

ひび割れが生じた外ケーブル定着突起の修復

株式会社 間 組 非会員 田辺 重男
 非会員 西田 壽起
 非会員 工藤 朗太
 非会員 清瀬 秀敏
 非会員 政岡 龍司

1. はじめに

広渡川二号橋は東九州道の一部であり、宮崎県日南市を流れる二級河川広渡川を横断する橋長265mの3径間連続PC箱桁橋である。本工事は上部工工事であり、右岸側および左岸側の両側径間部を事前に固定支保工施工し、その後、中央径間部を張り出し架設する(図-1参照)。特に、右岸側については側径間長が85mと長いため、P1柱頭部に発生する負の曲げモーメントを軽減する必要性から、P1柱頭部を跨いで18本の外ケーブルが配置されている。これらの外ケーブルは、箱桁内の上床版の下面に設けられた5対(10箇所)の定着突起に定着される(図-2, 写真-1参照)。

固定支保工施工の終了後、これらの外ケーブルの緊張・定着を行ったところ、定着突起にひび割れが発生した。ひび割れは、緊張・定着が終了した8箇所の定着突起のうち7箇所で発生した。

ひび割れの詳細調査の結果、いずれの定着突起においても以下に示すようにひび割れの発生形態は、ほぼ共通していることがわかった。

- ・ひび割れは、定着突起のすべての面(下面、載荷面及び載荷背面)に発生している。
- ・下面に発生したひび割れの幅は大きく(最大0.6mm)、

外寄りの定着具付近からウェブに向かって斜め方向に発生している。

- ・緊張・定着を解放したところ、下面のひび割れは0.15mm以下、その他の面のひび割れはほとんど確認できない程度に縮小した。
- ・最も深いひび割れは定着突起の厚さの1/2程度(375mm)までであり、いずれのひび割れも上床版、ウェブには及んでいない。

典型的なひび割れを示す定着突起(19-20断面)のひび割れマップを図-3に示す。

上記のひび割れ発生形態および再現FEM解析結果等から、上床版を含む定着突起部の両側ウェブを支点としたねじれ変形と、それに伴う定着突起下面付近のせん断変形によりひび割れは発生したと考えられた。また、せん断変形によって生じた斜引張応力に対して十分に抵抗できる量の鉄筋が配置されておらず、ひび割れ幅の増大につながったと推察できた。

