

2024年3月31日
中日本高速道路株式会社

橋軸直角方向の接合部を有する床版形式の取扱いについて

2021年11月5日(2021年11月15日追記)付け「橋軸直角方向の接合部を有する床版形式について」の通知において、プレキャストPC床版の縦目地部付近にひび割れが確認されたことから、当面の間、縦目地部を有する幅員方向に分割したプレキャストPC床版を採用する場合は、縦目地部を貫通するPC鋼材を配置するものとしておりました。

この度、縦目地部付近に発生したひび割れの原因が究明され、ひび割れ抑制策が取りまとめられたことから、縦目地部に超高強度コンクリートを用いたプレストレス力を導入しない構造の採用にあたっては、以下の検討事項を踏まえて設計・施工をおこなうものとします。

- 1) 収縮特性が明らかな材料を使用し、その影響についてFEM解析などにより検証する。
- 2) 縦目地部の形状などを検討し、その影響についてFEM解析などにより検証する。
- 3) インサートなど仮設材は、応力集中箇所に配置しない。
- 4) 収縮による型枠等拘束の影響を考慮した検討を実施する。

■参考資料:

別添資料1 縦目地部に超高強度コンクリートを用いたプレストレス力を
導入しない構造におけるひび割れ検証

別添資料2 2021年11月5日(2021年11月15日追記)付け通知
「橋軸直角方向の接合部を有する床版形式について」

【お問合せ先】

中日本高速道路株式会社 技術本部 環境・技術企画部 構造技術課

E-mail: structuraleng@c-nexco.co.jp

縦目地に超高強度コンクリートを用いた
プレストレスを導入しない構造におけるひび割れ検証

1. 概要

鋼橋の床版取替において、プレキャスト PC 床版（以下、PCaPC 床版という。）の橋軸直角方向接合部（以下、縦目地という。）に超高強度コンクリートを打設しプレストレスを導入しない構造において、接合部付近にひび割れが確認された。この事象に対し、ひび割れ調査、解析的検証等によりひび割れの原因、ひび割れ発生抑制対策を検討した。

2. 縦目地の構造概要

(1) 縦目地部概要

縦目地の構造は、図-1 に示すとおり、縦目地に現場打ちの超高強度コンクリートを打設し、プレストレスを導入しない構造である。なお、当該ひび割れは、床版コンクリートの底板部において生じたものである。

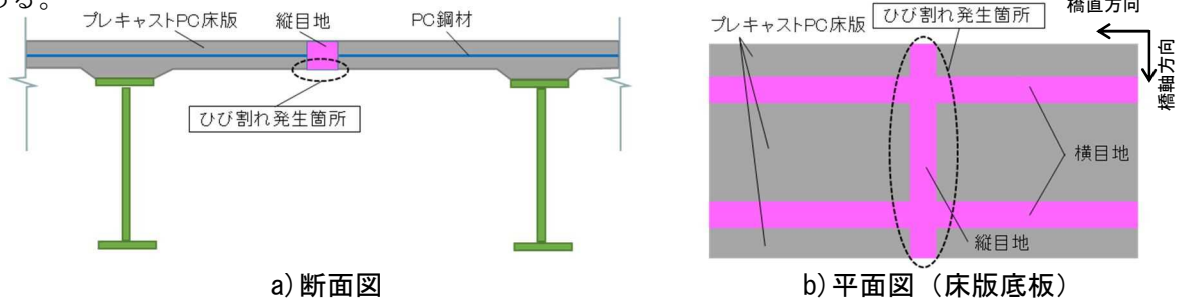


図-1 縦目地構造概要

(2) 縦目地部形状

縦目地の形状は、図-2 に示すとおり、横目地を 115mm 程度セットバックした位置で打ち止め、縦目地施工時は打継部を十字形状としている。これは、施工順序として横目地①→横目地②→縦目地の順に UFC を打設するにあたり、横目地の妻型枠の設置の容易性を考慮して決定したものである。

