

RC エンドバンド継手を用いたプレキャスト PC 床版の輪荷重走行疲労試験

Wheel loading fatigue test on precast PC slab with a joint for reinforcing bars,
combination of lap splice and mechanical anchorage

原健悟*, 福永靖雄**, 今村壮宏***, 二井谷教治****
Kengo Hara, Yasuo Fukunaga, Takehiro Imamura, Kyoji Niitani

*工修, オリエンタル白石(株), 技術研究所 (〒321-4367 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘 5)

**西日本高速道路(株), 本社 (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20)

***西日本高速道路(株), 九州支社 (〒810-0001 福岡県福岡市中央区天神 1-4-2)

****博士 (環境学), オリエンタル白石(株), 技術研究所 (〒321-4367 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘 5)

Larger increase in vehicle traffic causes damage to the steel-concrete composite RC Slab constructed at the high-growth period, and become a serious problem. The development of precast PC slab that the rapid construction is possible is advanced as a renewal construction of RC slab. Loop splice joint that can reduce the joint part is generally used for RC joint of precast PC slab, but the thickness is limited from the bending shape of the reinforcing bar. Thus, a new type of joint that is combination of lap splice and mechanical anchorage for reinforcing bar that can be applied to the slab that the length of the joint part is short, and thin slab was examined, and wheel loading fatigue test was executed. As a result, this new joint confirmed the fatigue durability equal with Loop splice joint.

Key Words: wheel loading fatigue test, precast PC slab, mechanical anchorage, lap splice

キーワード: 輪荷重走行疲労試験, プレキャスト PC 床版, エンドバンド継手

1. はじめに

高度成長期に建設された鋼鉄桁橋の RC 床版は、交通量の増加や車両の大型化に伴い、損傷が生じ深刻な問題となっている。床版損傷の主な要因として、①設計荷重を超過する大型車が走行したこと、②昭和 39 年の示方書では鉄筋の許容応力度が 1800kgf/cm^2 と過大に規定されていたこと、③床版厚の不足により剛性が小さく過大なたわみが発生したこと、④昭和 39 年までの配筋鉄筋は主鉄筋の 25% であり鉄筋量が不足していたこと、などが挙げられている¹⁾。

このような情勢を受け、RC 床版の補修技術や急速施工が可能なプレキャスト PC 床版を用いた取替技術の開発が進められた。プレキャスト PC 床版の橋軸方向の接合方法としては、プレストレスを導入する PC 接合と RC 接合がある。PC 接合では、現地での緊張作業が伴うこと、また、万が一床版の一部が損傷した場合、径間全部の床版を対象とした補修が必要となる。よって、後々の維持管理の容易さから部分取替えが可能な RC 接合が採用されてきている。RC 接合では、通常の重ね継手とすると、

接合部の長さが長く、型枠設置などの現地施工性が劣り、工程に影響するため、一般にループ鉄筋による継ぎ手が用いられているが、その鉄筋の曲げ加工形状から床版厚さが制限される。

そこで、写真-1 に示すように接合部の長さが短く、かつ、合理的な床版厚さを採用することが可能な継手構造として、鉄筋の先端に鋼管を圧着した機械式定着と重ね継手を併用し (以下、エンドバンド継手と呼ぶ)、鉄筋

