

論文 繰返し载荷を受ける UFC 床版接合部の挙動に関する研究

橋本 理*1・大島 邦裕*2

要旨：道路橋床版の更新に軽量かつ高耐久の UFC 床版を適用する場合、現場施工の床版接合部も含めて、疲労耐久性を検討しておく必要がある。接合部に充填する間詰材と本体の界面に水や塩化物イオンが浸入すると、水のポンピング作用に伴う界面劣化の進行や、間詰材内に設置されている PC 鋼材の腐食発生が懸念される。そこで本研究では、接合部を含む UFC 床版供試体を製作し、床版の上面に水を張った厳しい条件下で輪荷重走行試験を行った。その結果、最終的な破壊形態は接合部ではなく一般部における押抜きせん断破壊であり、浸水に伴う接合部の劣化や下面からの漏水は生じなかった。

キーワード：床版更新, UFC 床版, 接合部, 間詰材, 輪荷重走行試験, 界面挙動

1. はじめに

近年、道路橋のコンクリート床版の劣化損傷が大きな社会問題となっており、プレキャストプレストレストコンクリート床版（以下、PC 床版）への更新が各所で精力的に行われている。コンクリート床版の劣化損傷の最も大きな要因は、過積載車を含む重量車両の繰返し走行による疲労であるが、最近では飛来塩分量の多い海岸部橋梁の床版や凍結防止剤散布地域の床版に多く生じている塩害による鉄筋腐食、積雪寒冷地に見られる凍害による床版上面の土砂化など劣化形態が多様化している¹⁾。一方、都市高速道路に多く用いられている鋼床版においても、溶接部にて金属疲労に起因する亀裂が確認されており、鋼床版を新設するにはデッキプレート²⁾の増厚や開断面縦リブの採用などの処置が採用されているものの、根本的な解決に至っていない²⁾。

このような背景の中、既設鋼床版の更新も視野に入れて、軽量かつ高耐久の超高強度繊維補強コンクリート製プレキャスト床版（以下、UFC 床版）が開発されている³⁾。UFC は超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針（案）⁴⁾に準拠した材料で、ひび割れ発生や雨水・塩分の浸透に対する抵抗性が非常に大きい特性を有する。床版製作時には、UFC の高い圧縮強度を活かして大きなプレストレスを導入可能で、このことにより部材の薄肉化・軽量化を図っている。しかしながら、UFC 床版を環境条件の厳しい現場に実装するためには、現場で施工する UFC 床版接合部も含めて、疲労耐久性を検討しておく必要がある。

本研究では、水張条件下における輪荷重走行試験を行い、輪荷重下における UFC 床版接合部の変形挙動や界面の開口挙動を把握した。試験の際には、接合部およびその近傍の変形挙動を確認することで、供用中に接合部が疲労耐久性上の弱点とならないことを検証した。

2. 接合部を有する UFC 床版の輪荷重走行試験

2.1 床版供試体

図-1 に床版供試体の形状寸法を示す。床版供試体の寸法は、橋軸方向が 4.5m、橋軸直角方向が 2.8m であり、中央から走行方向に 600mm ずらした位置の走行直角方向に接合部が設けられている。接合部を中央からずらした位置に設定したのは、構造的に剛な接合部ではなく一般部での破壊が想定されたためである。床版の 2 方向リブ内にはそれぞれ PC 鋼材が設置されており、いずれもポストテンション方式でプレストレスを導入した。実際の床版では、橋軸直角方向の PC 鋼材はプレテンション方式でプレストレスを導入する設計となっているが、端部の定着ロスを考慮すると供試体に設計と同程度のプレストレスを導入することは困難であると考えられたため、本供試体ではポストテンション方式を採用した。有効プレストレスは橋軸直角方向の PC 鋼より線（1S15.2BL（SWPR7B））で 800N/mm²、橋軸方向の PC 鋼棒（B 種 1 号（SBPR930/1080））で 550N/mm²である。