これらの考察を受け、対策案として、『上床版を含む定着突起部の変形を抑制できる『下面増厚+下面ハンチ』工法』が採用された。

本文では、補強案の設計上の考え方、施工上の課題と実施した解決策について述べる。

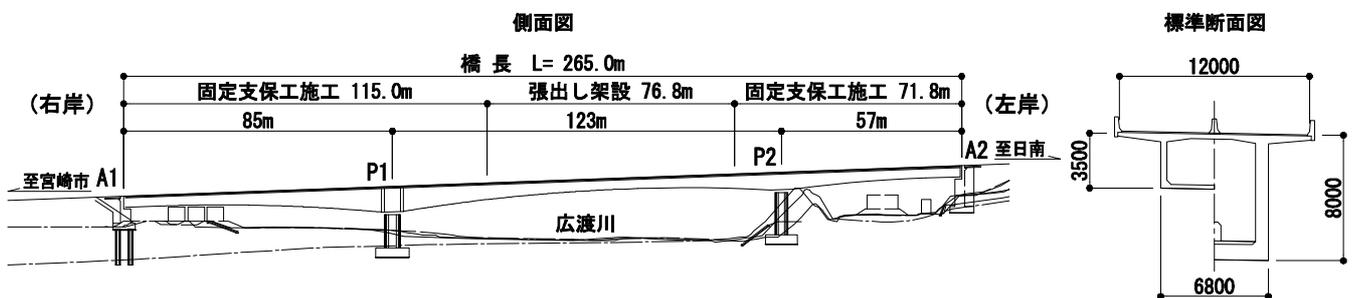


図-1 橋梁一般図

キーワード 補強, 外ケーブル, 定着突起, 無収縮モルタル, 逆打ち施工

連絡先 〒105-8479 東京都港区虎ノ門2丁目2番5号 株式会社間組 土木事業本部技術第二部 TEL03-3588-5762

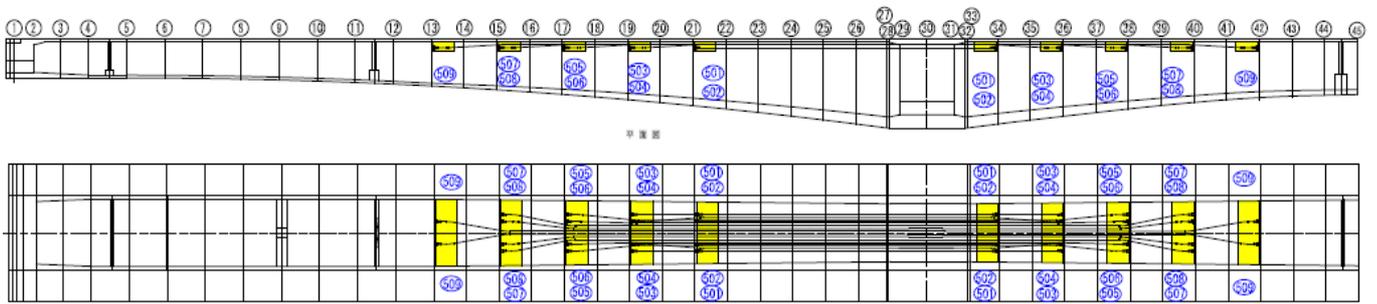


図 - 2 固定支保工施工区間に配置される外ケーブルおよび定着突起



写真 - 1 定着突起

の選定，温度ひび割れに対する検討なども行った．

(2) FEM 解析による検証

a) 解析モデル

解析は，三次元弾性 FEM 解析により行った．解析モデルを設定するにあたり以下を考慮した．

上床版，ウェブの変形が定着突起に影響するため，定着突起の前後 10m(桁高の 2 倍程度)をモデル化した．

定着突起に発生したひび割れは，あらかじめ撤去・修復するが，安全側を考慮し，ひび割れをモデル化した．具体的には，引張剛性，せん断剛性をゼロとしたひび割れ要素を配置した．

箱桁断面を含む既設部形状寸法等が一様ではないた

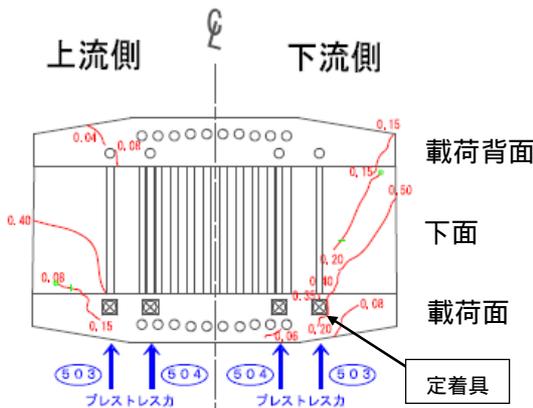


図 - 3 ひび割れマップ (19 - 20 断面)

2 . 補強設計

(1) 設計フロー

設計フローを図 - 4 に示す .FEM 解析に基づき補強形状 (増厚寸法および下面ハンチ形状) を決定し，その後，FEM 解析より得た各部材，各断面の引張応力，せん断応力を用いて接合面のアンカー鉄筋，および補強部に配置する鉄筋を検討した．また，決定した設計仕様に対する施工の确实性の評価，具体的には使用材料

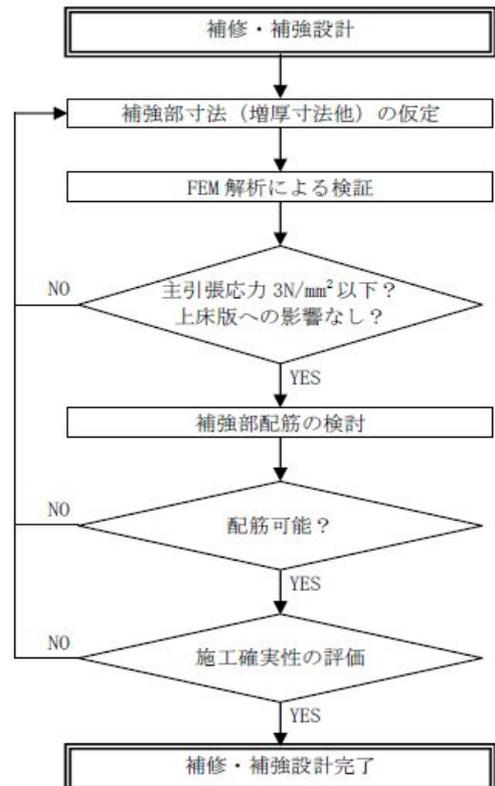


図 - 4 補修・補強の設計フロー

め、定着突起毎に補強形状は異なる．代表的な解析モデルを図 - 5 に示す．

b)補強形状の妥当性検証

仮定した補強形状の検証は，定着突起がRC構造，上床版がPC構造であることを踏まえ以下に基づいた．

- 定着突起および補強部におけるひび割れを，極力抑制するため，主引張応力がコンクリートの引張強度の推定値 (3.0N/mm^2) 以下となること．
- FEM 解析により求められた上床版軸方向引張応力度と全体系構造計算により算出される上床版軸方向応力度の和が許容引張応力度(架設時 2.5N/mm^2 , 設計荷重時 0N/mm^2) 以下であること．