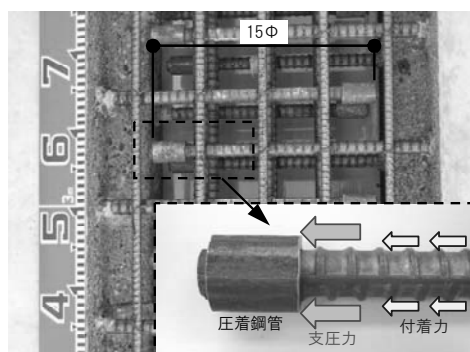


写真-1 エンドバンド継手と定着機構

とコンクリートの付着力と鋼管断面に作用する支圧力の複合作用によって定着力を発揮する構造を開発した²⁾。

九州自動車道の最重交通区間である太宰府 IC～筑紫野 IC 間に位置する向佐野橋は、4 径間連続鋼鈑桁橋部の RC 床版の劣化が著しく、プレキャスト PC 床版を用いた全面取替工事を実施することとなった。本工事では、先に述べた理由のほか、工程短縮も考慮し、橋軸方向の接合を RC 構造とした。さらに、継手部の鉄筋配置による時間ロスや工程確保を目的として、一般的な接合構造であるループ継手と比較して接合部の鉄筋配置が容易であるエンドバンド継手が採用されることとなった³⁾。

これまでに、本継手構造を有するプレキャスト PC 床版においても、RC 床版と比較し優れた疲労耐久性を有していることを輪荷重走行疲労試験により確認している⁴⁾。しかしながら、ループ継手を有するプレキャスト PC 床版とは、実施している条件が異なることから⁵⁾、同一条件での試験を実施し⁶⁾、その疲労耐久性を比較した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

(1) 鉄筋

試験体に使用した鉄筋は、JIS G 3112 鉄筋コンクリート用棒鋼に適合する鉄筋 D13(SD345)および D19(SD345)を使用した。

(2) PC 鋼材

プレキャスト PC 床版のプレテンション用 PC 鋼材は、JIS G 3536 PC 鋼線及び PC 鋼より線に適合する SWPR7BL 1S15.2 を使用した。

(3) エンドバンド鉄筋

鉄筋の先端に鋼管を圧着したエンドバンド鉄筋の寸法と形状を表-1 および図-1 に示す。試験に用いたのは鉄筋径 D19 であり、鉄筋径 D16 および D22 についても同様に示す。圧着する鋼管の長さは鉄筋の規格降伏強度まで鋼管と鉄筋にずれなどを生じない嵌合力を有する長さとした。

(4) コンクリート

セメントは、JIS R 5210 ポルトランドセメントに適合

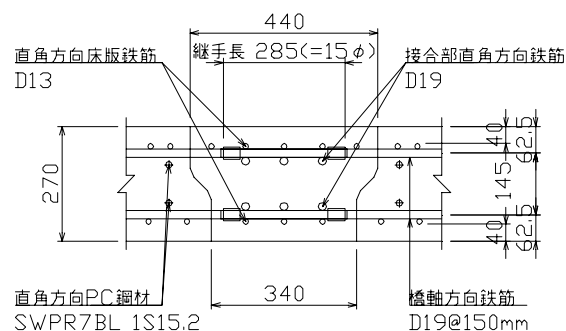
する早強ポルトランドセメントを使用した。プレキャスト PC 床版および場所打部に使用するコンクリートの設計基準強度は、 50N/mm^2 とした。場所打部には JIS A 6202 コンクリート用膨張材に適合する低添加型の膨張材を使用し、収縮補償コンクリートとした（単位膨張材量 25kg/m^3 ）。

2.2 設計方針

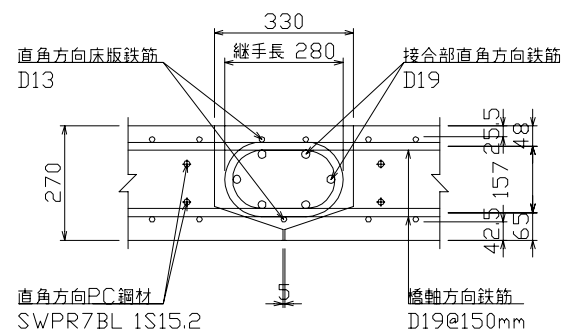
エンドバンド継手を有するプレキャスト PC 床版の輪荷重走行疲労試験は、ループ継手を有するプレキャスト PC 床版に対して行われた既往の試験方法⁶⁾と同一条件とした。疲労試験を行ったエンドバンド継手および比較対象のループ継手の構造を図-2 に示す。

