

論文 超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレキャスト床版接合構造に関する実験的検討

佐々木 一成*1・岩城 孝之*2・富永 高行*3・野村 敏雄*4

要旨：劣化した道路橋床版の取替工事では、工期短縮、品質向上の観点からプレキャスト床版が用いられており、床版同士の接合部には現場での施工の省力化、耐久性の向上が求められている。そこで本稿では高強度で耐久性に優れた超高強度繊維補強コンクリートを接合部の間詰材に用いた鉄筋重ね継手による接合構造に着目し、その力学的性能を確認するため、各種実験を行った。その結果、重ね継手長を鉄筋径の5倍確保することにより、鉄筋が降伏しても接合部が破壊しないこと、輪荷重走行実験において接合部がプレキャスト床版部分と比べて弱点となっていないことを確認した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、プレキャスト床版、接合、重ね継手

1. はじめに

わが国では建設から40～50年経過して劣化した道路橋床版の更新が進められており、工期短縮、品質向上などの観点からプレキャスト床版による更新が前提となっている。プレキャスト床版は車両により運搬されることなどから寸法に制約があるため、一般的に橋軸方向に2m程度の間隔でプレキャスト床版同士が接合される。接合部の鉄筋継手を通常の重ね継手とすると鉄筋径の25倍の重ね継手長が必要となり、コンクリートを場所打ちする部分が大きくなることから、プレキャスト床版を用いるメリットが小さくなる。そこで、重ね継手長を短くする技術が開発され、接合部の鉄筋を曲げ加工し、コンクリートの支圧による応力伝達を期待することにより重ね継手長を短くしたループ継手が一般的に用いられるようになってきている。また、ループ継手では鉄筋の曲げ半径を確保する必要があることから薄い床版厚には対応できないため、接合部の鉄筋先端に機械式定着を設けることにより重ね継手長を鉄筋径の15倍程度と短くし、薄い床版厚にも対応することができる工法が開発されている¹⁾²⁾。

一方で、重ね継手長を短くしたこれらの工法であっても、2mという接合部の間隔に対して0.4m程度の場所打ち部が生じ、接合部に配置される橋軸直角方向鉄筋を現場で組み立てる必要があることから、床版取替工事の工期短縮の妨げとなっていた。

米国では、接合部をさらに短くする工法として、混入されている短繊維により高い引張性能を発揮するUHPC(Ultra-high performance concrete)をプレキャスト床版の接合部に利用して重ね継手長を短くする工法が開発されている³⁾。米国で用いられているUHPCは常温で最

最終的に圧縮強度150N/mm²程度を発揮する材料である。

これは、わが国では超高強度繊維補強コンクリート(Ultra high strength fiber reinforced concrete: 以下、UFCと表記)⁴⁾と呼ばれている材料で、一般的に180N/mm²以上の強度を発現させて使用するため、高温養生が必要となり、適用場所が限定されていた。しかし、常温で圧縮強度180N/mm²以上を発現するUFCも実用化されており、現場での打込み、養生が可能となっている⁵⁾。

そこで本検討では、常温で圧縮強度180N/mm²以上を発現するUFCを重ね継手部に使用した接合構造を対象とし、重ね継手単体の一軸引張および疲労実験、接合部を有する梁の曲げ載荷実験、接合部を有する床版の輪荷重走行実験を実施して、UFCを用いた接合構造がプレキャスト道路床版の接合部として適当であるか力学的性能を確認した。

2. 対象とするUFCを使用した接合構造

本検討の対象とするプレキャスト床版の接合構造を図-1に示す。接合部の橋軸方向鉄筋は曲げや定着の加工をしない直筋で、継ぐ鉄筋同士にはあきがある重ね継手により接合部の橋軸方向鉄筋は接合されている。間詰材にはUFCを使用し、UFCを介して鉄筋の応力が伝達される。本構造に使用するUFCはポルトランドセメント、ポゾラン材、無機粉体、粒径5mm以下の骨材、特殊高性能減水剤、水および鋼繊維から構成され、標準養生により材齢28日で圧縮強度180N/mm²、引張強度8.8N/mm²(いずれも特性値)を満足する材料である⁵⁾。鋼繊維は直径0.16mm、長さ13mm、引張強度2700N/mm²で2vol.%混入している。接合部の橋軸直角方向の引張に対する負

