持管理上の大きな負担となることが多い。



写真-2.5.3.9 床版の土砂化の事例

したがって、床版防水工による水分や凍結防止剤に含まれる塩分の遮断とあわせ、施工時において床版上面に滞水を生じさせないよう平坦性を確保し、適切な排水を行うことが重要である。

〔担当 飯土井 剛〕

## 2. 5. 4 トンネル覆工

### (1) 既存トンネル覆工の調査

東北地方のトンネル覆工の施工に起因する不具合を把握する目的で、東北6県の供用中・供用前トンネルの覆工調査を実施した。調査対象は24トンネルとし、1980年代が3トンネル、1990年代が6トンネル、2010年から2016年が5トンネル、品質確保の手引き（案）発行後の2016年5月以降が7トンネルで実施した。調査トンネルの概要を表-2.5.4.1に示す。

表-2.5.4.1 調査トンネルの概要

調査年月日	No.	県名	所在地	国道	トンネル名	延長(m)	完成年	健全性	点検年	備考
2021/7/22	1	福島	いわき市久之浜	-	A	190.0	2013年	Ⅱ	2015年	海岸線
	2		いわき市平上荒川	-	B	262.0	1993年	Ⅱ	2018年	
	3		いわき市平上荒川	-	C	374.0	1992年	Ⅱ	2018年	
	4		いわき市平上荒川	-	D	270.0	2016年	Ⅱ	2017年	5年間長期保証
	5		いわき市平上荒川	-	E	364.9	2016年	Ⅱ	2017年	5年間長期保証
	6		いわき市三和町	-	F	1,385.0	2005年	Ⅲ	2018年	
	7		いわき市三和町	-	G	743.0	2010年	Ⅱ	2015年	
2021/7/23	8		会津坂下町	-	H	1,045.0	2001年	Ⅱ	2018年	
	9		郡山市熱海町	-	I	500.0	1989年	Ⅱ	2018年	
	10		郡山市熱海町	-	J	1,340.0	1991年	Ⅱ	2018年	
2021/8/1	11	山形	鶴岡市大綱	-	K	757.0	1990年	Ⅲ	2018年	
	12		鶴岡市大綱	-	L	881.0	1989年	Ⅲ	2018年	
2021/8/2	13	秋田	能代市二ツ井	-	M	644.0	1993年	Ⅱ	2016年	
	14		能代市二ツ井	-	N	637.0	1987年	Ⅲ	2016年	矢板工法
2021/8/17	15	青森	大鱒町	-	O	154.0	1993年	Ⅱ	2014年	
2021/9/1	16	岩手	普代村	-	P	2,058.0	2019年	Ⅱ	2020年	手引き発行後
	17	岩手	普代村	-	Q	256.0	2021年	I	2021年	手引き発行後
	18	岩手	普代村、野田町	-	R	1,587.0	2021年	I	2021年	手引き発行後
	19	岩手	野田村安家	-	S	997.0	2018年	I	2021年	手引き発行後
	20	岩手	普代村	-	T	1,582.0	2018年	Ⅱ	2020年	手引き発行後
	21	岩手	久慈市宇部町	-	U	446.0	2016年	I	2020年	
	22	岩手	野田村	-	V	293.0	2020年	I	2020年	手引き発行後
	23	岩手	久慈市長内町	-	W	1,368.0	2021年	I	2021年	手引き発行後
2021/9/27	24	山形	真室川町	-	X	95.0	2000年	Ⅱ	2017年	

覆工スパン毎の健全性評価は、定期点検で実施されているため、本委員会での調査は、全延長を徒歩にて調査し、覆工全体としての出来ばえを評価した。評価基準は、1スパン毎の表層目視評価基準を準用して、①はく離、②気泡、③水はしり・砂すじ、④色むら・打ち重ね線、⑤施工目地不良、⑥検査窓段差の6項目とし、覆工全体のスパンに対して不具合が発生しているスパン数の割合で評価した。表層目視評価基準（覆工全体）を表-2.5.4.2に示す。調査シートの例を表-2.5.4.3に示す。

表-2.5.4.2 表層目視評価基準（覆工全体）

評価点（覆工全体に対して）				
評価点	4	3	2	1
①はく離	ほぼ無し	50cm四方程度のはく離が数スパンで見られる	1m <sup>2</sup> 程度のはく離が数スパンで見られる	はく離が多くのスパンで見られる
②気泡	小さな（5mm程度）の気泡がほぼ無し	小さな（5mm程度）の気泡が数スパンで見られる	小さな（5mm程度）の気泡が複数のスパンで見られる	大きな（10mm程度）の気泡が複数のスパンで見られる
③水はしり・砂すじ	無し	1スパン1/10程度の水はしり等が数スパンで見られる	1スパン1/3程度の水はしり等が数スパンで見られる	水はしり等が複数のスパンで見られる
④色むら・打ち重ね線	ほぼ無し	1スパン1/10程度の色むら等が複数のスパンで見られる	1スパン半分程度の色むら等が複数のスパンで見られる	全体に色むら等が複数のスパンで見られる
⑤施工目地不良	無し	1スパン1/10程度の施工目地不良が数スパンで見られる	1スパン1/3程度の施工目地不良が数スパンで見られる	1スパンの側壁全体に施工目地不良が数スパンで見られる（天端に見られたら1）
⑥検査窓段差	無し	1スパンに1箇所程度の段差が数スパンで見られる	1スパンに2～3箇所程度の段差が数スパンで見られる	1スパン3箇所を越える段差が数スパンで見られる

表-2.5.4.3 トンネル覆工調査シート (例)

延長	190m	配合	不明	目地形式	台形目地	健全度	I	点検年	2020年
セトル仕様(予想)	メタルフォーム、検査窓(延長方向7、周方向7)			打設方法(予想)		天端は吹き上げ1箇所から打設			
備考	海岸線、飛来嵐分あり								
目視調査項目	判定	評価コメント							
1. はく離	1	セトル型枠に貼りつき、はく離した箇所(補修跡)が多数ある。型枠脱型強度の管理不足が原因か?							
2. 気泡	1.5	鋼製型枠のため気泡は比較的少ないが、側壁にも存在する。							
3. 水はしり・砂すじ	1	側壁部にブリーディング水がのぼった跡あり。							
4. 色むら・打ち重ね線	1	天端しまは比較的薄い。流れしま多数あり。水平打ち重ね線に沿ったひび割れあり。							
5. 施工目地不良	1.5	うきあり。目地蛇行あり。							
6. 検査窓段差	1	段差は比較的少ないが、窓枠周辺の砂すじや補修跡が多数ある。							
その他欠陥	-	インバート拘束によるひび割れ(スパン中央部)							
漏水状況	-	無し							
補修・補強状況	-	坑口2スパンのSL付近、目地に補修あり							
総評	2010年台の品質確保の取り組みを実施していないトンネルでは一般的な施工と判定した。検査窓からの締固めは実施されていたと予想するが、品質確保の取り組み意識は低い。								

7

坑門工



覆工全景

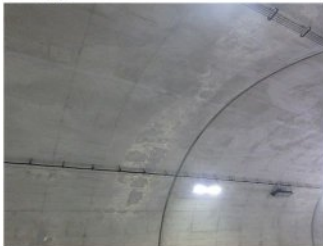


代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・はく離箇所多数。特に吹き上げ箇所周辺に多い。

2. 気泡



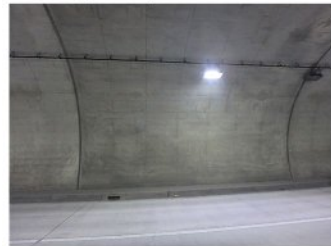
・側壁上部に気泡多数あり。

3. 水はしり・砂すじ



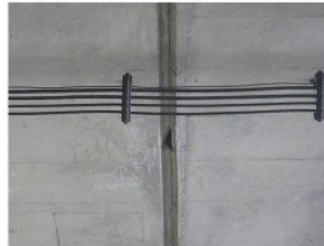
・端部・まど枠付近に多数あり。

4. 色むら・打ち重ね線



・打ち重ね線がコンクリートを流した方向に沿ってあり。

5. 施工目地不良



・台形目地を使用。うきあり。

6. 検査窓段差



・一部の窓枠周辺に砂すじがある。

その他欠陥



・中央スパンに拘束ひび割れ、0.5mm



・坑口から1~2スパンに目地補修・拘束ひび割れ補修・水平打ち重ね線補修あり



・打ち重ね線に沿ったひび割れあり。締固め管理不足が原因か?

以下にトンネルが施工された年代別に，トンネル覆工の代表例を示し，調査結果について考察する。

1980年代のトンネル覆工の定期点検結果は，健全度ⅡからⅢであり，多くのスパンではく落対策や目地補修が実施されている。天端部には亀甲状のひび割れが生じている箇所も存在し，打込み時の加水などにより，低品質のコンクリートが打込まれ，乾燥収縮により劣化が進行したものと推察される。また，打重ね線からはエフロレッセンスが析出しているものも多数あり，打込み時に締固め管理が実施されていなかったと推察される。代表する覆工を写真－2.5.4.1と2.5.4.2に示す。



写真－2.5.4.1 1980年代の覆工例（補修・補強）



写真－2.5.4.2 1980年代の覆工の不具合事例

1980年代の表層目視評価結果は、6項目すべての評価項目で評価点が付けられない状況にあり、この年代の覆工コンクリートの打込みには品質確保の意識が無かったことが解る。表層目視評価事例を図-2.5.4.1に示す。

<p>1. はく離 <span style="float: right;">0点</span></p>  <p>・天端吹き上げ口付近のはく落？</p>	<p>2. 気泡 <span style="float: right;">0点</span></p>  <p>・側壁に気泡・ジャンカが多数ある。</p>
<p>3. 水はしり・砂すじ <span style="float: right;">0点</span></p>  <p>・側壁に水はしり?はく落が明瞭にあり。</p>	<p>4. 色むら・打ち重ね線 <span style="float: right;">0点</span></p>  <p>・側壁の打ち重ね線のひび割れからエフロレッセンス析出あり。</p>
<p>5. 施工目地不良 <span style="float: right;">0点</span></p>  <p>・うき、剥落が多数あり。 ・ほとんどの目地で補修が実施されている。</p>	<p>6. 検査窓段差</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 20px; text-align: center;"> <p>検査窓なし</p> </div>

**合計 0点**

図-2.5.4.1 1980年代の覆工の表層目視評価事例

1990年代のトンネル覆工の定期点検結果は、健全度ⅡからⅢであり、多くのスパンではく落対策や目地補修が実施されている。1980年代と同様に、天端部に亀甲状のひび割れが生じている箇所も存在する。これは、打込み時の加水などにより、低品質のコンクリートが打込まれ、乾燥収縮により劣化が進行したものと推察される。代表する覆工を写真-2.5.4.3~2.5.4.4に示す。



写真-2.5.4.3 1990年代の覆工例（補修・補強）



写真-2.5.4.4 1990年代の覆工の不具合事例

1990年代の表層目視評価結果は、セントルの検査窓数を増加するなどの工夫が見られるようになり、1980年代から若干の進歩は見られるものの、6項目すべてで低評価となり、品質確保の意識は無かったことが解る。表層目視評価事例を図-2.5.4.2に示す。

1. はく離

0点



・天端・側壁に補修跡が多数あり。

2. 気泡

0点



・側壁に気泡が多数ある。

3. 水はしり・砂すじ

1点



・側壁に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線

0点



・天端・側壁の流れ縞に沿ってひび割れあり。

5. 施工目地不良

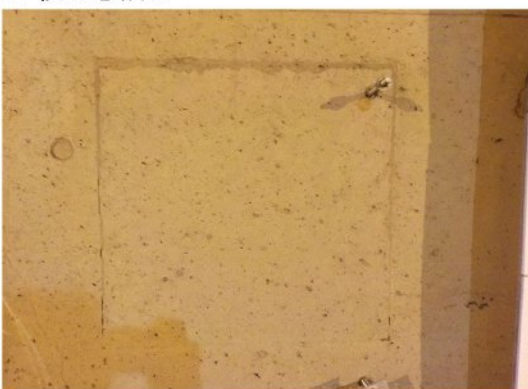
0点



・うき、剥落が多数あり。

6. 検査窓段差

1.5点



・検査窓枠の周辺に砂すじがある。

合計 2.5点

図-2.5.4.2 1990年代の覆工の表層目視評価事例



2000年代のトンネル覆工の定期点検結果は、健全度ⅡからⅢではあるが、大規模なはく落対策や目地補修が実施されているトンネルは減少している。この年代になるとセントルの面板にスチールフォームが使用されるようになり、検査窓数も増加している。しかし、色むらや打重ね線が明瞭に存在するため、これまでと同様に品質確保の意識は低く、コンクリートを流し込むだけで、締固め管理は実施されていないと推察される。代表する覆工を写真-2.5.4.5と2.5.4.6に示す。






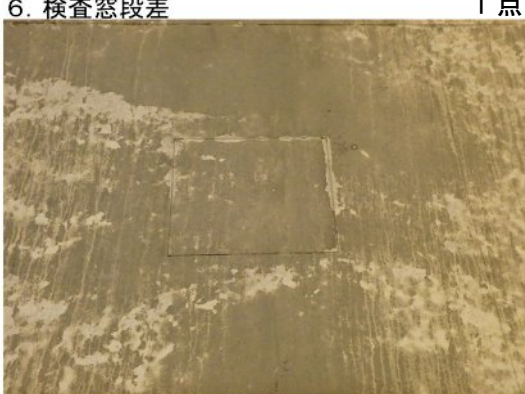


写真-2.5.4.5 2000年代の覆工例



写真-2.5.4.6 2000年代の覆工の不具合事例

2000年代の表層目視評価結果は、1990年代から多少の進歩は見られるものの、6項目すべてで低評価であり、品質確保の意識が低いことが解る。表層目視評価事例を図-2.5.4.3に示す。

<p>1. はく離 <span style="float: right;">1.5点</span></p>  <p>・天端吹き上げ口周辺にはく離あり。</p>	<p>2. 気泡 <span style="float: right;">1点</span></p>  <p>・側壁の端部に気泡あり。</p>
<p>3. 水はしり・砂すじ <span style="float: right;">0点</span></p>  <p>・側壁に水はしりの跡が多数ある。</p>	<p>4. 色むら・打ち重ね線 <span style="float: right;">0点</span></p>  <p>・天端の吹き上げ口周辺に明確な縞が残る。 ・側壁の流れ縞も明確に残る。</p>
<p>5. 施工目地不良 <span style="float: right;">2点</span></p>  <p>・目地の一部にうき、欠け、蛇行がある。</p>	<p>6. 検査窓段差 <span style="float: right;">1点</span></p>  <p>・窓枠周辺に砂すじが多数ある。</p>

**合計 5.5点**

図-2.5.4.3 2000年代の覆工の表層目視評価事例

2010年から2016年代のトンネル覆工の定期点検結果は、健全度Ⅱの評価が多くなり、一部で健全度Ⅰの評価もあることから、品質確保の意識が向上したと考えられる。この要因は、2008年から大型工事に総合評価方式が原則適用されるようになり、覆工コンクリートの品質向上が多くのトンネルで提案テーマに採用されたことによるものと推察される。さらに、東北地方整備局発注工事で2012年から覆工コンクリートに5年長期保証が適用されたことが要因で、品質・耐久性を向上するための取り組みが実施された結果であると考えられる。代表する覆工を写真-2.5.4.7と2.5.4.8に示す。



写真-2.5.4.7 2010年～2016年代の覆工例



写真-2.5.4.8 2010年～2016年代の覆工の事例

2010年から2016年代の表層目視評価結果は、6項目すべての評価項目で向上しており、品質・耐久性を意識した取り組みが進められるようになったことが解る。検査窓数の増加などのセントル設備の工夫により、締固めが行われるようになったと推察できる。また、天端部に放射状の締固め跡が見られるなど、打込み方法の工夫が確認できるようになった。表層目視評価事例を図-2.5.4.4に示す。

1. はく離

2.5点



・天端付近の一部にはく離あり。

2. 気泡

3点



・側壁に気泡があるが少ない。

3. 水はしり・砂すじ

3点



・側壁端部の縞は比較的少ない。

4. 色むら・打ち重ね線

2点



・側壁の一部に打ち重ね線に沿ったひび割れあり。

5. 施工目地不良

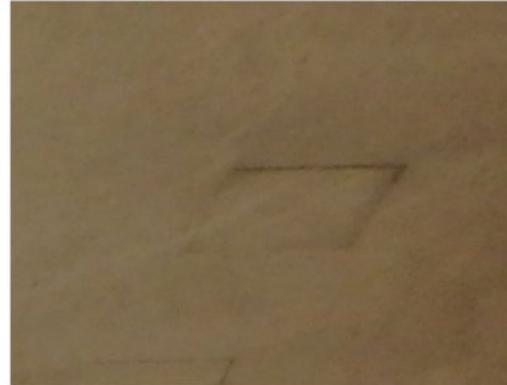
2点



・目地の一部にうき、欠けがある。

6. 検査窓段差

3点



・窓枠の一部に段差と周辺に砂すじがある。

合計 15.5点

図-2.5.4.4 2010～2016年代の覆工の表層目視評価事例

東北地方整備局から「コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)(トンネル覆工コンクリート編)」が発行された2016年5月以降のトンネル覆工の定期点検結果は、健全度ⅠからⅡの評価が多くなり、品質確保の意識がさらに向上してきたことが解る。震災復興で試行されてきた多くの品質確保の取り組み事例が各方面で紹介され、発注者や施工者に品質確保の必要性が周知されてきた成果と考えられる。代表する覆工を写真-2.5.4.9と2.5.4.10に示す。



写真-2.5.4.9 2016年以降の覆工例

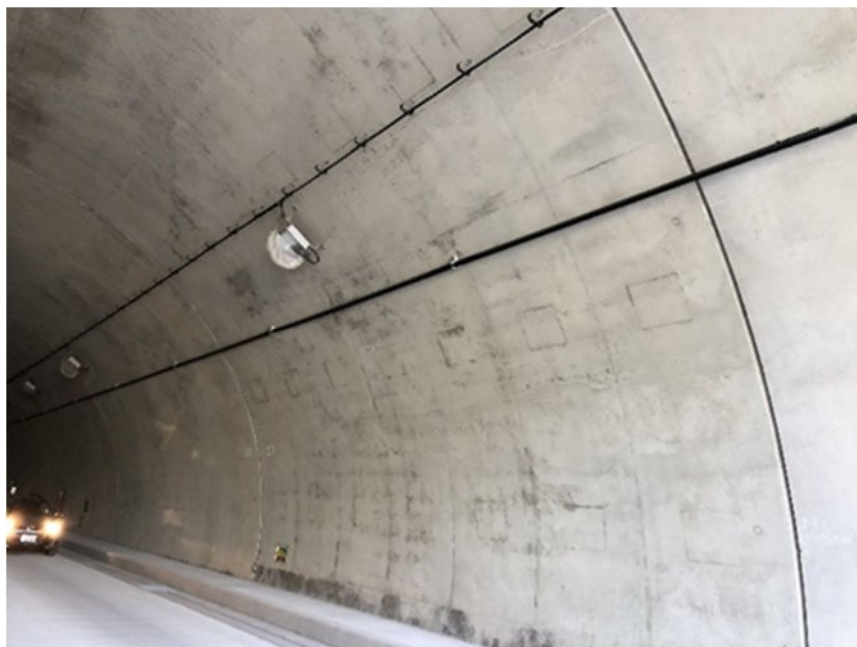


写真-2.5.4.10 2016年以降の覆工の事例

2016年5月以降の表層目視評価結果は、6項目すべての評価項目で評価が向上しており、品質が確保されるようになってきたことが解る。施工に起因する不具合が発生するスパン数が減り、打込み完了スパンの不具合の原因追及と対策を継続的に行ってPDCAを廻すことで、打込み初期に発生した不具合を改善している事例も確認できる。表層目視評価事例を図-2.5.4.5に示す。

1. はく離

3.5点



・一部の天端吹き上げ口に小規模のはく離あり。

2. 気泡

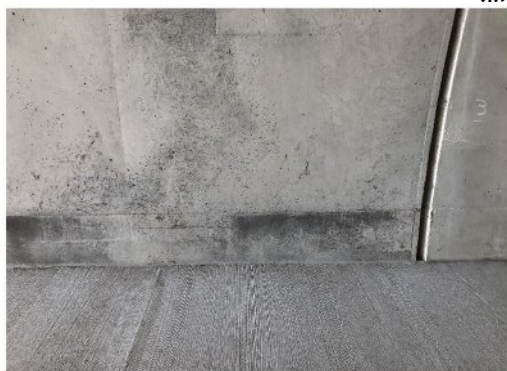
3点



・側壁に細かい気泡が残る。

3. 水はしり・砂すじ

3点



・側壁端部に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線

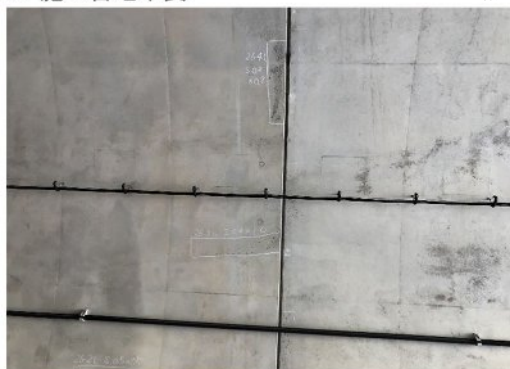
2.5点



・一部の側壁打ち重ねや天端の流れ縞部分にひび割れあり。

5. 施工目地不良

3点



・施工目地妻側に弱部あり。

6. 検査窓段差

3.5点



・一部の窓枠周辺に砂すじあり。

合計 18.5点

図-2.5.4.5 2016年5月以降の覆工の表層目視評価事例

各年代における表層目視評価結果を表-2.5.4.4、図-2.5.4.6に示す。各評価点は、総合評価方式が開始された2010年代から向上しており、それ以前の年代の評価点が低いことから品質確保の意識が無かったことが解る。2010年代以降は、評価項目のうち「1.はく離」、「2.気泡」、「3.水はしり、砂すじ」、「5.施工目地不良」、「6.検査窓段差」の5項目で2.5点台、「色むら・打ち重ね線」の1項目で2点台となっている。ただし、品質確保の手引きが発行された2015年5月以降の年代で、総合評価方式が開始された年代からの評価点向上が確認できなかったのは残念な結果であった。2010年以降は、コンクリートの配合変更、締固め方法の新技术の採用、長期養生などの取り組みで品質が向上したと推察される。評価点が3点以上に到達しない理由は、打込み時の基本的事項の遵守に改善の余地があるためと考えられる。今後は、品質確保の取り組みが定着したと推察される2020年代のトンネル覆工について、継続調査を行っていく必要がある。

表-2.5.4.4 年代別表層目視評価結果

完成年	評価点平均(4点×6項目=24点満点)						合計	件数
	1. はく離	2. 気泡	3. 水はしり・砂すじ	4. 色むら・打ち重ね線	5. 施工目地不良	6. 検査窓段差		
1980年代	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	0.50	1.17	3
1990年代	0.50	0.92	0.17	0.00	0.00	1.10	2.68	6
2000年代	1.50	1.50	0.17	0.33	1.50	1.00	6.00	3
2010年～2016年	2.60	2.80	2.50	2.10	2.60	2.40	15.00	5
2016年5月以降(手引き発行後)	2.43	2.79	2.57	1.93	2.50	2.79	15.00	7

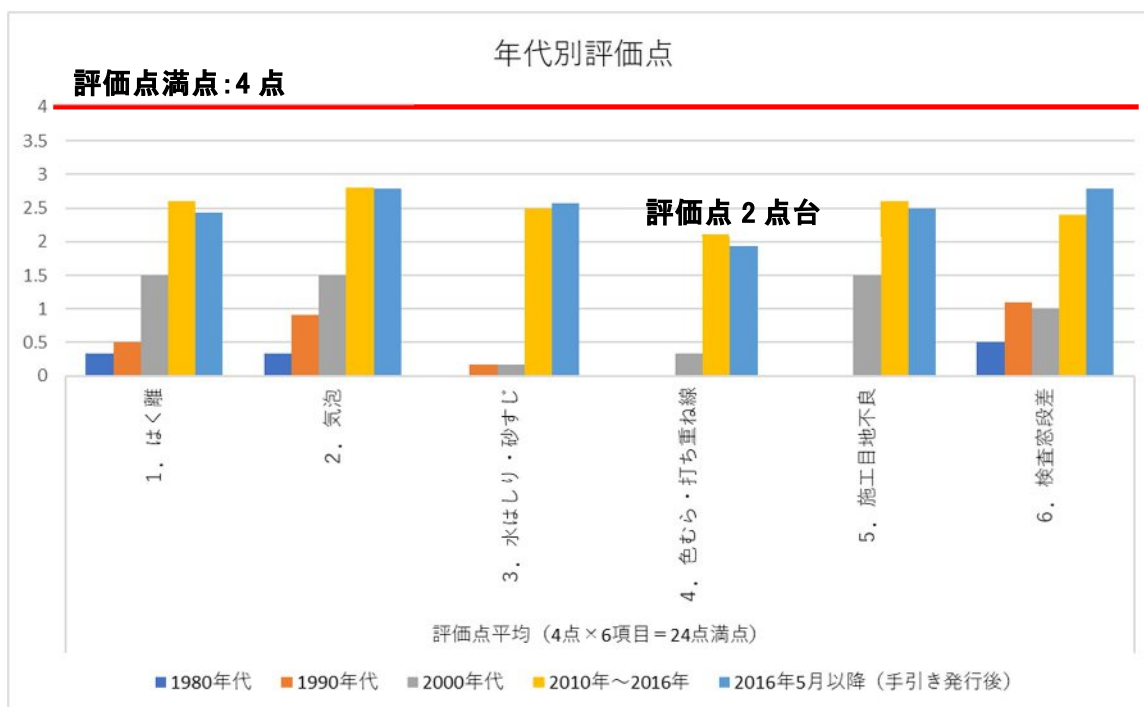


図-2.5.4.6 年代別表層目視評価結果

## (2) 表層目視評価点の推移に対する考察

年代が経過するにつれて表層目視評価点が向上してきた要因は、①発注方式の変遷、②セントルの変遷、③施工目地形式の変遷、④養生技術の変遷が主な理由であると推察する。

①発注方式の変遷について図-2.5.4.7に示す。従来のトンネル覆工は、「化粧巻き」という概念からコンクリートを充填することに目的があり、品質確保が疎かであったと推察される。1999年に山陽新幹線でコンクリート塊のはく落事故が発生し、2004年にはコンクリートへの加水が社会問題となり、単位水量の測定が義務化されている。その後、2005年に品確法が制定され、2006年に総合評価落札方式が拡大されるようになり、2007年には東北地方整備局で覆工コンクリートの品質・耐久性確保対策が技術提案のテーマに採用された。さらに、2012年には、覆工コンクリートに5年長期保証制度が適用されたことで、品質・耐久性を確保するための取り組みが必須事項となったため、2010年代以降の目視評価点が向上したものと推察される。このように、表層目視評価点の向上は、発注形態に大きく関係している。

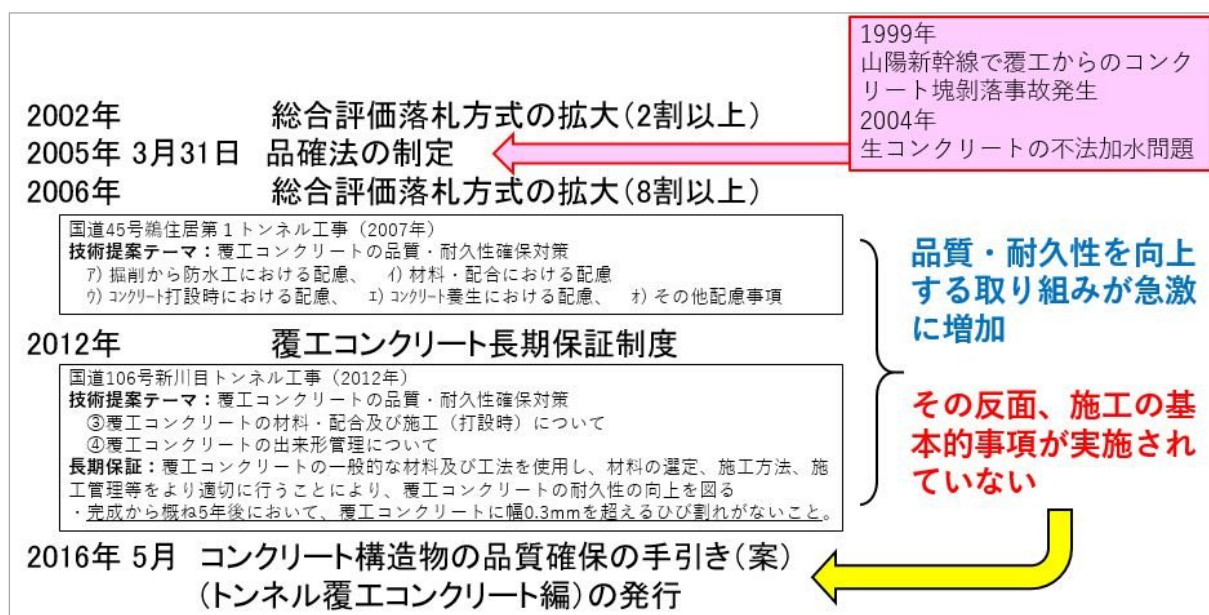


図-2.5.4.7 発注方式の変遷

②セントルの変遷を図-2.5.4.8に示す。現在でも標準的に使用されている、面板にスチールを用いたセントル(全断面スチールフォーム)は1980年代に開発された。1990年代に品質の確保や省力化を目的とした自動配管切替装置、ベルト式ケレン装置、検査窓数を増設したセントルが開発され、セントル設備が充実したことが表層目視評価点の向上に寄与したと考えられる。さらに、2005年の品確法制定前には、締固めを確実にするための各種バイブレータの開発、2000年代には押上げひび割れを防止するためのクラック防止システムや若材齢のコンクリート強度を把握するための積算温度管理システムが開発され、長期品質保証や総合評価方式の対応として、これらのシステムの活用が進んだことで、2010年代以降の表層目視評価点の向上に寄与したと考えられる。



品確法(2005) 手引き発行(2016)  
長期保証(2012)

年代	昭和55	60	平成2	7	12	17	22	27	令和2
型式・作業区分	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
1 型式	全断面鋼削 (NATM) 全断面スチールフォーム		全断面スライドセントル			テレスコ型全断面スチールフォーム			
	18mロングスパン全断面スチールフォーム		4車線第2東名・名神用スチールフォーム			中・高流動コンクリート対応型			
	全自動化全断面スチールフォーム		二般標準全断面スチールフォーム			自動化システム搭載全断面スチールフォーム			
2 移動	レール移動装置								自動レールシステム
							自動走行セットシステム		
3 セット・脱枠	フォームセットシステム			遠隔操作セットシステム			自動セットシステム		
	電動式上下装置		各種の省力・省人システム						
4 コンクリート打設	エレファントノズル	バイブレータロボット	浮きバイブレータ	天端引換バイブレータ	コンクリート充填確認センサー	自動打設システム		自動壁バイブシステム	
	配管切替装置		センサーバイブレータ			自動壁バイブシステム			
	強性体式妻板	コンクリート感知センサー	伸縮式妻板		コンクリートポンプ運動システム				
	各種の省力・省人システム		圧力測定センサー						
5 品質・ケレン	セラミックコート	ベルト式ケレン装置	ステンレスコート		面状集塵体加蓋養生				
	スリットフォーム	養護計測・コンクリート締固め作業用検査窓の増設			クラック防止システム				
						覆工コンクリート養生システム			
						積算温度管理システム			



※岐阜工業(株) 提供資料を一部加工

※全断面スチールフォーム：面板がスチールのセントル

※全断面スライドセントル：短距離・非常駐車帯用の面板が既成のメタルフォームのセントル

図-2.5.4.8 セントルの変遷



※自動配管切替装置，検査窓数増設

写真-2.5.4.11 標準的な全断面スチールフォーム

セントルの構成部材のうち、表層品質に最も関係する面板の種別と検査窓数が表層目視評価点にどのように影響するのか考察を行った。

面板種別・検査窓数と表層目視評価点との関係を図-2.5.4.9に示す。メタルフォームとスチールフォームを用いた表層目視評価点を比較すると、検査窓数が少ない年代を除いて、全ての評価項目でスチールフォームの評価点が優位となった。特にスチールフォームは、はく離、水はしり・砂すじ、色むら・打ち重ね線の評価項目で効果を発揮している。