2.3 試験体概要

プレキャスト PC 床版の鋼材配置図および試験体の概要を図-3 に示す。試験体は、床版支間が 6.0m の 2 辺単純支持とし、プレキャスト PC 床版 4 枚と接合部 3 箇所、および両端の場所打ち部からなる。プレキャスト PC 床版は、橋軸直角方向がプレテンション方式による PC 構造、橋軸方向が RC 構造である。接合部の打ち継ぎ処理は、プレキャスト PC 床版の打設前に、型枠に無機系硬化遅延剤を塗布し、脱型後に洗い出しをした。また、場所打ちコンクリート打設前には、プレキャスト PC 床版のコンクリート表面への吸水を抑制するため、アクリル樹脂系エマルジョン系吸水防止剤を塗布した。



(a) エンドバンド継手構造



(b) ループ継手構造

表-1 エンドバンド鉄筋の寸法（単位 mm）

鉄筋径	ϕA	B	L_0
D16	26.5	35.0	5.0
D19	29.0	40.0	5.0
D22	34.5	50.0	5.0

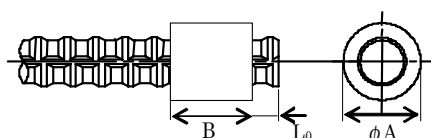


図-1 エンドバンド鉄筋の形状

図-2 試験対象の継手構造

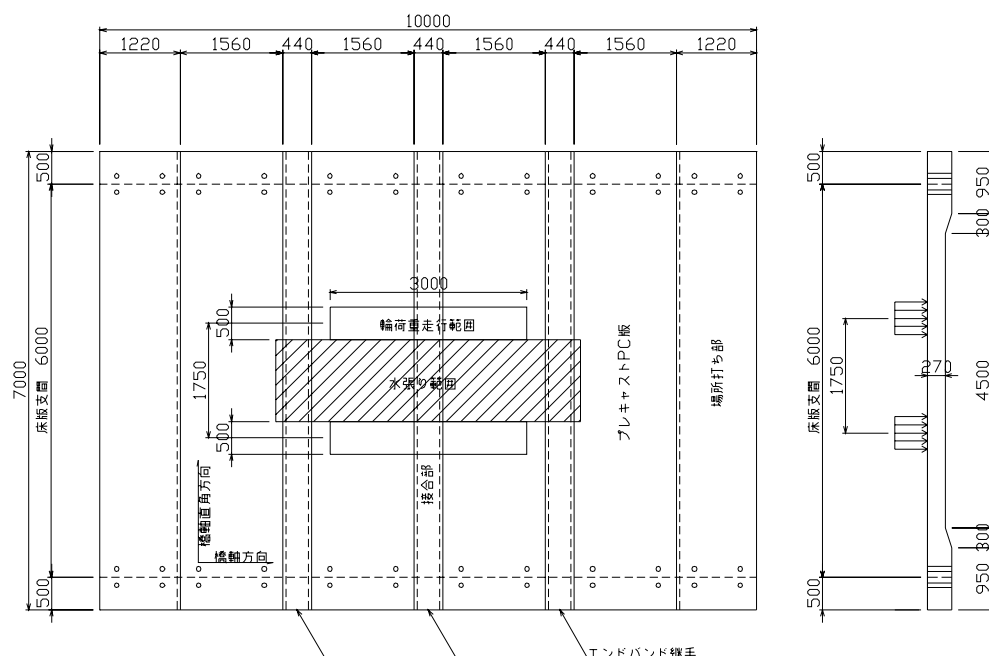


図-3 試験体および載荷位置

2.4 載荷方法

疲労試験は、表-2 に示す性能を有する(株)高速道路総合技術研究所所有の移動載荷疲労試験機を用いて実施した(写真-2)。

載荷方法は一軸2輪とし、図-4 に示すように、接合部を中心に橋軸方向に±1.5 m の範囲で移動させて繰返し載荷した。1 輪の幅は0.5 m、車輪の間隔は1.75 m とし、試験体と載荷輪との間には、幅0.5 m×長さ0.2 m の載荷版を5 mm の隙間を空けて載荷範囲に並設した。