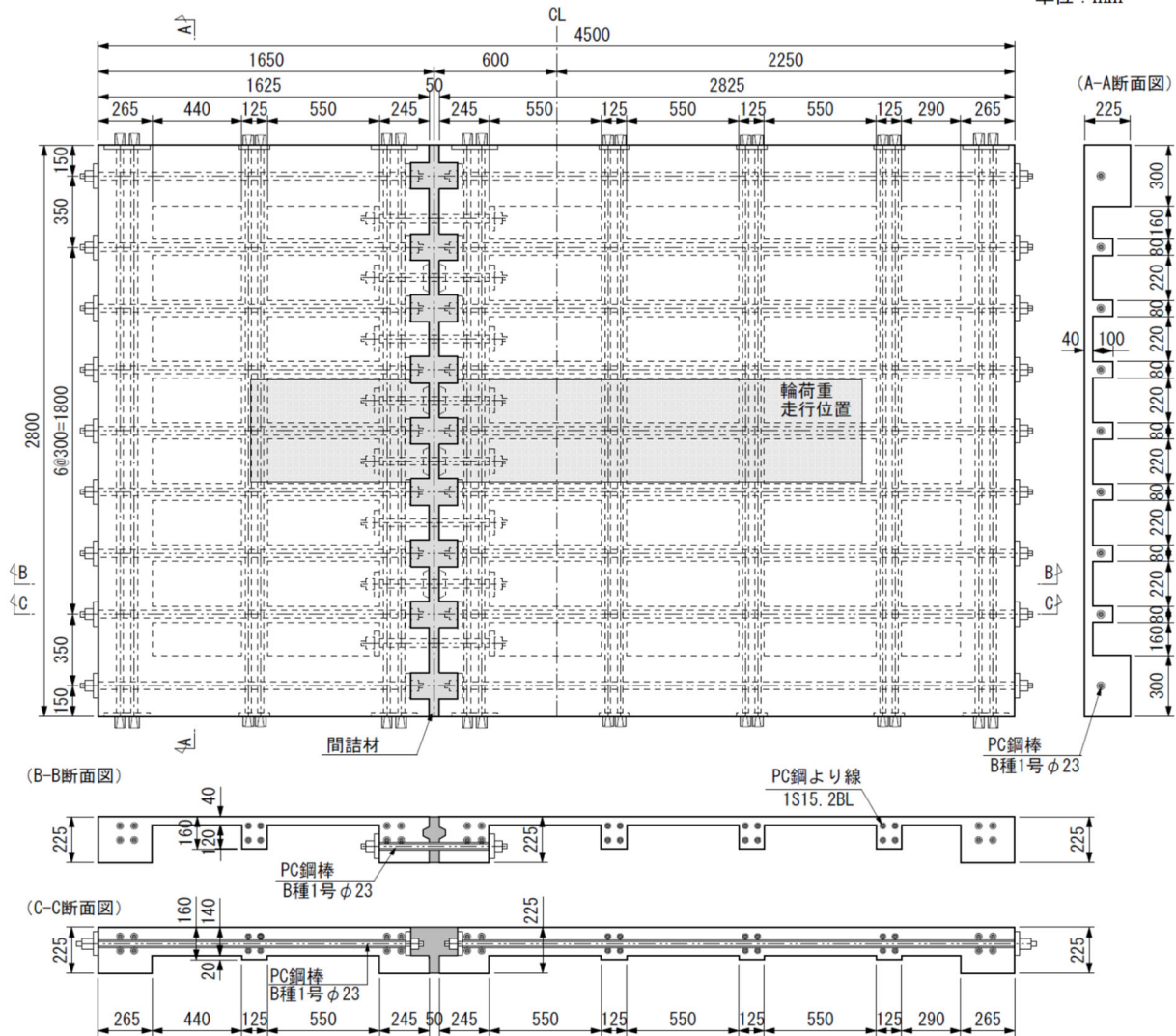
床版間の接合は、図-1 の B-B 断面図に示すとおり、UFC 床版間（50mm 幅）に間詰材（高強度繊維補強モルタル）を充填し、強度が発現した後、接合部の両側に位置する橋軸直角方向リブ同士を接合用の短尺 PC 鋼棒にて緊張することにより接合した（有効プレストレスは 550N/mm²）。なお、接合用の PC 鋼棒は、床版に局所的な損傷が生じた際に 1 枚ごとの交換を可能とするためシーズ内にグラウト充填をしない仕様としている。