検査窓数の比較では、検査窓数が増加するにつれて表層目視評価点が向上する傾向にある。検査窓数の増加により、目視での締固めが可能となったのが要因と考えられる。ただし、スチールフォームでは、検査窓数36から49のグループと50以上のグループで評価点がほぼ同等となり、評価点の向上効果が少ない結果となった。今回の調査から判断すると、検査窓数は、延長方向7列、周方向7列、計49箇所が品質・経済性の観点から最適と考えられるが、トンネル毎に打込み方法やコンクリートの仕様等が異なるため、事前の施工計画により最適な検査窓数・配置位置を設定する必要があると考える。

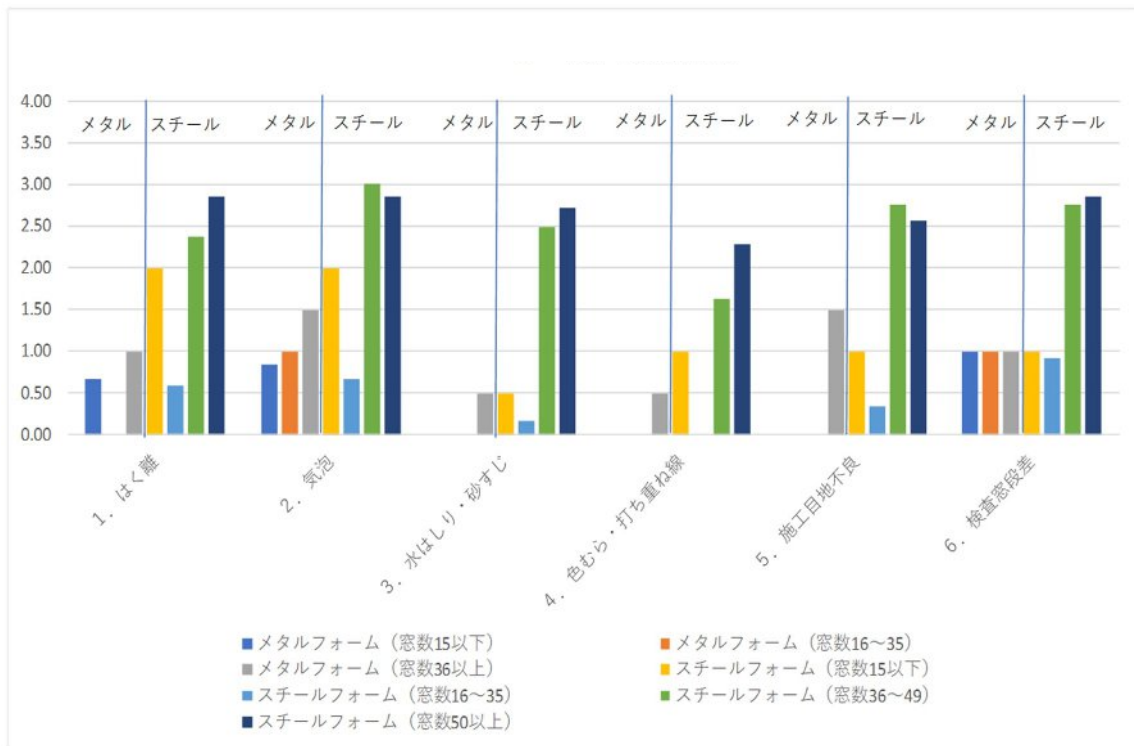


図-2.5.4.9 面板種別・検査窓数と表層目視評価点の関係

③施工目地形式の違いによる表層目視評価点を図-2.5.4.10 に示す。施工目地の不具合は、うき、はく離、はく落に進展する事例が多く、第三者被害のリスクが高い。2000年以前は、施工目地部に断面欠損を設置しない突合せ目地が多く施工され、多くの施工目地で不具合が発生していたため、表層目視評価点は0点である。2000年から2015年では、台形目地が使用されたことで不具合が減少したため、評価点は1.6点に向上した。その後、中国地方整備局が2014年の長期保証制度導入時に施工目地の標準仕様を三角目地に変更(図-2.5.4.11)したことで、全国で標準的に使用されるようになってから、評価点は2.7点まで向上した。しかし、現在の定期点検においても、施工目地が不具合の発生頻度が多いと報告がある。このため、施工目地の縁切り対策や目地部周辺コンクリートの締固め方法の工夫などの更なる改善が進められている。

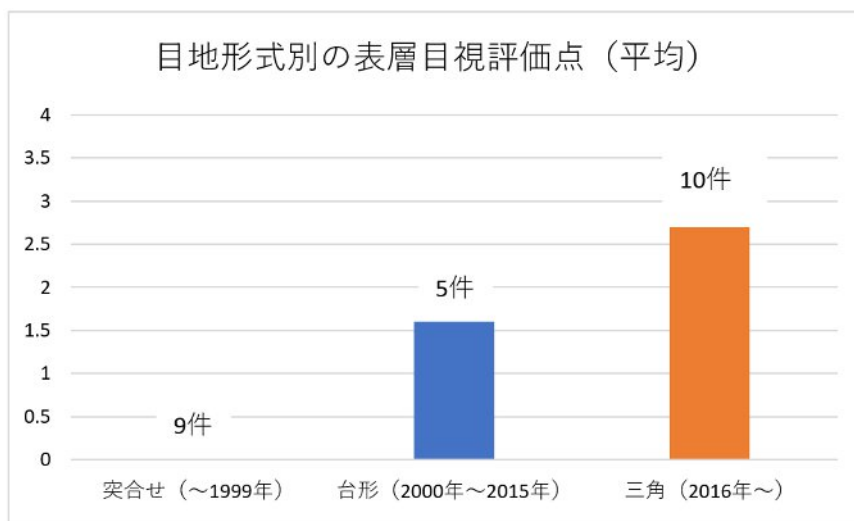


図-2.5.4.10 目地形式別の表層目視評価点

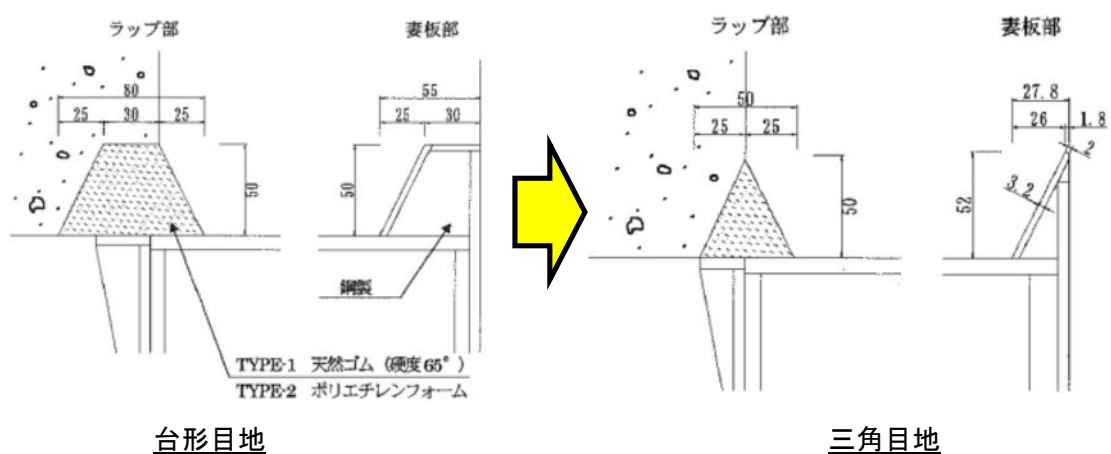


図-2.5.4.11 施工目地形式の変更

④養生方式の比較表を表-2.5.4.5に示す。覆工コンクリートは、従来は化粧巻きであるという概念から、品確法の制定や総合評価方式が導入されるまで養生が行われていなかったのが実態である。最初に開発された養生方式は2003年に密着方式のバルーンタイプで、その後にさらに養生効果を高める目的で、保水性材料の採用や給水タイプが開発された。養生は、表層目視の評価項目に対する直接的な効果は少ないが、コンクリートの緻密化を図ることで、拘束ひび割れ、乾燥ひび割れ、施工目地部の収縮・膨脹によるひび割れなどに対する抵抗性や劣化因子の浸透に対する抵抗性の向上に寄与している。

表-2.5.4.5 養生方式比較表

分類	密閉方式		密着方式				
			給水タイプ			水分逸散防止タイプ	
	ミスト		散水			ナイロン	シート
形式	ミスト噴霧	不織布給水	バルーン給水	バルーン給水	気泡シート給水	バルーン密着	シート貼付け
内容	専用台車の両端にアー子状のバルーンと台車部にシートを張り密閉状態を保つ	特殊薄膜不織布と凸凹マットを台車付バルーン上に設置し、バルーンの圧力で養生シートをコンクリート面に押し上げ、5本の給水チューブで給水する	専用台車上部全体をバルーンで覆いバルーンと覆工面を密着させ、3本の給水チューブで給水する	気泡シートをバルーン付き台車に設置し、バルーンで気泡シートを押し上げ、バキュームポンプにて吸引し、同時に給水する	気泡シートを専用台車にて取付けバキュームポンプにて吸引し、同時に給水する	専用台車上部全体をバルーンで覆いバルーンと覆工面を密着させる	シートを特殊接着のりで覆工面へ貼る
湿润養生種類	給水養生		給水養生			保水養生	
養生湿度	90%以上	100%	100%	100%	100%	90%以上	90%以上
代表写真							
年代	③2007年	⑦2015年	②2005年	⑥2014年	④2010年	①2003年	⑤2012年

※(株)東宏 提供資料を一部加工

以上より、トンネル覆工の施工に起因する不具合の発生は、年代別の表層目視評点の推移からもわかるように、①発注方式の変遷、②セントルの変遷、③施工目地形式の変遷、④養生技術の変遷に大きく関係している。従来から化粧巻きとして品質確保の意識が無く構築されてきた覆工コンクリートは、加水問題や剥落事故等の社会的問題にまで発展した。その後、品確法の制定や総合評価方式の導入により、品質確保の重要性が認識されるようになった。社会的に覆工に対する意識が変化してきたのと同時に、施工方法の改善や技術開発が進んだ結果、施工に起因する不具合の発生は減少してきている。

### (3) 施工に起因する不具合による材料劣化

施工に起因する材料劣化は、表層目視評価の判定基準である、①はく離、②気泡、③水はしり・砂すじ、④色むら・打ち重ね線、⑤施工目地不良、⑥検査窓枠段差の6項目がひび割れ等の材料劣化に進展する事例がある。この他に、コンクリートの充填・締固め不良が原因で、補修が必要な豆板が発生し、補修箇所が劣化してしまう事例や打込み時のコンクリートの側圧や防水シートの溶着不良等が原因で防水シートが損傷し、漏水により材料劣化を進展させる事例などがある。ここでは、本調査で確認した不具合が、将来どのような材料劣化に進展するか、事例に基づき示す。

打重ね管理や締固め不足が原因で発生する打重ね線は、乾燥収縮等により将来的に有害なひび割れやエフロレッセンス析出に進展すると予測される。同一トンネルの事例では無いが、写真-2.5.4.12に材料劣化の事例を示す。

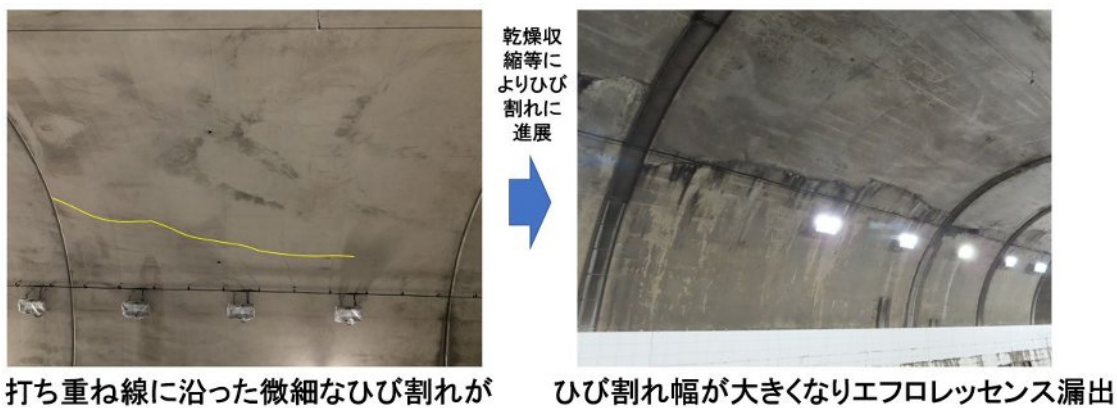


写真-2.5.4.12 打ち重ね線の材料劣化の予測事例

天端部において、ブリーディングやノロの排出が不十分で性状が異なるコンクリートを打重ねた場合や締固め不足が原因で発生する色むらや微細なひび割れが、将来的にエフロレッセンス析出や亀甲状のひび割れに進展し、さらにブロック化した場合は、はく落等により第三者被害をもたらすと予測される。同一トンネルの事例では無いが、写真-2.5.4.13に材料劣化の事例を示す。

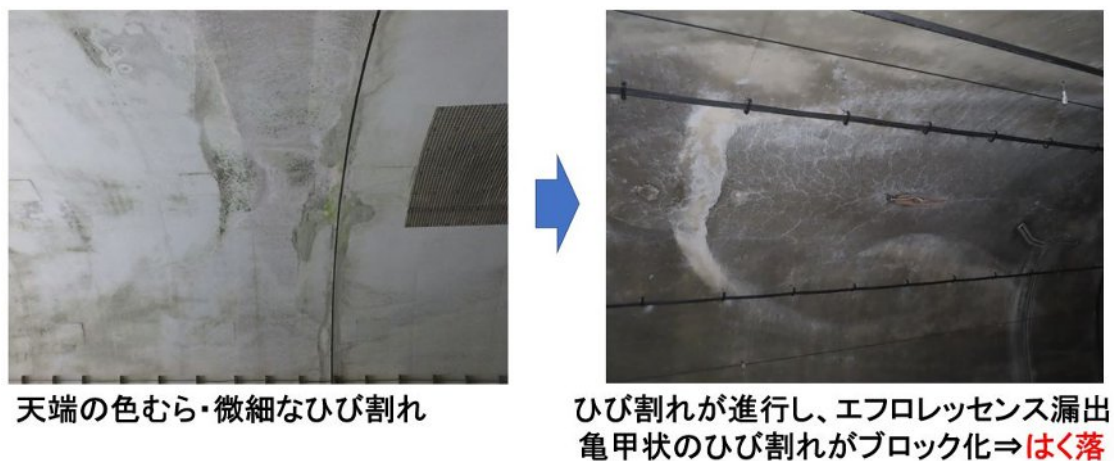


写真-2.5.4.13 天端部の色むら等の材料劣化の予測事例

側壁・アーチ部の施工目地部付近において、ブリーディングやノロの排出が不十分で低品質のコンクリートを打込んだ場合や締固め不足が原因で発生する水はしり・砂すじ、打込み時の打重ね管理や締固め不足が原因で発生する打重ね線が、将来的に有害なひび割れやエフロレッセンス析出に進展すると予測される。さらに漏水を伴う場合は、冬期につららが発生し、第三者被害をもたらすことも予測される。同一トンネルの事例では無いが、写真-2.5.4.14に材料劣化の事例を示す。



明瞭な水はしり・砂すじ、打重ね線が

ひび割れに発展し、漏水・エフロレッセンス漏出  
⇒冬期に漏水が凍結、つららの発生

写真-2.5.4.14 施工目地部付近の打重ね線等の材料劣化の予測事例

施工目地部において、ブリーディングやノロの排出が不十分で低品質のコンクリートを打込んだ場合や締固め不足が原因で発生する施工目地不良が、ひび割れ、うき、はく離に進展し、はく落等により第三者被害をもたらすと予測される。同一トンネルの事例では無いが、写真-2.5.4.15に材料劣化の事例を示す。



施工目地部の低品質なコンクリートが

うき・はく落・ひび割れに発展し、たたき落とし後に、はく落防止ネット設置

写真-2.5.4.15 施工目地不良の材料劣化の予測事例

鉄筋区間の施工目地部において、ブリーディングやノロの排出が不十分で低品質のコンクリートを打込んだ場合や締固め不足が原因で発生する施工目地不良が、ひび割れ、うき、はく離に進展し、鉄筋を腐食させることで、耐久性が低下する要因になると予測される。同一トンネルの事例では無いが、写真-2.5.4.16 に材料劣化の事例を示す。



目地部に生じたひび割れが



うき・はく落に発展し、鉄筋に腐食が発生  
⇒耐久性の低下

写真-2.5.4.16 鉄筋区間の施工目地不良の材料劣化の予測事例

本調査では、個別の施工に起因する不具合に着目し、長期的なスパンでどのように材料劣化が進展するのか把握できていない。今後は、個別の代表的な不具合に対して継続調査を行い、劣化過程について把握していくことが課題となる。

#### (4) 品質確保の手引き発行後の施工事例

東北地方整備局では、震災復興の試行工事で取り組んできた成果をまとめ、2016年5月に「コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)、トンネル覆工コンクリート編」を発行している。手引きでは、東北地方の自然環境やトンネルが供用される地域の環境を踏まえ、現状のトンネル覆工の課題を解決して、十分な耐久性をもつ覆工の構築が求められている。その方法として「施工状況把握チェックシート」と「表層目視評価シート」が活用され、施工に起因する不具合を無くす取り組みが進められている。

手引き発行後のトンネルでは、手引きの趣旨を理解し、継続的に品質改善に取り組んだ事例がある。しかし、手引き発行後においても、品質確保の取り組みが不十分なトンネルも散見されているため、以下に好事例と失敗事例を紹介する。

品質確保の手引きに準じて、覆工の全スパンで表層目視評価を行い、打込み完了スパンで発生した不具合の原因の追及と対策を繰り返し、継続的に評価点の向上を図った好事例を紹介する。表層目視評価点の推移を図-2.5.4.12に示す。打込み初期の段階では、満点24点のうち20点台であったのが、右肩上がりに向上し、打込み後期には22点台まで改善されている。このトンネルでの主な取り組み内容を表-2.5.4.6に示す。覆工コンクリートの出来ばえを写真-2.5.4.17に示す。

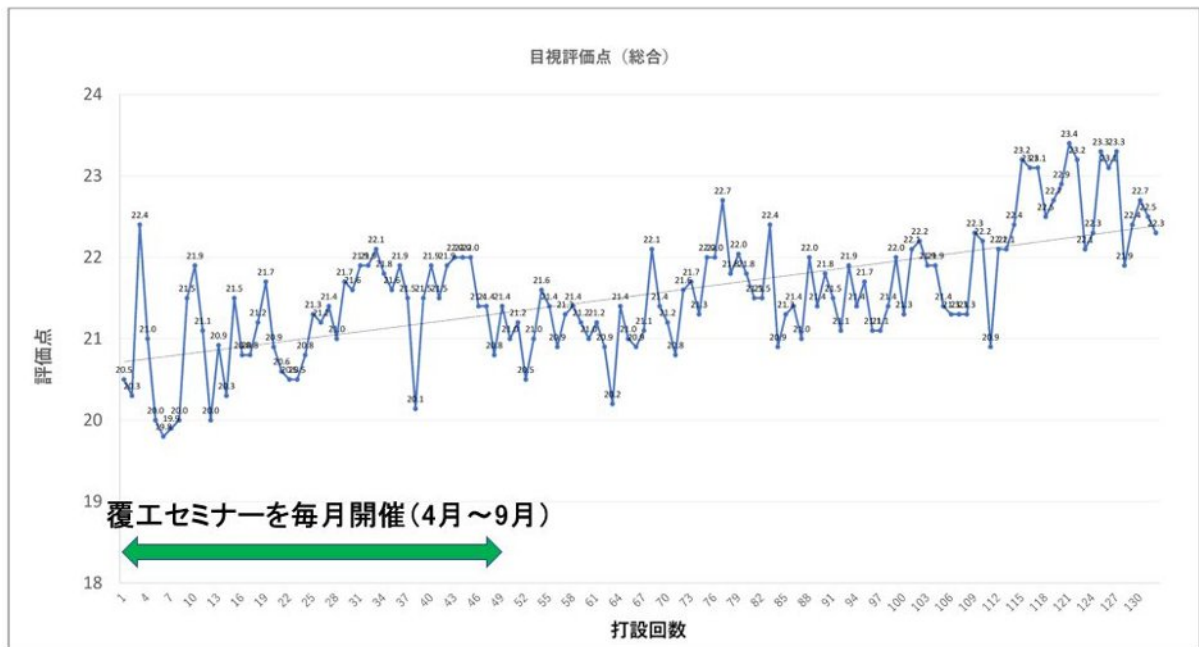


図-2.5.4.12 表層目視評価点の推移



表-2.5.4.6 主な取り組み内容

改善評価項目	取り組み内容
全体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 覆工に従事する関係者全員で「覆工セミナー」を打込み前及び打込み期間（毎月）開催し、不具合内容・箇所の発生原因の追究と対策を繰り返し行った。覆工従事者の品質確保の意識向上に努めた。</li> </ul>
①はく離，④色むら	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 4種類のはく離剤の試験施工を行い、はく離・色むらの発生を低減できる材料を選定した。</li> <li>・ コンクリートの流動によりはく離剤がとれてしまう肩部及び天端吹上げ口の周辺にスプレー型のはく離剤を使用し、打込み途中で随時塗布を行った。</li> </ul>
②気泡，③水はしり，砂すじ，④色むら，打重ね線	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ SL下の傾斜部にスパイラルバイブレータを使用した。また、打設速度を遅くし、丁寧な締固めを実施した。</li> <li>・ 天端打設範囲には流動化剤を添加し、流動性を確保した。スランプは1~2cm増加を目安とした。</li> </ul>



写真-2.5.4.17 覆工コンクリートの出来ばえ

品質確保の手引きが発行された後に施工されたトンネルではあるが、品質確保の取り組みが不十分で、継続的な品質の確保が実施できなかった事例を紹介する。このトンネルは、流動性の高いコンクリートを使用し、覆工の品質・耐久性の向上を図っている。しかし、施工の基本的事項の実施が不十分で、不具合の発生原因の追究と対策の実施の繰り返しを実施できなかったため、連続スパンで同じ箇所と同様の不具合（はく離）が発生してしまっている。不具合の発生事例を写真－2.5.4.18 に示す。



写真－2.5.4.18 連続スパンでの不具合発生事例

品質確保のための留意点は、施工中に生じる不具合の抑制に向けて、日々施工方法の改善に努めることにある。型枠脱型後に改善を要する不具合が確認された場合には、覆工に関係する従事者とともにそのスパンの打込みの振り返りを行い、原因の追究と改善策を検討し、次のスパンの打込みに反映するなどして、継続的に改善を図ることが重要である。

こうした品質確保の取り組みの進展により、品質確保の意識が無かった時代に発生していた施工に起因する重大な不具合（初期欠陥）は減少した。しかし、現在でも覆工に関係する従事者の品質確保に対する意識には差があり、コンクリートの本来持つべき品質まで確保できていない実態も確認される。このため、産官学が一体となり、品質確保の手引きの周知や啓蒙活動を通じて意識の定着化を図り、全体的な底上げを行っていく必要がある。

〔担当 三井 功如〕

## 2. 6 まとめ

本章では、施工に起因する不具合と耐久性に影響を及ぼす劣化要因、及び RC 床版とトンネル覆工など施工の影響を大きく受けるコンクリート部材の材料劣化について述べた。これらをふまえ、東北地方のコンクリート構造物について施工に起因する不具合の事例を示した。

コンクリート構造物では、施工に起因して様々な初期欠陥が生じる。これに対し、東北地方では凍結防止剤に含まれる NaCl によって、塩害や ASR、凍害による劣化が進行し、耐久性の低下に大きく影響している。

現在では、これらの塩害や ASR、凍害などの劣化要因に対し、耐久性を確保するための様々な対策がとられているが、コンクリートの品質は施工の影響を大きく受けるため、施工に起因する不具合によって十分な効果を発揮できない場合もある。

本章では、施工に起因する不具合の事例を紹介しているが、構造物の定期点検などにより確認されている劣化は、そのほとんどが施工の不具合による初期欠陥によるものであり、初期欠陥の発生を抑制することで、コンクリート構造物の維持管理コストの縮減が期待できる。

RC 床版の劣化の進行による陥没やトンネル覆工の剥落は、第三者被害の発生にも直結する劣化であり、これらの劣化にも少なからず施工の不具合が影響している。したがって、構造物の状態を長期にわたって健全な状態に保ち、将来の維持管理コストを縮減するためには、設計で期待した耐久性を確保するための適切な施工が重要であると考えられる。

なお、本章で述べた施工に起因する不具合のうち、打継ぎ、打重ねなどのひび割れが構造的にどのように影響するかについては、次章の解析的検討で詳細に述べる。

〔担当 飯土井 剛〕

### 3. 施工による不具合がコンクリート構造物の安全性に及ぼす影響に関する解析的検討

#### 3. 1 概説

本検討は、施工の良否によって生じる初期ひび割れの予測とそれが耐震性能に及ぼす影響を定量的に評価することである。前者の検討については、実物を対象に検討を行うため、解析結果の検証が可能であった。他方、後者の検討では、実験的に耐震性能を確認することは困難であるため、解析結果の信頼性を可能な限りに提示する必要がある。また、解析対象橋台に対して異なる解析コードを使用するため、コードの違いが結果に及ぼす影響も確認しておきたい。そこで、検討の前段として、仮想の形状・配筋・材料特性を設定した橋台を対象に、2つの汎用解析コードを用いた共通解析を実施した。2つのコード間で応答値に大きな違いがないことを確認し、続いて、理論値との比較を介した妥当性確認を行う。この過程によって得られたモデルは、実験値との比較はできないものの、信頼性のある解析解となり得る。最後に得られた解析手法をベースに各章にて橋台の耐震性能を評価する。

#### 3. 2 共通解析

##### 3. 2. 1 解析条件と対象構造物

図-3.2.1.1に共通解析の概要を示す。1990年代に施工された東北地方のRC橋台を模した縮尺した仮想構造物である。高さは1900(mm)であり、脚部は固定とした。軸力比は上部構造物による自重を考慮して、軸力比で0.1とし一定とした。载荷は、頂部の鋼板(緑色)に水平変位を与えるため、躯体には逆対称曲げが作用する。その他、断面形状、配筋および材料特性は図中に示すものとする。本ワーキングでは、解析コードとしてATENAとDIANAを使用し、2次元解析を実施した。コンクリートは平面応力要素、主筋とせん断補強筋は埋め込み鉄筋要素、境界条件および荷重条件は図中の通りとし、共通事項とした。

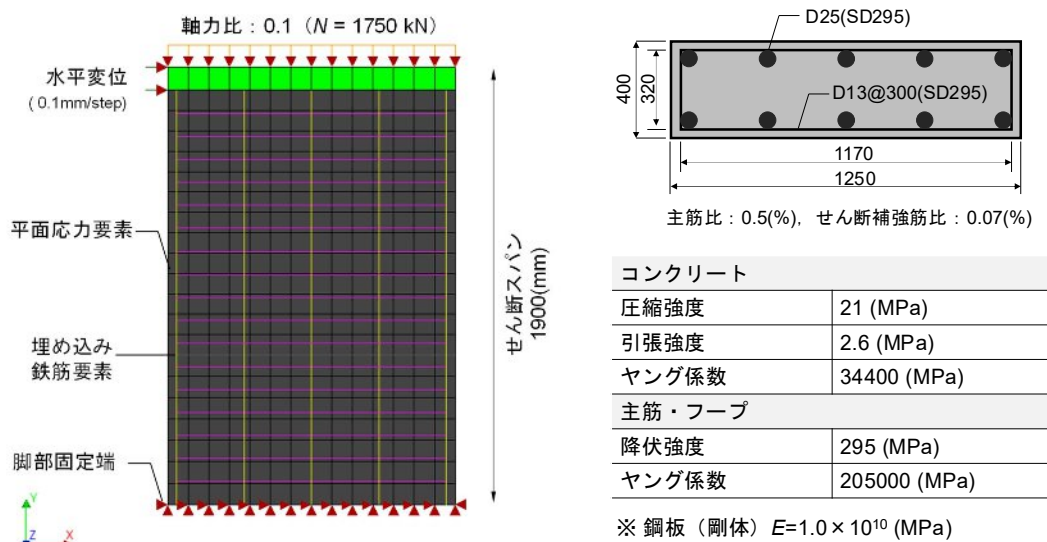


図-3.2.1.1 共通解析の概要

表-3.2.1.1 材料構成則と求解法

解析コード		ATENA	DIANA
圧縮側コンクリート	構成則	Hyperbola A 型	Hognestadt 型 <sup>1)</sup>
	圧縮破壊エネルギー	—	—
	拘束効果 (強度)	Kolmer モデル	Mander モデル <sup>2)</sup>
引張コンクリート	構成則	Exponential 型	2 直線-脆性
	破壊エネルギー	—	—
	Tension stiffening	—	—
ひび割れモデル		回転ひび割れ	回転ひび割れ
圧縮強度低減		Cruch band モデル	JSCE モデル <sup>3)</sup>
求解法		Newton-Raphson 法	Newton-Raphson 法

表-3.2.1.1 に考慮した構成則と求解法の比較を示す。DIANA では、コンクリートに対して全ひずみ型回転ひび割れモデルを採用し、引張および圧縮側に対して 1 軸応力-ひずみ関係を指定した。一般に、コンクリート材料に対して要素寸法に依存する局所破壊を回避するため、レギュラリゼーションを施すことが不可欠である。しかしながら、本節がコード間の検証に主眼を置いていることもあり、詳細な指定は避けることにした。同様の理由から、面材に対して考慮される鉄筋との付着特性、すなわち、Tension stiffening (引張硬化) も重要なパラメータであることは認識しているが、考慮していない。ただし、ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減は、最大耐力ならびにポストピークに大きな影響を及ぼすことは過去の研究から自明であるため考慮に入れることにした。最後に、求解法は Newton-Raphson 法を採用し、荷重は変位制御 (1 ステップ 0.1mm を 25 回、合計水平変位 25mm) とした。

ATENA でも、DIANA の解析とほぼ同様の条件を設定した。ただし、ソフトウエアの都合で使用している材料の構成則に若干の違いがある。

### 3. 2. 2 解析コード間の検証

図-3.2.2.1 に共通解析の結果を示す。荷重-変位関係について、荷重は脚部固定端の  $x$  方向反力を合計し評価した。図中のひび割れ図は、最終ステップ時の分布を示している。荷重-変位関係に着目すると、DIANA は 2 ステップ目から剛性が相対的に下がるものの、7 ステップ目に大きく荷重が低下する点は、ATENA と共通する。その後、両コードとも荷重が再び上昇し、最大耐力を迎えた後、軟化する。全体として、DIANA は作用変位に対する荷重が低いものの、全体傾向は同様であった。最終ステップ時におけるひび割れ図を見ると、対角方向と逆対称曲げの引張側 (左下端部と右上端部) と圧縮ストラットに沿ったひび割れが発生している点は、良好に一致している。このように、表-3.2.1.2 に示す構成則の違いは、最大耐力や軟化域における破壊性状に大きな影響を及ぼさない。しかしながら、異なる解析コードを使用する場合、初期剛性の評価には注意が必要である。これは、剛性評価が重