載荷荷重は、STEP-1 は一定の荷重とし、STEP-2、STEP-3 は図-4 に示すように±0.9 m の範囲は一定の荷重で載荷し、両端では徐々に STEP-1 の荷重まで低減する可変台形波載荷とした。台形波載荷にすることで、荷重の振幅が大きくなり、実橋に近い状態を再現できる。

図-5 に、荷重ステップと走行回数を示す。雨水の浸透により、疲労耐久性が低下すると報告されている⁷⁾こと、また、接合部での貫通ひび割れの発生を確認する目的で、STEP-2 および STEP-3 の最終4万回では、水はり状態で試験を実施した。各ステップの荷重強度は、下記を想定している⁹⁾。

(1) STEP-1：軸重 196 kN

設計荷重車両を想定した荷重強度であり、PC 床版は、フルプレストレス状態、接合部は、初期段階ではひび割れは発生しないが、走行回数の増加に伴い、橋軸方向および橋軸直角方向のひび割れが発生すると考えられる。

(2) STEP-2：軸重 294 kN

橋軸方向の設計曲げモーメントと等価となる荷重強度である。PC 床版の橋軸方向には、ひび割れは発生しないが、橋軸直角方向は許容ひび割れ幅程度のひび割れが発生すると考えられる。エンドバンド継手構造に対する

表-2 試験機の性能

項 目		性 能
供試体最大寸法		幅 7.0m×長さ 15.0m
移動載荷	最大荷重	490kN
	載荷方法	単輪載荷、一軸載荷、タンデム載荷
	移動ストローク	±1.5mm
	速度	30rpm (1 往復 2 秒)
静的載荷	荷重の波形	正弦波、三角波、可変台形波、任意波
	最大荷重	2,940kN
	最大ストローク	200mm



写真-2 試験状況

検証ステップとして位置づけられる。

(3) STEP-3：軸重 392 kN

橋軸直角方向の設計曲げモーメントと等価となる荷重強度である。PC 床版の橋軸直角方向は、ひび割れ発生限界にあり、走行回数が増加すれば橋軸方向に微細なひ

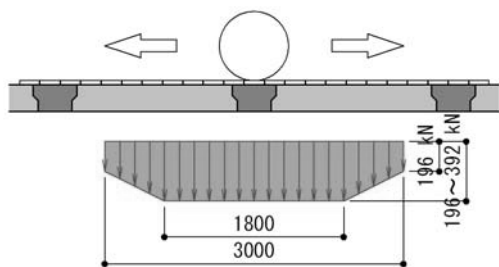


図-4 輪荷重の波形

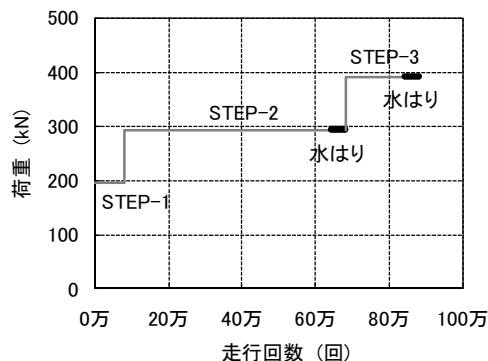


図-5 荷重ステップ

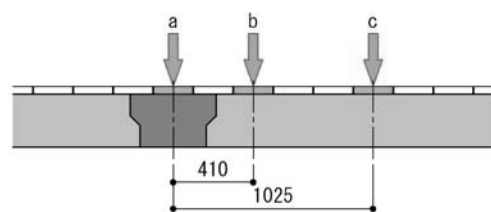


図-6 静的載荷位置

ひび割れが発生すると考えられる。走行回数は、2 台の設計荷重車両が並走する確率分を載荷すればよいと考えこの走行状態の確率を 10 回／日とし 50 年間を想定した。