表-1 に床版本体に用いた UFC および間詰材の配合を示す。間詰材には著者らがこれまでに開発を進めてきた高強度繊維補強モルタル⁵⁾を採用しており、早期強度発現性や収縮低減の工夫がなされている。使用鋼繊維は引張強度 2,000N/mm² 以上の高張力鋼繊維で、容積混入率はいずれも 2%である。表-2 に輪荷重走行試験の開始

*1 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 主席研究員 (正会員)

*2 大成建設(株) 土木本部土木技術部 次長

単位：mm



図一 UFC床版の基本形状

表一 配合

種別	単位量 (kg/m ³)					
	水			結合材	骨材	鋼繊維
	高性能減水剤	収縮低減剤				
UFC	180	20	---	1,278	934	157 (φ0.2×15mm)
間詰材	216	20	15	1,423	650	157 (φ0.16×13mm)

表二 材料試験結果

	試験時期	圧縮強度	引張強度	弾性係数	ポアソン比 (-)
		f'_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	
UFC	開始時	204	13.3	52.4	0.19
	終了時	227	13.8	51.9	0.18
間詰材	開始時	153	10.3	45.8	0.22
	終了時	174	12.7	47.8	0.22

時・終了時における材料試験結果を示す。ひび割れ発生強度と引張強度の試験方法は牧田ら⁹⁾の方法によった。

2.2 载荷と測定方法

図一に輪荷重走行試験の概要⁷⁾を示す。前述のとおり床版には走行直角方向の接合部が設けられおり、接合部を跨いで輪荷重が走行する際に生じる負曲げの影響について検討を行った。床版供試体の支持条件は、2辺(長辺)単純支持、他の2辺を弾性支持である。試験開始24時間前から試験終了までの間、床版上面は常時水を張った状態を保持しており、輪荷重走行下における漏水の有無を確認した。载荷は、荷重157kN、走行速度15rpmで走行を開始し、以降4万回ごとに19.6kNずつ荷重を増大させる階段载荷を行った。

測定は、輪荷重走行下における床版供試体の破壊形態および接合部周辺の挙動を把握するため、供試体の下面に鉛直変位計を、接合部近傍の上下面にパイ型変位計を、接合部界面の開き量を測定するずれセンサを設置した(図一3)。鉛直変位計は走行方向中心に、パイ型変位計