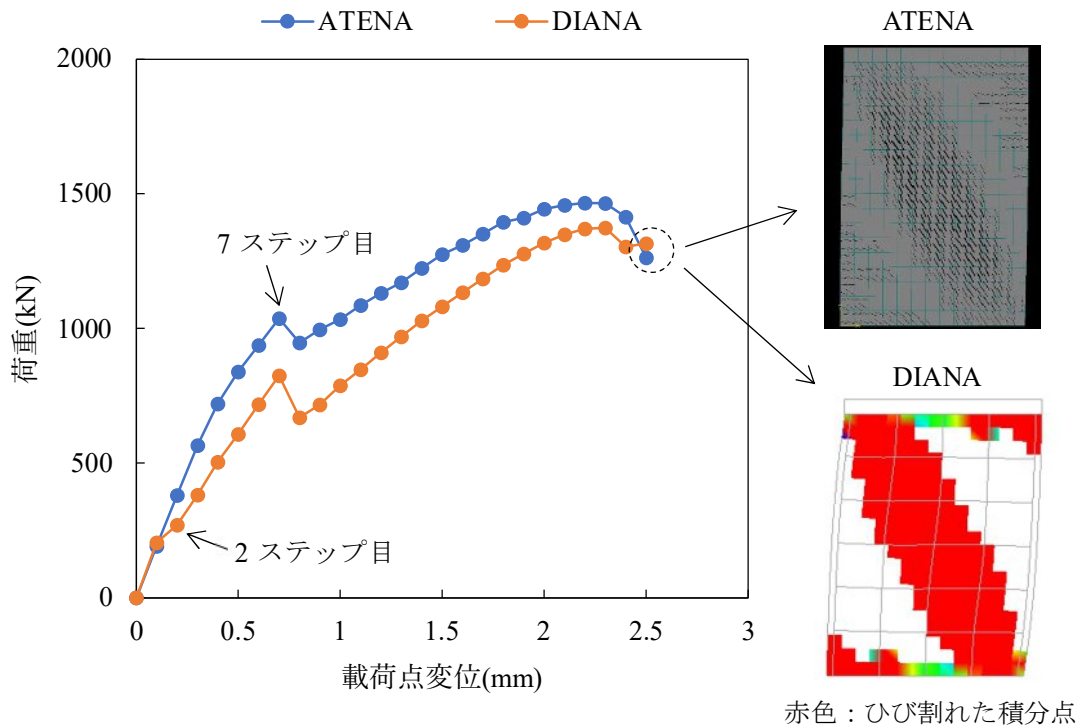
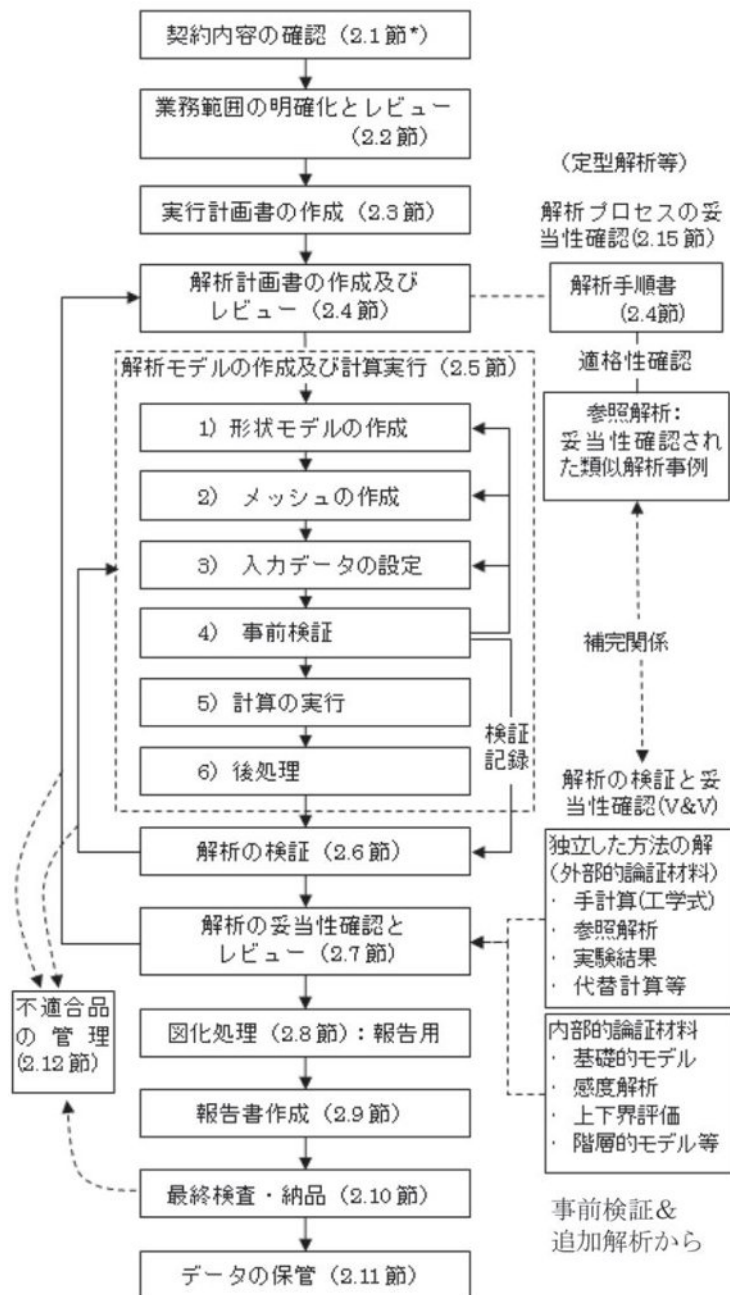


図-3.2.2.1 共通解析結果の比較

要な局面となる場合、すなわち使用限界状態を評価する際には、なるべく複数の汎用解析コードによる評価を実施し、多角的な分析が極めて重要であることを示唆している。

### 3.2.3 妥当性確認

近年のコンクリート工学分野における研究潮流の1つとして、Verification and Validation (以下、V&V)が挙げられる。シミュレーションの品質保証の枠組みを具体化したこのような取組は、大きく2つに大別される：モデルV&Vと品質V&Vである。一般に、前者は、シミュレーションのモデル開発における予測性能評価に主眼を置いたものであり、本ワーキングの対象ではない。むしろ後者が、本ワーキングが着目した点である。すなわち、数値シミュレーションプロセスに対する品質マネジメントが本節の目的と合致するものと考えられる。前者のモデルV&Vに対するコンクリート工学への適用は、すでに、2020年～2022年にかけて日本コンクリート工学会内に設置された「コンクリート構造物の構造・耐久性シミュレーションにおける検証と妥当性確認に関する研究委員会」にて報告されており、詳細は同報告書から入手することができる。最後に、文献4)に示されている日本計算工学会が発刊した品質V&Vのフローを紹介する。図-3.2.3.1に同学会が発刊したフローを示す。構造解析や流体解析などの解析業務を行う場合の標準的な手順がまとめられており、本章では解析の妥当性確認とレビューに着目する。ここでは、独立した方法による解と解析



\*)図中の節番はHQ002本文に対応

図-3.2.3.1 日本計算工学会発刊の標準手順<sup>4)</sup>

結果の比較が必要とされており、その方法として手計算や妥当性確認済の類似解析ならびに別の解析モデルによる代替計算が挙げられている。本ワーキングでは、品質 V&V に対するコンクリート工学への適用として、2つの設計式から誘導される骨格曲線を求め、それを独立した方法と位置付ける。得られた骨格曲線と有限要素解を比較し、トライ&エラーによって設計段階において実験的に性能を確認することができない橋台に対して、信頼性のあ

る解析アプローチを提示する。本章では、日本建築学会により整備されている2つの設計式を用いて評価する。ただし、次の点に留意する。

- ・ 曲げ強度の予測には、建築物の設計で使用される技術基準解説書に従う<sup>5)</sup>。
- ・ せん断強度の予測には、日本建築学会終局強度指針 A 法に従う<sup>6)</sup>。
- ・ 上記の2式は、梁や柱をはじめとする線材に対する設計式である点に留意する。

上記の留意点における3つ目は、**図-3.2.1.1**に示すような面材には適切ではない可能性を指摘しているものである。加えて建築構造物を対象としているため、スケールも土木構造物とは異なる。しかしながら、適切な設計式の選択を示すことは本ワーキングの検討領域を超えるため、ここでは上記に従うこととする。

**図-3.2.3.2**に各強度式の計算結果と共通解析結果を示す。強度式について、荷重直後から荷重変位 2mm までは曲げ応答が卓越し、変位 2mm 以降はせん断応答が支配的となる。よって、この仮設構造物は曲げ降伏後のせん断破壊を示すことが分かる。続いて、解析結果との比較に着目する。初期剛性は両解析コードとも強度式を下回り、DIANA の結果はより早期に曲げひび割れが発生していることが分かる。しかし、2次剛性は対照的である。その傾きは ATENA の結果が強度式を上回るものの、DIANA の結果は2次剛性を概ね模擬している。最大耐力点は、強度式を ATENA は 15%、DIANA は 7%を上回っていた。ただし、最大耐力点の変位は強度式と解析値の間に開きがある。最大耐力を迎えた後は、軟化挙動を示しており、これは**図-3.2.3.2**に示したせん断ひび割れの影響である。以上をまとめると、解析モデルの妥当性は、①初期剛性、②最大耐力と対応する変位を改善することによって得られるものと考えられる。これを受けて、**表-3.2.3.2**に示す検討解析を実施した。

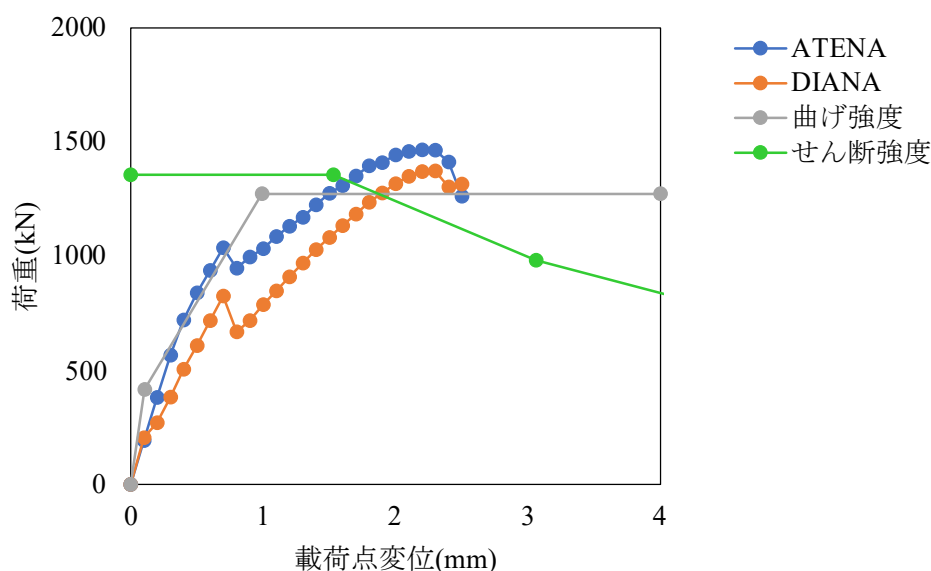


図-3.2.3.2 曲げ強度，せん断強度および共通解析結果の比較



表-3.2.3.2 検討解析一覧

検討ケース		Case1	Case2	Case3	Case4
圧縮	1軸特性	Hognestadt 式	放物線	放物線	放物線
	$G_{fc}$	—	Nakamura & Higai <sup>7)</sup>	Nakamura & Higai <sup>7)</sup>	Nakamura & Higai <sup>7)</sup>
	拘束効果 (強度)	Mander et al.	Mander et al.	Mander et al.	Mander et al.
引張	1軸特性	2直線	2直線	2直線	Tension Stiffening (岡村&前川 <sup>9)</sup> )
	$G_f$	CEB <sup>8)</sup> ( $d_{max}=16mm$ )	CEB <sup>8)</sup> ( $d_{max}=16mm$ )	CEB <sup>8)</sup> ( $d_{max}=16mm$ )	$C_0=0.4$
圧縮強度低減		JSCE	JSCE	Vecchio&Collins <sup>10)</sup>	Vecchio&Collins <sup>10)</sup>

表-3.2.3.2 に検討解析の一覧を示す。検討は、代表して解析コード DIANA を使用する。Case1 は、当初のモデルから引張側コンクリートの特性を変更している。これは、初期剛性へのコンクリートの寄与を改善するためである。ここでは、使用する骨材径を 16mm と仮定し、対応する破壊エネルギーを算出するとともに、得られた破壊エネルギー $G_f$ を介して要素の終局ひずみを決定するため、要素代表長さを考慮した Rots らの提案式を採用している。Case2 は、予測する最大耐力を改善するため、Case1 をベースに圧縮側コンクリートにおいてもレギュラリゼーションを実施している。具体的には、圧縮破壊エネルギー $G_{fc}$ を Nakamura と Higai の評価式から算出し、引張側と同様に終局ひずみを算出している。Case3 は、最大耐力時の変位を改善するため、Case2 をベースにひび割れたコンクリートの圧縮強度低減モデルを Vecchio と Collins (1993) のモデルに変更したものである。最後に、引張硬化が応答に及ぼす影響を確認する (Case 4)。

図-3.2.3.4 に検討結果 (荷重-変位関係) を示す。Case1 から分かるように、破壊エネルギーの考慮が初期剛性の改善に大きく貢献している。ただし、ポストピークはせん断強度式と乖離しており、これはアーチ機構に寄与する圧縮ストラットのモデル化、すなわち、圧縮側コンクリートの局所化が一因と推察される。それを改善した Case 2 では、予想と反して最大耐力値は大きく異なる値を示した。これは、コンクリートの圧縮抵抗が改善されたものの、圧縮ストラット上に存在するひび割れたコンクリートの強度低減に改善が必要であることを示している。そこで、Case3 では、これまでと異なるアプローチとして、Vecchio と Collins による強度低減モデルを採用した。すると、最大耐力後のポストピークは、せん断強度式を概ね模擬する結果となった。Case4 は、鉄筋とコンクリート間の付着を考慮したものである。図から分かるように、プレピークの剛性が他の検討ケースと比較して大幅に改善されている。しかしながら、最大耐力は強度式を大きく過大評価した。今回、引張軟化特性を決定する係数  $C_0$  を 0.4 としたが、この値が応答に及ぼす影響は極めて敏感であることが既往の研究から分かっている<sup>9)</sup>。本ワーキングではその視点に立ったパラメトリックスタディは実施しないが、実務における 1 つの注意点として理解しておく必要がある。最後に、最も

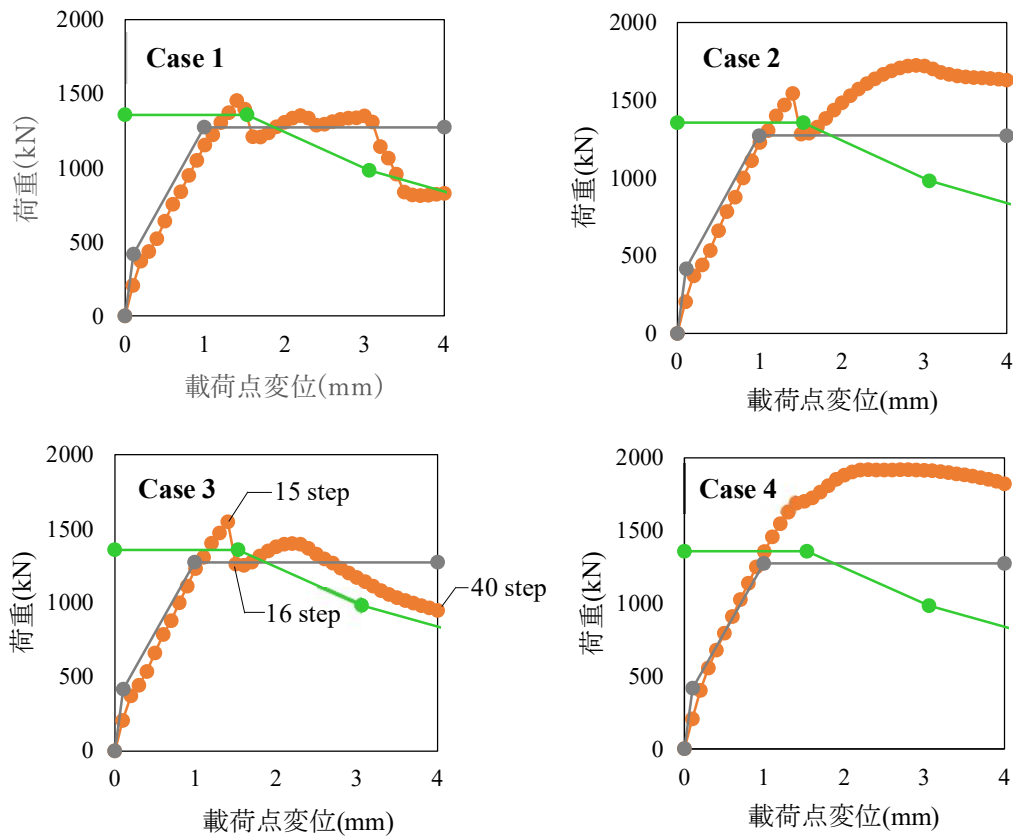


図-3.2.3.4 検討解析結果：荷重－変位関係（凡例は図-3.3に同じ）

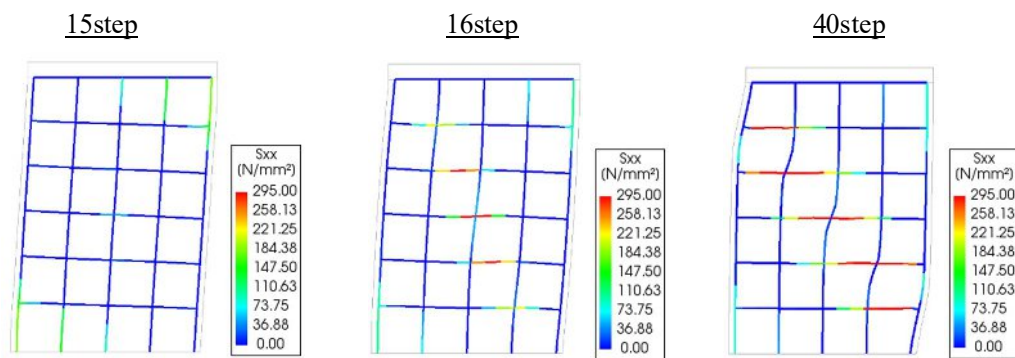


図-3.2.3.5 Case 3における鉄筋に生じた応力度分布の経過：

良好なシミュレーション結果を与えたと判断される Case3 を対象に，コンター図を介して破壊モードを判定する。図-3.2.3.5に鉄筋に生じた応力度分布を示す。3つの応力度分布図は，図-3.2.3.4に示すCase3の荷重－変位関係中に図示した解析ステップと対応している。最大耐力時（解析の15step）目では，曲げに抵抗する圧縮鉄筋と引張鉄筋に集中して応力度が作用している。縦筋の降伏は観察されていないが，降伏応力度（295 [MPa]）に極め

て近い。このことから、最大耐力への寄与は、曲げモードが支配的である。一方、16step 目には耐力が急激に低下した。鉄筋コンター図 (図-3.2.3.5) を見ると、高さ中央のせん断補強筋に降伏応力度 (295[MPa]) 以上の応力度が作用していることを確認できる。よって、この耐力低下は、せん断破壊によってもたらされたものと断定できる。鉄筋の抵抗が支配的であるから、コンクリートはすでにひび割れており、この範囲にあるコンクリートの圧縮抵抗は著しく低下しているはずである。したがって、ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減が、以後のモデルの挙動を左右することは容易に想像できよう (Case 2 と Case 3 を比較すると良い。これらの違いは、ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減のモデル化が異なっている)。40 step 目の応力度分布をみると、16step 目と比べてせん断補強筋の降伏範囲がより広がっている。以上をまとめると、荷重-変位関係および応力度分布図から、解析対象構造物の破壊モードは、曲げ破壊後のせん断破壊と判断できる。これは、強度式によって導かれる破壊モードと一致しており、ここに解析モデルの妥当性が確認された。

#### 参考文献

- 1) Hognestad, E., N. W. Hanson and D. Mc Henry : Concrete stress distribution in ultimate strength design, ACI, Vol. 52(12), p. 455-480, 1955.
- 2) Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R.: Theoretical stress-strain model for confined concrete, *J. Struct. Eng.*, Vol.114, Issue 8, pp.1804-1823, 1988.
- 3) JSCE. JSCE Guidelines for Concrete No. 15: Standard Specifications for Concrete Structures - 2007 "Design". Tech. rep., Japan Society of Civil Engineers, 2010.
- 4) 中村 均 : シミュレーションの V&V の現状と課題, 日本原子力学会誌 ATOM, Vol.57, Issue 2, 99-103, 2015.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所 (監修) : 建築物の構造関係技術基準解説書, 2020.
- 6) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針 (案)・同解説, 1988.
- 7) H. Nakamura and T. Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, *Seminar on post-peak behavior of RC structures subjected to seismic loads*, vol.2, 259-272, JCI-C51E, 1999.
- 8) CEB Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d'Information, No.203, 1991.
- 9) 岡村甫, 前川宏一 : 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1990.
- 10) Vecchio, F. J., and Collins, M. P. Compression response of cracked reinforced concrete. *J. Str. Eng.*, ASCE 119, 12 (1993), 3590-3610.

[担当 堀川 真之・上原子 晶久]

### 3. 3. 1 K橋における温度応力解析に基づくひび割れ発生位置の評価

#### (1) K橋の概要と施工工程

本節では、K橋 A2橋台に生じたひび割れについて、その原因を検討する。対象とした橋台は、高さ 1.9m×幅 9.04m×奥行き 19mのフーチングに縦壁部の高さ 19.066m×幅 9.04m×奥行き 19mの中空の大型橋台である。本橋台の縦壁部は、2017年9月に施工を開始し7ロットに分けてコンクリートを打設し、2018年3月に施工を完了している。

施工完了直後の調査において、縦壁前面の1ロットから3ロットに至る表面に鉛直方向のひび割れが確認された。また、第2ロットと第3ロットの打継面に水平のひび割れも確認されている。これらひび割れの原因は温度応力によることが推測されたが、本研究ではそれを確かめるため、この大型橋台のモデルを作成して3次元FEM初期応力解析プログラム JCMAC-3（日本コンクリート工学会製）を用いて、縦壁部に生じる初期応力を算出した。

写真-3.3.1.1にA2橋台およびP2橋脚の写真を示す。また、概略図を図-3.3.1.1に示す。なお、本件等ではA2橋台のみの解析とする。A2橋台は、図-3.3.1.2に示すようにフーチングを含め、パラペット部まで8つのロットに分けて施工された。表-3.3.1.1に施工工程をまとめたものを示す。



写真-3.3.1.1 K橋 A2橋台の全景図

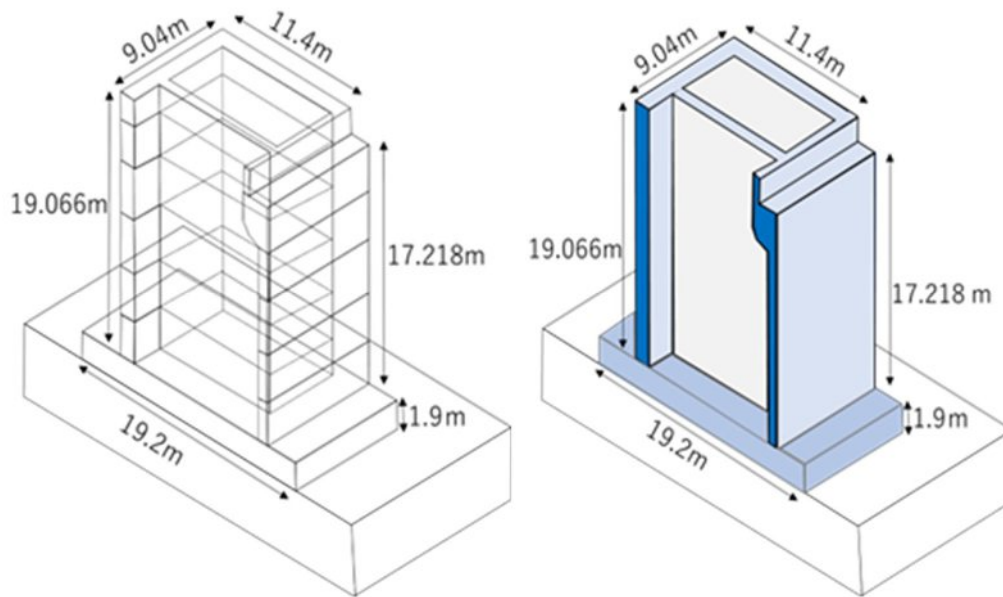


図-3.3.1.1 K橋 A2 橋台概要図

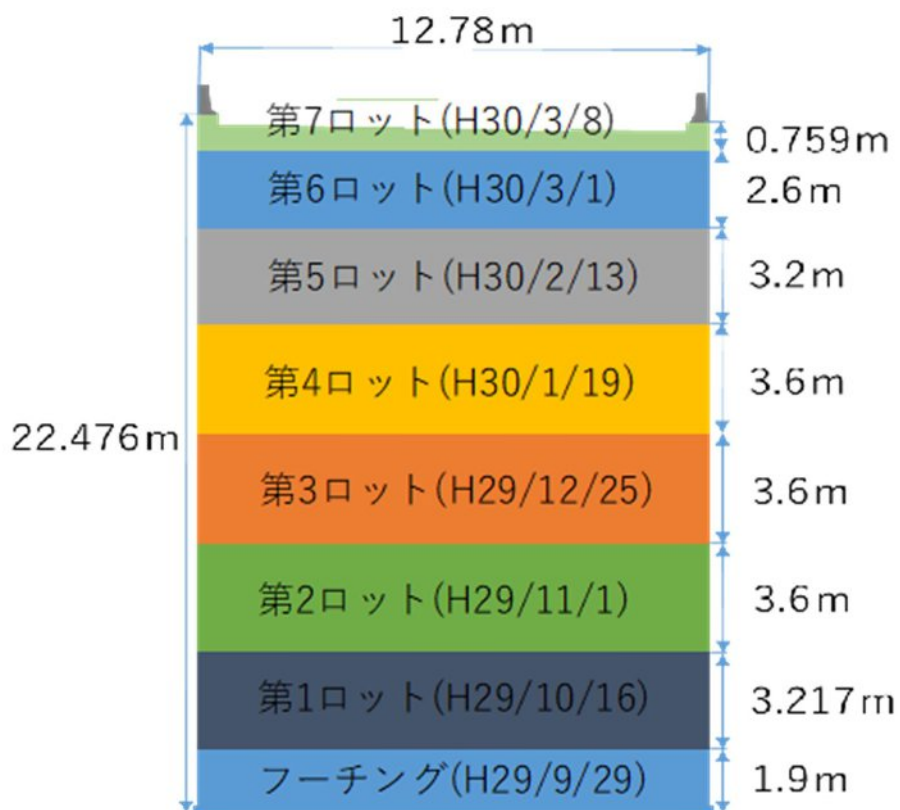


図-3.3.1.2 K橋 A2 橋台打設ロット割

## (2) ひび割れの発生状況

A2 橋台では、事前に実施した温度解析結果を踏まえて、温度ひび割れ対策としてひび割れ誘発目地を設置したが、誘発目地とは別の場所にひび割れが発生した。ひび割れの詳細を写真-3.3.1.2に示す。

表-3.3.1.1 施工工程

日付	内容
2017/09/29	フーチング打設 【散水・養生マット・給熱養生(冬期) 5 日間 型枠残存期間 10~20 日間】
2017/10/16	1 ロッド目打設 【散水・養生マット・給熱養生(冬期) 5 日間 型枠残存期間 10~20 日間】
2017/11/01	2 ロッド目打設 【散水・養生マット・給熱養生(冬期) 5 日間 型枠残存期間 10~20 日間】
2017/12/25	3 ロッド目打設 【散水・養生マット・給熱養生(冬期) 5 日間 型枠残存期間 10~20 日間】
2018/01/19	4 ロッド目打設 【散水・養生マット・給熱養生(冬期) 5 日間 型枠残存期間 10~20 日間】

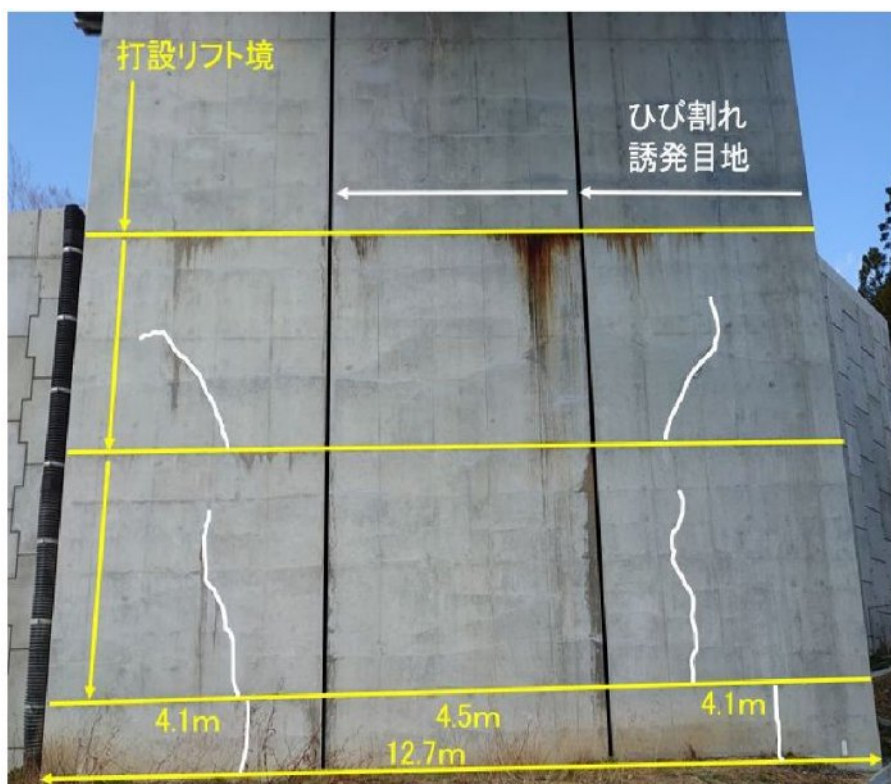


写真-3.3.1.2 K 橋 A2 橋台ひび割れ発生状況

(3) 解析に使用したコンクリート物性値

前述したひび割れの発生状況を確認するため、JCMAC3 を用いて初期応力解析を行う。  
以下に解析において仮定したコンクリートの物性値を示す。

コンクリートの配合を表-3.3.1.2 に示す。

表-3.3.1.2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S1	S2	G	Ad.
53	46.3	4.5	168	320	424	398	987	4.146

セメントは高炉 B 種

使用したコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度は、コンクリート標準示方書 2017 (設計編) の記述に従い、水セメント比より推測して 35.65N/mm<sup>2</sup> とした。

材齢に伴うコンクリートは、土木学会コンクリート標準示方書の以下の式(3.3.1.1)を用いて表す。

$$f'_c(t') = \frac{(t-S_f)}{a+b(t-S_f)} * f'_c \quad (3.3.1.1)$$

ここに  $f'_c(t')$ :有効材齢  $t'$  日におけるコンクリートの圧縮強度 N/mm<sup>2</sup>

$f'_c$  :基準材齢  $t$  日におけるコンクリートの圧縮強度 35.65N/mm<sup>2</sup>

$t$  :設計基準強度の基準材齢日(日) 28 日

$a, b$  :セメントの種類および基準材齢に応じた定数

$$a=7.117, b=0.741$$

$S_f$  :硬化原点に対応する有効材齢 0.42 日

また、有効ヤング係数についても土木学会標準示方書の以下の式(3.3.1.2)を用いて表す。

$$Ee(t') = \Phi e(t') * 6.3 \times 10^3 * f'_c(t')^{0.45} \quad (3.3.1.2)$$

ここに  $Ee(t')$ :有効材齢  $t'$  日における有効ヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)

$f'_c(t')$  :式(3.3.1.1)による有効材齢  $t'$  日の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$\Phi e(t')$ :クリープの影響を考慮するためのヤング係数の低減係数

最高温度に達する有効材齢まで： $\Phi e(t')=0.42$

引張強度は、土木学会コンクリート標準示方書より、式(3.3.1.3)を用いて求める。

$$f_{tk}(t') = c_1 \cdot f'_c(t')^{c_2} \quad (3.3.1.3)$$

ここに、 $f_{tk}(t')$ ：有効材齢  $t'$  日におけるコンクリートの引張強度(N/mm<sup>2</sup>)

$f'_c(t')$ ：有効材齢  $t'$  日におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$t'$ ：有効材齢(日)で 28 日

$c_1, c_2$ ：養生方法によって定まる定数で  $c_1=0.13, c_2=0.85$

ただし、コンクリートの引張強度を 0.13 から 0.10 に変更した。

解析に使用した圧縮強度および弾性係数のグラフを図-3.3.1.3 および図-3.3.1.4 に示す。

コンクリート引張強度を図-3.3.1.5 に示す。図中の「引張強度 0.13」は、式(3.3.1.3)の  $c_1$  の値を 0.13 としたもので示方書の推奨値である。また、「引張強度 0.1」は、コンクリートの施工が十分でないことを想定して、式(3.3.1.3)の  $c_1$  の値を 0.1 としたものである。この場合の引張強度は、通常の 75%程度の値となっている。

コンクリートの断熱温度上昇量は、式(3.3.1.4)より求める。

$$T = Q_{\infty}(1 - e^{-r(t-t_0)}) \quad (3.3.1.4)$$

ここに、 $Q_{\infty}$ ：終局断熱温度上昇量=53.681℃

$r$ ：発熱速度

なお、 $Q_{\infty}$ 、および  $t_0$  については、2017 年度版土木学会コンクリート標準示方書の記述に従い、単位セメント量 320(kg/m<sup>3</sup>)および以下に示す打ち込み時の温度より具体的な値を算出した。