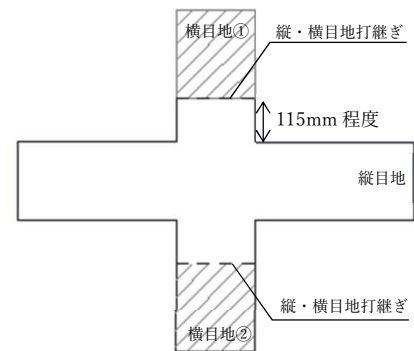


図-2 縦目地部形状（十字）

(3) 縦目地部材料

縦目地に使用した材料は、超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC という。）を採用しており、一般のコンクリートと同じ養生方法で所要の性能を発揮する常温硬化型材料である。UFC の配合を表-1 に示す。標準養生により材齢 28 日で圧縮強度 180N/mm²、ひび割れ発生強度 8.0N/mm²、引張強度 8.8N/mm² を満足する材料である。UFC は水結合材比が非常に小さく、通常のコンクリートと比較して自己収縮が大きく、乾燥収縮が小さい特徴を有する。

表-1 UFC の配合

水結合材比 (%)	単位重量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg/m ³)
	水	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
15.5	230	1830	331	22	157

3. ひび割れ発生に関する時系列

当該事象に関する工事およびひび割れ確認における時系列を以下に示す。

- ・ 2020年5月 PCaPC床版の工場製作
- ・ 2020年6月～11月 PCaPC床版の現場架設、目地部の施工（完成箇所から随時供用）
- ・ 2021年6月 縦目地部近傍にひび割れを確認
- ・ 2021年7月～2023年9月 ひび割れ調査実施

4. ひび割れ発生状況

床版底面コンクリートにおけるひび割れ発生状況を図-3、写真-1～3に示す。主なひび割れは、「PCaPC床版の角部（図中の赤線）」および「縦目地部（図中の青線）」である。

PCaPC床版の角部のひび割れは、計10箇所を確認されており、最大ひび割れ幅は0.1mm、長さは最大約0.34m、深さは最大約60mmであった。また、約1年間にわたりひび割れ変動を計測したが、長さ、幅、深さともに進展は確認されていない。なお、一部のひび割れはPCaPC床版に設置された型枠固定用インサートに沿ったひび割れが確認された。