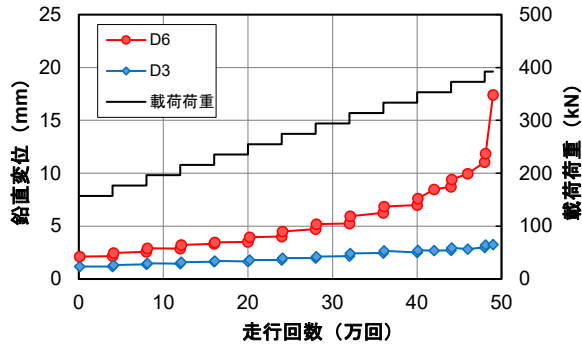


図-5 鉛直変位と走行回数の関係

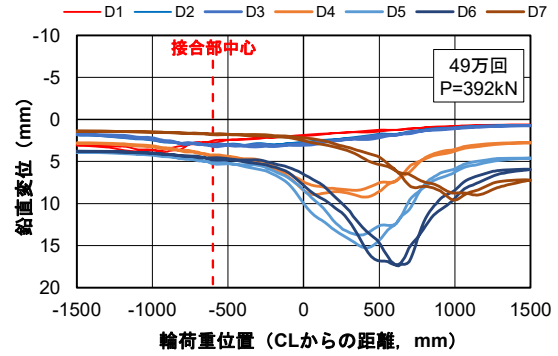
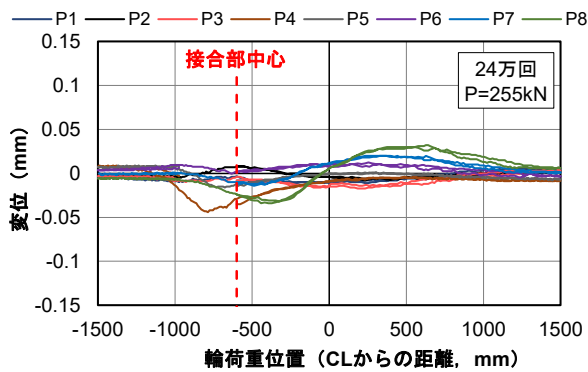
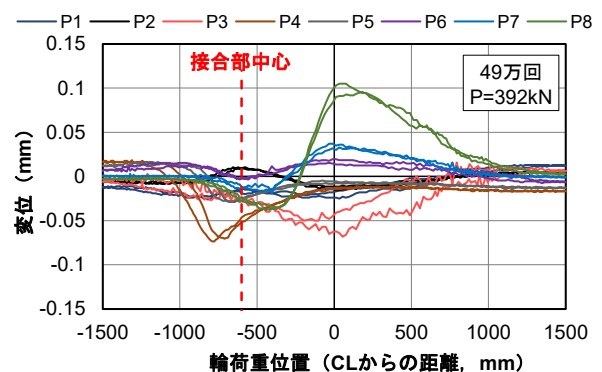


図-6 鉛直変位と輪荷重位置の関係



a)走行回数 24 万回



b)走行回数 49 万回

図-7 変位と輪荷重位置の関係

これは、接合部が一般部に比べて著しく剛であり、接合部に横桁が存在する状態に近いと推察される。

図-6 に走行回数 49 万回時における床版の鉛直変位と輪荷重位置の関係を示す。図中のプロットは、走行輪が1往復する間の鉛直変位である。図-4 に示すとおり、接合部右側の一般部で押抜きせん断破壊が生じているため、接合部および接合部左側の鉛直変位は小さくなり、最大変位を示した D6 に近づくにつれ鉛直変位は大きくなる傾向であることが分かった。

(3) 接合部の挙動

図-7 は、走行回数 24 万回および 49 万回における接合部周辺の床版上下面の変位を示した図で、縦軸にパイ型変位計による変位を、横軸に輪荷重位置を示している。変位はパイ型変位計が開く方向が正であり、活荷重に対する変位である。すなわち、パイ型変位計で測定した変位から、CL±1500mm の位置に輪荷重が位置する際の平均変位を差し引いた値とした。図-7 を参照すると、走行回数 24 万回時点では各測定点で計測された変位は微小であったが、走行回数が 49 万回になると接合部と一般部の境界付近 (P8) の変位が卓越し、図-4 に示すような破壊に至った。これは、走行回数を重ねるごとに一般部 (接合部右側) の鉛直変位が増大し、図-8 に示すようなメカニズムで生じたものと推察される。すなわち、接合部の構造が剛であることから接合部が一体となって

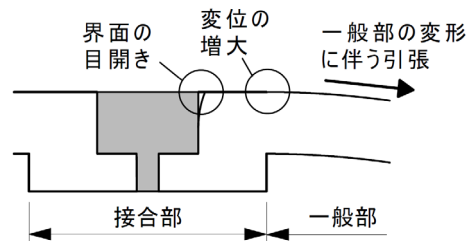


図-8 想定される界界面目開きのメカニズム

挙動し、床版厚さが小さくなる一般部との境界で変位が大きくなったと考えられる。

接合部上縁の曲率が増大し、本体と間詰材の界面に目開きが生じた場合、そこからの浸水により床版の耐久性が損なわれることが懸念される。図-9 は、走行数 24 万回および 49 万回における接合部の曲率と輪荷重位置の関係を示す。曲率 ϕ は、図-7 b) に示す上下のパイ型変位計の測定結果から、式(1)を用いて算出した。なお、今回使用したパイ型変位計の基長はすべて 150mm であり、パイ型変位計の固定には高さ 10mm のコマを用いている。このことから、曲率 ϕ を算出する際には式(1)に条件を代入した式(2)を用いた。