1ロット	2ロット	3ロット	4ロット	5ロット	6ロット	7ロット
21.0℃	14.7℃	11.8℃	8.0℃	4.3℃	4.5℃	7.1℃

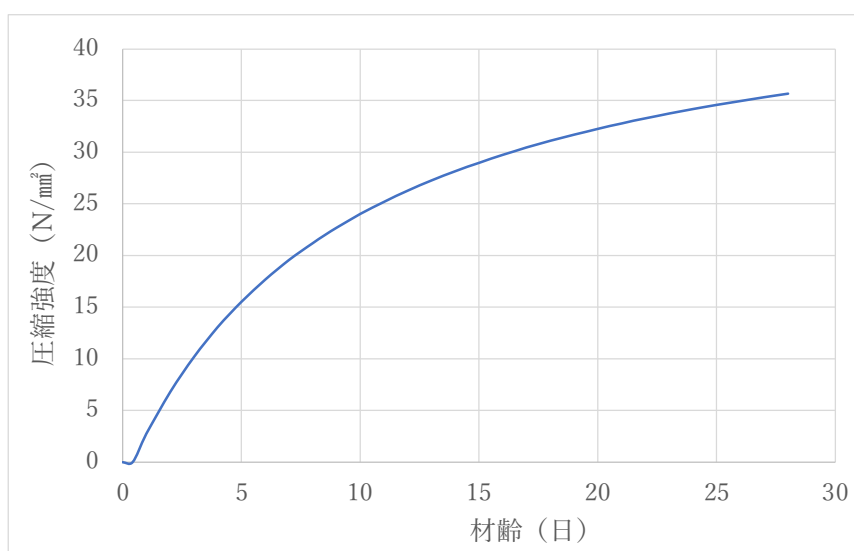


図-3.3.1.3 土木学会標準示方書により算出したコンクリートの圧縮強度



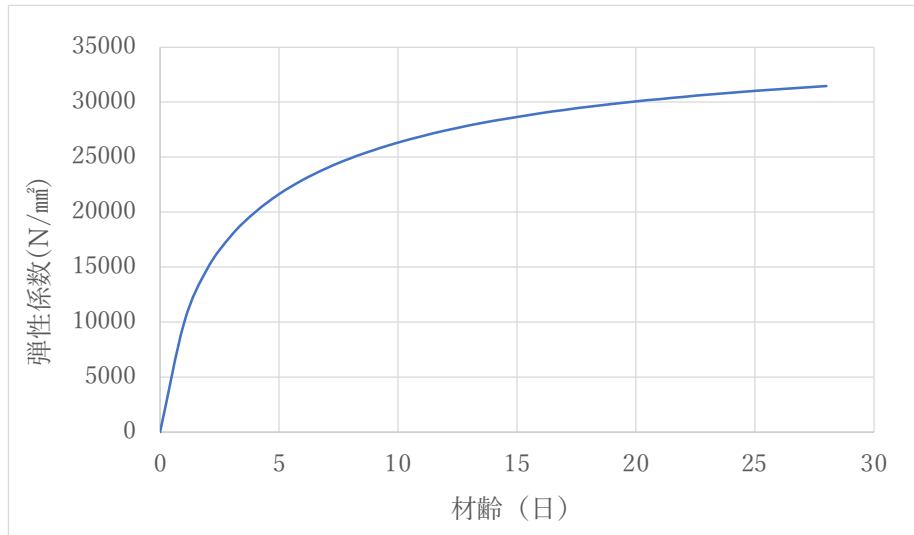


図-3.3.1.4 土木学会標準示方書により算出したコンクリートの弾性係数

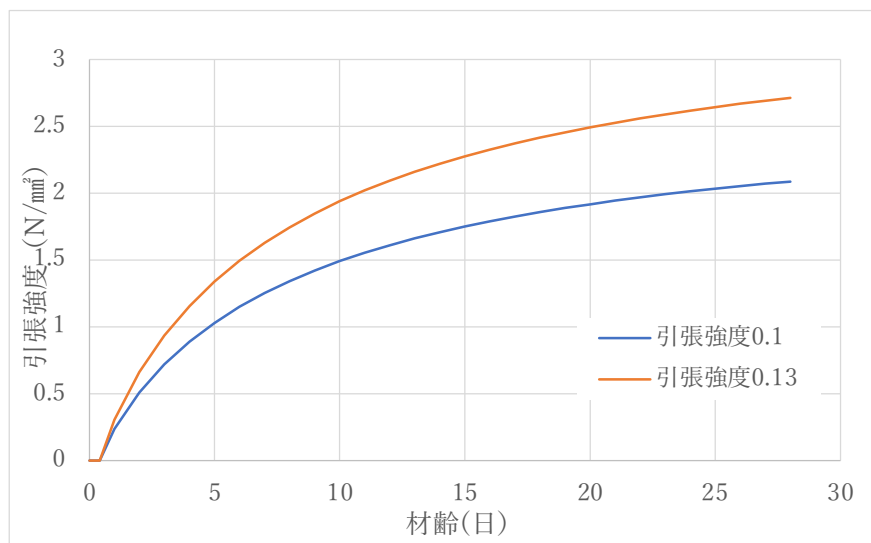


図-3.3.1.5 土木学会標準示方書により算出したコンクリートの引張強度

#### (4) K 橋 A2 橋台の温度応力・ひび割れ幅解析

##### ・解析モデル

K 橋 A2 橋台の初期応力解析には、これまでと同様に JCMAC3 を用いた。解析モデルを 図-3.3.1.6、図-3.3.1.7 に示す。解析モデルは構造物の対称性を考慮して 1/2 モデルとした。

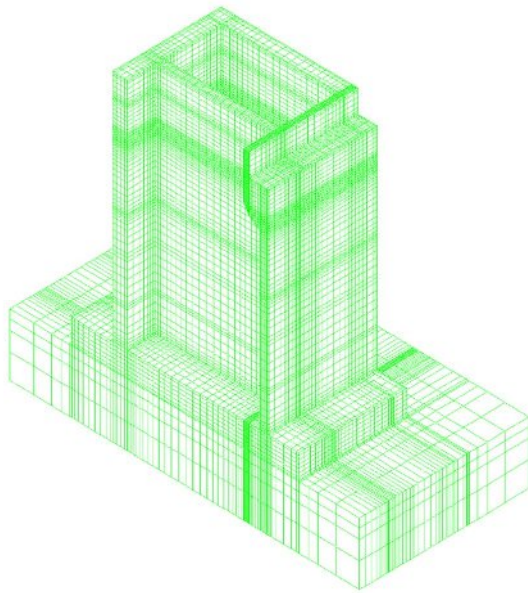


図-3.3.1.6 解析モデルK橋 A2橋台内側

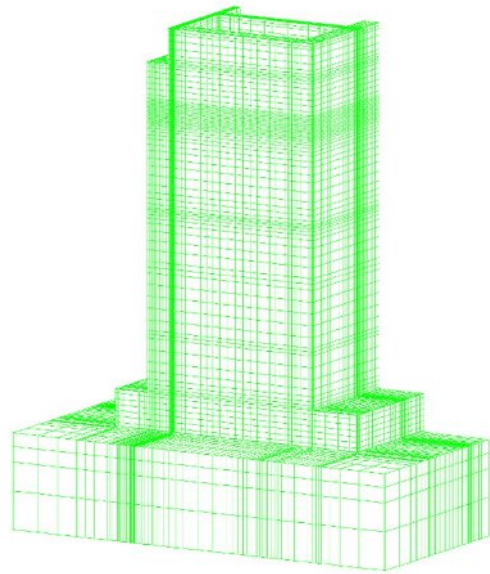


図-3.3.1.7 解析モデル側壁側

・養生条件

コンクリートの脱枠およびコンクリート打ち上がり面の養生条件を反映するための熱伝達係数および露出条件を図-3.3.1.8および表-3.3.1.3に示す。

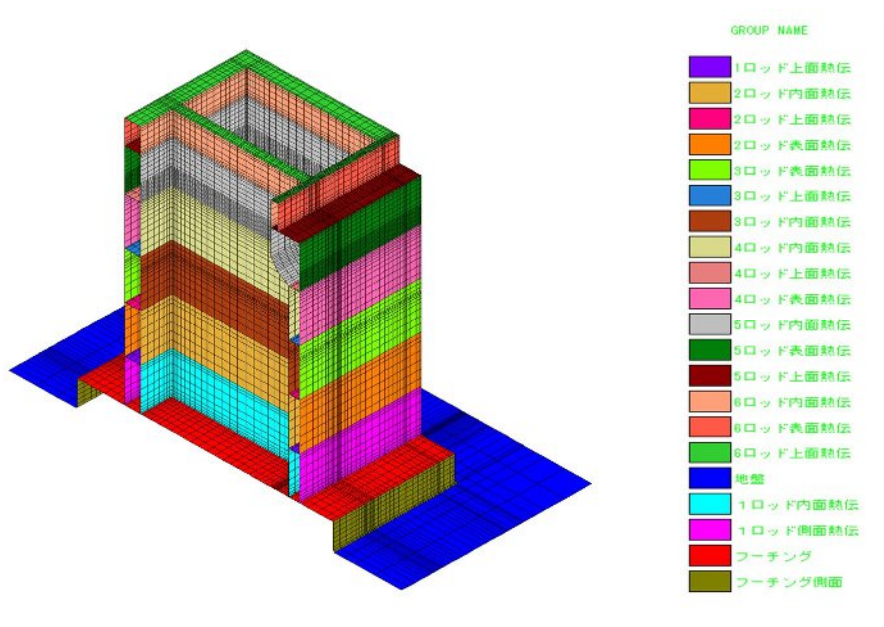


図-3.3.1.8 熱伝達係数の設定箇所

表-3.3.1.3 熱伝達係数

フーチング					
日程	熱伝達係数2(上面)		熱伝達係数3(側面・内面)		
	係数	露出	係数	露出	
2017年9月29日(打設日)					
2017年10月4日	8	0	8		0
2017年10月14日	14	1	8		0

第1ロッド					
日程	熱伝達係数4(上面)		熱伝達係数5(側面・内面)		
	係数	露出	係数	露出	
2017年10月16日(打設日)					
2017年10月21日	8	0	8		0
2017年10月31日	14	1	8		0

第2ロッド					
日程	熱伝達係数6(上面)		熱伝達係数7(側面・内面)		
	係数	露出	係数	露出	
2017年11月1日(打設日)					
2017年11月6日	8	0	8		0
2017年11月16日	14	1	8		0

第3ロッド					
日程	熱伝達係数8(上面)		熱伝達係数9(側面・内面)		
	係数	露出	係数	露出	
2017年12月25日(打設日)					
2017年12月30日	8	0	8		0
2018年1月9日	14	1	8		0

第4ロッド					
日程	熱伝達係数10(上面)		熱伝達係数11(側面・内面)		
	係数	露出	係数	露出	
2018年1月19日(打設日)					
2018年1月24日	8	0	8		0
2018年2月4日	14	1	8		0

第5ロッド					
日程	熱伝達係数12(上面)		熱伝達係数13(側面・内面)		
	係数	露出	係数	露出	
2018年2月13日(打設日)					
2018年2月18日	8	0	8		0
2018年2月28日	14	1	8		0

第6ロッド					
日程	熱伝達係数14(上面)		熱伝達係数15(側面・内面)		
	係数	露出	係数	露出	
2018年3月1日(打設日)					
2018年3月6日	8	0	8		0
2018年3月16日	14	1	8		0

・拘束条件

解析モデルの拘束条件を図-3.3.1.9に示す。構造物の対称条件より対称面となるx方向を拘束した。また地盤の下面はz方向を拘束している。

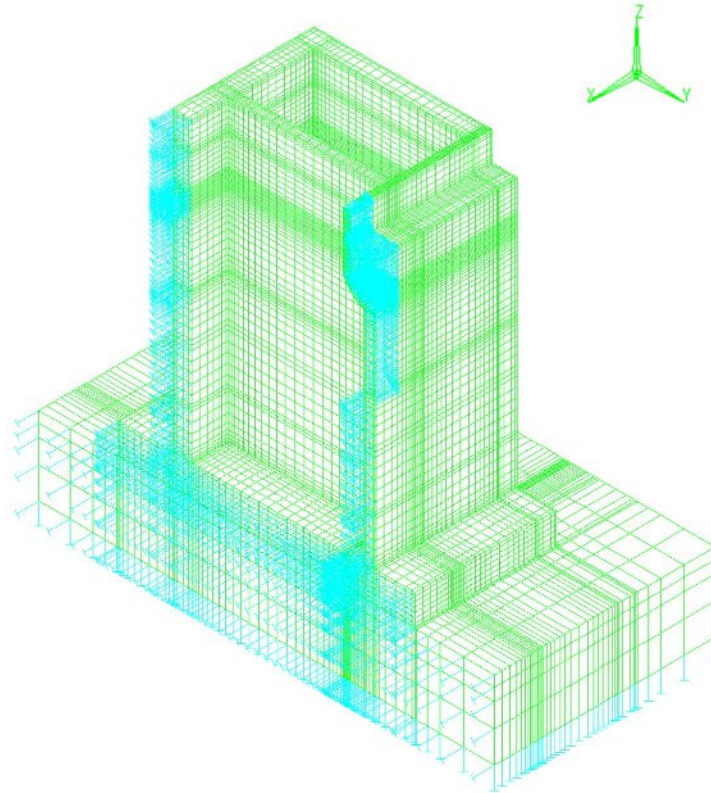


図-3.3.1.9 拘束条件

・外気温の設定

外気温は、現地の値を得ることができなかつたため、架橋位置付近の年間気温を設定した。また打込み温度は外気温+5℃とした。底版コンクリートの打設日から約1年間分の気温の推移を図-3.3.1.10に示す。

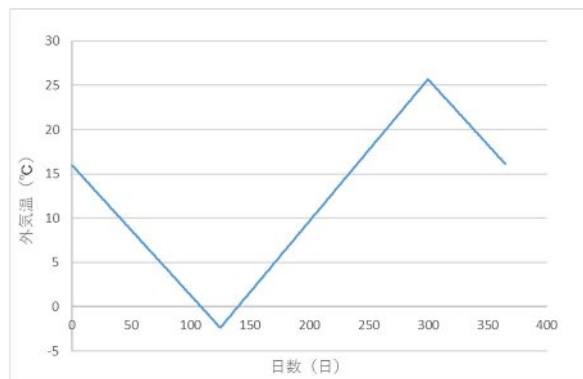


図-3.3.1.10 解析で設定した外気温

### ・解析ケースおよび解析結果

解析は温度解析，応力解析およびひび割れ幅解析の順に行った。解析結果の温度履歴および応力履歴を示した位置を以下の図 3.3.1.11 にある 1 ロットから 4 ロットとして示す。

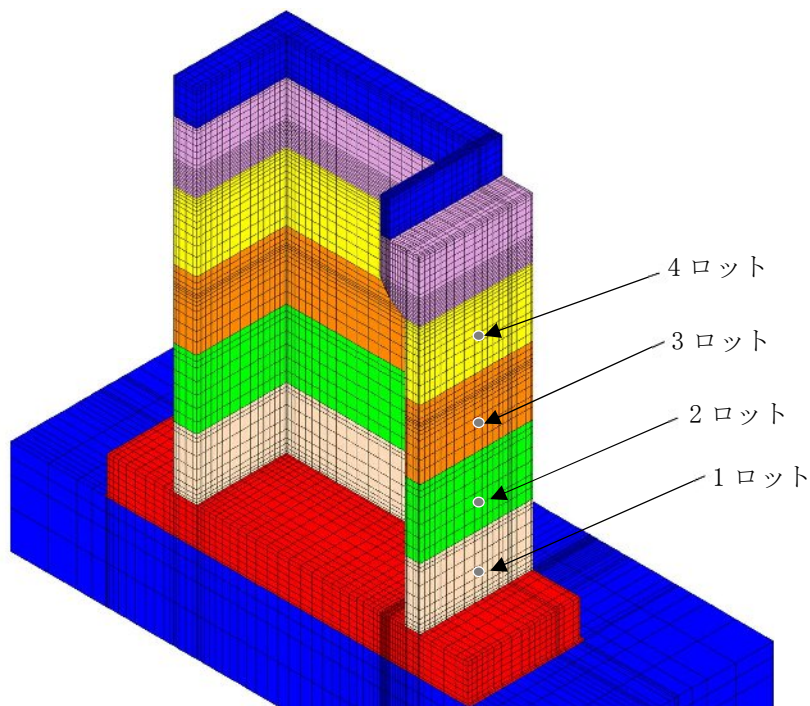


図-3.3.1.11 温度および応力解析のプロット位置

温度の解析結果を図-3.3.1.12 に示す。第 1 ロットから第 4 ロットまでの応力の解析結果を示す。通常の引張強度を仮定した場合には，第 1 ロットと第 2 ロットにおいて引張強度を上回る応力が生じるが，第 3 ロットと第 4 ロットでは，発生応力より引張強度の方が上回っている。一方，引張強度を通常の 75%程度と第 1 ロットから第 4 ロットまでの発生応力は，全ての引張強度を超える結果となった。

図-3.3.1.17 は，通常の引張強度を仮定した場合の材齢 285 日におけるひび割れパターン図である。この場合，隅角部に多少のひび割れは生じているものの，実際の写真にあるような鉛直方向のひび割れは確認できない。これに対して，図-3.3.1.18 に示した引張強度を 75%程度と低減した場合には，実際の写真に見られるような，ひび割れのパターンを確認できた。

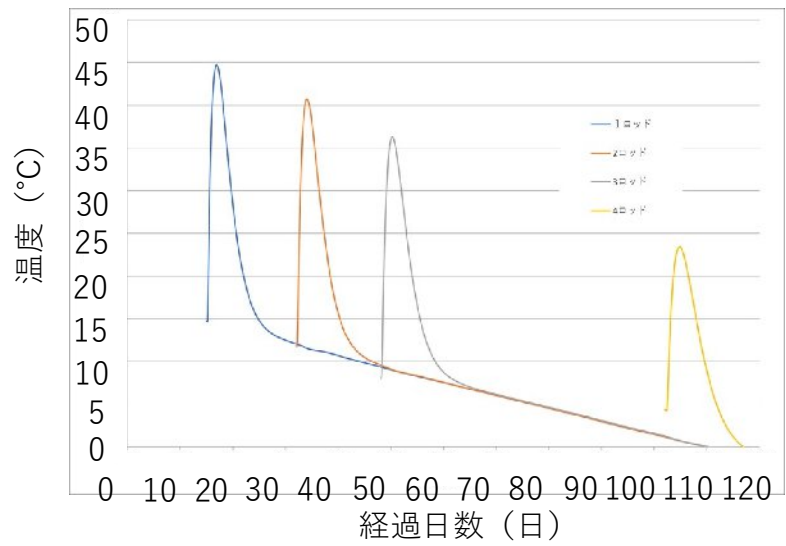


図-3.3.1.12 温度解析結果

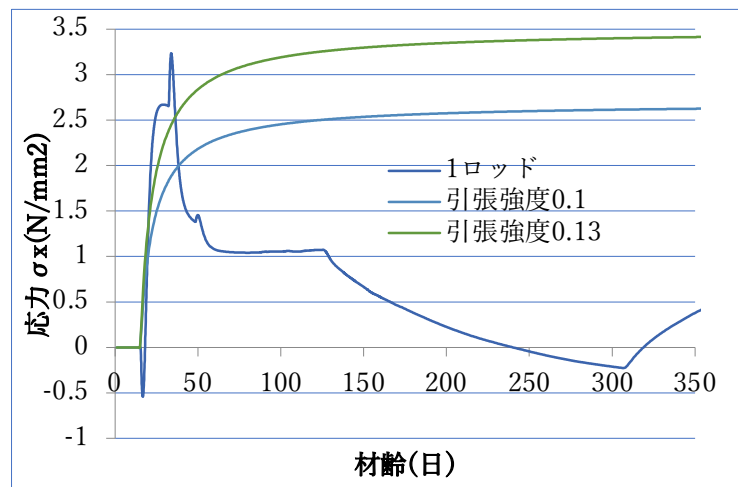


図-3.3.1.13 1 ロットにおける最大主応力と引張強度との比較

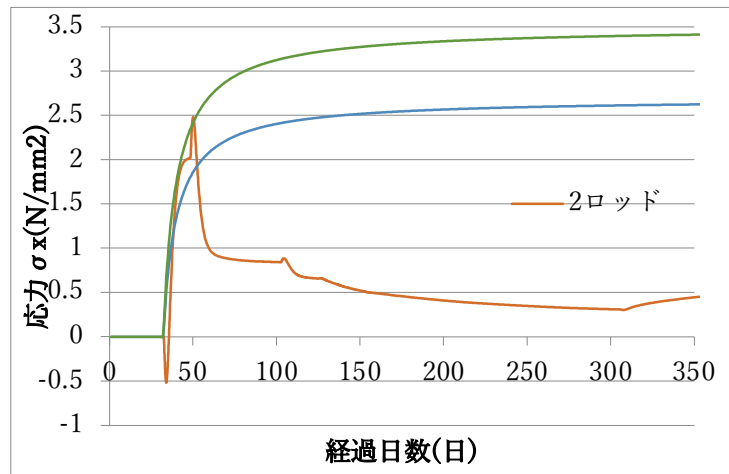


図-3.3.1.14 2 ロッドにおける最大主応力と引張強度との比較

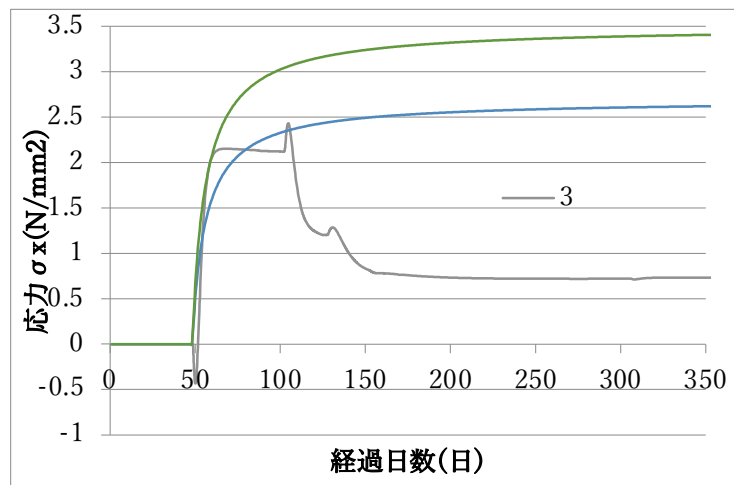


図-3.3.1.15 3 ロッドにおける最大主応力と引張強度との比較

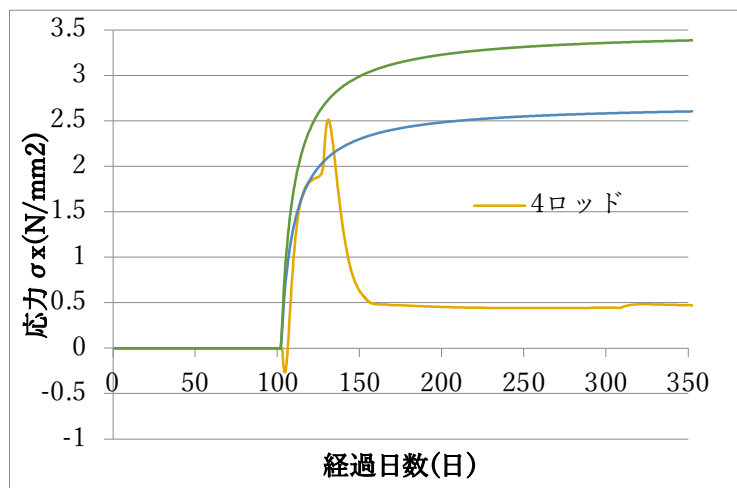


図-3.3.1.16 4 ロッドにおける最大主応力と引張強度との比較

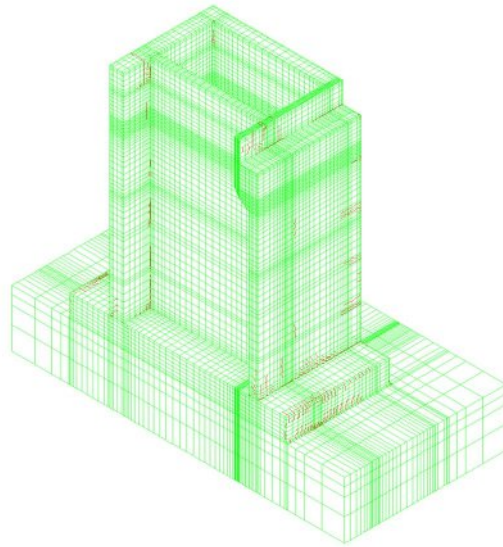


図-3.3.1.17 通常の引張強度を仮定した場合のひび割れパターン図

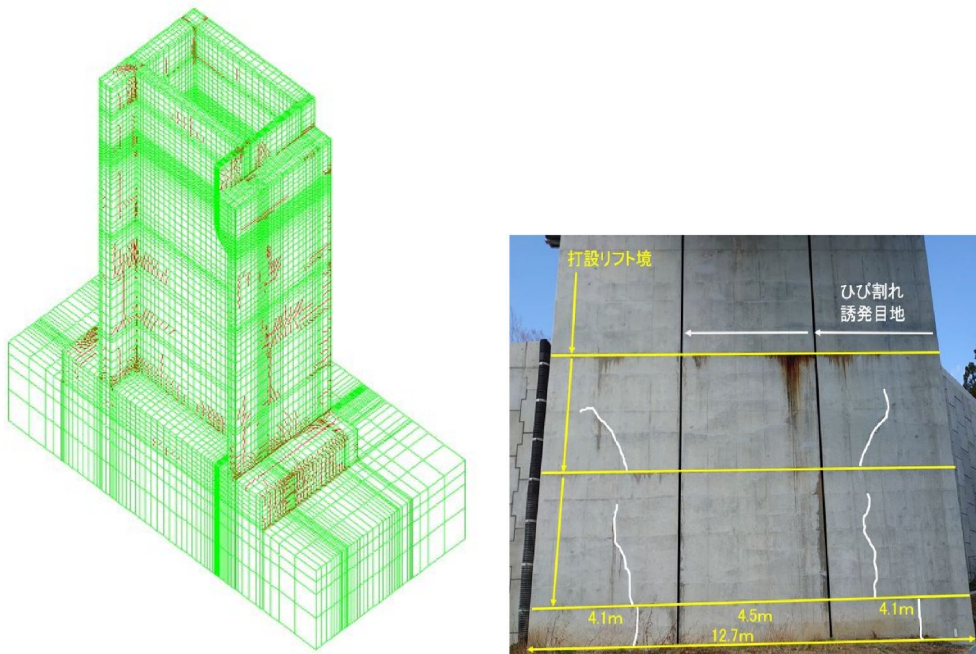


図-3.3.1.18 引張強度を75%程度と仮定した場合のひび割れパターン図と実際の写真

(5) 本節のまとめ

本検討では、K橋の橋台縦壁前面に生じたひび割れの原因を確認する目的で、温度応力解析を行った。本橋台には、主に2種類のひび割れが発生しており、一つは第1ロッドかから第3ロッドに3本の鉛直のひび割れであり、もう一方は、第2ロッドと第3ロッドの打継



面に沿った水平のひび割れである。

これらのひび割れを再現すべく、まず、土木学会コンクリート標準示方書に従い水セメント比から計算される引張強度の設計用値を用いて解析を行ったが、実際に生じたひび割れを再現することはできなかった。この解析では、鉛直のひび割れは1 ロッドにとどまってお  
り、ひび割れ幅も 0.1mm 程度と極わずかな幅であった。また、第2 ロッドと第3 ロッドの打継面に水平のひび割れも再現できなかった。

一方、コンクリートの引張強度が所定の強度を確保できていないのではないかと考え、引張強度を通常の 75%程度と低減した解析結果では、実際に生じた鉛直ひび割れ及び打継部のひび割れとほぼ同様のひび割れを再現することができた。よって、本構造物に生じたひび割れの原因は、温度応力によるものであるとともに、施工時に所定の引張強度が確保できていなかったのではないかと結論に至った。

[担当 石川 雅美]

### 3. 3. 2 A橋における初期欠陥が常時ならびに地震時挙動に及ぼす影響

第2章の現地調査に基づき施工不良によってもたらされる初期欠陥を導入した2次元FEM解析をDIANA ver.10.6により実施し、常時と地震時に及ぼす影響を検討する。

図-3.3.2.1に常時の作用荷重を示す。荷重状態の特徴は、台形型の分布荷重と偏心軸荷重を受ける点であり、一般的な橋台が常時受ける荷重状態である。対応する解析モデルを図-3.3.2.2に示す。(a)は初期欠陥として高さ4900[mm]位置に離散ひび割れを導入した。

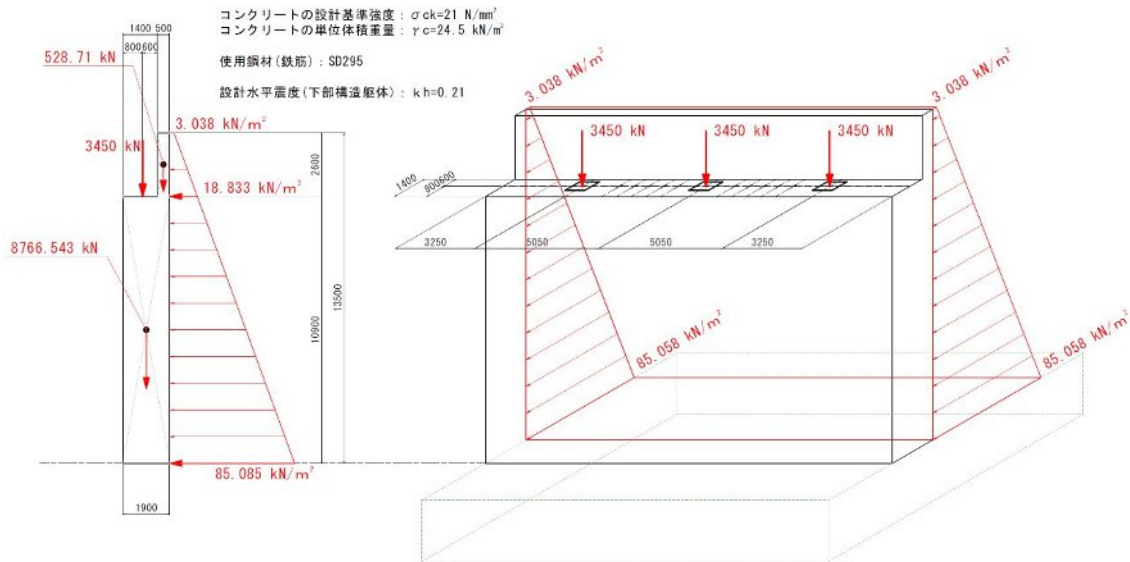


図-3.3.2.1 常時の作用荷重：左は解析対象断面の詳細，右は橋台の3次元表示に基づく荷重状態の図示

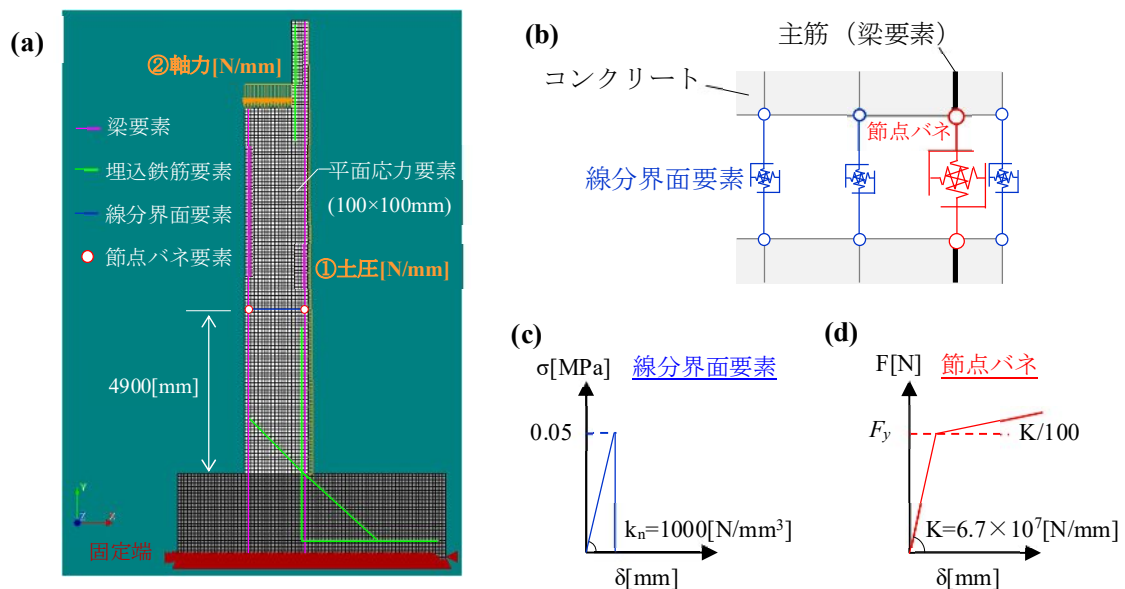


図-3.3.2.2 解析モデルの概要：(a)要素分割・境界条件および荷重条件 (b)初期ひび割れ発生位置のモデル化 (c)線分界面 (d)主筋を結ぶ節点バネの材料特性