解析結果を図 - 6 に示す．

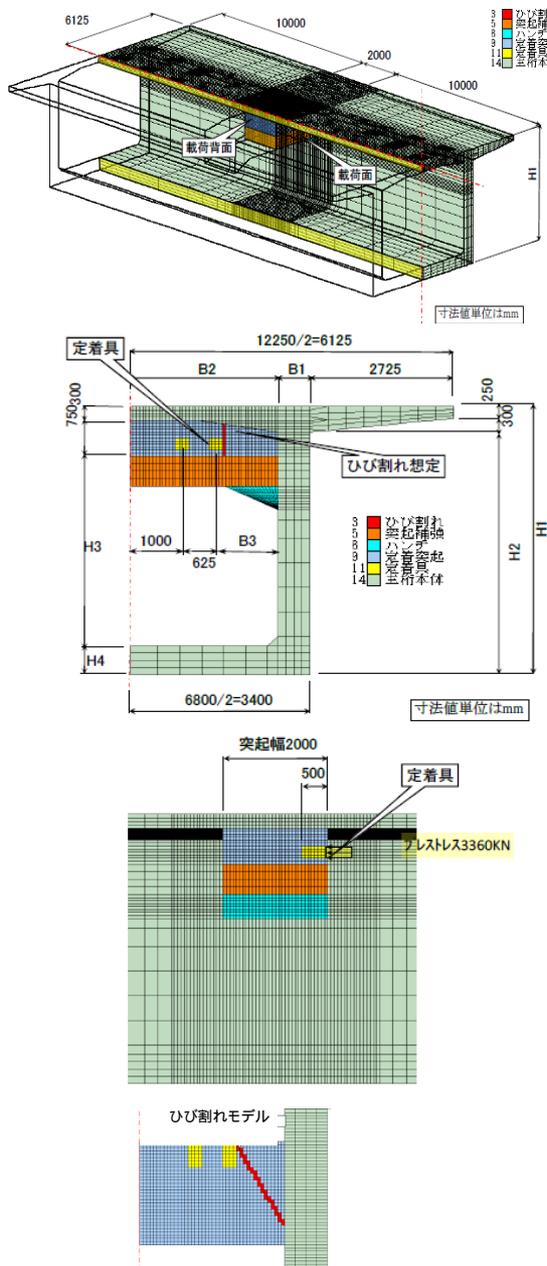
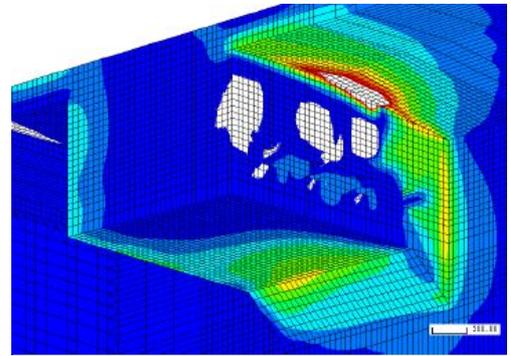
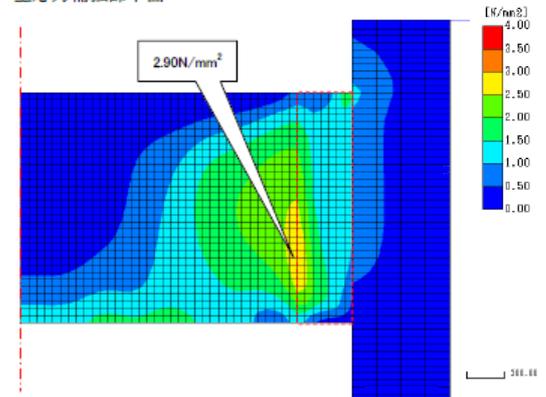


図 - 5 解析モデル

主応力全体 (前面下方から望む)



主応力補強部下面



主応力補強部上面

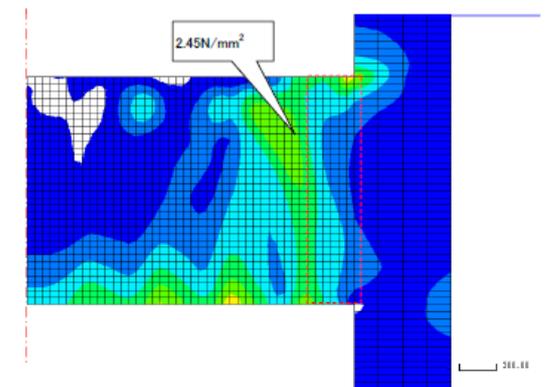


図 - 6 解析結果 (主引張応力)

(3) 補強部配筋の検討

a)接合面の設計

接合面の設計にあたっては，そこに発生する応力度の大きさ，分布を考慮し，それに応じた適切な力の伝達機構を検討しなければならない．ここでは，鉄筋アンカーによる力の伝達を前提とし，FEM 解析結果より得た各接合面での面外引張応力度，せん断応力度およびその分布範囲，面積をもとに仕様を決定した．