$$\phi = (\varepsilon_u - \varepsilon_l) / h \quad (1)$$

ここに、 ε_u : 上縁ひずみ、 ε_l : 下縁ひずみ

h : 床版の厚さ(mm)

$$\phi = (u_u - u_l) / 150 (h + 2 \times 10) \quad (2)$$

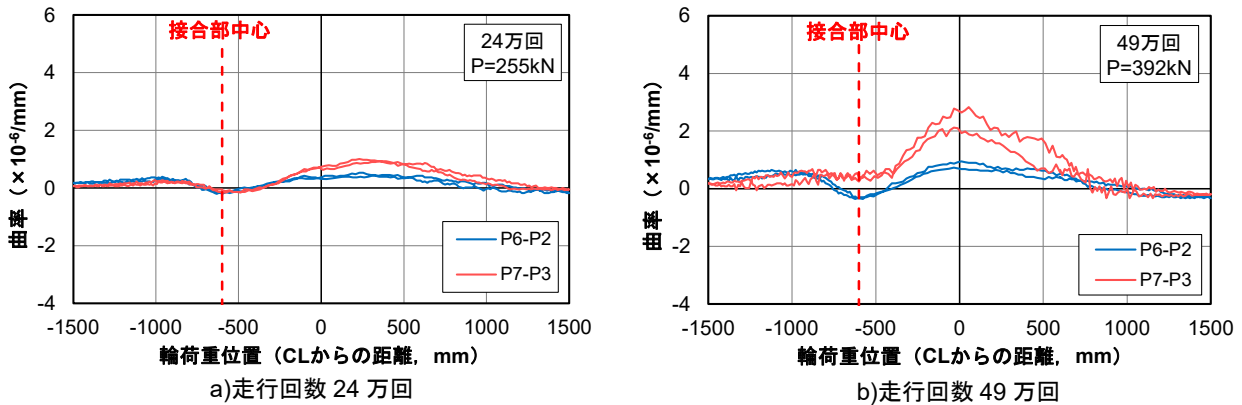


図-9 接合部における曲率と輪荷重位置の関係

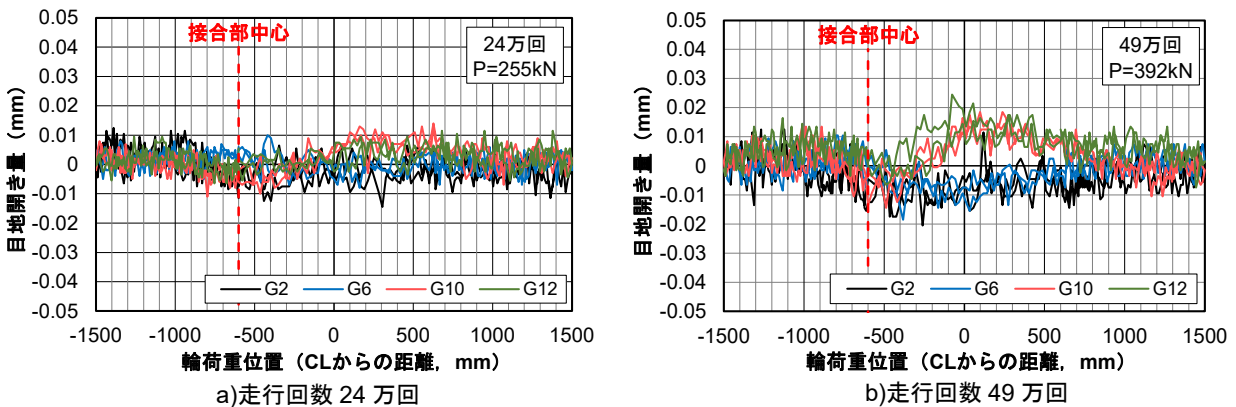


図-10 接合部界面における目開き量と輪荷重位置の関係

ここに、 u_u, u_l : 上縁, 下縁それぞれのパイ型変位計による変位(mm)