図-3.3.2.3 分散ひび割れの導入位置とひび割れ部の経過

図-3.3.2.2に要素分割図を示す。分散ひび割れの位置は図-3.3.2.3に示す壁の打ち継ぎ目のひび割れを模したものである。このひび割れからは漏水による損傷が点検記録から確認されている。その影響から、2014年と2019年の点検写真を比べると明らかなようにエフロッセンスの析出が確認できる。このようなひび割れが構造性能に及ぼす影響を解析的に確認するとともに、可能な範囲で現象の解明を試みる。分散ひび割れのモデル化方法は、尾崎ら<sup>1)</sup>の研究を参考に次のような仮定を導入した(図-3.3.2.2(b))。

- ・ 分散ひび割れ面と直交する主筋は梁要素としてモデル化し、ひび割れ開口後は節点バネにより主筋の挙動を表現する。
- ・ 分散ひび割れ面には、線分界面要素によりコンクリートのひび割れを導入する。法線方向にはモードⅠに対するコンクリートの弾性ならびに引張軟化特性を付与し、接線方向に対してはひび割れ前後で異なる一定せん断剛性を付与することで、モードⅡを表現する。ひび割れ後は、低減した一定せん断剛性によって骨材の噛み合い効果をモデル化する

現状では、図-3.3.2.3に示す実構造物に生じたひび割れ面の材料特性を入手することができない。ここでは、次に示す特性を具体的に仮定した。

#### 線分界面要素 (図-3.3.2.2(c))

- ・ 法線方向について、ひび割れ前の剛性は Rots<sup>2)</sup>の切り欠き梁無筋コンクリートを対象としたパラメトリックスタディを参考に  $1000[\text{N}/\text{mm}^3]$ を仮定する。次に、本報告では、後述の3.3.3節と同様に、ひび割れは貫通しているものと仮定し、引張強度は  $0.05[\text{N}/\text{mm}^2]$ とした(極めてゼロに近い引張強度を付与させた)。また、引張強度に到達した後、負担応力度はゼロになるよう仮定した。
- ・ 接線方向について、ひび割れ前の剛性は法線方向と同様として、ひび割れた後のせん

断剛性は  $500[\text{N}/\text{mm}^3]$  (弾性剛性の 50%) を仮定する。

#### 節点バネ (図-3.3.2.2(d))

- ・ 材軸方向について、鉄筋の応力-ひずみ関係を模擬するカー伸び関係を指定する。具体的には、D32 (SD295) が奥行き方向 (Z 方向) に 66 本存在するため、降伏応力度に対応する降伏応力  $F_y \approx 1.8 \times 10^7 [\text{N}/\text{mm}^2]$  となる。対応する変位は、降伏時ひずみに JIS 引張試験に基づき D32 に対応する標点距離の約  $160[\text{mm}]$  を乗じて  $0.27[\text{mm}]$  とする。得られた初期剛性が図-3.3.2.2(c) に示されている。
- ・ 材軸直交方向について、すなわち、ダボ作用については弾性を仮定する。

解析手順は、上記のモデルに対して、まず①土圧荷重を 20Step にわたり線分荷重として作用させた後、②軸力を 10Step にわたり線分荷重として作用させ、自重は考慮していない。共通解析と異なり、作用荷重値が図-3.3.2.1 に示すように設定されているため、ここでは荷重制御法を用いている。したがって、最大耐力後の軟化挙動を計算することはできない点に留意する。本節の求解法は、共通解析と同様に Newton-Raphson 法を使用する。その他の材料構成則の設定は 3.2 節と同様である。

図-3.3.2.4 に解析結果を示す。図中には、離散ひび割れを導入した解析結果 (図中の凡例では“初期ひび割れ”と表記) の他、離散ひび割れを無視した結果 (“健全”と表記) を示す。また、解析結果の妥当性を確認する 1 つの試みとして、3.2 節で示した強度式のうち、弾性剛性を併記した。また、水平外力の合計とは、図-3.3.2.1 に示した水平外力の合計を示すものである。2 つの解析結果は、弾性剛性が強度式と一致しており、また最大せん断力は水平外力の合計と一致するため、解析モデルは妥当と判断される。続いて、2 つの解析結果を比較すると、初期ひび割れを有する解析結果は、剛性が若干低く、最終変位がやや大きいものの、両者に大きな違いは見られない。図-3.3.2.5 に各モデルの最終ステップ時の

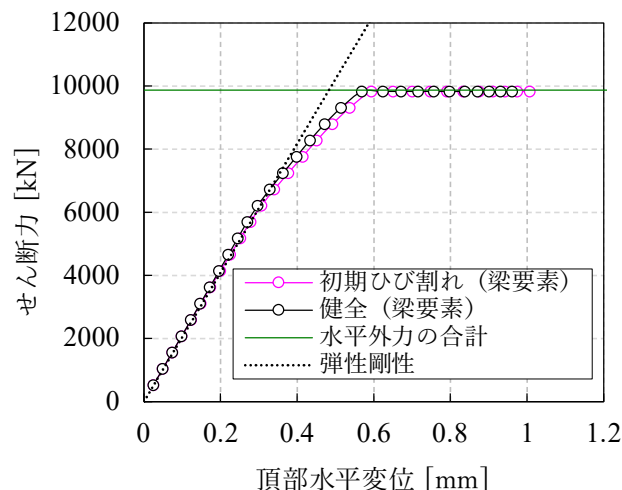


図-3.3.2.4 ベースシア vs. 頂部水平変位関係

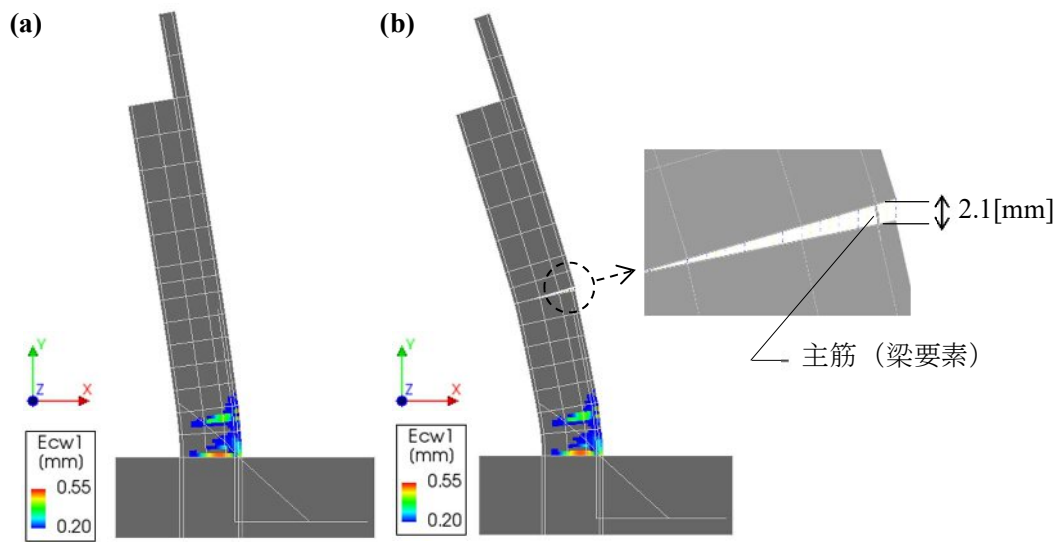


図-3.3.2.5 最終ステップにおけるひび割れ分布と離散ひび割れ面にある主筋位置での開口変位：(a)健全モデル(b)初期ひび割れモデル

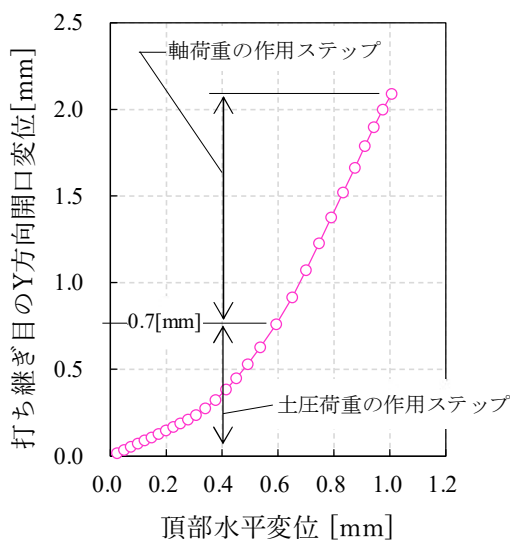


図-3.3.2.6 開口変位の推移

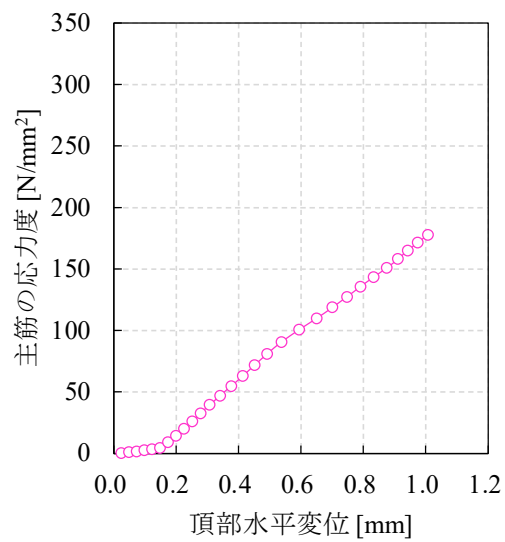


図-3.3.2.7 ひび割れ面を横切る主筋の挙動

コンター図を示す。図より、いずれも目視できる大きさのひび割れが塑性ヒンジ部に集中し、その分布に大きな違いはない。ただし、構造物の水平方向の変位は、モデル(b)の方が大きい。この要因は、拡大した離散ひび割れ要素に着目すると明らかである。主筋位置におけるY方向の開口変位は2.1[mm]であり、極めて大きなひび割れが発生している。図-3.3.2.6に開口変位の推移を示す。土圧荷重が全て作用した段階で、離散ひび割れ部の開口は0.7[mm]程度開き、軸荷重が偏心して作用するためモーメントが付加されることで、さらに開口変位が進む。図-3.3.2.7は離散ひび割れ面を横切る主筋の応力度の推移を示している。

ひび割れが開口することによって、主筋の負担応力度は徐々に増え、最終的に  $177[\text{N}/\text{mm}^2]$  まで達した。以上を総括すると、A 橋に生じた打ち継ぎ部分の水平ひび割れについて、極めて条件が厳しい離散ひび割れ条件を設定した結果、初期欠陥の発生は、全体応答（せん断力-頂部水平変位）や塑性ヒンジ部の損傷状況に大きな影響を及ぼさないことが分かった。しかしながら、常時荷重が作用する状態において、打ち継ぎ部分で開口が  $2\text{mm}$  程度まで開く可能性があり、ここから埋め戻し土を介した雨水の侵入が予想される。すなわち、図-3.3.2.3 に示したエフロレッセンスや雨水の浸透範囲の増加の一要因となっているものと推察される。

続いて、地震時挙動の検討に着手する。図-3.3.2.8 に地震時に考慮する荷重状態を示す。土圧荷重の分布と軸荷重値は、常時の作用時と異なる。また、上部構造からの水平外力が付加されるとともに、慣性力が水平方向に作用する。解析モデルの概要や解析手順は、常時荷重時と同様であるため割愛する。なお、水平力と慣性力は、土圧荷重と軸荷重を作用させた後、図-3.3.2.8 に示す値を節点荷重によって作用させ、自重は考慮しなかった。

図-3.3.2.9 に解析結果を示す。せん断力-頂部水平変位関係は 3 つの荷重が順に作用されている点に留意する。すなわち、①土圧荷重の作用 (20step)、②続く軸荷重の作用 (10step)、③最後に水平力と慣性力 (20step) が作用されている。初期ひび割れを有する解析結果は、土圧作用時に剛性が低下する。その影響により、続く軸荷重作用時に比較して水平変位が大きく生じる。しかしながら、最後の地震力の作用では対応する剛性は健全モデルと比較して高い。これは最終ステップにおける引張鉄筋のコンター図を見ると明らかである。図は、主筋の降伏応力度  $295[\text{N}/\text{mm}^2]$  を超える要素が赤く着色されている。図より、塑性ヒンジ部の主筋に加え、初期ひび割れによる開口部を横断する部分の主筋が降伏している。当然のこと

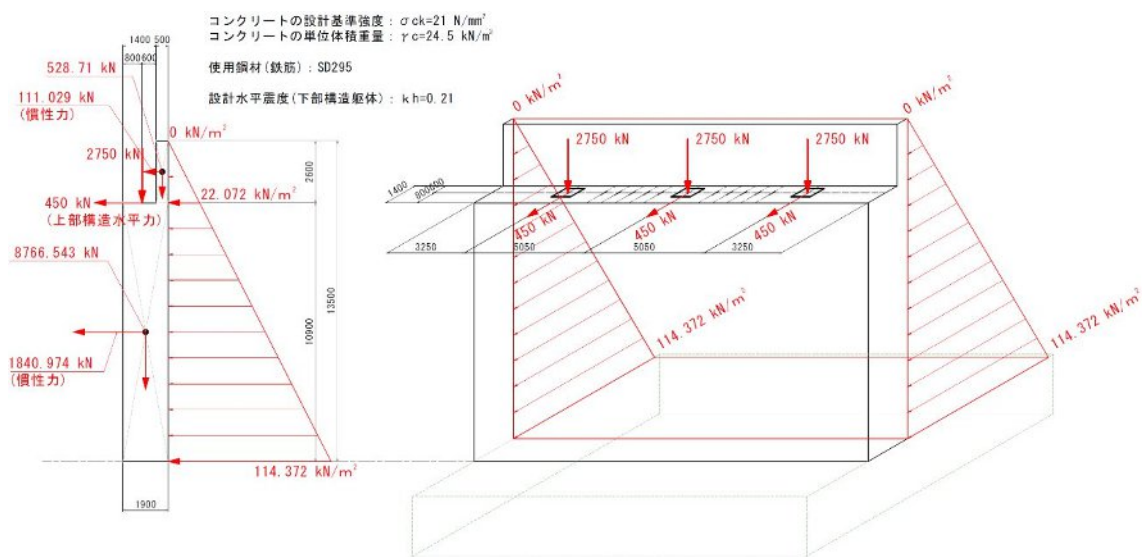


図-3.3.2.8 地震時の作用荷重：左は解析対象断面の詳細、右は橋台の3次元表示に基づく荷重状態

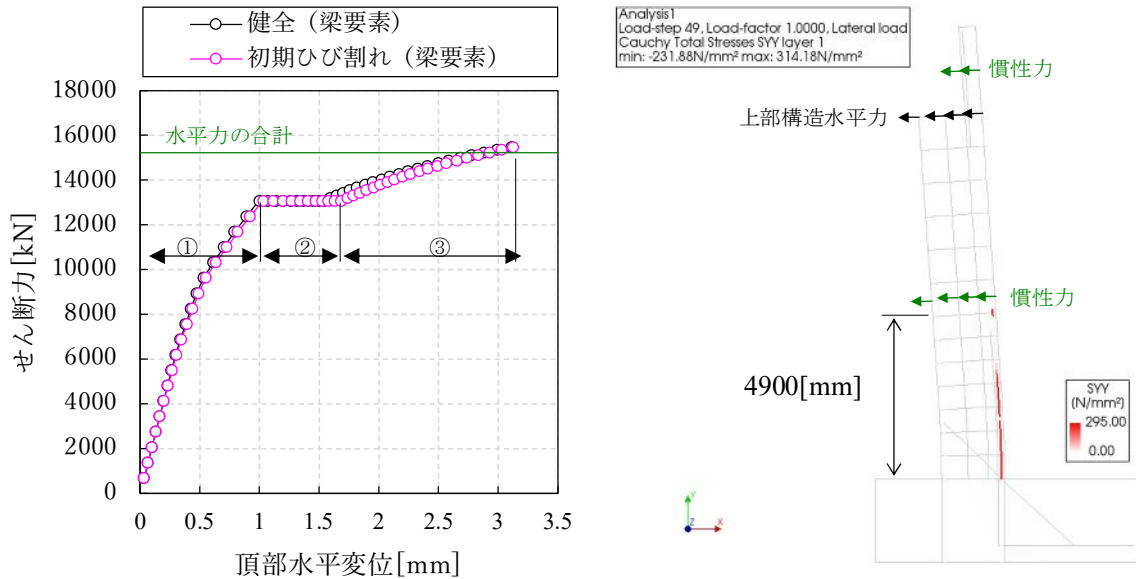


図-3.3.2.9 地震時の挙動：左はせん断力 vs. 頂部変位関係，右は最終ステップにおける初期ひび割れを有した解析モデルの主筋応力度分布

ながら，健全な解析モデルではこのような現象は観察されていない。つまり，健全モデルより引張鉄筋の抵抗範囲が増えたため，耐荷性状が全体として大きく評価される。

以上を要約すると，A橋に生じた打ち継ぎ部分の水平ひび割れについて，極めて条件が厳しい離散ひび割れ条件を設定した結果，初期欠陥の発生は，全体応答（せん断力-頂部水平変位）に若干の剛性低下を引き起こすものの，大きな影響を及ぼさないことが分かった。しかしながら，地震時に想定するヒンジ部の他，ひび割れ開口部分を横断する主筋が降伏することが明らかとなり，損傷範囲の増大が懸念される。

#### 参考文献

- 1) 尾崎英介，今井究，田嶋和樹，白井伸明：曲げ降伏後にせん断破壊するRC柱の非弾性挙動をシミュレートする改良ファイバーモデルの構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.31(2)，121-126，2009.
- 2) J. G. Rots: Computational modeling of concrete fracture, Dissertation, Delft University of Technology, 1988.

[担当 堀川 真之]

### 3. 3. 3 C橋とB橋における初期欠陥が曲げ耐荷性状に及ぼす影響

2章, および3章の共通解析における検討の結果を受けて, 表-3.2.2示した Case3 のモデルを仮定して, 初期欠陥を有する 2つの橋梁に関して曲げ耐荷性状に関する有限要素解析を行った。使用した有限要素解析コードは, ATENA Ver.5 である。

図-3.3.3.1と図-3.3.3.2にC橋とB橋の解析モデルを示す。両者ともに橋軸直交方向を2次元でモデル化した。C橋に関しては, 2つの初期欠陥による打継を以下のようにモデル化して解析ケースを設定した。

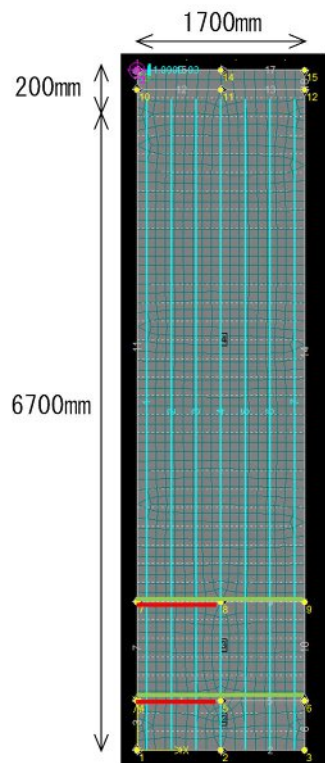


図-3.3.3.1 C橋の解析モデル

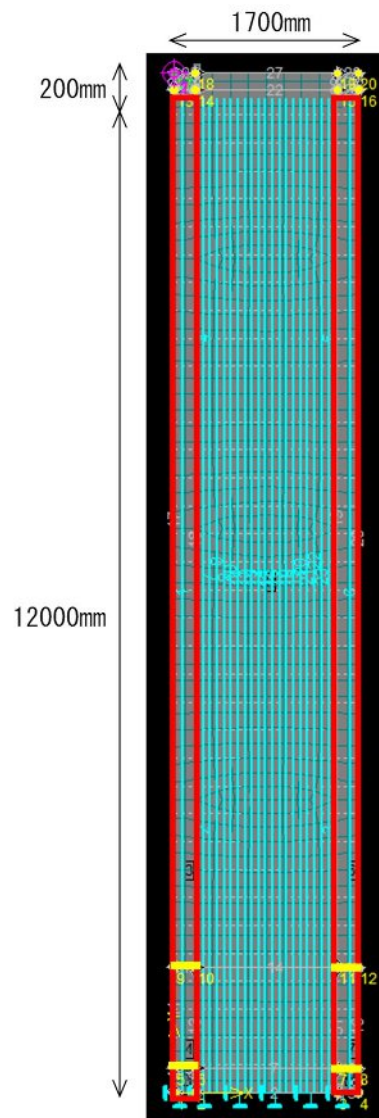


図-3.3.3.2 B橋の解析モデル

- 損傷なし
- 橋脚下部から 500mm の位置に打継部を設定して非貫通



表-3.3.3.1 インターフェイス要素の材料特性

鉛直方向剛性	$3.0 \times 10^6 \text{N/mm}^2$
水平方向剛性	$3.0 \times 10^6 \text{N/mm}^2$
引張強度	$0.05 \text{N/mm}^2$
粘性係数	$1.0 \text{N/mm}^2$
摩擦係数	0.1
ひび割れ後の鉛直剛性	$3.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$
ひび割れ後の水平剛性	$3.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$

- 橋脚下部から 500mm の位置に打継部を設定して貫通
- 橋脚下部から 1500mm の位置に打継部を設定して非貫通
- 橋脚下部から 1500mm の位置に打継部を設定して貫通

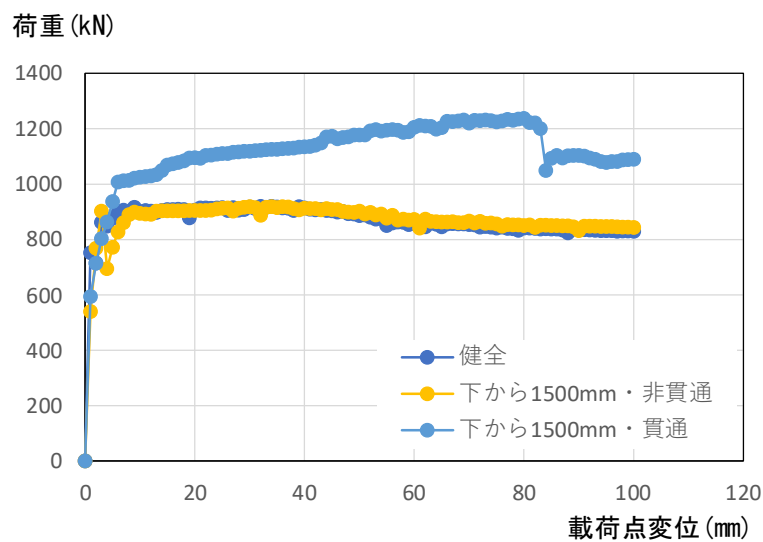
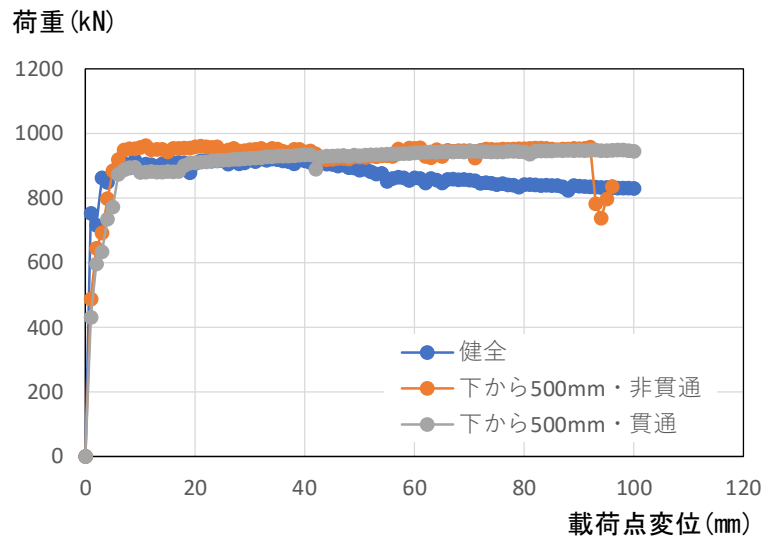


図-3.3.3.3 荷重-載荷点変位関係 (C橋)

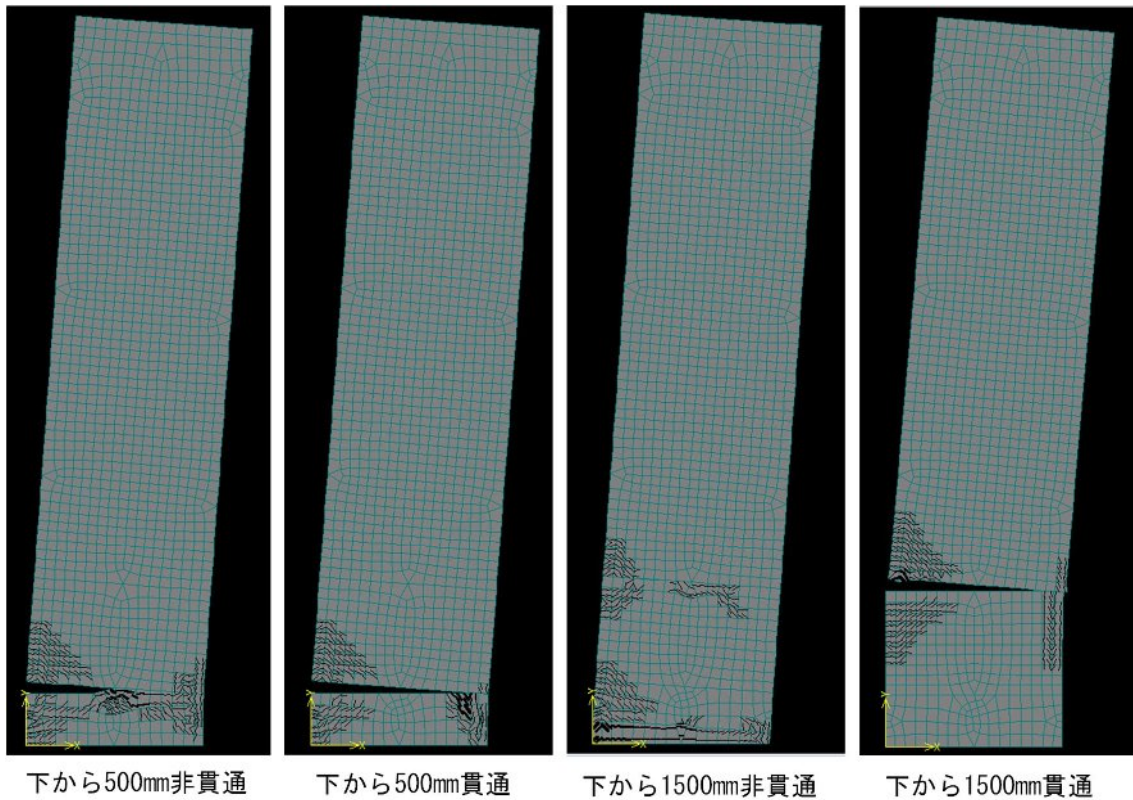


図-3.3.3.4 解析上のひび割れ図 (C 橋)

一方、B 橋に関しては、RC 増厚部のみに初期欠陥があるものと推定される。図-3.3.3.2 において、赤枠部分が増厚部に相当する。B 橋においては、初期欠陥による打継部を 2 か所、増厚部にモデル化した。

有限要素解析における打継部は、ATENA に搭載されているインターフェイス要素を使用した。材料特性を表-3.3.3.1 に示す。なお、鉄筋に関しては、主鉄筋を埋め込み鉄筋要素、せん断補強鉄筋を分散鉄筋要素としてモデル化した。その他の材料構成則や解析方法については、共通解析と同様である。解析上の荷重方法は、厚さ 200mm の荷重板 (鋼製を想定) の最上部を変位制御で一方向に片押しする方法で行った。なお、強制変位は 100mm まで漸増で与えた。解析においては、フーチングをモデル化しない代わりに橋脚の最下端を完全拘束した。

C 橋の解析結果を図-3.3.3.3 と図-3.3.3.4 に示す。図-3.3.3.3 は荷重と荷重点変位との関係を示したものである。この図を見ると、打継部を下端から 500mm の位置に設けた場合には、曲げ耐荷性状に大きな差が見られないことがわかる。一方、打継部を下端から 1500mm の位置に設けた場合には、打継部が貫通している場合に、見かけの曲げ耐荷性状が向上していることがわかる。これは、図-3.3.3.4 の解析におけるひび割れ図に示した通り、貫通ひび割れを 1500mm の位置に設定した場合には、柱基部ではなく打継部に塑性ヒンジが形成される。このように、作用曲げモーメントが最大ではない位置に塑性ヒンジが形成

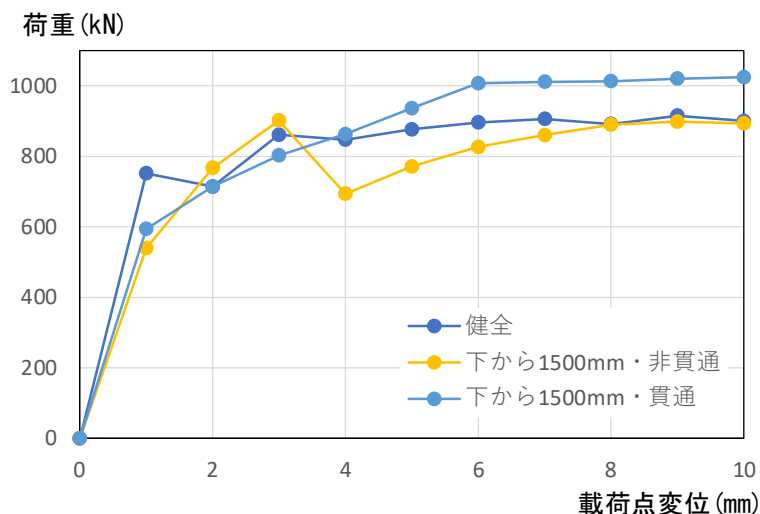
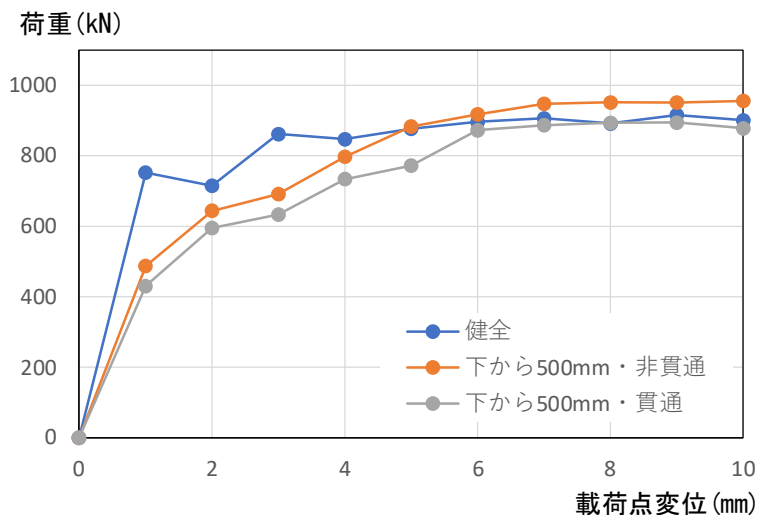
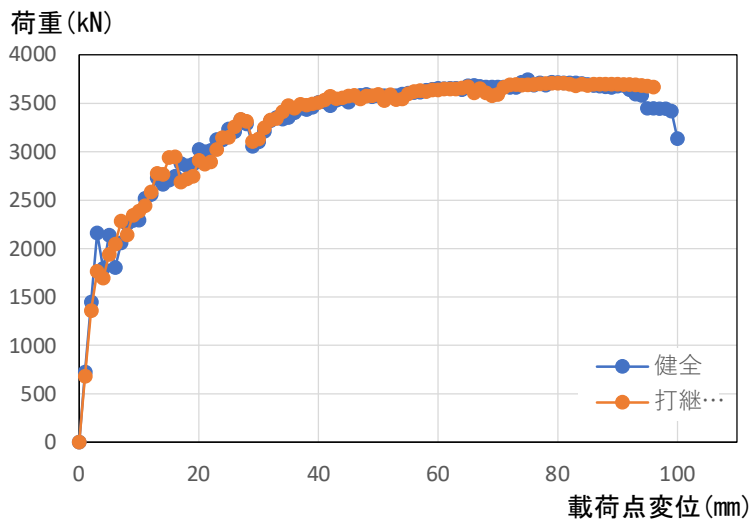


図-3.3.3.5 載荷点変位 10mm までの荷重-変位関係 (C 橋)