面外引張力については，すべてを鉄筋アンカーにより受け持つものとし，鉄筋アンカーの制限値は通常の許容応力度に余裕を持たし 120N/mm^2 とした．また，

異常時における鉄筋アンカーのコーン破壊を回避するため、コーン破壊耐力をアンカー鉄筋の降伏耐力以上に設定した。

ねじれ変形等に起因する接合面におけるずれせん断力については、鉄筋とコンクリートで受け持つものとし、前者については純せん断に対する一般的な制限値である 80N/mm^2 を用いた。後者については、「アンダーピング設計・施工の手引き」(鉄道総合研究所)によれば 0.96N/mm^2 程度となるが、既設部との接合面が逆巻き施工となることから十分なる安全性を確保するため、コンクリートが負担できるせん断応力度の 30% (0.17N/mm^2) を制限値とした。これについては直接せん断試験により確認した。

また、接合面にひび割れが発生し、コンクリートのずれせん断強度が期待できない事態に備え、鉄筋だけで受け持つ場合も想定した。この場合の制限値は鉄筋のせん断降伏応力度 ($\sigma_y/3=199\text{N/mm}^2$) とした。

b) 補強部の設計

ねじれ変形に対する補強、引張力に対する補強として、接合面のアンカー鉄筋量と同量を配置した。加えて、載荷方向に発生するせん断力に対しては、道路橋示方書に準じてスターラップ量を算定し配置した。

c) 補強細目

補強鉄筋配置を図-7に示す。アンカー鉄筋の配置はウェブに配置されている内ケーブルを考慮して決定した。また、接合面における付着強度確保のため、 10mm 程度の深さの目粗しを実施することとした。

(4) 施工現実性の評価

a) 使用材料の選定

使用材料の選定は以下の観点から行い、その結果、低熱タイプ無収縮モルタル(太平洋プレユーロックス

LH)を選定した。選定表を表-1に示す。

補強部に配置される鉄筋および鉄筋アンカー量は、コンクリート体積あたり 200kg/m^3 以上と多く、非常に密な鉄筋配置になっている。このため、充填性は低下し、また、締固めも行いづらく、充填不良、ジャンカ等が起こり易く、均質な品質の確保も困難になる。したがって、流動性がよく、締固め頻度により品質のバラツキが起こりにくい材料を選定する必要がある。

逆打ち施工となるため、定着突起の下面に空気溜りが発生し易い。また、ブリージングによる隙間、水疱が発生する可能性がある。接合面での密着性を高め、設計で想定したずれせん断強度を確保するため、極力、空気溜りが発生しにくく、ブリージングの少ない材料を選定する必要がある。

補強部の形状は厚さ $0.35 \sim 0.8\text{m}$ 、平面寸法 $2\text{m} \times 6\text{m}$ 程度のマット形状であり、マスコンクリートの範疇には入らない。しかしながら、三面を定着突起、ウェブに拘束され、かつ、富配合材料が用いられるため温度応力ひび割れが懸念される。したがって、硬化時の水和熱による発熱量が小さく、かつ、収縮の少ない材料を選定する必要がある。

補強部の形状が薄く広いため、上床版および定着突起を貫通する打設孔を新たに設ける場合、補強部1ヶ所につき12箇所以上の削孔が必要になる。これは、PC構造である上床版、および補強対象である定着突起に対してダメージを与えることになり好ましくない。したがって、既設開口より箱桁内に打設ホースを入れ、狭小空間で人力によるホースの移動・設置を繰り返す必要があるが、このような打設方法に適った材料を選定する必要がある。

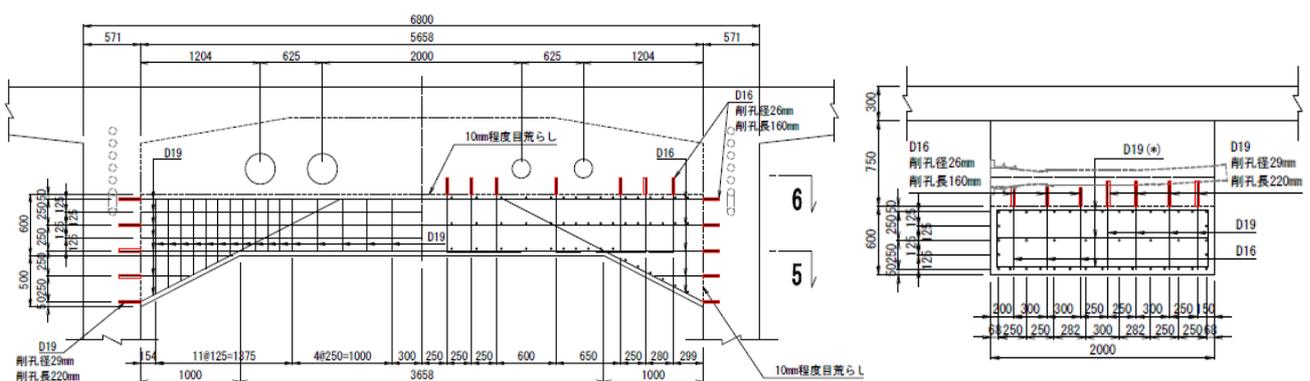


図-7 補強部の鉄筋および鉄筋アンカー配置(19-20断面)