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 構造技術研究部 副主任研究員 修(工)(正会員)

*2 (株)大林組 土木本部 生産技術本部 橋梁技術部 技術第二課 課長 修(工)

*3 (株)大林組 土木本部 生産技術本部 橋梁技術部 技術第三課 課長 修(工)

*4 (株)大林組 技術本部 技術研究所 構造技術研究部 上席研究員 博(工)

担は UFC の鋼繊維に期待でき、接合部の橋軸方向の長さも 200mm 程度と短いことから、橋軸直角方向に鉄筋は配置していない。

プレキャスト床版コンクリートの打継ぎ面は複数の凹凸状のせん断キーを設けた形状としている。表面は脱型時に高圧水で水洗いして骨材が見える状態とするグリーンカット処理が施されている。

今回の検討では、一般的なプレキャスト床版を想定し、橋軸方向鉄筋は SD345 で鉄筋径 19mm、鉄筋間隔 125mm (継ぐ鉄筋同士の間隔は 1/2 の 62.5mm)、純かぶり 51mm の床版接合部を対象とした。重ね継手長は 2 ケースについて検討し、1 ケースは文献³⁾を参考として鉄筋径 ϕ の 7.5 倍(=142.5mm、以下、7.5 ϕ と表記)とした。もう 1 ケースは文献³⁾で使用している材料と比べて本構造に使用する UFC の強度が高く、さらに鉄筋の降伏強度は 0.7 倍程度で、継手長を短くできると考えられることから、鉄筋径 ϕ の 5 倍(=95mm、以下、5 ϕ と表記)とした。プレキャスト床版部のコンクリートは呼び強度 50N/mm² の早強コンクリートを使用し、打継ぎ面は UFC 打込み前に水を噴霧して湿潤状態としてから打ち継いだ。

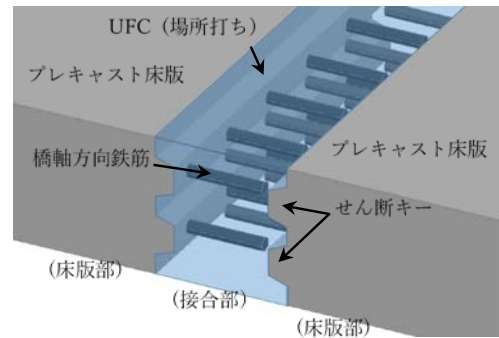


図-1 UFC を用いた床版接合構造

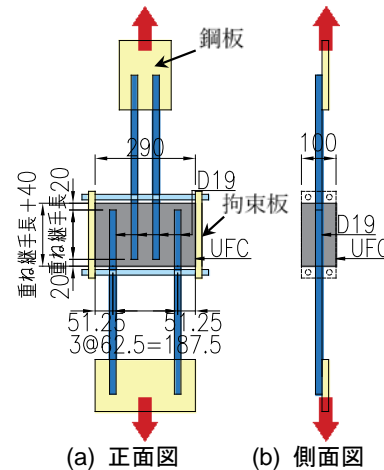


図-2 重ね継手の一軸引張・疲労試験体

3. 重ね継手の一軸引張実験

3.1 概要

UFC を用いた重ね継手の引張耐力を確認するため、継手に直接一軸引張力を作用させて実験を行った。

3.2 実験方法

UFC を使用した重ね継手を設けた試験体を作製し、アムスラーにより両端を引っ張って荷重した。試験体形状を図-2 に示す。試験体に偏心荷重が生じないように、左右対称の鉄筋配置とし、鋼板を鉄筋端部に溶接して、鋼板をアムスラーで引っ張ることにより荷重した。また、UFC 部分には曲げが作用するため、曲げ破壊しないよう、継手直交方向は拘束した。重ね継手長は 5.0 ϕ および 7.5 ϕ の 2 種類とした。使用した材料の諸元は表-1 のとおりである。