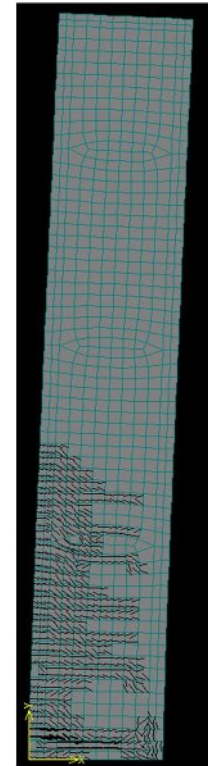
されることにより、見かけの曲げ耐荷性状が向上したものと思われる。しかしながら、設計の前提としては、柱基部に塑性ヒンジが形成されることにより、エネルギー吸収が行われることが条件である。このように、初期欠陥を有する場合には、設計の前提条件が成立しない可能性があることに留意が必要であるといえる。図-3.3.3.5 に載荷点変位を 10mm までにした場合の荷重変位関係を示す。この図より、打継部を設けた場合には、初期欠陥がない場合と比較して初期剛性が低下することがわかる。このことは、打継などの初期欠陥がある場合には、交通荷重などが作用する常時の使用時に、ひび割れの早期発生などの影響を与えることが示唆される。

B 橋の解析結果を図-3.3.3.6 と図-3.3.3.7 に示す。この場合には、打継の有無で曲げ耐荷性状に大差がないことがわかる。一方で、図-3.3.3.8 に載荷点変位を 10mm までにし

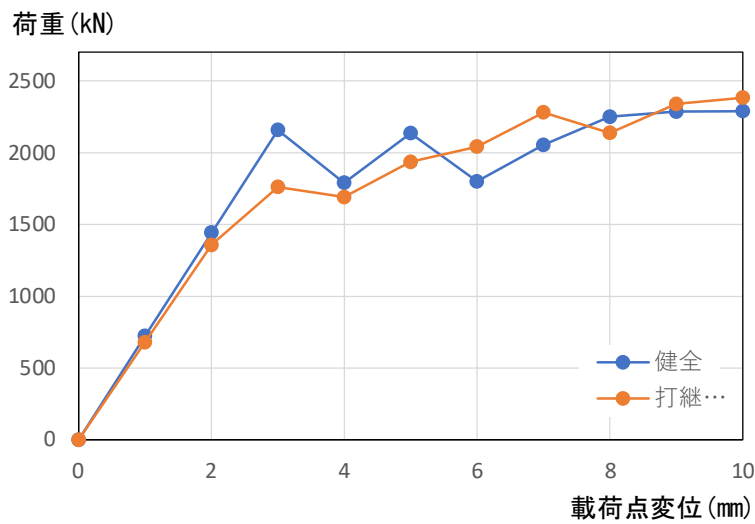
た場合の荷重－変位関係を見ると、C 橋の場合と同様で、初期欠陥がある場合には初期剛性が低下する傾向にある。



図－3.3.3.6 荷重－載荷点変位関係 (B 橋)



図－3.3.3.7 解析上のひび割れ図 (B 橋)



図－3.3.3.8 載荷点変位 10mm までの荷重－変位関係 (B 橋)

[担当 上原子 晶久]

#### 4. おわりに

本委員会は、2020年4月から2023年3月までの3年間の活動期間を経て、この成果を報告書にまとめた。活動期間中にコロナ禍の影響を受け、1年間の活動期間の延長を余儀なくされた。全体委員会は、全てリモート会議としたが、参画して頂いた委員の多くは、コロナ禍前より東北支部における他の委員会にて精力的に活動を行ってきた、いわゆる同士の関係にあり、闊達な議論が行われたと自負している。

構造物調査WGは、委員会活動期間内において点検調書の分析のみに留まることなく、WGメンバーが自ら足繁く東北6県の構造物を見て回るといって、“東北行脚”を実行した。報告書を読むと、WGメンバーが見て判断した施工の良否と劣化の問題を行間に感じとれるのではないだろうか。

解析WGにおいては、施工不良箇所を解析モデルで表現するという、無理難題に真っ正面から取り組んだ。3年間という期間があったにせよ、成果を出せるかWG活動当初は不透明のまま、手探りでモデル化の議論を続け、トライアンドエラーを繰り返し、解析の成果を公表できるまでに尽力した。コールドジョイントなどの施工由来のひび割れが、構造物の安全性に影響する可能性を示したことは、問題提起として価値を有するものと考えている。

国土交通省東北地方整備局は、コンクリート構造物の品質確保の手引きを公示している。東北には、この手引きに準拠し施工されたコンクリート構造物が復興道路、復興支援道路に加えその他にも増えつつある。日本コンクリート工学会東北支部専門研究委員会では、丁寧な施工を行ったこの種のコンクリート構造物が東北の環境条件の下、どのような経年変化を辿るのか、継続的かつ属人化を排除した追跡調査の基盤を作り“見守り”を続けていく。本委員会の成果は、この委員会の意義を裏付ける根拠資料として、過去の反省を糧とした丁寧な施工の重要性を広く東北地方で活動する土木技術者に啓蒙する一助になると確信している。

[担当 子田]

付録 1 橋梁等構造物の現地調査結果

## 事例集

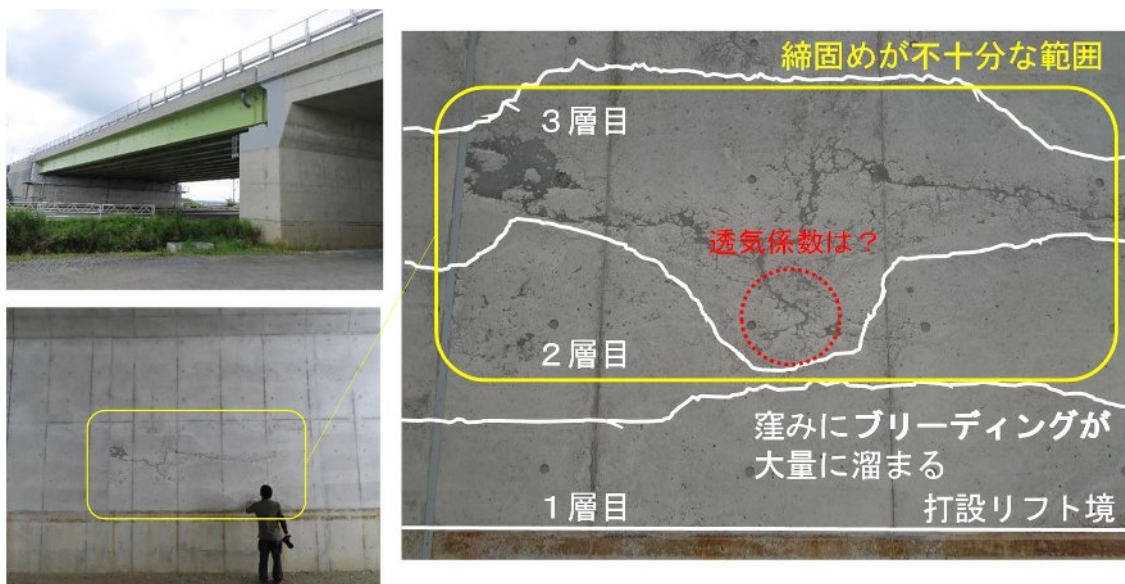
### 事例①：福島県内陸部

- ・対象構造物：橋梁下部工（1997年4月）
- ・内容：打継ぎ部、及びひび割れからの遊離石灰
- ・原因の推定：温度応力によってひび割れが発生し、漏水などの水分供給によって十分な打継ぎ処理がなされていない打継ぎ部からエフロレッセンスが析出した



### 事例②：秋田県日本海沿岸

- ・対象構造物：橋梁下部工
- ・内容：ブリーディングが這い上がった跡が残っている
- ・原因の推定：水平に打設していないために窪みにブリーディングが大量にたまり、これを処理せずに次の層を打設した



## 事例集

### 事例③：秋田県日本海沿岸

- ・対象構造物：橋梁下部工
- ・内容：打重ね線にひび割れが生じている
- ・原因の推定：打重ね部の締固めやブリージング処理が十分でなかった可能性



### 事例④：秋田県日本海沿岸

- ・対象構造物：橋梁下部工（2006年12月）
- ・内容：格子状のひび割れが生じている
- ・原因の推定：反応性骨材が使われており、さらに塩化物イオンが供給されることが影響している





## 事例集

### 事例⑤：秋田県内陸部

- ・対象構造物：橋梁下部工（1995年12月）
- ・内容：打重ね線にひび割れが生じている
- ・原因の推定：打重ね部の締固めやブリージング処理が十分でなかった可能性



### 事例⑥：秋田県内陸部

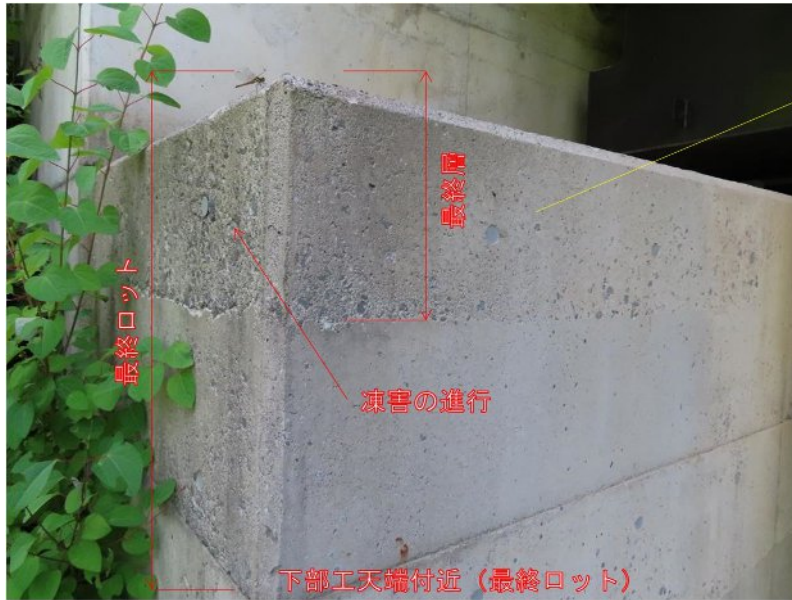
- ・対象構造物：擁壁（1995年頃）
- ・内容：打重ね線にひび割れが生じている
- ・原因の推定：打重ね部の締固めやブリージング処理が十分でなかった可能性



## 事例集

### 事例⑦：秋田県峠部

- ・対象構造物：橋梁下部工
- ・内容：凍害が生じている
- ・原因の推定：最終層の天端付近はバイブレータによる締固めがほとんどされなかったため表面気泡が残りやすい



- ・バイブレータの振動が伝わりにくい
- ・天端仕上げとの関係もあり最終層はほとんど締固めがされていない

### 事例⑧：青森県峠部

- ・対象構造物：橋梁下部工（1964年2月）
- ・内容：コンクリートの剥離、鉄筋の露出
- ・原因の推定：かぶり不足や型枠継目からのセメントペーストの漏れによる可能性



## 事例集

### 事例⑨：青森県市街地

- ・対象構造物：橋梁下部工（1978年6月）
- ・内容：格子状のひび割れが生じている
- ・原因の推定：反応性物質を含む骨材が使われている。また凍結防止剤に含まれる塩化物イオンが供給される



下部工全景 (A2橋台)



ひび割れ補修跡 (A2橋台)



微細ひび割れ (A2橋台)



下部工全景 (A1橋台)



補修部材のひび割れ (A1橋台)



補修部材のひび割れ (A1橋台)

### 事例⑩：青森県沿岸部

- ・対象構造物：橋梁下部工
- ・内容：格子状のひび割れが生じている
- ・原因の推定：不明



柱の形状：9.5m×3.2m(小判型)

ひび割れ発生状況



架橋状況(湾)

- 仕様など
- ・27-8-25-BB (W/C<45%)
- セメント量 約330kg/m<sup>3</sup>
- AE減衰剤・空気量調整剤添加
- ・鉄筋：エポキシ樹脂塗装鉄筋
- ・型枠：透水性型枠
- ・打設時期：通年
- ・養生：養生マット+散水(7日以上)  
(寒中はジェットヒーター使用)
- ※引渡し前に浸透系塗布材を施工

## 事例集

### 事例⑪：青森県平野部

- ・対象構造物：函渠工（2007年2月）
- ・内容：豆板の補修跡、打重ね部のひび割れ、ブリーディングが這い上がった跡
- ・原因の推定：締固めやブリージング処理が十分でなかった可能性



### 事例⑫：青森県平野部

- ・対象構造物：橋梁下部工（1985年12月）
- ・内容：ひび割れ（補修跡）
- ・原因の推定：温度応力によるひび割れ



## 事例集

### 事例⑬：青森県平野部

- ・対象構造物：橋梁下部工（1985年12月）
- ・内容：ひび割れ、格子状のひび割れ、打継ぎ部の開口、ピーコン近傍のひび割れ
- ・原因の推定：温度応力によるひび割れ、等々



### 事例⑭：青森県平野部

- ・対象構造物：橋梁下部工
- ・内容：打継ぎ部のひび割れ（補修跡）
- ・原因の推定：打重ね部の締固めやブリージング処理が十分でなかった可能性



## 事例集

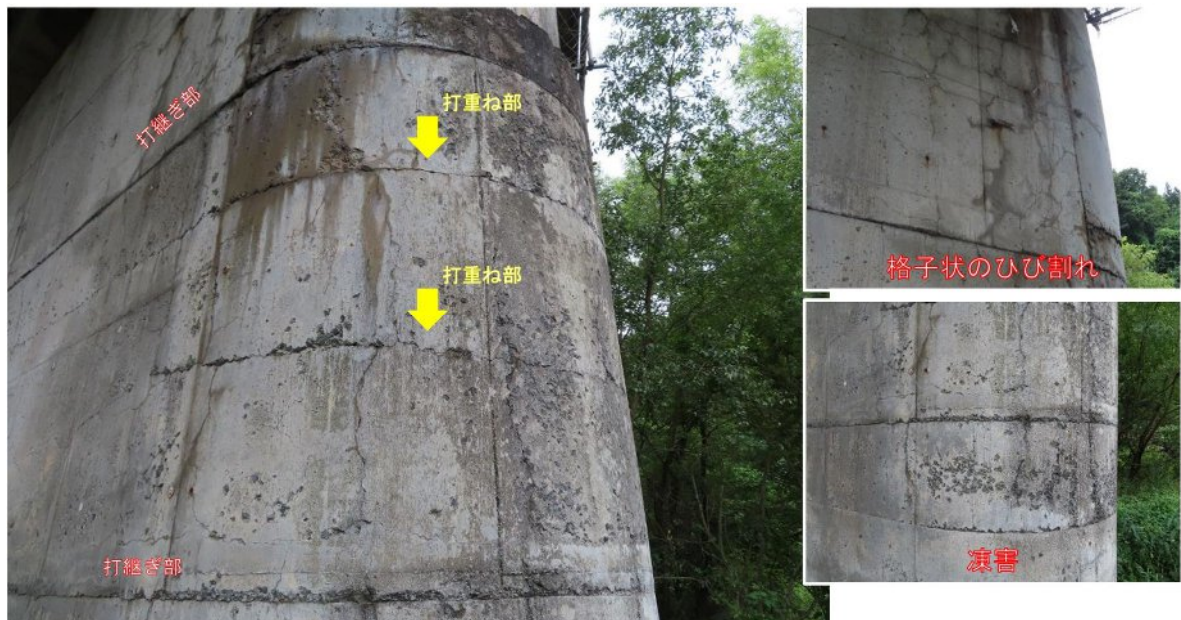
### 事例⑮：青森県平野部

- ・対象構造物：橋梁下部工（1997年4月）※竣工してから約25年経過
- ・内容：打重ね部のひび割れ、格子状のひび割れ
- ・原因の推定：打重ね部の締固めやブリージング処理が十分でなかった可能性



### 事例⑯：青森県平野部

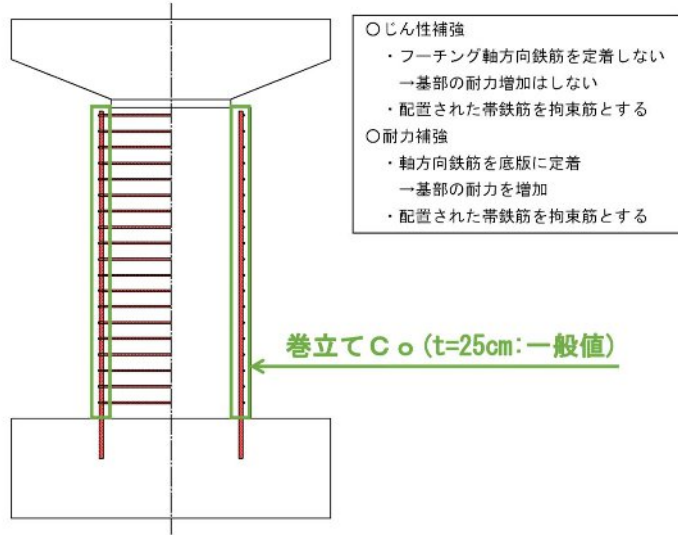
- ・対象構造物：橋梁下部工（1975年12月）※竣工してから約50年経過
- ・内容：打重ね部のひび割れ、格子状のひび割れ、凍害
- ・原因の推定：打重ね部の締固めやブリージング処理が十分でなかった可能性



事例集

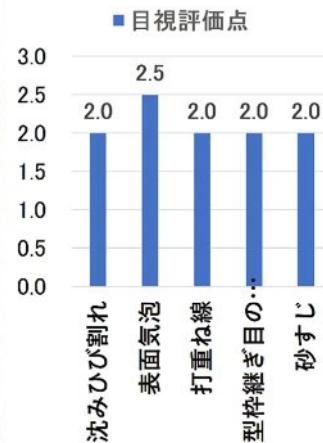
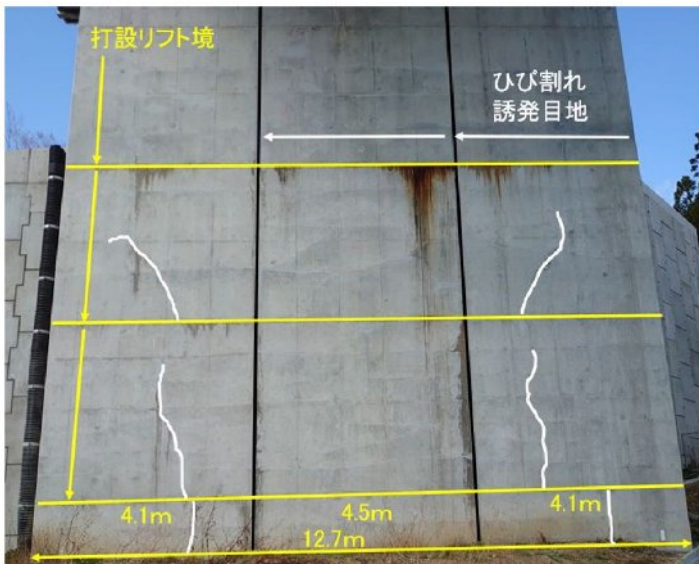
事例⑰：その他

- ・対象構造物：橋梁下部工の鉄筋コンクリート巻立てによる耐震補強（1996年以降）
- ・内容：巻立てコンクリート（一般に  $t=25\text{cm}$ ）にひび割れが生じている
- ・原因の推定：既設コンクリートで拘束される部材であり、乾燥や拘束によるひび割れが発生しやすい



事例⑱：宮城県平野部

- ・対象構造物：橋梁下部工
- ・内容：ひび割れ誘発目地間のひび割れ
- ・原因の推定：温度応力によるひび割れ（それ以外にも？）



注) 目視評価点は暫定値  
精査が必要

ひび割れ誘発目地間のひび割れ  
(施工由来+温度応力? 錆び汁の原因?)

## 付録2 トンネル覆工調査結果



調査トンネル一覧

調査年月日	No.	県名	所在地	国道	トンネル名	延長(m)	完成年	健全性	点検年	備考
2021/7/22	1	福島	いわき市久之浜	-	A	190.0	2013年	Ⅱ	2015年	海岸線
	2		いわき市平上荒川	-	B	262.0	1993年	Ⅱ	2018年	
	3		いわき市平上荒川	-	C	374.0	1992年	Ⅱ	2018年	
	4		いわき市平上荒川	-	D	270.0	2016年	Ⅱ	2017年	5年間長期保証
	5		いわき市平上荒川	-	E	364.9	2016年	Ⅱ	2017年	5年間長期保証
	6		いわき市三和町	-	F	1,385.0	2005年	Ⅲ	2018年	
	7		いわき市三和町	-	G	743.0	2010年	Ⅱ	2015年	
2021/7/23	8	山形	会津坂下町	-	H	1,045.0	2001年	Ⅱ	2018年	
	9		郡山市熱海町	-	I	500.0	1989年	Ⅱ	2018年	
	10		郡山市熱海町	-	J	1,340.0	1991年	Ⅱ	2018年	
2021/8/1	11	山形	鶴岡市大綱	-	K	757.0	1990年	Ⅲ	2018年	
	12		鶴岡市大綱	-	L	881.0	1989年	Ⅲ	2018年	
2021/8/2	13	秋田	能代市二ツ井	-	M	644.0	1993年	Ⅱ	2016年	
2021/8/17	14	青森	能代市二ツ井	-	N	637.0	1987年	Ⅲ	2016年	矢板工法
	15		大鰐町	-	O	154.0	1993年	Ⅱ	2014年	
2021/9/1	16	岩手	普代村	-	P	2,058.0	2019年	Ⅱ	2020年	手引き発行後
	17	岩手	普代村	-	Q	256.0	2021年	I	2021年	手引き発行後
	18	岩手	普代村、野田町	-	R	1,587.0	2021年	I	2021年	手引き発行後
	19	岩手	野田村安家	-	S	997.0	2018年	I	2021年	手引き発行後
	20	岩手	普代村	-	T	1,582.0	2018年	Ⅱ	2020年	手引き発行後
	21	岩手	久慈市宇部町	-	U	446.0	2016年	I	2020年	
	22	岩手	野田村	-	V	293.0	2020年	I	2020年	手引き発行後
2021/9/27	23	岩手	久慈市長内町	-	W	1,368.0	2021年	I	2021年	手引き発行後
	24	山形	真室川町	-	X	95.0	2000年	Ⅱ	2017年	

調査トンネル目視評価点

No.	トンネル名	延長	完成年	健全性	評価点						合計	備考
					1. はく離	2. 気泡	3. 水はしり・砂すじ	4. 色むら・打ち重ね線	5. 施工目地不良	6. 検査窓段差		
1	A	190.0	2013年	II	1	1.5	1	1	1.5	1	7.0	
2	B	262.0	1993年	II	1	1	0	0	0	1	3.0	
3	C	374.0	1992年	II	1	2	0	0	0	1	4.0	
4	D	270.0	2016年	II	3	3	2.5	2	3.5	2	16.0	5年間長期保証
5	E	364.9	2016年	II	3	3.5	2.5	2.5	3	3	17.5	5年間長期保証
6	F	1,385.0	2005年	III	1.5	1	0	0	2	1	5.5	
7	G	743.0	2010年	II	2.5	3	3	2	2	3	15.5	
8	H	1,045.0	2001年	II	1	1.5	0	0	1.5	1	5.0	
9	I	500.0	1989年	II	1	1	0	0	0	1	3.0	
10	J	1,340.0	1991年	II	1	1.5	0	0	0	-	2.5	
11	K	757.0	1990年	III	0	0	0	0	0	1	1.0	
12	L	881.0	1989年	III	0	0	0	0	0	0	0.0	
13	M	644.0	1993年	II	0	0	1	0	0	1.5	2.5	
14	N	637.0	1987年	III	0	0	0	0	0	-	0.0	
15	O	154.0	1993年	II	0	1	0	0	0	1	2.0	
16	P	2,058.0	2019年	II	1	3	2.5	0	2	3	11.5	手引き発行後
17	Q	256.0	2021年	I	2.5	3.5	2.5	3.5	3	2.5	17.5	手引き発行後
18	R	1,587.0	2021年	I	2	3.5	3	2	2	3	15.5	手引き発行後
19	S	997.0	2018年	I	3	2	2	1	3	3	14.0	手引き発行後
20	T	1,582.0	2018年	II	3	2	2	2	2	2	13.0	手引き発行後
21	U	446.0	2016年	I	3.5	3	3.5	3	3	3	19.0	
22	V	293.0	2020年	I	3.5	3	3	2.5	3	3.5	18.5	手引き発行後
23	W	1,368.0	2021年	I	2	2.5	2.5	2	2.5	3	14.5	手引き発行後
24	X	95.00	2000年	II	2	2	0.5	1	1	1	7.5	

トンネル覆工調査シート

No. 1

調査日: 2021/7/22

トンネル名	A	国道	-	県名	福島	所在地	いわき市久之浜	完成年	2013年
延長	190m	配合	不明	目地形式	台形目地	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	メタルフォーム、検査窓(延長方向7、周方向7)			打設方法(予想)		天端は吹き上げ1箇所から打設			
備考	海岸線、飛来塩分あり								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	1	セントル型枠に貼りつき、はく離した箇所(補修跡)が多数ある。型枠脱型強度の管理不足が原因か?
2. 気泡	1.5	鋼製型枠のため気泡は比較的少ないが、側壁にも存在する。
3. 水はしり・砂すじ	1	側壁部にブリーディング水がのぼった跡あり。
4. 色むら・打ち重ね線	1	天端しまは比較的薄い。流れしま多数あり。水平打ち重ね線に沿ったひび割れあり。
5. 施工目地不良	1.5	うきあり。目地蛇行あり。
6. 検査窓段差	1	段差は比較的少ないが、窓枠周辺の砂すじや補修跡が多数ある。
その他欠陥	-	インバート拘束によるひび割れ(スパン中央部)
漏水状況	-	無し
補修・補強状況	-	坑口2スパンのSL付近、目地に補修あり
総評	2010年台の品質確保の取り組みを実施していないトンネルでは一般的な施工と判定した。検査窓からの締固めは実施されていたと予想するが、品質確保の取り組み意識は低い。	

7

坑門工



覆工全景

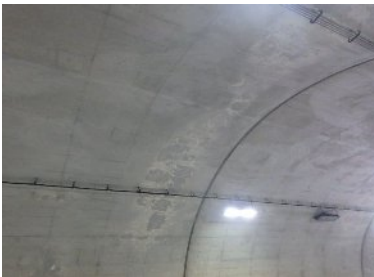


代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・はく離箇所多数。特に吹き上げ箇所周辺に多い。

2. 気泡



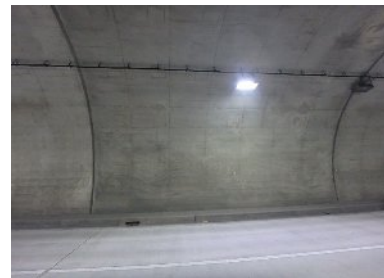
・側壁上部に気泡多数あり。

3. 水はしり・砂すじ



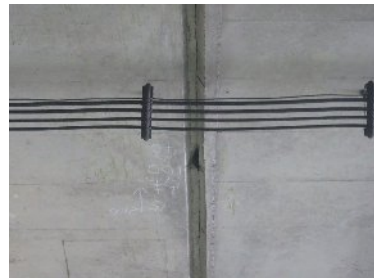
・端部・まど枠付近に多数あり。

4. 色むら・打ち重ね線



・打ち重ね線がコンクリートを流した方向に沿ってあり。

5. 施工目地不良



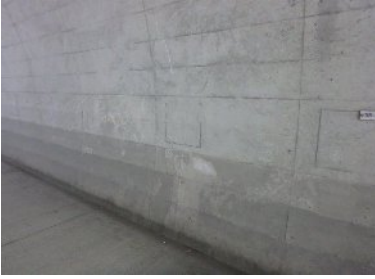
・台形目地を使用。うきあり。

6. 検査窓段差



・一部の窓枠周辺に砂すじがある。

その他欠陥



・中央スパンに拘束ひび割れ、0.5mm



・坑口から1～2スパンに目地補修・拘束ひび割れ補修・水平打ち重ね線補修あり



・打ち重ね線に沿ったひび割れあり。締固め管理不足が原因か？

トンネル覆工調査シート

No. 2

調査日: 2021/7/22

トンネル名	B	国道	-	県名	福島	所在地	いわき市平上荒川	完成年	1993年
延長	262m	配合	不明	目地形式	突合せ	健全度	I	点検年	2020年
セトル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向4、周方向7)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設		
備考	側壁部に防水塗装あり。								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	1	側壁や吹き上げ口周辺などにはく離が見られる。側壁部はケレン不足、剥離剤塗布不良が原因？天端は脱型強度不足？
2. 気泡	1	側壁上部にも気泡多数あり。SL下は防水塗装が実施されている。
3. 水はしり・砂すじ	0	特につま部の水はしり、砂すじが多い。ブリーディングが抜けていない。
4. 色むら・打ち重ね線	0	天端は流れしまの境界でひび割れ多数あり。打ち重ね線に沿って水平ひび割れ多数あり。
5. 施工目地不良	0	突合せ目地なので、ひび割れ・欠け等が多数ある。
6. 検査窓段差	1	段差は少ないが、窓枠周辺に砂すじが目立つ。
その他欠陥	-	拘束ひび割れ(延長方向に2本程度)、側壁部に亀甲状のひび割れあり。
漏水状況	-	なし
補修・補強状況	-	目地部にはく落防止ネット多数。
総評	1990年代のトンネルでは一般的な施工と判定する。品質確保の取り組み意識はない。	

3

坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・はく離箇所多数。特に吹き上げ箇所周辺に多い。

2. 気泡



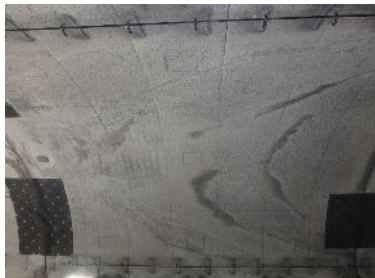
・側壁上部に気泡多数あり。

3. 水はしり・砂すじ



・ラップ側・妻側の側壁部に明瞭な水はしりの跡が多数ある。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端の流れ縞に沿ってひび割れが発生している。

5. 施工目地不良



・ラップ側・妻側にひび割れ、欠けが多数ある。  
・目地にはく落防止ネットが多数設置されている。

6. 検査窓段差



・窓枠周辺に砂すじ等が多数ある。

その他欠陥



・目地部のはく落防止対策



・ラップ側側壁はパイプレータ作業が実施されていないため、水はしり跡がはっきり表れる。  
・打ち重ね線に沿ったひび割れが発生している。



・SL下の防水塗装に亀甲状のひび割れが見れる。

トンネル覆工調査シート

No. 3

調査日: 2021/7/22

トンネル名	C	国道	-	県名	福島	所在地	いわき市平上荒川	完成年	1992年
延長	374m	配合	不明	目地形式	突合せ	健全度	I	点検年	2020年
セトル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向3、周方向7)				打設方法(予想)	天端は吹き上げ1~2箇所から打設			
備考	内装板あり。								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	1	吹き上げ口周辺などにはく離が見られる。脱型強度不足が原因か？
2. 気泡	2	側壁上部に気泡あり。この年代では少ない方だと思う。SL下は防水塗装が行われている。
3. 水はしり・砂すじ	0	特につま部の水はしり、砂すじが多い。ブリーディングが抜けていない。
4. 色むら・打ち重ね線	0	天端は流れしまの境界でひび割れ多数あり。打ち重ね線に沿って水平ひび割れ多数あり。
5. 施工目地不良	0	突合せ目地なので、ひび割れ・欠け等が多数ある。1.3mm有害なひび割れもあり。
6. 検査窓段差	1	段差は少ないが、窓枠周辺に砂すじがある。この年代では少ない方だと思う。
その他欠陥	-	拘束ひび割れ(延長方向に1~3本程度)あり。
漏水状況	-	エプロンセメント漏出。
補修・補強状況	-	目地部にはく離防止ネット多数。
総評	1990年代のトンネルでは一般的な施工と判定する。品質確保の取り組み意識はない。	

4

坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・吹き上げ箇所周辺にはく離が多数ある。

2. 気泡



・側壁上部に気泡多数あり。

3. 水はしり・砂すじ



・ラップ側・妻側の側壁部に明瞭な水はしりの跡が多数ある。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端の流れ縞に沿ってひび割れが発生している。