縦目地部のひび割れは、計4箇所が発生しており、最大ひび割れ幅は0.15mm、深さは最大約1mmであり、構造的な影響を及ぼすものではないと判断される。

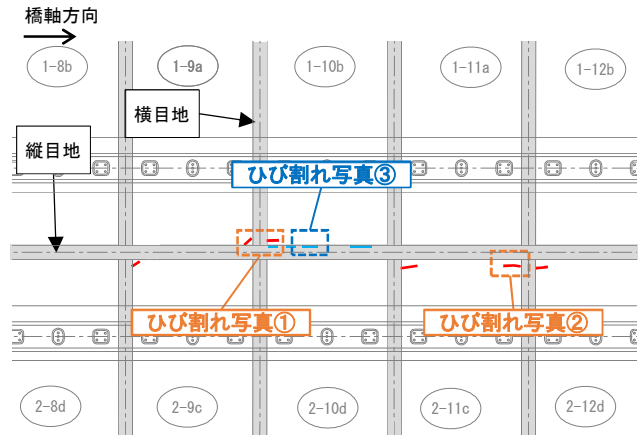


図-3 ひび割れ発生状況（PCaPC床版底面）

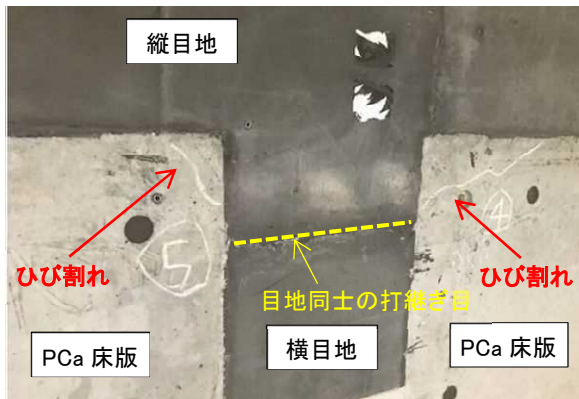


写真-1 ひび割れ発生状況①



写真-2 ひび割れ発生状況②

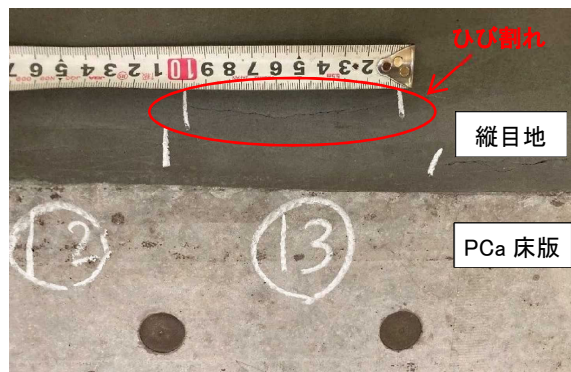


写真-3 ひび割れ発生状況③

5. PCaPC 床版の角部のひび割れに関する検証

5.1 解析的検証

(1) FEM 解析概要

PCaPC 床版角部のひび割れの発生要因を特定するために FEM 解析を実施した。解析モデルは、**図-4** に示すとおり線形 FEM にてモデル化した。解析ソフトは Midas FEA/NX (Midas IT 社)を使用した。PCaPC 床版をソリッド要素、鋼桁をシェル要素、対傾構を梁要素によりモデル化した。これにより、主桁、横桁による拘束の影響を考慮することが可能となる。また、PCaPC 床版内の PC 鋼材は、トラス要素でモデル化した。鋼桁は、橋長約 40m をすべてモデル化し、床版は 12 パネル分をモデル化した。なお、解析では、解析イベントとして**表-2**、**図-5** に示す実施工ステップを再現し、作用荷重として死荷重、プレストレス、収縮、クリープの影響、温度の影響 (UFC の水和発熱、外気温) を考慮した。解析上の着目位置は、**図-5** に示すとおりひび割れが発生した PCaPC 床版の角部 (**図-5** の PCa1) とした。

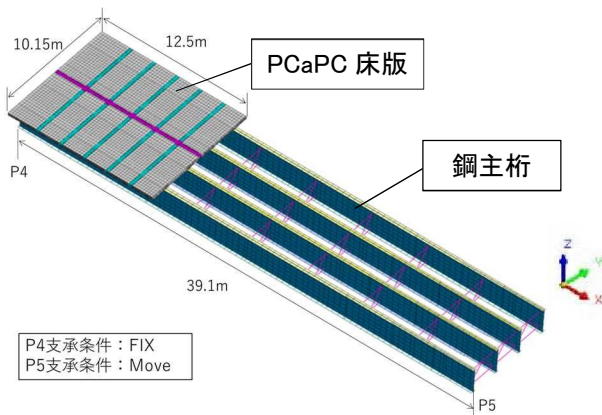


図-4 FEM 解析モデル

表-2 施工ステップ (解析イベント)

延日数 (日)	解析イベント
1~9	PCa床版の製作 (1-1~1-6、2-1~2-6)
36~41	PCa床版の架設 (1-1~1-6)
49~52	横目地の打設 (1-1~1-5)
54~59	PCa床版の架設 (2-1~2-6)
61~63	横目地の打設 (1-1~1-5)
64	縦目地の打設