アムスラーに取り付けたロードセルにより荷重を計測し、荷重を鉄筋断面積で除した値を鉄筋応力度とした。

1 ケースにつき、3 体の荷重を実施した。

3.3 実験結果

実験により得られた重ね継手長と最大荷重時の鉄筋応力の関係を図-3 に示す。いずれも鉄筋降伏した後、あき重ね部分の UFC に生じた斜めひび割れが進展することにより、荷重が低下した。重ね継手長が短い方が最大荷重は小さくなったが、5 ϕ であっても設計降伏強度以上の耐力があった。

表-1 一軸引張・疲労実験の使用材料

	UFC		鉄筋	
	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
一軸引張実験	201	39.9	389	586
一軸引張疲労実験	190	34.1		

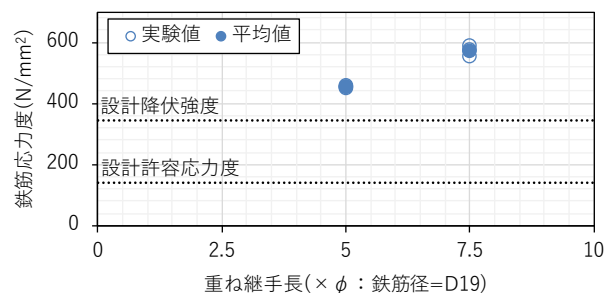


図-3 一軸引張実験結果

4. 重ね継手の一軸引張疲労実験

4.1 概要

UFC を用いた重ね継手の引張疲労性能を確認するため、継手に繰返し引張力を作用させて実験を行った。

4.2 実験方法

試験体は 3. と同様とし、重ね継手長は 5.0 ϕ とした。使用した材料の諸元は表-1 のとおりである。

作用させる上限応力は表-2 に示す 3 ケースとし、下限応力は文献⁶⁾に準じて 30N/mm² とした。荷重速度は 5Hz とした。1 ケースにつき、1 体の荷重を実施した。

4.3 実験結果

実験結果を表-2に示す。上限応力 300N/mm² および 240N/mm² では初期に UFC にひび割れが発生しているが、いずれも鉄筋母材で破断した。上限応力 180N/mm² では 300 万回の載荷で破壊せず、UFC にひび割れも見られなかった。重ね継手長 5φ で鉄筋母材以上の疲労強度があると考えられる。

表-2 一軸引張疲労実験条件および実験結果

No.	重ね継手長	載荷条件		実験結果	
		上限応力 (N/mm ²)	下限応力 (N/mm ²)	破断回数 (回)	破断位置
1	5φ	300	30	54,122	鉄筋母材
2		240	30	545,980	鉄筋母材
3		180	30	(300万回以上)	未破壊

5. 接合部を有する梁の曲げ実験

5.1 概要

UFC を使用した重ね継手を連続的に用いた接合構造の性能を確認するため、接合部を設けた梁の曲げ載荷実験を行った。

5.2 実験方法

図-4に示すように接合部に UFC を使用した幅×長さ = 542.5mm×2800mm, 厚さ 210mm の梁を作製し、曲げ載荷した。実験ケースを表-3に示す。重ね継手長を 2 種類と、接合部を有さない梁の 3 体の試験体について検討した。実験に使用した材料の特性を表-4, 5に示す。試験体はあらかじめ 2 つの床版部を作製し、接合部に UFC を打ち込んで接合することにより作製した。載荷条件は図-4のとおりで、載荷スパン 600mm, 支点間 2500mm とした。変位をスパン中央で計測した。

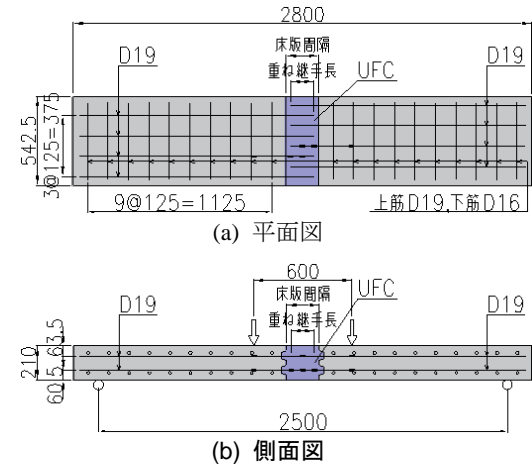


図-4 曲げ載荷試験体および載荷条件

表-3 実験ケース

試験体	重ね継手長 (mm) (φ:鉄筋径)	床版間隔 (mm)
No.1	なし	—
No.2	7.5φ	142.5
No.3	5.0φ	95

表-4 曲げ載荷実験の使用材料 (コンクリート, UFC)