5. 施工目地不良



・ラップ側・妻側にひび割れ、欠けが多数ある。  
・目地にはく離防止ネットが多数設置されている。

6. 検査窓段差



・窓枠周辺に砂すじ等が多数ある。

その他欠陥



- ・目地部のひび割れ、幅1.3mm。
- ・打ち重ね線に沿ったひび割れあり。
- ・エフロレッセンス漏出あり。



- ・坑門工と覆工の目地部には落防止ネットあり。覆工には明瞭なひび割れが発生している。



- ・天端吹き上げ口の周りに亀甲状のひび割れが発生している。特に坑口から近いスパンに目立つ。加水等により乾燥収縮が大きいのが原因か？



- ・インバート拘束によるひび割れが多数ある。



トンネル覆工調査シート

No. 4

調査日: 2021/7/22

トンネル名	D	国道	-	県名	福島	所在地	いわき市平上荒川	完成年	2016年
延長	280m	配合(アーカイブより)	21-15-25BB	目地形式	三角	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向7、周方向7(天端に一部追加あり))		打設方法(予想)		天端は吹き上げ1箇所から打設				
備考	5年保証対象現場、技術提案で覆工の品質・耐久性の向上がテーマ、覆工の施工は2014年12月～2015年6月。								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	3	明確なはく離は見当たらないが、一部に補修したと推測できる跡がある。
2. 気泡	3	側壁上部の一部に気泡あり。
3. 水はしり・砂すじ	2.5	特につま部の水はしりの跡が残る。ブリーディングが抜けていない。
4. 色むら・打ち重ね線	2	側壁は妻側に向かって流れ縞があるが、ひび割れの発生は現時点で無し。天端部にも吹き上げ口からの流れ縞が残る。
5. 施工目地不良	3.5	目地不良は見当たらない。目地の通りも直線状である。
6. 検査窓段差	2	段差はないが、窓枠周辺に砂すじがある。
その他欠陥	-	インバート拘束ひび割れ(延長方向に1本)あり。
漏水状況	-	なし
補修・補強状況	-	インバート拘束のひび割れは、5年保証のため、完成前に補修済みである。
総評	震災後の5年保証が適用された現場である。材齢28日養生や充填検知センサ・加圧充填など最新の技術で打設された覆工である。しかし、この時点では品質確保の取り組みは確立されておらず、現場独自の取り組みで品質確保が行なわれた。	

16

坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・白い範囲が補修跡に見える。

2. 気泡



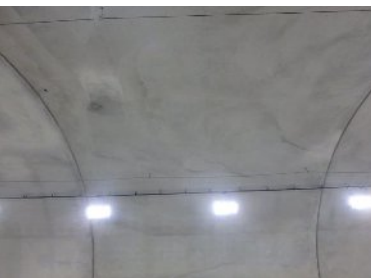
・側壁の一部に気泡あり。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁の端部に水はしりの跡が多数ある。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端の吹き上げ口周辺に明確な縞が残る。  
・側壁の流れ縞は比較的少ないが一部に残る。

5. 施工目地不良



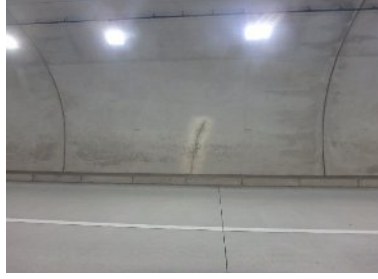
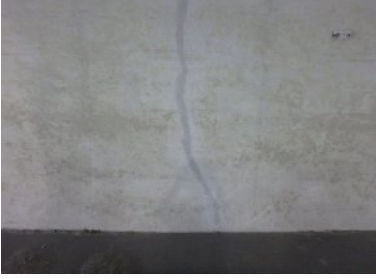
・目地は良好

6. 検査窓段差



・窓枠周辺に砂すじ等が多数ある。

その他欠陥



- ・インバート拘束によるひび割れ補修跡あり。
- ・ひび割れ幅は0.4mm。

トンネル覆工調査シート

No. 5

調査日: 2021/7/22

トンネル名	E	国道	-	県名	福島	所在地	いわき市平上荒川	完成年	2016年
延長	365m	配合(アーカイブより)	21-15-25BB	目地形式	三角	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向7、周方向7(天端に一部追加あり))		打設方法(予想)		天端は吹き上げ1箇所から打設				
備考	5年保証対象現場、技術提案で覆工の品質・耐久性の向上がテーマ、覆工の施工は2014年12月～2015年6月。								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	3	明確なはく離は見当たらないが、一部の窓枠の下にはく離跡がある。
2. 気泡	3.5	側壁の一部に気泡あり。
3. 水はしり・砂すじ	2.5	特につま部の水はしりの跡が残る。ブリーディングが抜けていない。
4. 色むら・打ち重ね線	2.5	側壁は妻側に向かって流れ縞があるが、ひび割れの発生は現時点で無し。天端部にも吹き上げ口からの流れ縞が残る。
5. 施工目地不良	3	一部にうきや欠けがある。目地の通りは直線状である。
6. 検査窓段差	3	一部に軽微な段差があり。一部の窓枠周辺に砂すじがあるが問題となる欠陥ではない。
その他欠陥	-	インバート拘束ひび割れ(延長方向に1本)あり。天端中央の縦断方向にひび割れあり(1スパンのみ)。
漏水状況	-	なし
補修・補強状況	-	インバート拘束のひび割れ及び天端中央のひび割れは、5年保証のため、完成前に補修済みである。
総評	震災後の5年保証が適用された現場である。材齢28日養生や充填検知センサ・加圧充填など最近の技術で打設された覆工である。しかし、この時点では品質確保の取り組みは確立されておらず、現場独自の取り組みで品質確保が行なわれた。	

17.5

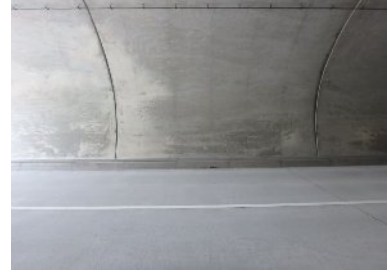
坑門工



覆工全景

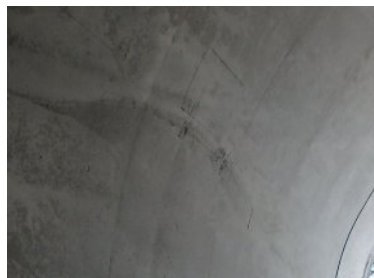


代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・窓枠の下にはく離あり。

2. 気泡



・側壁の一部に気泡あり。全体的には少ない。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁の端部に水はしりの跡が多数ある。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端の吹き上げ口周辺に明確な縞が残る。  
・側壁の流れ縞は比較的少ないが一部に残る。

5. 施工目地不良



・目地の一部にうき、欠けがある。

6. 検査窓段差



・窓枠の一部に段差あり。窓閉塞時にゆるみ。

その他欠陥



- ・インバート拘束によるひび割れ補修跡あり。
- ・天端中心に縦断方向のひび割れ補修跡あり。

トンネル覆工調査シート

No. 6

調査日: 2021/7/22

トンネル名	F	国道	-	県名	福島	所在地	いわき市三和町	完成年	2005年
延長	1385m	配合	不明	目地形式	台形	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向5、周方向5、天端は不規則な窓)		打設方法(予想)		天端は吹き上げ1or2箇所から打設				
備考	内装板あり。								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	1.5	天端吹き上げ口周辺にはく離補修跡あり。
2. 気泡	1	側壁の端部に気泡が多数ある。締固めが実施されていない。
3. 水はしり・砂すじ	0	側壁に水はしりが多数あり。
4. 色むら・打ち重ね線	0	天端吹き上げ口周辺に不規則なひび割れあり。水セメント比が大きいコンクリートを打設? 流れ縞にそってひび割れが多数あり。
5. 施工目地不良	2	目地の蛇行あり。一部の目地に小規模な欠けがある。ブリーディングが集まりによる強度不足が原因か?
6. 検査窓段差	1	窓枠周辺に砂すじが多数あり。
その他欠陥	-	ラップ側に半月状のひび割れあり。天端吹き上げ口周辺に亀甲状のひび割れあり。縞にそってひび割れが多数あり。
漏水状況	-	エプロンセメント漏出あり。一部に漏水導水あり。
補修・補強状況	-	現在のところ補修は行われていない。
総評	天端に打設窓を多く配置するなど締固めに対する意識が見られるが、品質は確保されていない。	

5.5

坑門工



覆工全景



代表覆工



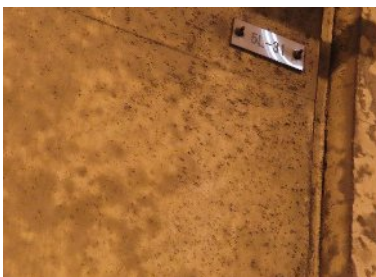
目視調査項目

1. はく離



・天端吹き上げ口周辺にはく離あり。

2. 気泡



・側壁の端部に気泡あり。

3. 水はしり・砂すじ



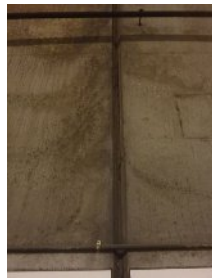
・側壁に水はしりの跡が多数ある。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端の吹き上げ口周辺に明確な縞が残る。  
・側壁の流れ縞も明確に残る。

5. 施工目地不良



・目地の一部にうき、欠け、蛇行がある。

6. 検査窓段差

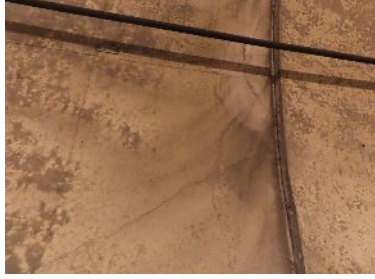


・窓枠周辺に砂すじが多数ある。

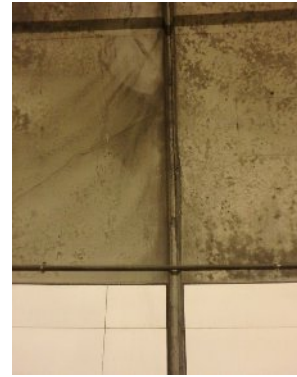
その他欠陥



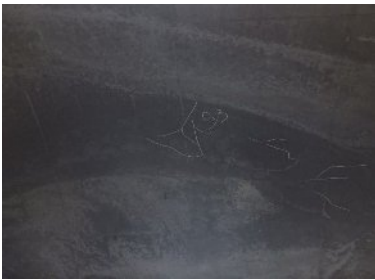
・天端吹き上げ口付近に不規則なひび割れあり。



側壁に半月状のひび割れあり。



・施工目地の蛇行あり。



・天端に亀甲状のひび割れあり。



・天端に不規則に検査窓を設置している。

トンネル覆工調査シート

No. 7

調査日: 2021/7/22

トンネル名	G	国道	-	県名	福島	所在地	いわき市三和町	完成年	2010年
延長	743m	配合	不明	目地形式	台形	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向5~10、周方向9)				打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設			
備考	側壁にタイル貼りの防護								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	2.5	天端吹き上げ口周辺にはく離補修跡あり。
2. 気泡	3	側壁の一部に気泡がある。
3. 水はしり・砂すじ	3	側壁に水はしりは比較的少ない。
4. 色むら・打ち重ね線	2	流れ縞に沿ったひび割れが一部にある。
5. 施工目地不良	2	一部の目地にうき、欠けがある
6. 検査窓段差	3	検査窓の一部に段差と砂すじがあるが、問題となるような欠陥ではない。
その他欠陥	-	側壁中央部に拘束ひび割れあり。
漏水状況	-	なし。
補修・補強状況	-	現在のところ補修は行われていない。
総評	検査窓を側壁部に10個、天端付近に3列設置するなど、セントルに工夫があり、品質確保の意識が高いトンネルである。天端部にパイプレータの締固め跡が放射状に残っており、打ち重ねに配慮しているのが解る。品質確保が推奨されていない年代での良好な事例である。	

15.5

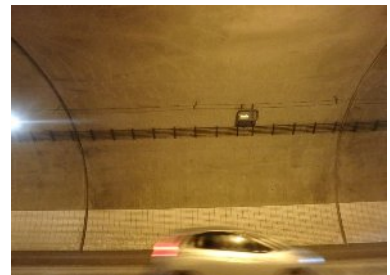
坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・天端付近の一部にはく離あり。

2. 気泡



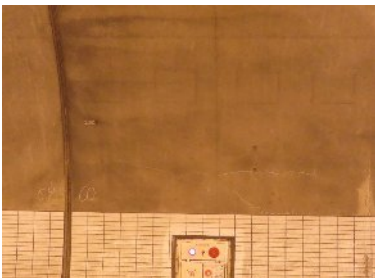
・側壁に気泡があるが少ない。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁端部の縞は比較的少ない。

4. 色むら・打ち重ね線



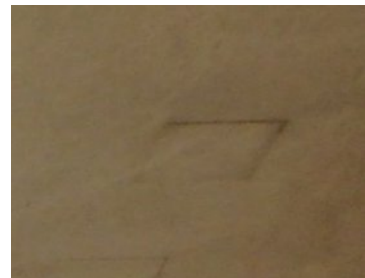
・側壁の一部に打ち重ね線に沿ったひび割れあり。

5. 施工目地不良



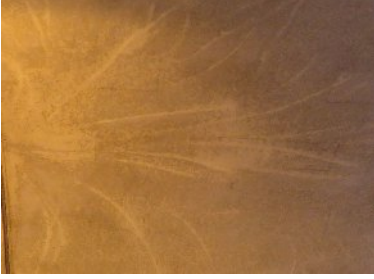
・目地の一部にうき、欠けがある。

6. 検査窓段差



・窓枠の一部に段差と周辺に砂すじがある。

その他欠陥



・天端に放射状のパイプレータ締固め跡がある。  
確実に締固めが行われている。



・天端の検査窓の配置3列。



・側壁下部は検査窓を延長方向に10個配置。



・側壁中央に拘束ひび割れあり。



トンネル覆工調査シート

No. 8

調査日: 2021/7/23

トンネル名	H	国道	-	県名	福島	所在地	会津坂下町	完成年	2001年
延長	1045m	配合	18-12-40	目地形式	台形目地	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	メタルフォーム、検査窓(延長方向6、周方向7)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設		
備考	側壁にタイル貼りの防護								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	1	天端吹き上げ口周辺にはく離あり。
2. 気泡	1.5	メタル枠を使用しているため全体的には気泡は少ないが、側壁の端部に気泡があり。
3. 水はしり・砂すじ	0	側壁に明瞭な水はしりあり。締固めが実施されていない。
4. 色むら・打ち重ね線	0	流れ縞に沿ったひび割れが一部にある。
5. 施工目地不良	1.5	目地の弱部にうき、欠けがある。
6. 検査窓段差	1	検査窓に段差と砂すじがあり。
その他欠陥	-	側壁中央部に拘束ひび割れあり。天端に亀甲状のひび割れあり。
漏水状況	-	一部に漏水、エフロレンス漏出あり。
補修・補強状況	-	現在のところ補修は行われていない。
総評	2000年代のトンネルでは一般的な施工と判定する。品質確保の取り組み意識はない。	

5

坑門工



覆工全景



代表覆工



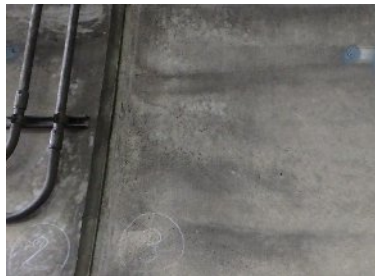
目視調査項目

1. はく離



・天端付近の一部にはく離あり。

2. 気泡



・側壁端部に気泡があり。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁端部に水はしり、打ち重ね線が明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端・側壁に打ち重ね線に沿ったひび割れあり。

5. 施工目地不良



・目地にうき、欠けが多数あり。

6. 検査窓段差

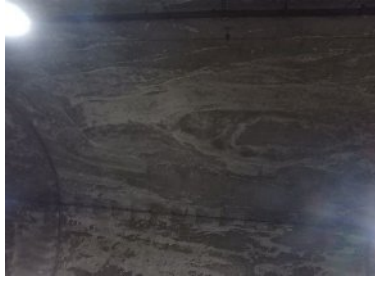


・窓枠に段差と周辺に砂すじがある。

その他欠陥



- ・側壁中央部に拘束ひび割れあり。
- ・エフロレッセンス漏出あり。



- ・天端・側壁の明瞭な縞。



- ・天端に亀甲状のひび割れあり。



- ・天端吹き上げ口に流れ縞に沿ってうきがある。

トンネル覆工調査シート

No. 9

調査日: 2021/7/23

トンネル名	I	国道	-	県名	福島	所在地	郡山市熱海町		完成年	1989年
延長	500m	配合	不明		目地形式	突合せ	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	メタルフォーム、検査窓(延長方向3、周方向2)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1~2箇所から打設			
備考	側壁にタイル貼りの防護									

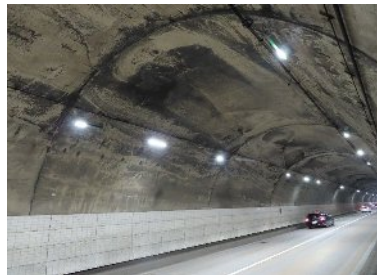
目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	1	側壁にはく離(ジャンカ)補修あり。
2. 気泡	1	メタル枠を使用しているため全体的には気泡は少ないが、側壁の端部に気泡があり。
3. 水はしり・砂すじ	0	側壁に明瞭な水はしりあり。締固めが実施されていない。
4. 色むら・打ち重ね線	0	打ち重ね線に沿ったひび割れが多数あり。多くのひび割れからエフロッセンス漏出あり。
5. 施工目地不良	0	坑口部の目地は補修されている。うき・欠け多数あり。目地段差あり。
6. 検査窓段差	1	検査窓に段差と砂すじがあり。
その他欠陥	-	全周に拘束ひび割れあり。天端に亀甲状のひび割れあり。かぶり不足箇所あり。
漏水状況	-	漏水、エフロッセンス漏出あり。
補修・補強状況	-	漏水対策、目地補修あり。
総評	品質確保の取り組み意識が無い。検査窓は側壁部に1列のみで、アーチから天端までの多くの範囲を吹き上げ口から打設していると推察される。	

3

坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



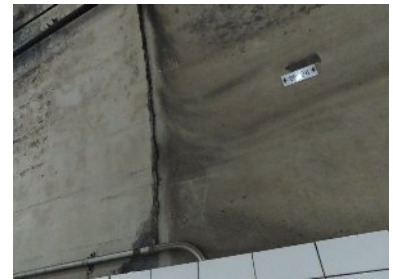
・側壁にはく離あり。

2. 気泡



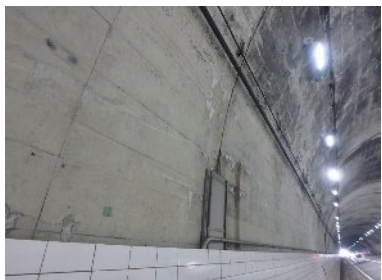
・側壁端部に気泡があり。気泡は比較的少ない。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁端部に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端・側壁に打ち重ね線に沿ったひび割れあり。

5. 施工目地不良



・目地にうき、欠けが多数あり。

6. 検査窓段差



・検査窓枠の周辺に砂すじがある。

その他欠陥



・ひび割れ補修あり。漏水導水あり。  
・エフロレッセンス漏出あり。



・側壁ひび割れからエフロレッセンス漏出あり。



・天端は2箇所の吹き上げ口から打設している。



・かぶり不足で鉄筋が露出している。



・天端部に亀甲状ひび割れあり。



・天端のながれ縞に沿ってひび割れあり。

トンネル覆工調査シート

No. 10

調査日: 2021/7/23

トンネル名	J	国道	-	県名	福島	所在地	郡山市熱海町	完成年	1992年
延長	1340m	配合	不明	目地形式	突合せ	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	メタルフォーム、検査窓なし		打設方法(予想)		天端は吹き上げ1箇所から打設				
備考	内装板あり。								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	1	天端吹き上げ口付近にはく離あり。
2. 気泡	1.5	メタル枠を使用しているため全体的には気泡は少ないが、側壁の端部に大きい気泡があり。
3. 水はしり・砂すじ	0	側壁に明瞭な水はしりあり。締固めが実施されていない。
4. 色むら・打ち重ね線	0	打ち重ね線に沿ったひび割れが多数あり。多くのひび割れからエフロッセンス漏出あり。
5. 施工目地不良	0	坑口部の目地は一部補修されている。うき・欠け多数あり。目地段差あり。
6. 検査窓段差	-	検査窓なし。
その他欠陥	-	側壁中央に拘束ひび割れあり。天端に亀甲状のひび割れあり。
漏水状況	-	漏水、エフロッセンス漏出あり。
補修・補強状況	-	漏水対策、目地補修あり。
総評	品質確保の取り組み意識が無い。検査窓が見つからなかった。	

2.5

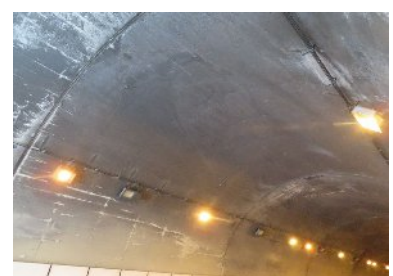
坑門工



覆工全景

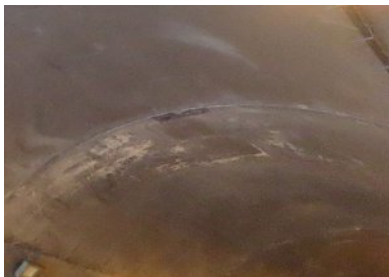


代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・天端吹き上げ口付近にはく離あり。

2. 気泡



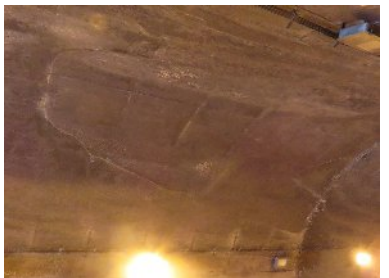
・側壁端部に気泡あり。気泡は比較的少ない。

3. 水はしり・砂すじ



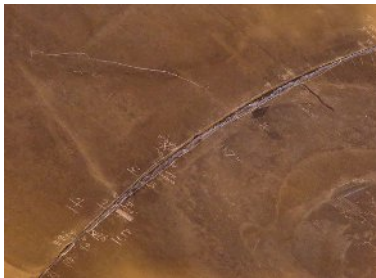
・側壁端部に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端・側壁に打ち重ね線に沿ったひび割れ・うきあり。

5. 施工目地不良



・目地にうき、欠けが多数あり。

6. 検査窓段差



検査窓なし

その他欠陥



- ・天端吹き上げ付近のひび割れ。
- ・メタルフォームの突合せにジャンカ。



- ・天端部に亀甲状ひび割れあり。



- ・目地部の補修あと。

トンネル覆工調査シート

No. 11

調査日: 2021/8/1

トンネル名	K	国道	-	県名	山形	所在地	鶴岡市大綱		完成年	1990年
延長	757m	配合	不明	目地形式	突合せ	健全度	I	点検年	2020年	
セトル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向4、周方向5)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設			
備考	防水塗装あり。ダム湖より低標高のため漏水が激しい。全線湿っている。									

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	0	天端吹き上げ口付近にはく落防止ネットあり。
2. 気泡	0	気泡多数あり。
3. 水はしり・砂すじ	0	側壁に明瞭な水はしりあり。締固めが実施されていない。
4. 色むら・打ち重ね線	0	打ち重ね線に沿ったひび割れが多数あり。多くのひび割れからエフロレッセンス漏出あり。
5. 施工目地不良	0	坑口部の目地は補修されている。うき・欠け多数あり。漏水あり。目地段差あり。
6. 検査窓段差	1	検査窓の周囲に砂すじあり。
その他欠陥	-	天端に亀甲状のひび割れあり。全周方向にひび割れあり。
漏水状況	-	漏水、エフロレッセンス漏出あり。
補修・補強状況	-	目地漏水対策あり。はく落対策あり。トンネル全周に防護板が設置されているスパン有。
総評	品質確保の取り組み意識が無い。打設したコンクリートの配合の水セメント比が高く、乾燥収縮やASRによる亀甲状のひび割れが発達している。覆工の状態が非常にわるいため、全面打替え等の抜本的な対策が必要と感じた。	

1

坑門工



覆工全景



代表覆工



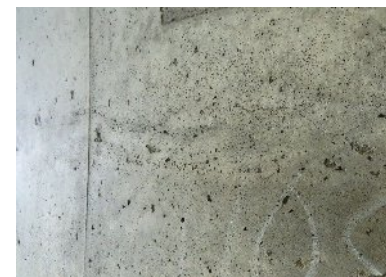
目視調査項目

1. はく離



・天端吹き上げ口付近にはく離あり。

2. 気泡



・側壁に多数気泡あり。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁端部に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・側壁打ち重ねからエフロレッセンス漏出あり。  
・目地から漏出あり。

5. 施工目地不良



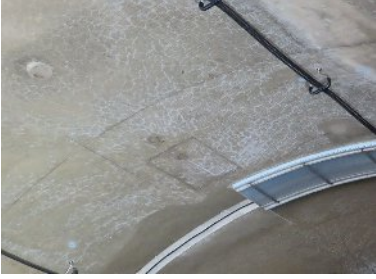
・目地にうき、欠けが多数あるため、Vカット補修されている。

6. 検査窓段差



・検査窓枠の周辺に砂すじがある。

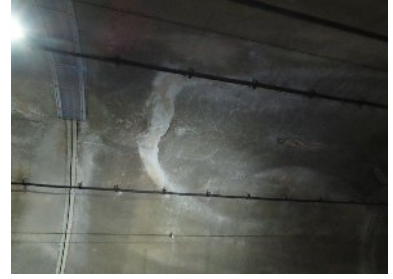
その他欠陥



・天端に亀甲状のひび割れが明瞭にある。



・全周に防護板が設置されている。



・天端付近の明瞭な打ち重ね線。



・目地部に導水板あり。



・打ち重ね線のひび割れからエフロレッセンス漏出あり。



トンネル覆工調査シート

No. 12

調査日: 2021/8/1

トンネル名	L	国道	-	県名	山形	所在地	鶴岡市大綱	完成年	1989年
延長	881m	配合	不明	目地形式	突合せ	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向4、周方向5)				打設方法(予想)		天端は吹き上げ1~2箇所から打設		
備考	防水塗装あり。ダム湖より低標高のため漏水が激しい。中央区間は湿っている。								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	0	天端・側壁に多数のはく離あり。ジャンカ補修箇所がはく離している箇所もある。
2. 気泡	0	気泡を越えて、ジャンカが多数あり。
3. 水はしり・砂すじ	0	側壁に明瞭な水はしりあり。締固めが実施されていない。
4. 色むら・打ち重ね線	0	打ち重ね線に沿ったひび割れが多数あり。多くのひび割れからエフロレッセンス漏出あり。
5. 施工目地不良	0	坑口部の目地は補修されている。うき・欠け多数あり。漏水あり。目地段差あり。
6. 検査窓段差	0	検査窓の周囲に砂すじあり。明瞭な段差あり。窓の同じところではく離が連続してあるため、欠陥を気にしていないと思われる。
その他欠陥	-	天端に亀甲状のひび割れあり。全周方向にひび割れあり。鉄筋の露出あり。
漏水状況	-	下り線より山側に位置するため下り線よりは漏水は少ないが、ひび割れからのエフロレッセンス漏出あり。
補修・補強状況	-	目地漏水対策あり。はく落対策あり。トンネル全周に防護板が設置されているスパン有。
総評	0	品質確保の取り組み意識が無い。打設したコンクリートの配合の水セメント比が高く、乾燥収縮やASRによる亀甲状のひび割れが発達している。覆工の状態が非常にわるいため、全面打替え等の抜本的な対策が必要と感じた。

坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・天端や側壁に多数はく離あり。

2. 気泡



・側壁にジャンカが多数あり。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・側壁打ち重ねからエフロレッセンス漏出あり。

5. 施工目地不良



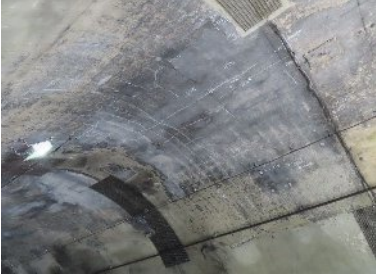
・目地にうき、欠けが多数あるため、剥落防止ネットが設置されている。

6. 検査窓段差



・検査窓枠の周辺に砂すじがある。  
・見事な水はしり。

その他欠陥



・天端の補修箇所新たに発生しているひび割れ。



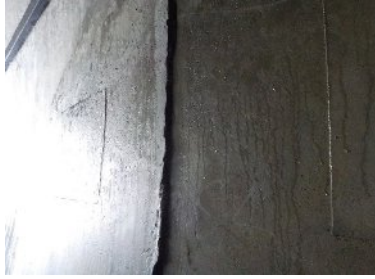
・全周に防護板が設置されている。



・天端吹き上げ口付近の亀甲状のひび割れ。



・鉄筋の露出あり。かぶり不足。



・目地段差が1cm以上ある。



・締固め不良による微細なひび割れが多数ある。

トンネル覆工調査シート

No. 13

調査日: 2021/8/2

トンネル名	M	国道	-	県名	秋田	所在地	能代市二ツ井		完成年	1993年
延長	644m	配合	不明		目地形式	突合せ	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	メタルフォーム、検査窓(延長方向4、周方向7)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1~2箇所から打設			
備考	内装板あり。									

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	0	天端・側壁にジャンカの補修跡が多数あり。
2. 気泡	0	側壁に気泡やジャンカが多数ある。
3. 水はしり・砂すじ	1	側壁に明瞭な砂すじあり。
4. 色むら・打ち重ね線	0	天端・側壁の流れ縞にひび割れが発生している。
5. 施工目地不良	0	多数のスパンに欠け、剥落が生じている。
6. 検査窓段差	1.5	検査窓の周囲に砂すじあり。
その他欠陥	-	天端吹き上げ口付近に亀甲状のひび割れあり。セントルラップ部分に半月状のひび割れあり。インバート拘束によるひび割れあり。
漏水状況	-	無し。
補修・補強状況	-	断面修復跡あり。はく落防止ネットの設置あり。
総評	1990年代のトンネルでは一般的な施工と判定する。品質確保の取り組み意識はない。	

2.5

坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・天端・側壁に補修跡が多数あり。

2. 気泡



・側壁に気泡が多数ある。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端・側壁の流れ縞に沿ってひび割れあり。  
・はく落防止ネットが多数ある。

5. 施工目地不良



・うき、剥落が多数あり。

6. 検査窓段差



・検査窓枠の周辺に砂すじがある。

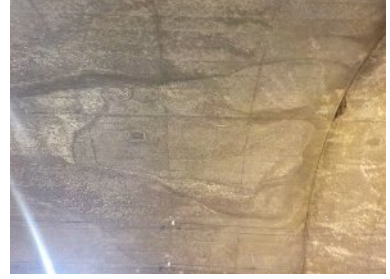
その他欠陥



・セントララップ部分に半月状のひび割れ。



・断面修復跡あり。  
・はく落防止ネットあり。



・天端吹き上げ口付近の亀甲状のひび割れ。



・インパート拘束によるひび割れあり。

トンネル覆工調査シート

No. 14

調査日: 2021/8/2

トンネル名	N	国道	-	県名	秋田	所在地	能代市二ツ井		完成年	1987年
延長	637m	配合	不明	目地形式	突合せ	健全度	I		点検年	2020年
セントル仕様(予想)	メタルフォーム、検査窓なし?					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1~2箇所から打設			
備考	内装板あり。									

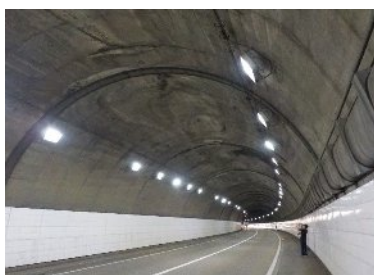
目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	0	天端の吹き上げ口付近にはく離あり。
2. 気泡	0	側壁に気泡・ジャンカが多数ある。
3. 水はしり・砂すじ	0	締固めが実施されていないため、ジャンカが多数存在する。施工不良部の弱部にひび割れが発生している。
4. 色むら・打ち重ね線	0	天端・側壁の打ち重ね線のひび割れからエフロッセンス漏出あり。
5. 施工目地不良	0	ほとんどの目地で不良が生じ、補修されている。
6. 検査窓段差	-	
その他欠陥	-	天端に亀甲状のひび割れあり。インバート拘束と施工不良による弱部のひび割れが繋がっている。
漏水状況	-	漏水あり。ひび割れからエフロッセンス漏出あり。
補修・補強状況	-	全周にはく離防止ネットの設置あり。ひび割れ補修多数あり。
総評	品質確保の取り組み意識が無い。側壁や天端の打ち重ね線のひび割れと施工不良によるひび割れが繋がり、全面ではく離の危険性がある。このため、全周ではく離防止ネットが設置されているスパンがある。全面打替え等の抜本的な対策が必要と感じた。	

0

坑門工



覆工全景

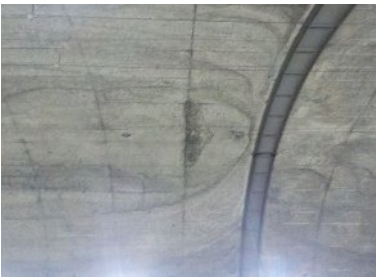


代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・天端吹き上げ口付近のはく離?