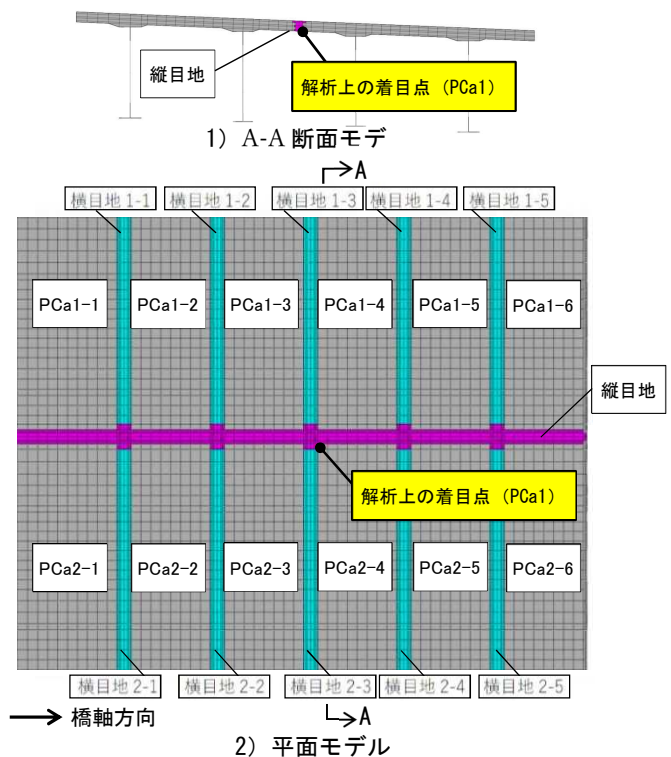


図-5 解析モデル (床版底面側)・解析上の着目点

UFC における収縮特性は、**図-6** に示す疑似完全拘束試験による収縮特性を用いた。また、PCaPC 床版におけるコンクリートの収縮・クリープ特性は、**図-7** に示すコンクリート標準示方書 2002 に準拠した。

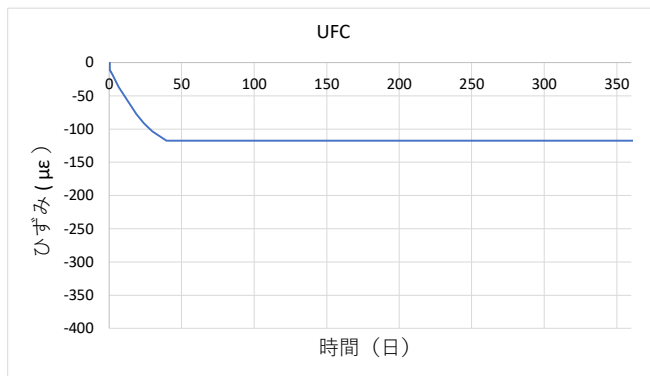


図-6 UFC の収縮ひずみモデル

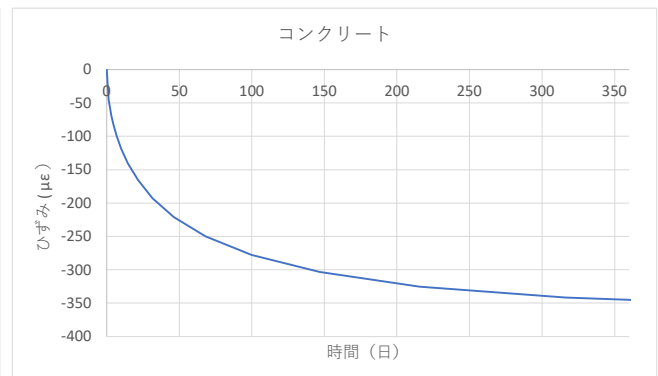


図-7 コンクリートの収縮ひずみモデル

(2) 解析結果

1) UFC の収縮特性の影響 (要因①)

図-8 に PCaPC 床版 (底面部 PCa1) の最大主応力の経時変化を示すが、床版角部において PCaPC 床版のひび割れ発生限界となる $3.2\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の応力度が生じている。また、UFC 打設後、急激に応力増加し、約 40 日経過以降で応力ピークとなり、UFC の収縮特性の経時変化と同様な傾向を示した。以上から、UFC の収縮特性により、PCaPC 床版に大きな応力度が発生しているものと推察され、当該橋梁の床版角部に生じたひび割れの要因の 1 つと考えられる。

2) 打継部の形状の影響 (要因②)

十字形状の影響を確認するため、図-9 のとおり十字形状と直線形状とした場合における PCaPC 床版 (底面部) の発生応力度の変化を図-10 に示す。十字形状から直線形状へ変更することで、発生応力度は $1.6\text{N}/\text{mm}^2$ まで低減し、ひび割れ発生限界応力を下回った。