表 - 1 使用材料の選定表

		膨張コンクリート	高流動コンクリート (膨張材入り)	無収縮モルタル	低熱タイプ 無収縮モルタル
充填性	流動性	(スランプ15cm)	(フロ-50cm)	(J14流下時間 6-8秒)	(J14流下時間 6-8秒)
	均質性	締固め頻度による 品質のパラッキの 起こりにくさ	x		
接合面の 密着性	内包する空気に 起因する気泡溜り の発生しにくさ (空気量の多寡)	(3-6%)	(2-3%)	(2-3%)	(2-3%)
	ブリージング率が 小さいこと			(ノンブリージング)	(ノンブリージング)
温度応力 ひび割れ 発生リスク	発熱量が小さいこと			x	
	収縮量				
箱桁内の 施工性	打設ホース取り回 し易さ	(100#-入)	(100#-入)	(50#-入)	(50#-入)
総合評価		x		x	

b)温度応力解析による効果の事前検証

低熱タイプ無収縮モルタルの温度応力ひび割れに対する抑制効果を確認するため温度応力解析を実施した。

解析は「コンクリート標準示方書 2007年版」に準じて行い、解析プログラムはASTEA-MACSを使用した。

解析モデルは図-5で示す構造解析モデルと同一モデルを用いる。解析条件を表-2および3に示す。解析結果として、最大温度、最小ひび割れ指数の分布図と結果一覧を示す(表-4参照)。いずれの箇所においてもひび割れ発生確率は低く、温度応力ひび割れ発生リスクは低減できている。

c)その他

乾燥収縮ひび割れに対する用心として、砂つき三軸アラミドメッシュをコンクリート表面に配置した。

表 - 2 打込み温度と養生温度

外気温度(°C)	打込み温度(°C)	*)冷却水を練混ぜ水として使用することを前提に、打ち込み温度を外気温+0とした。
27.6	27.6	

養生位置	養生期間(日)	養生熱伝達率(W/m²°C)	撤去後熱伝達率(W/m²°C)
外気	-	14	14
木製型枠	4	8	14
保温養生	4	1.64	14

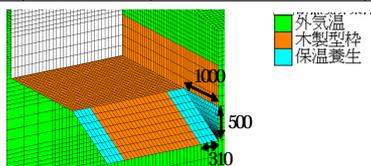
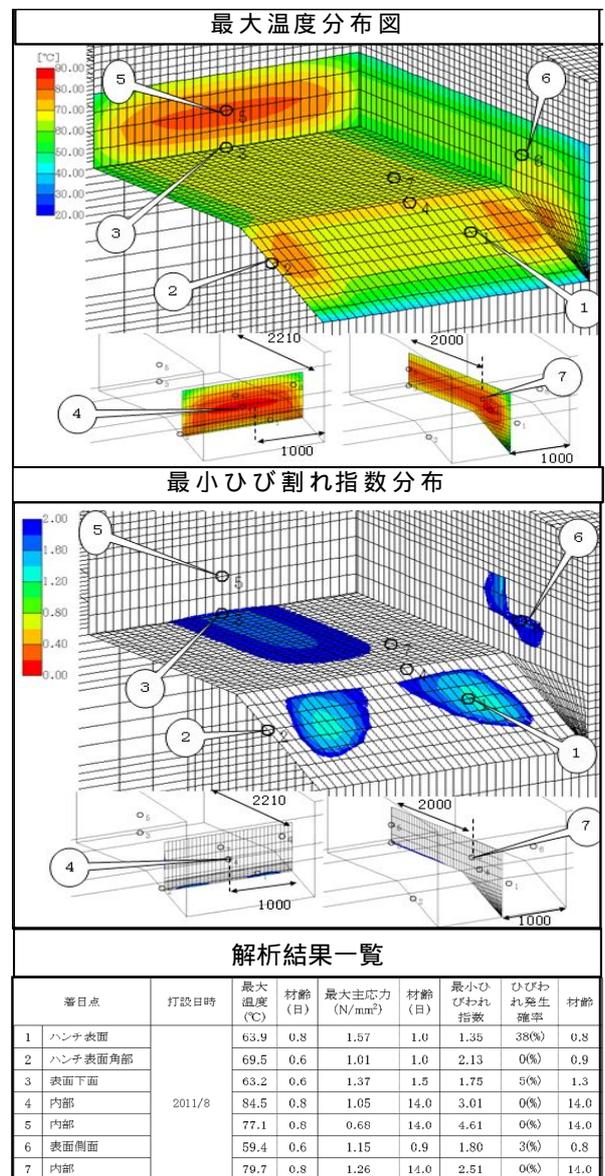