	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
床版部 (No.1)	60	3.6	—	3.23×10 ⁴
床版部 (No.2,3)	75	4.4	—	3.67×10 ⁴
接合部 (UFC)	190	—	34.1	4.43×10 ⁴

5.3 実験結果

(1) 概要

実験結果を図-5に示す。なお、図中の計算値は表-4, 5の材料定数を使用して文献⁷⁾の方法により計算した。いずれの試験体も曲げひび割れが発生して剛性低下した後、引張側の軸方向鉄筋が降伏し、上面のコンクリートが圧壊して荷重が低下した。

(2) 曲げひび割れ発生荷重

いずれのケースにおいても大きな差は見られなかった。No.2,3には床版部と接合部との打継ぎが存在するが、打継ぎ界面より先に床版部コンクリートにひび割れが見られた。接合部に使用した UFC と床版部コンクリートとの付着が、床版部コンクリートのひび割れ強度と比べて同等以上であったためと考えられる。図-5に示すように、接合部の有無による初期剛性の違いは見られなかった。接合部 UFC にひび割れが生じた荷重は No.2 で 72kN, No.3 で 101kN であった。床版部の鉄筋が降伏する前に UFC にひび割れが発生しているものの、道路橋床版の設計曲げモーメントに相当する載荷荷重は 20kN 程度でひび割れが発生することにはなかった。

(3) 鉄筋降伏荷重

いずれのケースにおいても大きな差は見られなかった。No.2,3については床版部の鉄筋が降伏しており、今回検討した継手長においては鉄筋降伏強度以上の継手強

表-5 曲げ載荷実験の使用材料 (鉄筋)

	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (×10 ⁻⁶)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D16	388	2133	583	1.96×10 ⁵
D19	385	2137	577	1.97×10 ⁵

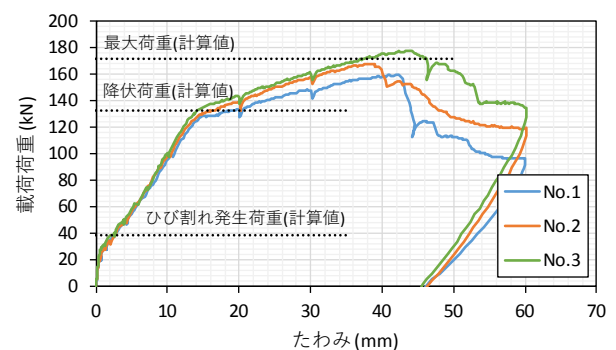


図-5 曲げ載荷実験における載荷荷重-たわみ関係

度が確保されていることが本実験でも確認された。

(4) 最大荷重

いずれのケースも上面コンクリートの圧壊により荷重が低下した。No.2,3についてはスパン中央に位置する接合部の UFC の圧縮強度が高いため、床版部コンクリートが圧壊した。最大荷重が No.1 と比べて大きくなったが、No.2,3に使用した床版部コンクリートの製作時期が No.1 と異なり、圧縮強度が高かったためと考えられる。

6. 輪荷重走行載荷実験

6.1 概要

UFC を用いた接合部の輪荷重に対する疲労性能を確認するため、輪荷重走行実験を実施した。5 種類の接合部およびプレキャスト RC 床版部の性状を比較することにより、性能を評価した。

6.2 実験方法

(1) 試験機

使用した試験機は動力源が車輪と一緒に走行する自走式であり、車輪は航空機用のゴムタイヤで最大 250kN まで載荷することができる。時速 2~5km で走行し、14.5m の区間を走行することができる。