これより、縦目地と横目地の交差点部の UFC の打継形状を十字形状としたことで、PCaPC 床版の角部に橋軸方向の付加応力が生じ、ひび割れが発生したものと考えられる。その傾向は底面側の表面部において顕著となり、当該橋梁のひび割れ計測結果とも合致する。

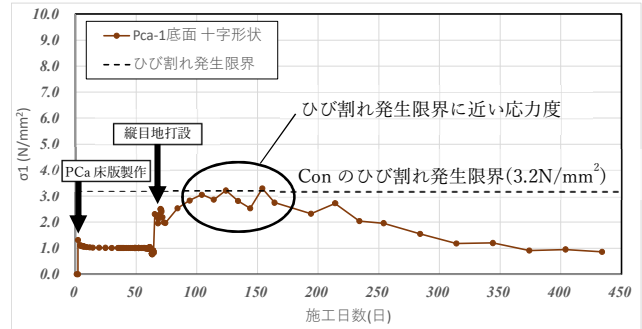


図-8 PCaPC 床版 (PCa1) の発生応力度の経時変化

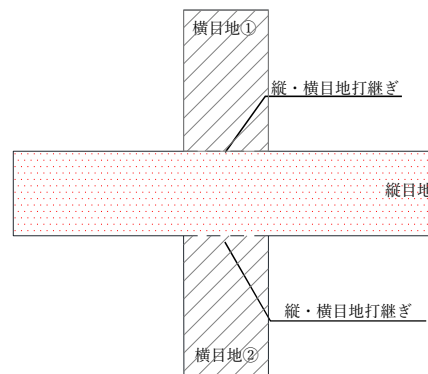


図-9 縦目地部形状 (直線)

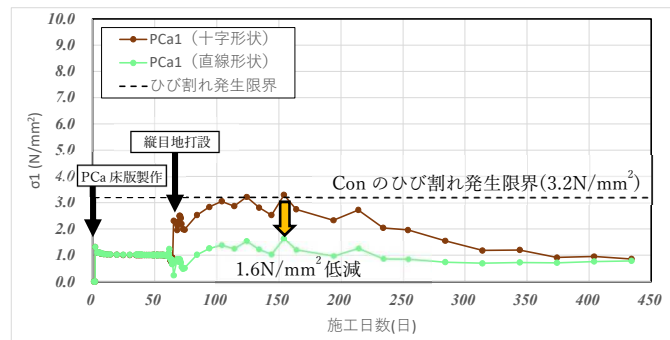


図-10 打継形状の違いによる発生応力度の経時変化

5.2 ひび割れ要因分析

前節における解析結果を踏まえて、主なひび割れ発生メカニズムは、縦目地や横目地に施工された UFC の収縮 (要因①) により、UFC 自体やそれを拘束する PCaPC 床版に応力度が生じたことによるものである。これに加え、縦目地と横目地の交差点部において、UFC の打継形状を十字形状 (要因②) としたことにより、床版角部に付加的な引張応力度が発生してひび割れが発生させたものと考えられる。

5.3 ひび割れ抑制策

縦目地部に超高強度コンクリートを打設しプレストレスを導入しない構造を採用する場合は、以下に留意してひび割れ抑制に努める必要があると思慮される。なお、このひび割れ抑制策は同一な縦目地構造で施工された現場にて実施した結果、ひび割れが発生しなかったことを確認している。

- 1) 目地材の収縮特性を明らかにし、FEM 解析等により目地材の施工後に縦目地部付近にひび割れが生じないことを確認する。
- 2) 目地形状は直線形状とする等、目地材の収縮に対して応力集中しない形状を検討する。
- 3) PCaPC 床版にインサート等仮設物を配置する際は、応力集中する箇所に配置しない。