表 - 3 低熱タイプ無収縮モルタルの熱的特性等

熱伝導率	W/m°C	2.7
比熱	kJ/kg°C	1.15
単位体積重量	kg/m³	2,183
断熱温度 上昇式 (打込み 30°Cの例)	(基本式)	$Q(t) = K(1 - \exp(-\alpha t^{\beta}))$
	単位セメント量 (kg/m³)	536
	(K)°C	79.7
	(α)	2.47
	(β)	1
熱膨張係数	$\times 10^{-6}/°C$	10
ポアソン比	-	0.2
圧縮強度	$f'_{c(28)}(N/mm^2)$	53.6
	$f'_{c(91)}(N/mm^2)$	55.1
有効ヤング係数	N/mm²	$E_e = \Phi(t) \times 3650 (f'_{c(t)})^{0.5}$ $\Phi(0 \leq t < 0.8 \text{ 日}) = 0.73$ $\Phi(0.8 \leq t < 2.8 \text{ 日}) = 0.73 \sim 1.0$ $\Phi(2.8 \text{ 日} \leq t) = 1.0$
引張強度	N/mm²	$f_t(t) = 0.44 (f'_{c(t)})^{0.5}$

表 - 4 温度応力解析結果



3. 施工

(1) 施工上の課題

材料選定で示した観点は打設方法を検討する際の課題でもある。具体的には以下の観点に基づいて打設方法を計画した。

密な鉄筋配置に対し、充填不良、品質のバラツキが起こりにくい打設方法

逆打ち施工となる接合面で空気溜りを発生させない打設方法

温度応力ひび割れ抑制のため打設温度を下げる方法

(2) 試験施工

a) 試験施工 1

上記課題を模索するため試験施工を行った。試験施工は、定着突起に見立てたコンクリート版の直下に鉄筋、型枠を組み立て、無収縮モルタルを逆打ちすることにより行った。型枠は長さ 2m(実寸と同じ)、幅 2.5m(実寸の 1/2)、厚さ 0.3m(実寸の 1/2)とし、実構造と同じ縦横断勾配を再現した。また、内部には実構造とほぼ同量の鉄筋を配置した。打設は低い側の投入口からパイプレータを併用しながら行った。打設完了後の試験設備を写真 - 2 に示す。

硬化確認後、コンクリート版および逆打ち部をコア抜きし充填状況を確認した。その結果、コンクリート版との接合面に一部に大きな充填不良箇所が見られたが、それ以外の部分については、部分的に空気溜りは見られるものの接合面の一体化状況は概ね良好であった(写真 - 3 および 4 参照)。

一部に見られた大きな充填不良箇所は、モルタルの流れが直線的ではなく不規則に方向を変えるため、他方面からの流れと出合った際に空気を挟み込んだことが原因であると考えられた。部分的に見られる空気溜りは振動締固めによりモルタル内から浮きあがってきた気泡がとどまったものと考えられた。

コア抜きした供試体による接合面のせん断試験を実施し、ずれせん断強度を確認した結果、設計値として用いた 0.17N/mm^2 を大きく上回る 1.84N/mm^2 を得た。

b) 試験施工 2

接合面での充填不良と空気溜りを減らすために更なる試験施工を実施した。接合面状況を観察することを目的として、コンクリート版の代わりに目地をシールした頑強な天板型枠を組み、その下に逆打ち施工を行った。