(2) 試験体

試験体の概要を図-7 に示す。試験体の寸法は長さ 12.01m、幅 2.0m、厚さ 0.21m である。それぞれ諸元の異なる接合部を 2m 間隔で 5 か所に設けた。接合の諸元を表-4 に示す。接合部 1 では、橋軸方向鉄筋先端に一般的な鉄筋定着に用いられる直径 50mm、厚さ 16mm の円形のプレートに摩擦圧接で鉄筋に接合した機械式定着を配置し、重ね継手長を鉄筋径の 15 倍とした。橋軸直角方向にも鉄筋を配置し、間詰材は呼び強度 50N/mm² の早強コンクリートとした。接合部 2 は接合部 4 と同形状で、直角方向の鉄筋は配置せず、間詰材のみ接合部 1 と同じコンクリートとした。接合部 3~5 は間詰材を UFC とし、重ね継手長および接合面形状をパラメータとしている。

あらかじめ床版 A~F の 6 枚のプレキャスト RC 床版部を製作し、次に、コンクリートで接合する接合部 1,2 を接合した。その後、床版を試験装置にセットした状態で接合部 3~5 の型枠を設置し、UFC を打ち込んだ。UFC の表面は不陸ができないよう金ごてで仕上げた。製作が冬季であったため、30℃程度の保温養生を 5 日間実施した。実験開始時(材齢 14 日)および終了時(材齢 51 日)に実施した使用材料の強度試験結果を表-5,6 に示す。若材齢時の影響を加味して安全側に評価するため、材齢が短い段階から実験を開始した。

(3) 載荷方法

載荷は使用した試験機で行われてきた既往の実験を参考に 100kN から 220kN まで 30kN ずつ増加させ、各荷重で 4 万回、合計 20 万回走行させた。載荷荷重と走行回数(回)の関係を図-6 に示す。梁のスパンは 1800mm とした。

(4) 計測

床版の鉛直変位、鉄筋ひずみ、接合継目部の変位を図-8 に示す位置で計測した。計測時は輪荷重を図-8 に示す位置で停止させ、静的に計測した。計測した時期は図-6 のとおりで、試験体に発生したひび割れをあわせて観察した。

表-4 接合部諸元

接合部	間詰材	重ね継手長(mm) (φ:鉄筋径)	床版間隔 (mm)	接合面形状	
1	コンクリート	15φ+機械式	285	340	L形せん断キー
2	コンクリート	7.5φ	142.5	200	複数せん断キー(凹形)
3	UFC	5.0φ	95	150	複数せん断キー(凸形)
4	UFC	7.5φ	142.5	200	複数せん断キー(凹形)
5	UFC	5.0φ	95	150	複数せん断キー(凹形)

表-5 輪荷重走行実験の使用材料(コンクリート, UFC)

		圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
		床版部	開始時	79	4.2
	終了時	78	—	—	3.82×10 ⁴
接合部1,2	開始時	68	4.4	—	3.63×10 ⁴
	終了時	70	—	—	3.66×10 ⁴
接合部3,4,5 (UFC)	開始時	164	—	31.7	4.18×10 ⁴
	終了時	195	—	33.6	4.54×10 ⁴

表-6 輪荷重走行実験の使用材料(鉄筋)

	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (×10 ⁻⁶)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D16	373	2073	568	1.95×10 ⁵
D19	364	2043	554	1.89×10 ⁵

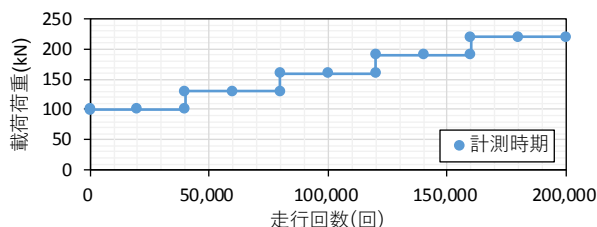


図-6 載荷ステップおよび計測時期

6.3 実験結果

(1) 概要

実験結果を図-9~12 に、実験終了後の床版下面のひび割れの状況を図-13 に示す。値は各載荷荷重における弾性変化分で残留値は含んでいない。図-10, 11 に示す接合部の鉄筋ひずみは接合部中央から 300mm 離れた両側の床版部鉄筋ひずみの平均値であり、図-12 に示す値は接合部両側の打継ぎ部に設置した π 形ゲージの変位の平均値である。換算走行回数は、式(1)により求めた。基準輪荷重を 130kN とし S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値は松井ら⁸⁾が提案する 12.7 を適用した。本実験終了時の換算走行回数は 3745 万回である。

$$N_{eq} = \sum \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^m \times N_i \quad (1)$$