6. 縦目地部のひび割れに関する検証

6.1 解析的検証

(1) FEM 解析概要

縦目地部でのひび割れの発生原因を特定するために FEM 解析を実施した。写真-4 に示すとおり、縦目地部の上反り形状が確認されたことから、図-11 に示すとおり UFC の収縮による変形が型枠等に拘束された影響と推定された。そのため、解析モデルは縦目地部に着目し、底面型枠を詳細にモデル化した（図-12、図-13）。解析ソフトは Midas FEA/NX (Midas IT 社) を使用した。PCaPC 床版、UFC、型枠をソリッド要素によりモデル化した。作用は、死荷重、収縮、クリープの影響、温度の影響（UFC の水和発熱、外気温）を考慮した。解析イベントは打設のみとし、UFC と PCaPC 床版に定義した収縮モデルは 5.1 と同様とした。



写真-4 縦目地部の上反り状況

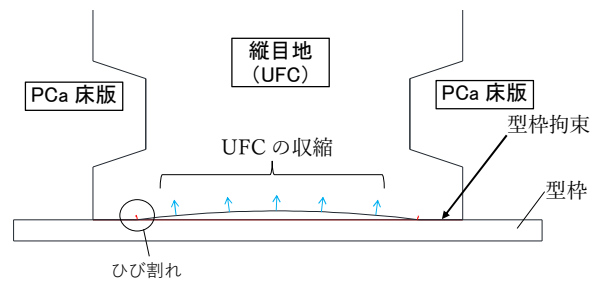


図-11 型枠等拘束による影響イメージ

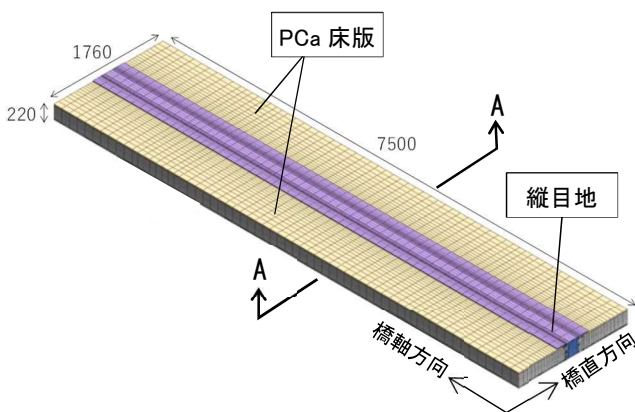


図-12 縦目地部モデル図

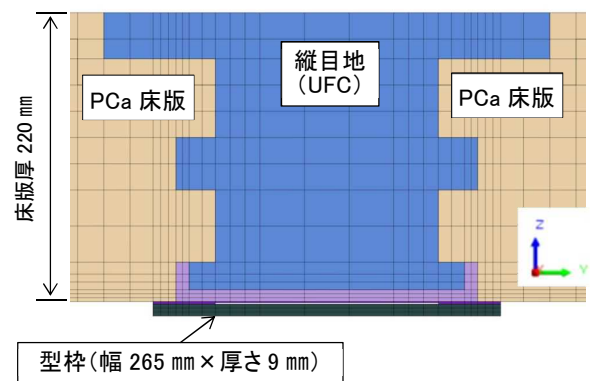


図-13 縦目地部断面モデル (図-12_A-A断面)

(2) 解析結果 (要因③)

図-14 に縦目地部の最大主応力が最大となった材齢 6 日目の応力度コンター図を示す。実際にひび割れが確認された位置において、応力が集中しており、最大 4.6N/mm²の応力度が生じている。

また、UFC の中心部に向かって円弧状の応力分布となっていることから、型枠等の拘束の影響により断面内で変形量の違いが生じたものと推察され、ひび割れの要因の 1 つと考えられる。

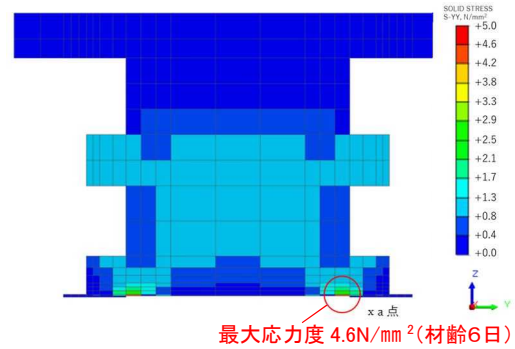


図-14 縦目地部の応力度コンター図

6.2 ひび割れ詳細調査(要因④)