2. 気泡



・側壁に気泡・ジャンカが多数ある。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁に水はしり?はく離が明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・側壁の打ち重ね線のひび割れからエフロッセンス漏出あり。

5. 施工目地不良



・うき、剥落が多数あり。  
・ほとんどの目地で補修が実施されている。

6. 検査窓段差



検査窓なし

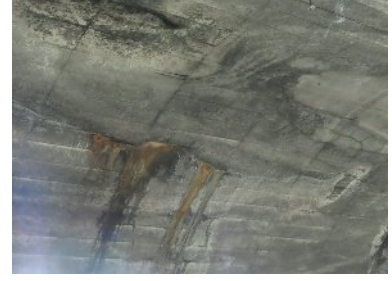
その他欠陥



・全周にはく落防止ネットが設置されている。



・ほとんどの目地で補修が実施されている。  
・導水板が設置されている箇所あり。



・天端吹き上げ口付近の亀甲状のひび割れ。  
・打ち重ね線からエフロレッセンス漏出あり。



・インパート拘束によるひび割れや施工不良によるひび割れが繋がって発生している。



・坑門工にASRIによるひび割れ？



・内装板の裏から漏水が発生している。

トンネル覆工調査シート

No. 15

調査日: 2021/8/17

トンネル名	〇	国道	-	県名	青森	所在地	大鰐町	完成年	1993年
延長	637m	配合	不明	目地形式	突合せ	健全度	I	点検年	2020年
センター仕様(予想)	メタルフォーム、検査窓(延長方向5、周方向7)			打設方法(予想)	天端は吹き上げ1~2箇所から打設				
備考	内装板あり。								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	0	天端にモルタル補修跡が多数あり。
2. 気泡	1	側壁の水はしり箇所に気泡・ジャンカが多数ある。
3. 水はしり・砂すじ	0	締固めが実施されていないため打ち重ね線に沿ってひび割れが発生している。
4. 色むら・打ち重ね線	0	天端・側壁の打ち重ね線のひび割れからエフロッセンス漏出あり。
5. 施工目地不良	0	目地にはく離・はく落あり。叩き落しが行われている。一部に漏水・にじみあり。
6. 検査窓段差	1	窓枠周辺に砂すじあり。窓枠段差、ジャンカあり。
その他欠陥	-	天端にモルタル補修跡が多数あり。インバート拘束によるひび割れあり。
漏水状況	-	漏水あり。ひび割れからエフロッセンス漏出あり。
補修・補強状況	-	天端・側壁にモルタル補修跡が多数あり。
総評	1990年代のトンネルでは一般的な施工と判定する。品質確保の取り組み意識はない。	

2

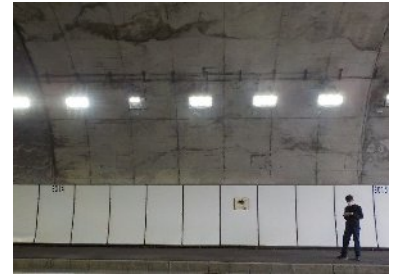
坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・天端・側壁にモルタル補修跡が多数あり。

2. 気泡



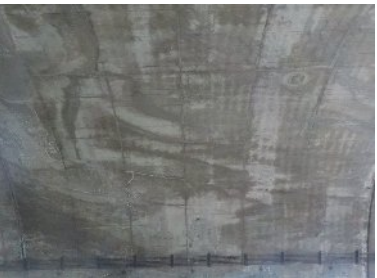
・側壁の水はしり箇所に気泡・ジャンカが多数ある。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・側壁・天端の打ち重ね線が明瞭にあり、ひび割れが発生している。

5. 施工目地不良



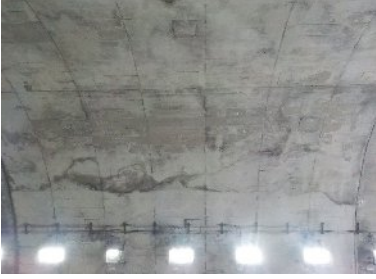
・うき、剥落が多数あり。

6. 検査窓段差

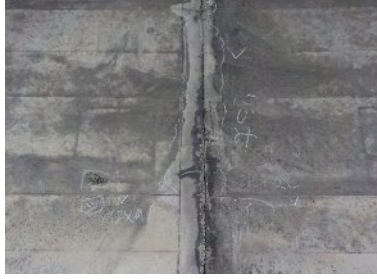


・窓枠周辺に砂すじあり。窓枠段差あり。

その他欠陥



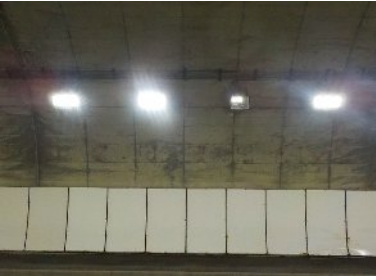
・天端モルタル補修跡。



・目地からのにじみ。  
・検査窓枠にジャンカあり。



・側壁の打ち重ね線にひび割れあり。



・インパート拘束によるひび割れあり。



・ひび割れ幅0.55mm。



トンネル覆工調査シート

No. 16

調査日: 2021/8/17

トンネル名	P	国道	-	県名	岩手	所在地	普代村	完成年	2019年
延長	2,058m	配合(アーカイブより)	21-15-25BB	目地形式	三角目地	健全度	II	点検年	2020年
セトル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向7、周方向7)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設		
備考									

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	1	側壁にはく離が多数ある。多くのスパンで天端に補修跡がある。一部に型枠脱型時の強度不足によるはく離が見受けられた。
2. 気泡	3	側壁の一部に気泡があるが、絶対数は少ない。
3. 水はしり・砂すじ	2.5	打設初期段階の側壁に水はしりが明瞭にある。
4. 色むら・打ち重ね線	0	天端吹き上げ口周辺にコールドジョイントが多数あり不良部は叩き落としされている。締固め管理が実施されていない。
5. 施工目地不良	2	目地部コンクリートの強度不足による欠けや剥落が一部にある。
6. 検査窓段差	3	一部の窓枠周辺に砂すじ、段差がある。
その他欠陥	-	天端吹き上げ口周辺に締固め不良と充填不足によるコールドジョイントが多数ある。天端縦断方向ひび割れあり。
漏水状況	-	なし
補修・補強状況	-	多くのスパンで天端の補修跡がある。目地部補修あり。
総評	目地部にアラミド繊維補強が実施されているが、充填不足や締固め不良により、ジャンカが多数発生している。目地補強など耐久性向上の取り組みが行われているが、品質確保の基本的事項が実施されていないため、初期欠陥が多数発生しており、他のトンネルに劣る。	

11.5

坑門工



覆工全景

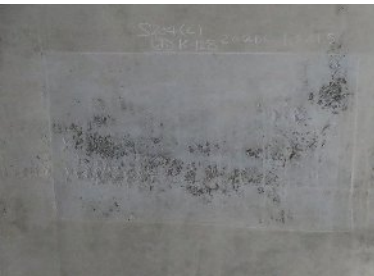


代表覆工



目視調査項目

1. はく離



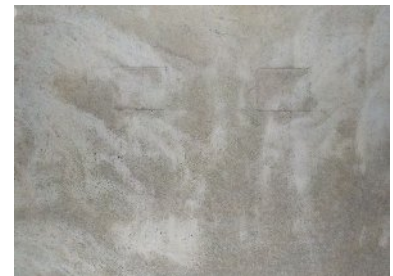
・側壁にはく離あり。

2. 気泡



・側壁の一部に気泡がある。

3. 水はしり・砂すじ



・打設初期段階の側壁に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端吹き上げ口周辺にコールドジョイントが多数ある。

5. 施工目地不良



・欠け、剥落が多数あり。

6. 検査窓段差



・窓枠周辺に砂すじあり。窓枠段差あり。

その他欠陥



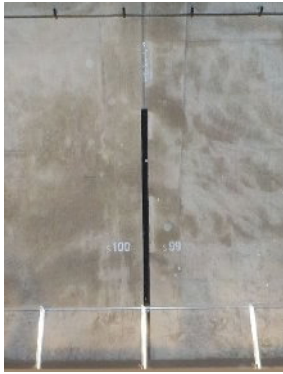
・天端縦断方向ひび割れ。



・天端部の補修跡。多くのスパンで実施されている。  
・天端吹き上げ口周辺にコールドジョイント。



・目地部にアラミド繊維補強が実施されているが、締固め不良や充填不足によるジャンカが多数ある。



・目地部のゴム補修



トンネル覆工調査シート

No. 17

調査日: 2021/8/17

トンネル名	Q	国道	-	県名	岩手	所在地	普代村	完成年	2021年
延長	256m	配合	不明	目地形式	三角目地	健全度	I	点検年	2021年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向7、周方向9、天端3列)				打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設、肩部吹き上げあり			
備考									

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	2.5	側壁や天端の一部にはく離がある。側壁は締固め不足によるはく離が一部にある。天端の妻部にはく離がある。
2. 気泡	3.5	側壁の一部に少量の気泡がある。
3. 水はしり・砂すじ	2.5	打設初期の側壁の両端部に水はしりがある。
4. 色むら・打ち重ね線	3.5	打設初期に比べ、後半は天端の流れ縞は目立たなくなっており、PDCAにより改善されていると考える。一部の吹き上げ口周辺にひび割れがある。
5. 施工目地不良	3	一部の目地に充填不足や締固め不足によるジャンカがある。一部の目地に蛇行がある。一部に湿っている箇所がある。
6. 検査窓段差	2.5	一部の検査窓周辺に砂すじやジャンカがある。段差も見受けられる。
その他欠陥	-	一部の検査窓に亀甲状のひび割れあり。締固め不足が原因か？
漏水状況	-	一部の目地部に湿りあり
補修・補強状況	-	補修予定
総評	検査窓や肩部吹き上げ口の増設などセントルに工夫があり、縞や打ち重ね線が少なく、美観は良好である。しかし、一部に水はしりや、はく離等の初期欠陥が見受けられた。施工管理に改善の余地はあったと考える。	

17.5

坑門工



覆工全景

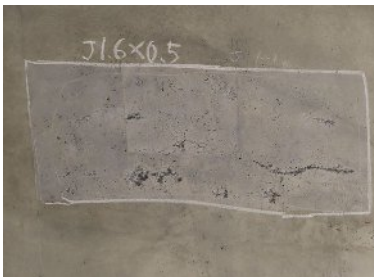


代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・一部の側壁や天端にはく離あり。

2. 気泡



・側壁の端部に少量の気泡がある。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁の両端部に水はしりが明瞭にある。

4. 色むら・打ち重ね線



・後半の天端の流れ縞は目立たない。パイプレータ跡が放射状にある。

5. 施工目地不良



・一部の目地に充填不足や締固め不足によるジャンカがある。

6. 検査窓段差



・窓枠周辺に砂すじあり。窓枠段差あり。  
・一部の検査窓の周囲に補修跡あり。

その他欠陥



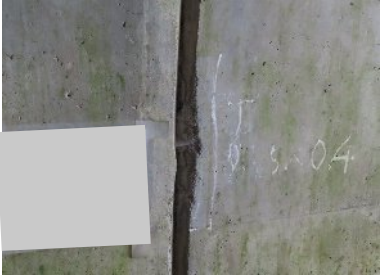
・検査窓付近に亀甲状のひび割れあり。



・目地からのにじみ。  
・検査窓枠にジャンカあり。



・天端の目地部に補修あとあり。  
・天端妻部にはく離あり。



・目地の蛇行あり。



・一部の目地に湿りあとあり。  
・一部の目地にエフロレッセンス漏出？あり。



調査日: 2021/8/17

トンネル名	R	国道	-	県名	岩手	所在地	普代村、野田町	完成年	2021年
延長	1,587m	配合(アーカイブより)	21-15-25BB	目地形式	三角目地	健全度	I	点検年	2021年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向7、周方向9、天端3列)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設、肩部吹き上げあり		
備考	側壁の下部に含浸剤等の処理が実施されていると予想する。								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	2	非常駐車帯のメタルフォーム打設箇所でのはく離が広範囲にある。ケレン不足が原因か?
2. 気泡	3.5	側壁の気泡数は少ない。
3. 水はしり・砂すじ	3	打設初期のスパンで側壁に水はしりがある。
4. 色むら・打ち重ね線	2	天端の打ち重ね線に沿った縦断方向のひび割れがある。特に打設初期のスパンに多い。
5. 施工目地不良	2	目地自体の欠陥は少ないが、目地周辺の強度不足によるひび割れが多数ある。特に側壁下部に多い。一部に欠けがある。
6. 検査窓段差	3	一部の窓枠周辺に砂すじあり。窓枠段差あり。
その他欠陥	-	一部のスパンに天端吹き上げ口付近にコールドジョイントがある。拘束ひび割れあり。側壁下部に半月状のひび割れあり。
漏水状況	-	にじみ程度の漏水が一部にあり。
補修・補強状況	-	今後予定。
総評	非常駐車帯のメタルフォーム使用箇所でののはく離や打ち重ね線等の初期欠陥が目立ち、施工管理不足が見受けられた。打設初期に比べ、後半は初期欠陥が少なく美観も改善されているため、PDCAによる品質確保が実施されていると考える。	

15.5

坑門工



覆工全景



代表覆工



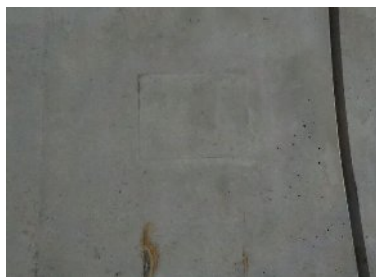
目視調査項目

1. はく離



・非常駐車帯のメタルフォームでののはく離が広範囲にある。

2. 気泡



・側壁の気泡数は少ない。

3. 水はしり・砂すじ



・打設初期のスパンで側壁に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端の打ち重ね線に沿った縦断方向のひび割れがある。

5. 施工目地不良



・目地の欠陥は少ないが、目地周辺の強度不足によるひび割れが多数ある。特に側壁下部に多い。

6. 検査窓段差



・一部の窓枠周辺に砂すじあり。窓枠段差あり。

その他欠陥



・天端吹き上げ口周辺にひび割れあり。



・天端吹き上げ口付近に大規模なコールドジョイントあり。



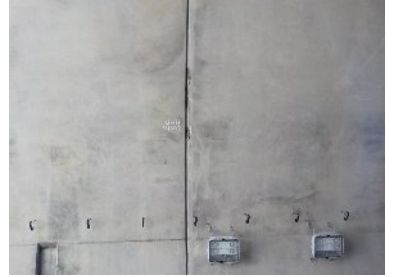
・非常駐車帯では打ち重ね線が明瞭にある。



・打設初期のスパンの天端に縦断方向ひび割れが多数あり。



・【良好な事例】支保パターン変化スパンに覆工厚・打設日を示した表記がある。



・目地の一部に欠けがある。

トンネル覆工調査シート

No. 19

調査日: 2021/8/17

トンネル名	S	国道	-	県名	岩手	所在地	野田村安家		完成年	2018年
延長	997m	配合	不明	目地形式	三角目地	健全度	I	点検年	2020年	
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向7、周方向9、天端3列)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設			
備考	SL下部のビニールシートによる長期養生が実施されていると予想する。一部のスパンで検査窓間を浮きパイプレータで締め固めたと予想する。									

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	3	一部にはく離箇所の補修あり。
2. 気泡	2	打設初期は側壁の広範囲に気泡があるが、後半は両端部のみに気泡が目立つ。
3. 水はしり・砂すじ	2	側壁に明瞭な水はしりあり。後半もあまり改善されていない。
4. 色むら・打ち重ね線	1	天端の流れ縞や打ち重ねのひび割れからエフロレッセンス漏出あり。吹き上げ口周辺にひび割れあり。
5. 施工目地不良	3	目地の一部に締め固め不足によるジャンカがある。
6. 検査窓段差	3	窓枠周辺に砂すじがあるが、問題となる欠陥ではない。
その他欠陥	-	拘束ひび割れあり。
漏水状況	-	ひび割れからエフロレッセンス漏出あり。
補修・補強状況	-	一部のひび割れに補修跡あり。
総評	品質確保の手引きの発刊後のトンネルであるが、施工に起因する初期欠陥が多数発生している。後半はPDCAにより若干の改善は見られるが、他のトンネルに劣る。	

14

坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・天端・側壁にモルタル補修跡が多数あり。

2. 気泡



・側壁に気泡が広範囲にある。

3. 水はしり・砂すじ



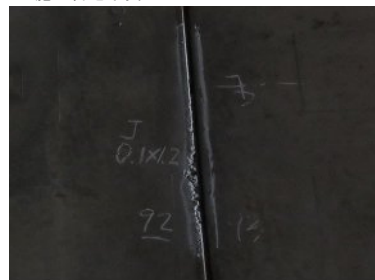
・側壁に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・打ち重ね線のひび割れからエフロレッセンス漏出あり。

5. 施工目地不良



・一部に締め固め不足によるジャンカがある。

6. 検査窓段差



・窓枠周辺に砂すじがある。

その他欠陥



・目地の一部に強度不足によるうきがある。



・一部の吹き上げ口周辺にひび割れあり。



・打ち重ね線のひび割れからエフロッセンス漏出あり。



・天端の色むら・打ち重ね線。



・【良好事例】検査窓間で浮きパイププレートによる締固めが実施されたと予想する。



・【良好事例】SLより下部にビニールシート養生の跡がある。



トンネル覆工調査シート

No. 20

調査日: 2021/8/17

トンネル名	T	国道	-	県名	岩手	所在地	普代村	完成年	2018年
延長	1,582m	配合	不明	目地形式	三角目地	健全度	II	点検年	2020年
センター仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向7、周方向11、天端3列)				打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設			
備考									

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	3	一部の側壁にはく離あり。
2. 気泡	2	打設初期は側壁の広範囲に気泡があるが、後半は両端部のみに気泡が目立つ。
3. 水はしり・砂すじ	2	側壁に明瞭な水はしりあり。後半もあまり改善されていない。
4. 色むら・打ち重ね線	2	側壁打ち重ね線が明瞭にあり、ひび割れからエフロッセンス漏出あり。天端の流れ縞にひび割れあり。
5. 施工目地不良	2	目地の一部にうき、かけがある。天端のラップ側端部に広範囲な補修跡があるスパンあり。
6. 検査窓段差	2	窓枠周辺に砂すじあり。窓枠段差あり。
その他欠陥	-	拘束ひび割れあり。天端ラップ箇所半月状のひび割れあり。
漏水状況	-	無し
補修・補強状況	-	拘束ひび割れ、縦断方向ひび割れ、目地の補修跡あり。
総評	品質確保の手引きの発刊後のトンネルであるが、施工に起因する初期欠陥が多数発生している。後半はPDCAにより若干の改善は見られるが、他のトンネルに劣る。	

13

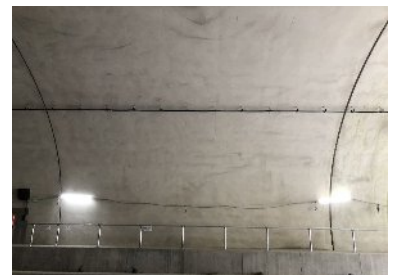
坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



・一部の側壁にはく離あり。

2. 気泡



・側壁に気泡が広範囲にある。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・側壁・天端の打ち重ね線が明瞭にあり、ひび割れからエフロッセンス漏出あり。

5. 施工目地不良



・うき、かけが多数あり。

6. 検査窓段差



・窓枠周辺に砂すじあり。窓枠段差あり。

その他欠陥



・天端吹き上げ口周辺にコールドジョイントあり。



・天端ラップ側に補修跡あり。



・天端ラップ箇所に半月状のひび割れあり。



・インパート拘束によるひび割れあり。



・【良好事例】SLより下部にビニールシート養生の跡がある。

トンネル覆工調査シート

No. 21

調査日: 2021/8/17

トンネル名	U	国道	-	県名	岩手	所在地	久慈市宇部町	完成年	2016年
延長	446m	配合	不明	目地形式	三角目地	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向7、周方向13、天端3列)				打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設、肩部吹き上げあり			
備考	品質確保の取り組みが実施されたトンネルと判断する。								

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	3.5	一部の肩部・天端の吹き上げ口にはく離がある。
2. 気泡	3	側壁に比較的大きな気泡があるが数は少ない。
3. 水はしり・砂すじ	3.5	側壁端部に明瞭な水はしりは見当たらない。
4. 色むら・打ち重ね線	3	天端の吹き上げ口付近の縞が目立つ。側壁・肩部に打ち重ね線は無く、良好である。
5. 施工目地不良	3	目地蛇行箇所補修跡あり。一部に欠けあり。
6. 検査窓段差	3	一部に窓枠段差が大きい箇所あり。一部に窓枠周辺に砂すじあり。
その他欠陥	-	拘束ひび割れあり。
漏水状況	-	なし
補修・補強状況	-	拘束ひび割れ補修あり。目地部の補修あり。
総評	セントルの検査窓数の増設や肩部吹き上げ口の増加など打込みに配慮している。初期欠陥の数も少なく良好な覆工を構築している。	

19

坑門工



覆工全景



代表覆工



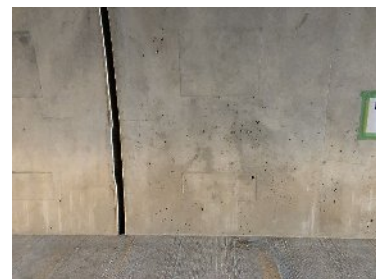
目視調査項目

1. はく離



・肩部・天端の吹き上げ口にはく離がある。

2. 気泡



・側壁に比較的大きな気泡があるが数は少ない。

3. 水はしり・砂すじ



・【良好】側壁端部に明瞭な水はしりは見当たらない。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端の吹き上げ口付近の縞が目立つ。側壁・肩部に打ち重ね線は無く、良好である。

5. 施工目地不良



・目地蛇行箇所補修跡あり。

6. 検査窓段差

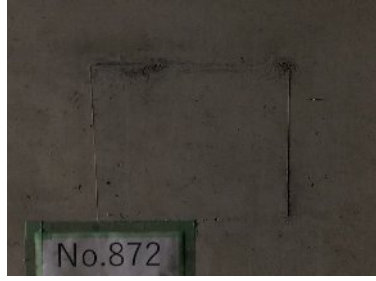


・一部に窓枠段差が大きい箇所あり。

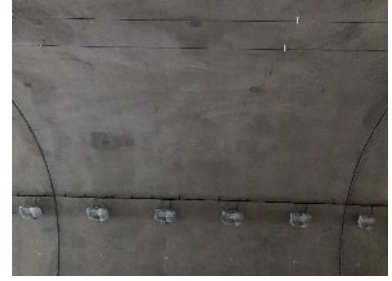
その他欠陥



・拘束ひび割れ補修跡あり。



・窓枠周辺に砂すじあり。



・天端に放射線状のパイプレータ跡あり。



・坑口近くのスパンに細かい亀甲状のひび割れあり。



・目地の一部に補修跡あり。

トンネル覆工調査シート

No. 22

調査日: 2021/8/17

トンネル名	V	国道	-	県名	岩手	所在地	野田村		完成年	2020年
延長	293m	配合(アーカイブより)		21-15-25BB	目地形式	三角目地	健全度	I	点検年	2020年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向7、周方向9、天端3列)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設			
備考	品質確保の取り組みが実施されたトンネルと判断する。									

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	3.5	一部の天端吹き上げ口に小規模のはく離あり。
2. 気泡	3	側壁に締固め不足による細かな気泡が残る。
3. 水はしり・砂すじ	3	側壁端部に水はしりが明瞭にあるが、範囲は少ない。
4. 色むら・打ち重ね線	2.5	一部の側壁打ち重ねや天端の流れ縞部分にひび割れあり。ひび割れ幅は小さい。
5. 施工目地不良	3	側壁の妻側に弱部あり。
6. 検査窓段差	3.5	一部の窓枠周辺に砂すじがあるが、全体的には良好といえる。
その他欠陥	-	無し
漏水状況	-	無し
補修・補強状況	-	無し
総評	一部の打ち重ね線に軽度なひび割れや締固め不良(気泡・水はしり)が見られるが、良好な覆工を構築している。	

18.5

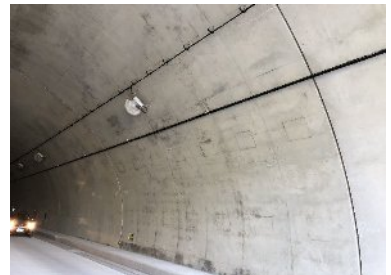
坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



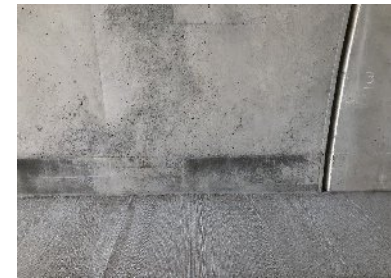
・一部の天端吹き上げ口に小規模のはく離あり。

2. 気泡



・側壁に細かい気泡が残る。

3. 水はしり・砂すじ



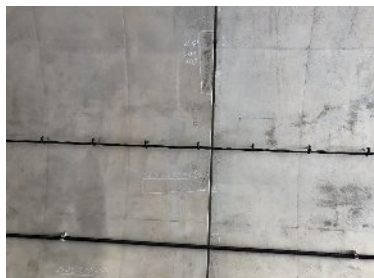
・側壁端部に水はしりが明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・一部の側壁打ち重ねや天端の流れ縞部分にひび割れあり。

5. 施工目地不良



・施工目地妻側に弱部あり。

6. 検査窓段差



・一部の窓枠周辺に砂すじあり。

その他欠陥



・天端に締固め不足による弱部あり。



・側壁の打ち重ね線に沿ったうきあり。



・天端に放射線状のパイプレータ跡あり。

トンネル覆工調査シート

No. 23

調査日: 2021/8/17

トンネル名	W	国道	-	県名	岩手	所在地	久慈市長内町	完成年	2021年
延長	1,368m	配合(アーカイブより)	18-60-25BB(中流動)	目地形式	三角目地	健全度	I	点検年	2021年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向7、周方向7)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設、肩部吹き上げあり		
備考	両坑口からセントル2基で打設を行ったと推察する。								

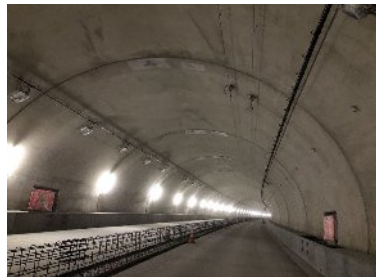
目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	2	肩部吹き上げ口の下にはく離あり。天端吹き上げ口周辺に補修箇所が多数あり。
2. 気泡	2.5	一部の側壁に気泡が多いスパンがある。
3. 水はしり・砂すじ	2.5	側壁端部に水はしり・気泡あり。締固め、ブリーディング処理不足と推測する。
4. 色むら・打ち重ね線	2	天端の吹き上げ口周辺の縞にひび割れあり。また、補修跡が多数ある。
5. 施工目地不良	2.5	一部の目地にうき、欠けがあり、補修跡がある。
6. 検査窓段差	3	一部の窓枠周辺に砂すじあり。
その他欠陥	-	天端軸方向ひび割れあり。拘束ひび割れあり。
漏水状況	-	目地からの漏水あり(一部にエフロッセンス漏出あり)。
補修・補強状況	-	天端吹き上げ口や検査窓周辺に補修跡が多数ある。
総評	中流動コンクリートで打設された覆工であるが、品質確保の取り組みが疎かになっており、初期欠陥が多数発生している。残念な結果である。	

14.5

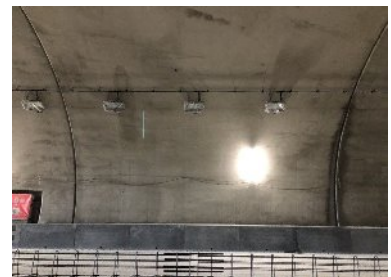
坑門工



覆工全景



代表覆工



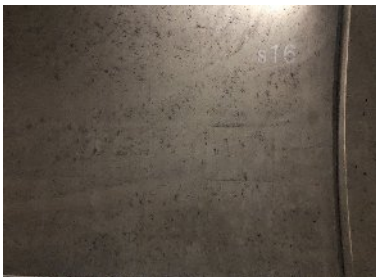
目視調査項目

1. はく離



・肩部吹き上げ口下にはく離あり。

2. 気泡



・側壁に気泡が多数ある。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁に水はしり・気泡が明瞭にあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端の吹き上げ口周辺の縞にひび割れあり。また、補修跡が多数あり。

5. 施工目地不良



・一部の目地にうき、欠けの補修跡あり。

6. 検査窓段差



・一部の窓枠周辺に砂すじあり。

その他欠陥



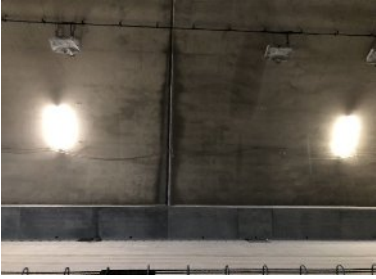
・天端吹き上げ口付近のコールドジョイント。



・天端の検査窓、吹き上げ口付近に補修跡あり。



・天端軸方向にひび割れ補修跡あり。



・目地からの漏水あり。



・天端の流れ縞に沿ったひび割れ。



・天端吹き上げ口付近のはく離。



トンネル覆工調査シート

No. 24

調査日: 2021/9/27

トンネル名	X	国道	-	県名	山形	所在地	真室川町		完成年	2000年
延長	95m	配合	不明	目地形式	台形目地	健全度	II		点検年	2020年
セントル仕様(予想)	スチールフォーム、検査窓(延長方向3、周方向5)					打設方法(予想)	天端は吹き上げ1箇所から打設、肩部吹き上げあり			
備考	台形目地にゴム系の充填が実施されている。									

目視調査項目	判定	評価コメント
1. はく離	2	天端吹き上げ口付近にはく離あり。
2. 気泡	2	側壁に細かい気泡が多数ある。
3. 水はしり・砂すじ	0.5	側壁両端部に明瞭な水はしりがあり、欠けが生じている。
4. 色むら・打ち重ね線	1	天端の吹き上げ口周辺の流れ縞にひび割れあり。また、はく落防止対策が多数あり。
5. 施工目地不良	1	目地に欠けあり。一部にはく落防止対策あり。
6. 検査窓段差	1	窓枠周辺に砂すじあり。一部に段差有。
その他欠陥	-	かぶり不足による鉄筋露出あり。天端吹き上げ口付近に亀甲状のひび割れあり。
漏水状況	-	無し
補修・補強状況	-	はく落防止ネットあり。全周ネット欠けを行ったスパン有。
総評	95mのトンネルであるが、セントル(スチールフォーム)を使用している。2000年台では標準的な覆工と判断する。	

7.5

坑門工



覆工全景



代表覆工



目視調査項目

1. はく離



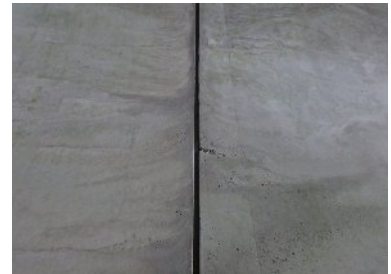
・天端吹き上げ口付近にはく離あり。

2. 気泡



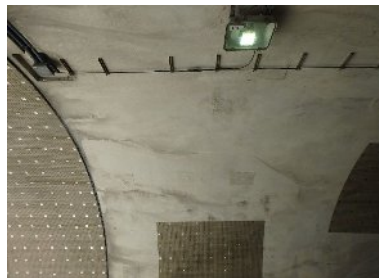
・側壁に細かい気泡が多数ある。

3. 水はしり・砂すじ



・側壁に水はしり・気泡が明瞭にあり。欠けあり。

4. 色むら・打ち重ね線



・天端の吹き上げ口周辺の流れ縞にひび割れあり。また、はく落防止対策が多数あり。

5. 施工目地不良



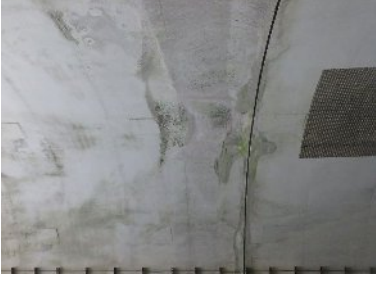
・目地に欠けあり。一部にはく落防止対策あり。

6. 検査窓段差



・窓枠周辺に砂すじあり。一部に窓枠段差あり。

その他欠陥



・天端吹き上げ口付近に亀甲状のひび割れあり。



・鉄筋露出あり。



・台形目地にゴム系の充填が実施されている。