ここに、 N_{eq} : 基本輪荷重による荷重載荷回数

P_i : 輪荷重

P_0 : 基本輪荷重(=130kN)

m : S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値(=12.7)

N_i : 輪荷重 P_i における載荷回数

UFC を用いた接合部のたわみの変化はプレキャスト床版部とほぼ同等で、試験終了後、図-13 に示すように床版部には亀甲状のひび割れがみられたが、接合部の UFC にひび割れは見られなかった。

(2) 重ね継手の鉄筋形状による影響

継手の鉄筋形状が異なる接合部 1, 2 のたわみは図-9 より同等であった。継手の鉄筋形状がたわみに与える影

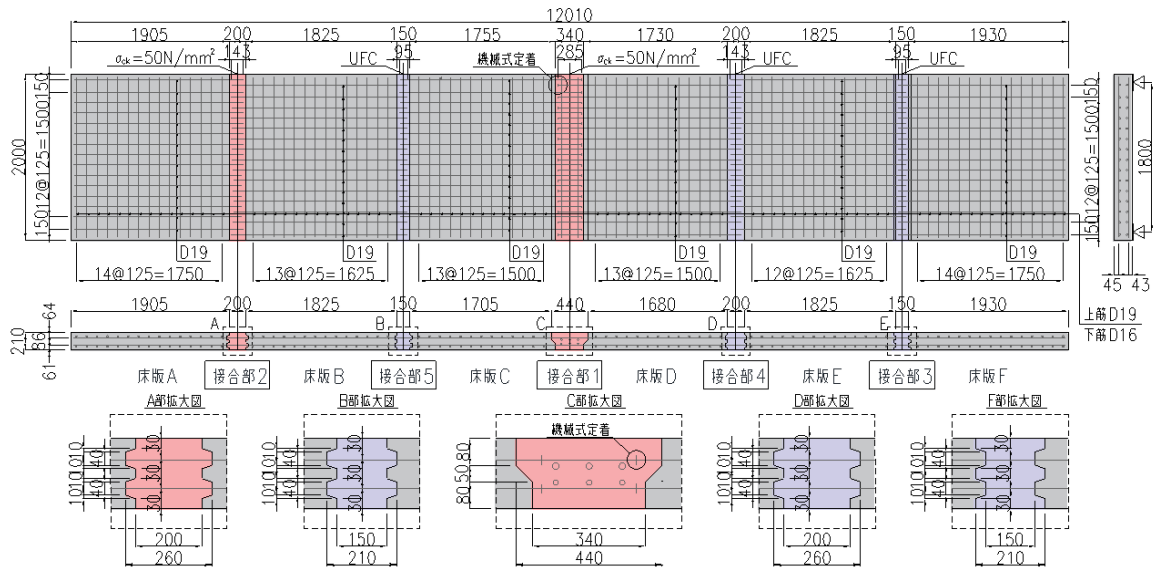


図-7 輪荷重走行実験試験体

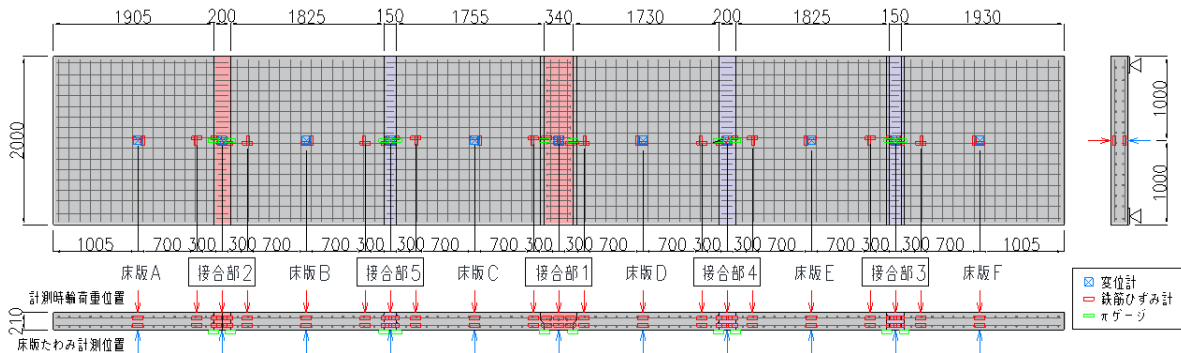


図-8 計測位置

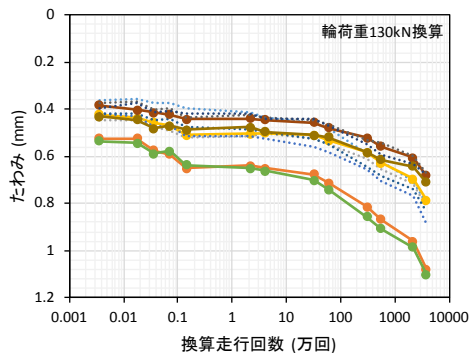


図-9 たわみ-換算走行回数関係

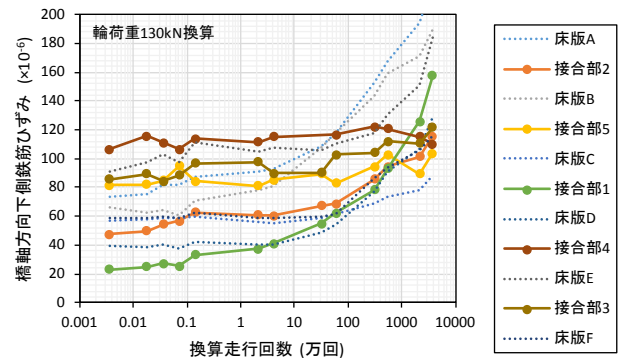


図-11 橋軸方向下側鉄筋ひずみ-換算走行回数関係

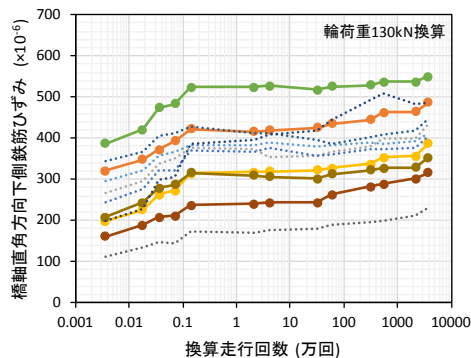


図-10 橋軸直角方向下側鉄筋ひずみ-換算走行回数関係

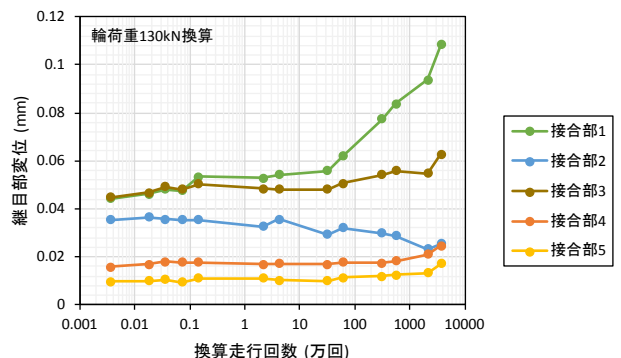


図-12 継目部変位-換算走行回数関係

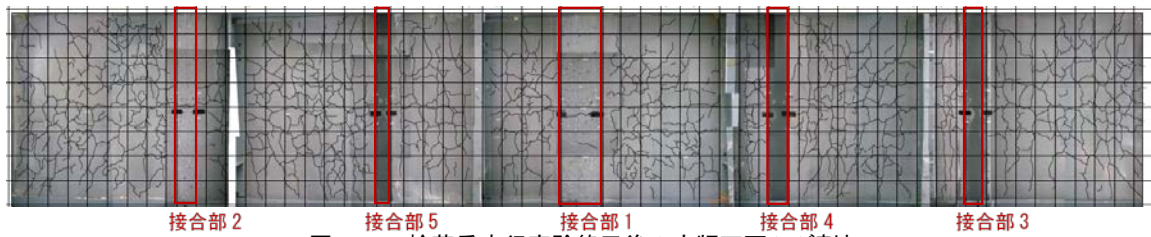


図-13 輪荷重走行実験終了後の床版下面ひび割れ

響は小さいと考えられる。

(3) 間詰材の影響

図-9 より、UFC を用いた接合部 3~5 はコンクリートを用いた接合部 1,2 と比較して、発生したたわみが小さく、図-10 より、接合部付近の床版部橋軸直角方向鉄筋のひずみも小さかった。間詰材に使用した UFC は剛性およびひび割れ発生強度が高く、橋軸直角方向の曲げに抵抗するためと考えられる。図-11 より、接合部 3~5 は初期の段階で接合部付近の床版部橋軸方向鉄筋にひずみが生じているが、その後の増加は少ない。載荷終了後、接合部 1,2 に使用したコンクリートにはひび割れがみられたが、接合部 3~5 に使用した UFC にひび割れは見られなかった。