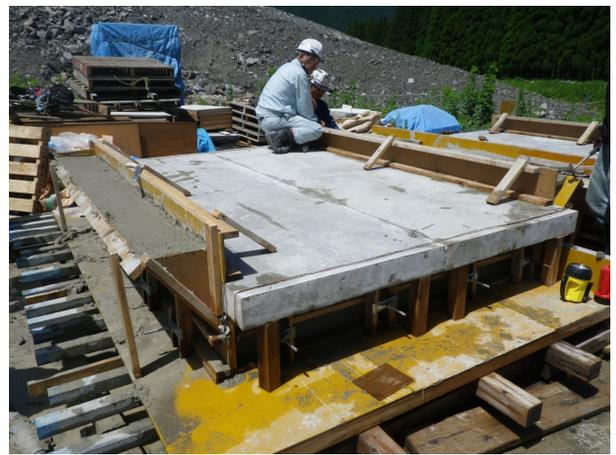


写真 - 2 試験施工 1 の試験設備



写真 - 3 接合面を含むコア抜き供試体

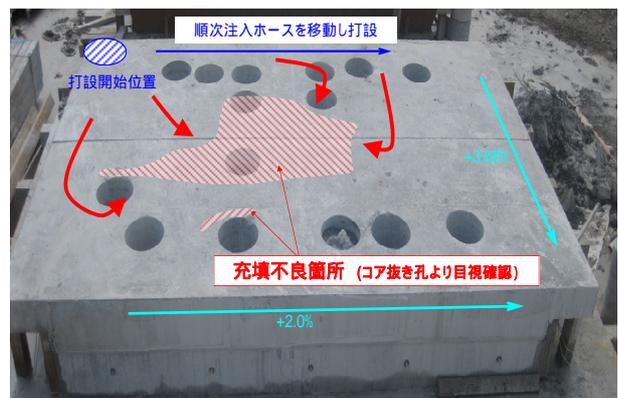


写真 - 4 試験施工 1 の充填不良箇所の分布

打設方法については試験施工 1 の結果を踏まえ、以下のような工夫を施した(図 - 8 参照)。

上層(天板型枠近傍)でモルタル流が不規則に方向を変えることによる空気の挟み込みを防止するため、整流壁(丸鋼 50c500)を設ける。

ホース筒先での空気の挟み込みを防止するため、整流壁で区分されたブロック毎に、型枠先端まで挿入した打設ホース先端をモルタル内に常に 20cm 以上埋めつつ、引き戻しながら打設する。

モルタル内からの気泡の浮き上がりを防止するため、上層の打設においては、振動締固めを行わない。

以上の措置を施し、打設終了後、天板型枠を撤去し接合面の状況を確認したところ、空気の挟み込みだけでなく、空気溜りもほとんどない緻密な接合面が形成されていた(写真-5参照)。また、充填率(空気溜り等の面積/接合面面積)は96%以上であった。これは、当初、意図した効果だけでなく、整流壁によるブロック化とホース筒先のモルタル内埋め込みにより、局部的に圧力注入状態になり、気泡の押し出し効果もあったと思われる。

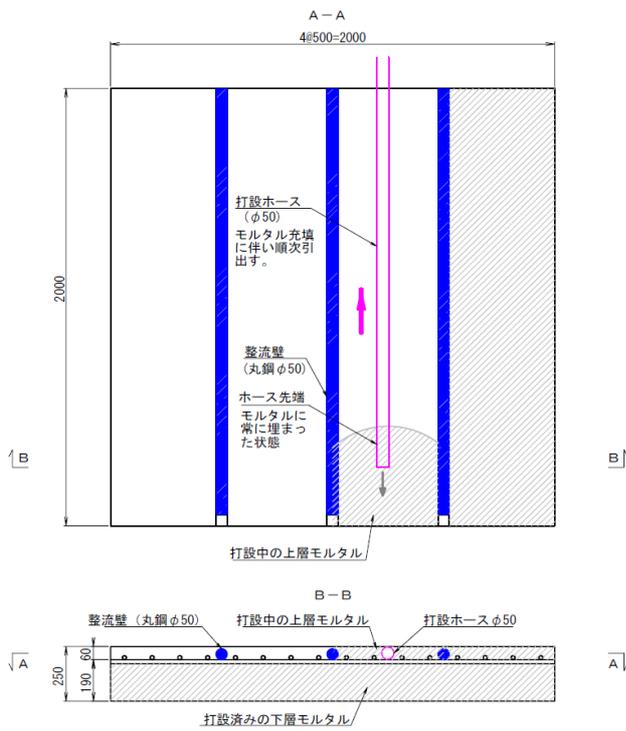


図 - 8 試験施工 2 の試験設備

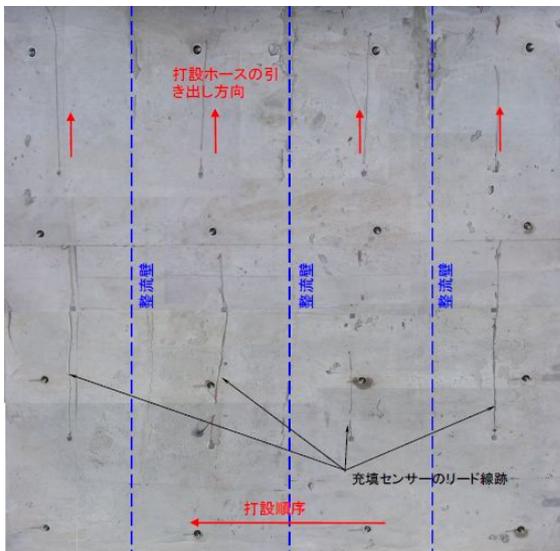


写真 - 5 試験施工 2 の接合面の状況

(3) 施工

a) 打設方法

図-9に示すように接合面から50mm以深を下層、接合面から50mm以内を上層とし、表-5に示すように各層の打設方法を計画した。箱桁内での打設状況を写真-6および7に示す。