2.5 測定項目

床版の変位、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみおよび接合部目地の目開きは、試験途中に静的載荷を行い測定した。静的載荷では、荷重を 50 kN きざみで各ステップの最大荷重まで載荷した。図-6 に静的載荷位置を示す。また、ひび割れ性状は目視により観察し、ひび割れ幅を測定した。

3. 試験結果

3.1 材料試験結果

試験開始時と終了時における、プレキャスト部および接合部のコンクリート強度試験結果を表-3 に示す。接合部の試験開始時の圧縮強度は目標強度 50N/mm^2 を若干上回る程度であった。

3.2 ひび割れ性状

床版下面のひび割れ性状を、図-7 に示す。STEP-1 で

は、ひび割れの発生は、観察されなかった。STEP-2 では、接合部に橋軸方向および橋軸直角方向のひび割れが生じた。走行回数の増加とともに、ひび割れ本数は増加したが、ひび割れ幅に変化は見られなかった。STEP-3 では、接合部の目地近傍にひび割れが生じ、PC 床版にも橋軸直角方向のひび割れが生じた。しかしながら、ひび割れ幅は最大 0.06 mm であり、ひび割れ深さも浅く、鉄筋がひび割れを制御していると考えられる。接合部に生じたひび割れが分散していることから、鉄筋に沿ったひび割れが顕著に生じていないことから、接合部の鉄筋の付着は十分に確保されていると考えられる。また、水はり状態での試験時に漏水は確認されず、床版上面にもひび割れは生じていないことから、貫通ひび割れになっていないと考えられる。

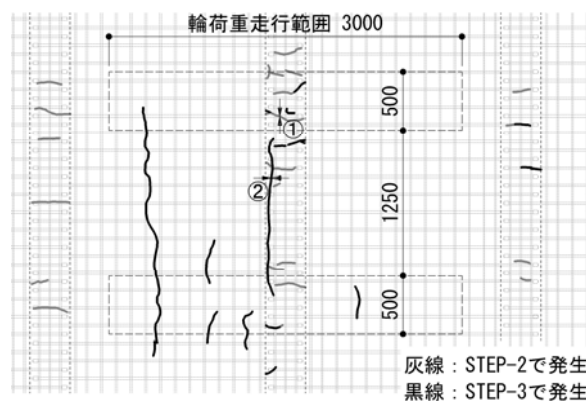
3.3 床版たわみ

STEP-3 終了時の静的載荷における輪荷重位置のたわみ分布を、図-8 に示す。たわみ分布は接合部目地において角折れも生じていないことから、PC 床版と接合部の連続性が保たれていることが確認できる。

図-9 に、輪荷重位置における橋軸中心でのたわみの変化を示す。活荷重によるたわみは、荷重ステップ毎に増加しているが、各ステップ内ではほとんど増加していない。

表-3 コンクリート強度

項目		圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
PCa部	開始時	69.6	5.6	34.6
	終了時	70.7	5.9	35.1
接合部	開始時	54.3	5.1	31.0
	終了時	58.7	4.4	33.5



(単位mm)

測定箇所	方向	STEP-3				
		0.2万回	4万回	8万回	16万回	20万回
①	橋軸	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06
②	橋軸直角	—	0.04	0.04	0.06	0.06