図-9によると、24万回(載荷荷重 255kN)時点に比べて、破壊直前における49万回(載荷荷重 392kN)時点の接合部曲率が大きくなっている。特に、本体と間詰材の界面のうち一般部に近い界面部(図-3 b)を含むP7-P3位置)における曲率が大きくなっており、図-8に示すメカニズムを裏付ける結果となった。一方、接合部中心(図-3 b)のP6-P2位置)における曲率は破壊直前においても24万回時点から微増した程度であり、図-8に示す接合部と一般部の境界から離れている分、一般部に生じた変形の影響が小さかったものと推察される。

図-10は接合部における本体と間詰材間の目開き量と輪荷重位置の関係である。目開き量は開く方向が正であり、活荷重に対する値を示している。ずれセンサによる計測は図-3 c)に示す12箇所で行ったが、ここでは代表的な4箇所の結果を示した。図-10によると、24万回時点では目開き量が概ね0.01mm以内であるのに対し、49万回時点では最大0.022mmの目開き(G12, 床版中央から接合部方向へ55mm離れた位置)が生じる結果となった。これは、走行回数および載荷荷重の増加に伴って床版一般部の変形が大きくなったことに起因していると推察される。ただし、目開き量が0.02mmを超えるのは

輪荷重が床版中央付近を通過する短時間のみであり、輪荷重の通過後は概ね0.01mm程度に収まることが分かった。一方、床版下面では輪荷重が接合部の左側に位置するタイミングで最大0.013mmの目開きが確認された(G2, 走行回数49万回, 床版中央から接合部方向へ1122mm離れた位置)。しかしながら、試験中の目視確認では目開きを明確に把握することができず、試験完了に至るまで接合部からの漏水は確認されなかった。

3. 接合部の挙動に対する考察

輪荷重走行試験では、一般部の変形増大に伴って接合部の曲率が大きくなり、床版の上下面それぞれにおいて目開きが生じていることが確認された。床版本体と間詰材の間に水が浸入した場合、輪荷重作用下において水のポンピング現象による噴射水圧の影響で、界面の劣化を促進してしまうことが懸念される^り。また、凍結防止剤の散布が行われる地域の床版では、塩化物イオンを含んだ水が界面を介して浸入し、間詰材内のPC鋼材を腐食させてしまうことも考えられる。したがって、輪荷重走行下における浸水の可能性については十分検討しておく必要がある。