(4) 重ね継手長、間詰幅の影響

重ね継手長が異なる接合部 4,5 を比較すると、図-9, 10 より接合部 4 の方が、たわみが小さく、接合部付近の床版部橋軸直角方向鉄筋のひずみも小さい傾向がみられた。重ね継手長が長いだけでなく接合部の幅が大きく UFC が橋軸直角方向の曲げに抵抗する割合が大きいためと考えられる。

(5) 接合面形状の影響

床版下面の接合部と床版部の打継ぎ部に取り付けた π 形ゲージによる変位を図-12 に示す。間詰材に同じコンクリートを用い、接合面形状が異なる接合部 1,2 を比較すると、載荷が進むにつれて差が大きくなる傾向が見られた。接合部 1 では打継ぎ面での目開きが目視で確認された。接合部 2 は、接合面に設けた複数の凹凸が、せん断だけでなく、継目を開こうとする力に抵抗し、接合部と床版部の一体性を向上させたものと考えられる。

接合部 3,5 を比較すると接合部 3 の変位が大きくなったが、打継ぎ面での目開きは目視で確認できなかった。100mm の π 形ゲージを用いたため、計測範囲の床版部にひび割れが生じ、変位が大きく表れたと考えられる。

7. おわりに

鉄筋重ね継手部に常温硬化型 UFC を用いたプレキャスト床版接合構造を対象とした実験を行い、鉄筋径 19mm、鉄筋間隔 125mm の接合部に対して以下のことを確認した。

- ・重ね継手長 5 ϕ を確保することにより鉄筋降伏以上の応力を伝達することができる。

- ・接合部の有無による剛性の差は見られず、複数せん断キーにより床版部と接合部の一体性が確保される。
- ・接合部と床版部のたわみ性状は同等である。
- ・輪荷重 130kN 走行回数 3700 万回相当の載荷に対し、接合部 UFC に目視できるひび割れは発生しない。

以上より、今回対象とした接合構造の道路床版への適用にあたり、重ね継手長 5 ϕ で十分な力学的性能を有していると考えられる。