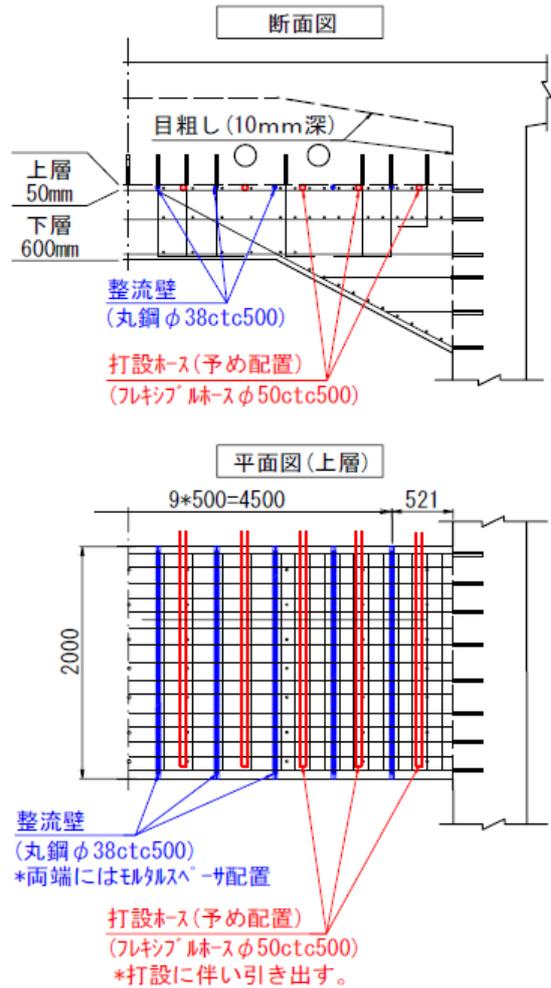


図 - 9 打設層区分と整流壁,打設ホース

表 - 5 各層の打設方法

	打設方法
下層	<ul style="list-style-type: none"> ・5層に分割し、1層あたりの厚さ12cm程度とする。 ・打設ホースを型枠内に直接挿入し、適宜移動する。 ・パイプレータによる振動締固めをきめ細かく実施し、型枠内の隅々まで行き渡らせる。 ・打設状況はホース投入口から常時、目視確認する。
上層	<ul style="list-style-type: none"> ・整流壁で区分されたブロック毎にあらかじめ配置した打設ホースを用いて、奥より打設する。ホース先端を200mm程度コンクリート内に埋めながら順次、引抜き打設を行う。 ・パイプレータによる振動締固めは行わない。 ・打設状況は目視確認できないため、接合面にあらかじめ設置した充填確認センサーにて確認する。



写真 - 6 箱桁内での打設状況（下層）



写真 - 7 箱桁内での打設状況（上層）

b) 打設時間計画

以下に示す点に配慮し、1層あたりの打設時間を40分以内、全量の打設時間を3時間以内として計画した。このため2班体制を組み、各班が1時間当たり1.7m³程度を両ウェブ際から打設した。

- 無収縮モルタルの硬化時間は早く、コールドジョイント等、打重ね不良が懸念される。
- 打設量は定着突起1ヶ所当たり約8.7m³と多量であるが、打設時間が長い場合、凝結開始後の振動によるひび割れが懸念される。

b) 練混ぜ

練混ぜプラントは橋面上に設け、既設開口より箱桁内に圧送した。先に示した打設速度を確保するため、練混ぜプラントは2箇所設け、各プラントあたり4台のモルタルミキサー(100L練り)、1台の圧送ポンプ(50L/分)を配置した。また、予備を1台ずつ常備した。これにより、1時間当たり2.0m³の練混ぜ速度を確保した。

温度応力解析で仮定した無収縮モルタルの練り上がり温度(外気温以下)を確保するため、循環冷却装置を用いて練混ぜ水の冷却を行った。これにより、外気温が30以上であるにもかかわらず、練り上がり温度は25以下を確保できた。

(4) 施工後の経過

乾燥収縮ひび割れ防止のため、打設後の型枠設置期間中はミスト養生を実施し、脱枠後は密着シートによる封緘養生を実施した。この効果もあり、施工完了後、4ヶ月が経過したが補強部および定着突起にひび割れは発生していない(写真-8参照)。



写真 - 8 補強後の定着突起

4. おわりに

大量の無収縮モルタルの逆打ち施工により補強体を構築するというあまり前例のない方法を採用し、実施した。工期的に余裕のない状況下であったが、施工品質を担保するため、数々の解析、試験施工、室内試験等を実施してきた。その効果もあり、品質に対して申し分のない補強体を構築できた。

構造物の耐震補強などにおいて下面増厚補強が必要となる場合がある。その場合も、本工事同様、接合面の密着性確保、強度確保などは重要な課題である。本報告が今後の補強工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省宮崎河川国道事務所：広渡川二号橋PC定着突起部のひび割れ要因と対策案について、2011.8
- 2) 鉄道総合研究所：アンダーピニング設計・施工の手引き、1987.9
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 2007年版