本研究では、輪荷重走行試験後に床版を切断し、ひび割れの発生状況や浸水跡の有無について確認を行った。

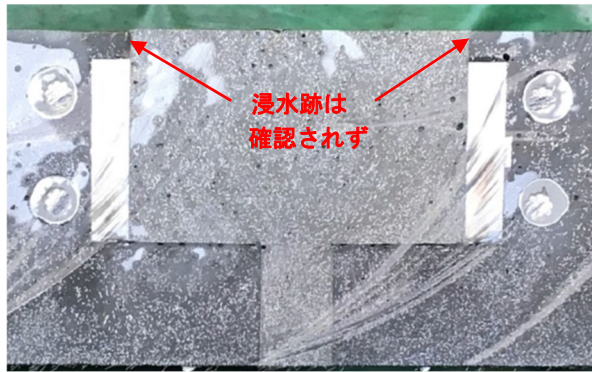


写真-1 床版切断面写真（接合部）

写真-1 は、床版中央付近の接合部を橋軸方向に切断した写真であるが、界面内への浸水跡や繰返し载荷にともなう劣化は見られなかった。今回の試験では、最終的な破壊形態を確認する目的で実際の輪荷重に比べて過大な載荷荷重を作用させている。さらに、試験開始から完了まで床版上面に水を張った条件で実施しており、供用中の床版に比べてかなり厳しい条件といえる。この条件下で接合部内への浸水がなかったこと、最終的な破壊が一般部における押抜きせん断破壊であったこと（写真-2）を考慮すると、今回検討した構造において接合部は疲労耐久性上の弱点にならないと判断される。接合部を中央に設置した場合には接合部の破壊が先行する可能性もあるが、今回の試験において接合部に十分な疲労耐久性があることを確認できた。また、写真-2 に示すとおり、接合部と一般部の境界付近の床版上面に微細ひび割れが確認されたが、これは接合部が一般部に比べて剛な構造であったためと推察される。しかしながら、微細ひび割れ部において床版内への目立った浸水跡やひび割れの進展も見受けられないことから耐久性上の弱点にはならないものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、水張条件下における輪荷重走行試験を行い、輪荷重下における UFC 床版接合部の変形挙動や界面の開口挙動を把握した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 最終的な破壊形態は、接合部ではなく一般部における押抜きせん断破壊であった。
- (2) 接合部付近で測定した床版上面の水平変位は、接合部と一般部の境界付近で最大となった。そこから接合部中心に近づくほど水平変位は小さくなった。
- (3) 接合部において間詰材と床版本体の目開き量は 0.02mm 程度であった。試験後に切断面を確認した所、浸水跡や界面劣化は確認されなかった。

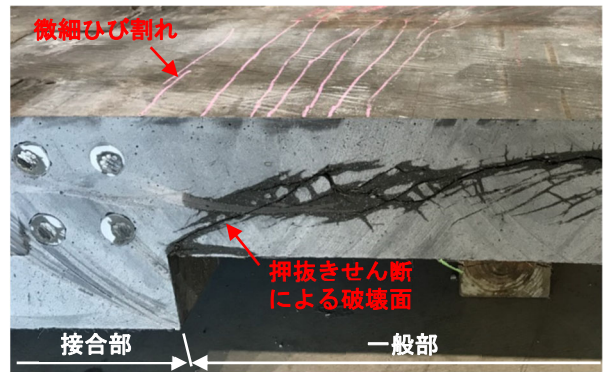


写真-2 切断面写真（接合部と一般部の境界付近）

- (4) 以上のことから今回対象とした構造において接合部が疲労耐久性上の弱点にならないものと判断された。
謝辞等

本研究は、(国研) 土木研究所と当社を含む民間 5 社の「短繊維補強コンクリートを用いた橋梁床版の耐久性向上技術に関する共同研究」における成果の一部を報告したものである。輪荷重走行試験の際には(国研) 土木研究所から多大な協力を頂いた。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版の長寿命化技術，森北出版，pp.1-3，2016.9
- 2) 小坂崇，金治英貞，一宮利通，藤代勝，三木朋広：ワッフル型 UFC 床版の構造設計および使用性検討，土木学会論文集 A1，Vol.74，No.3，pp.473-490，2018
- 3) 北村健，岩崎郁夫，趙唯堅，岸田政彦，石原陽介，岩城一郎：道路橋 UFC プレキャスト床版の耐荷性および耐疲労性に関する検証，構造工学論文集，Vol.63A，pp.806-819，2017.3
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004
- 5) 橋本理・渡部孝彦・武田均・武者浩透：膨張材および収縮低減剤の使用が高強度繊維補強モルタルの諸性能に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.74，pp.273-280，2021.3
- 6) 牧田通，北川寛和，横田祐起，本田智昭，一宮利通：直接引張試験による UHPFRC の引張特性に関する研究，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，V-542，pp.1083-1084，2017.9
- 7) 土木研究所，大成建設，カナフレックスコーポレーション，J-ティフコム施工協会，エスイー，鹿島建設：短繊維補強コンクリートを用いた橋梁床版の耐久性向上技術に関する共同研究報告書，2024.