なお、本検討では、鉄筋径、鉄筋間隔など特定の条件で確認を行ったが、重ね継手の性能は鉄筋間隔やかぶりの影響をうけると考えられる。また、重ね継手長を 5 ϕ および 7.5 ϕ の場合について検討したが、5 ϕ であっても鉄筋降伏強度以上の耐力があり、疲労限界など明確な破壊限界を確認できていない。また、本性能が継手長、定着長いずれの影響により発揮されているか、耐荷機構が明確でない部分もある。必要最小限の重ね継手長を検討するために今後さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 阿部浩幸, 原健梧, 澤田浩昭, 中村雅之: プレキャスト PC 床版の新しい RC 接合構造に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.493-498, 2007
- 2) 表真也ほか: 床版取替用プレキャスト床版の合理化継手の開発, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.1169-1177, 2014
- 3) Federal Highway Administration: Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections, TECHNICAL NOTE, FHWA-HRT-14-084, 2014
- 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), コンクリートライブラリー, 第 113 号, 2004
- 5) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書, 技術推進ライブラリー, No.10, 2012
- 6) 土木学会: 鉄筋定着・継手指針[2007年版], コンクリートライブラリー, 第 128 号, 2007
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書(Ⅲコンクリート橋編)・同解説, 2012
- 8) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007