ひび割れの発生状況の詳細を確認するため、写真-5 に示すとおり、はつり調査を実施した。ひび割れ深さは 1 mm 程度に留まっており、底板表面部では繊維が架橋していない箇所がごく一部で確認された。

ここで、表-3 に鋼繊維量と割裂ひび割れ発生強度の関係を示す。縦目地部に用いる UFC は、鋼繊維量が UFC 体積比で 2% 混入されることを想定しているが、鋼繊維量が減るとひび割れ発生強度も小さくなる傾向があり、繊維量が 0% に近づくと 4.5N/mm²まで低下する。これは、前節6.1(1)の最大発生応力度と同等となっている。

以上から、ごく表面部の鋼繊維分布の影響がひび割れの要因の 1 つと考えられる。ただし、ひび割れ深さ 1 mm、幅 0.15 mmであることを踏まえると、構造特性や耐久性に影響を及ぼすひび割れではないと考えられる。

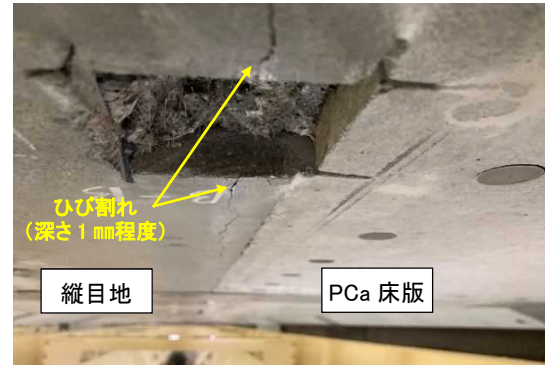


写真-5 はつり調査によるひび割れ調査

表-3 鋼繊維量と割裂ひび割れ発生強度の関係

鋼繊維量 (vol%)	割裂ひび割れ発生強度 σ_{tk} (N/mm ²)	特性値比率
0.0	4.5	0.48
1.0	5.3	0.57
2.0	9.4	1.00

6.3 ひび割れ要因分析

前節 6.2 における解析結果、ひび割れ詳細調査を踏まえて、主なひび割れ発生メカニズムは、縦目地部に施工された UFC の自己収縮を型枠等が拘束することで応力集中を発生 (要因③) させ、ごく表面部の鋼繊維分布の影響 (要因④) により繊維が架橋されない箇所でひび割れを発生させたものである。

6.4 ひび割れ抑制策

縦目地部に超高強度コンクリートを打設しプレストレス力を導入しない構造を採用する場合は、以下に留意してひび割れ抑制に努める必要がある。なお、このひび割れ抑制策を行った場合、ひび割れの発生を抑制できたことを確認している。

- 1) 型枠脱型が可能な強度に達したら速やかに型枠固定を緩める等、型枠による拘束の影響を最小限にする措置を検討する。

2021年11月5日
2021年11月15日追記
中日本高速道路株式会社

橋軸直角方向の接合部を有する床版形式について

プレキャストPC床版の橋軸直角方向接合部(以下「縦目地部」という。)に超高強度コンクリートを使用した床版で、接合部付近にひび割れが確認されました。

当面の間、縦目地部を有する幅員方向に分割したプレキャスト PC 床版を採用する場合は、縦目地部を貫通する PC 鋼材を配置するものとします。

なお、縦目地部に超高強度コンクリートを打設しプレストレスを導入しない構造を全断面プレキャスト PC 床版と同等とみなす例として、NEXCO 試験方法試験法 442「プレキャスト PC 床版接合部の疲労耐久性試験方法」により耐用年数 100 年相当の載荷荷重及び載荷回数に対して漏水がないことを確認することに加えて、以下の項目を満足することを適切な方法で立証することとします。

- ・主桁による拘束の影響を考慮した上で、超高強度コンクリートの打設後に縦目地部の接合部付近にひび割れが生じないこと。

【お問合せ先】

中日本高速道路株式会社 技術本部 環境・技術企画部 構造技術課

E-mail: structuraleng@c-nexco.co.jp.