図-7 床版下面のひび割れ性状

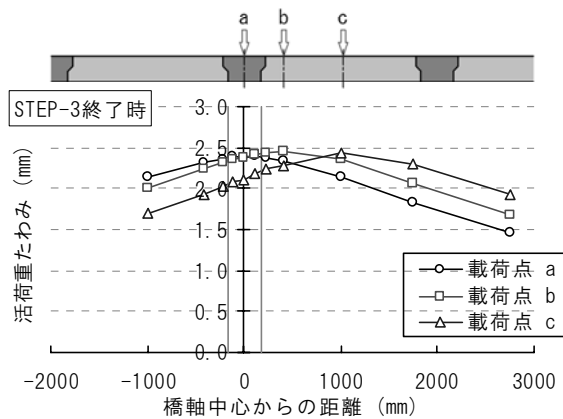


図-8 輪荷重位置の活荷重たわみ分布

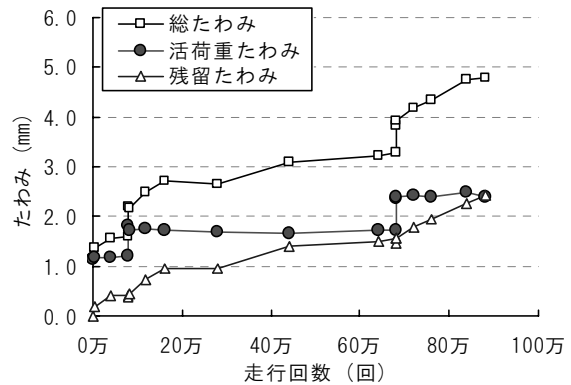


図-9 輪荷重位置のたわみの変化

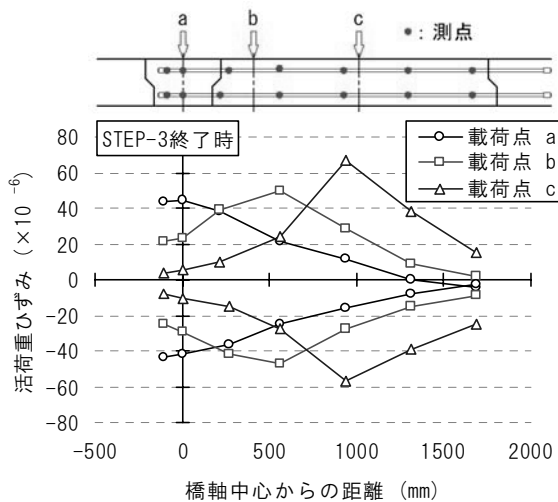


図-10 輪荷重位置の活荷重ひずみ分布

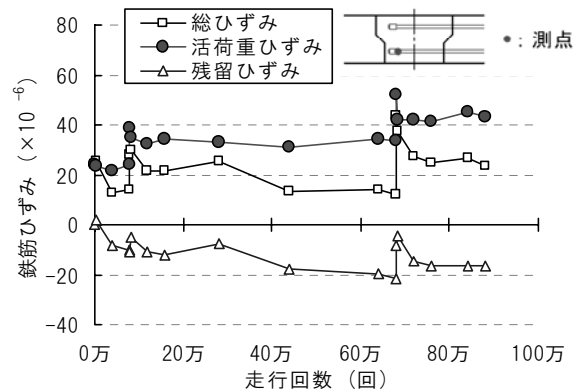


図-11 輪荷重位置のひずみの変化

3.4 鉄筋ひずみ

STEP-3 終了時の静的載荷における輪荷重位置の鉄筋ひずみ分布を図-10に示す。橋軸方向の鉄筋ひずみの最大値は約 60×10^{-6} であり、疲労耐久性を十分に有していると言える。

図-11に、輪荷重位置における圧着鋼管付根部での鉄筋ひずみの変化を示す。活荷重による鉄筋ひずみは、走行回数による影響は無く、荷重ステップ毎に増加しているが、各ステップ内ではほとんど増加していない。また、残留ひずみは約 20×10^{-6} 程度である。接合部は、収縮補償コンクリートを用いているが、試験開始材齢は13日であり、収縮側に転じていると考えらる。

3.5 ループ継手との比較

エンドバンド継手の試験結果と既往のループ継手を有するPC床版の試験結果⁹⁾を比較する。図-12に床版の活荷重たわみの経時変化を示す。STEP-1では、静的載荷荷重が異なるが(ループ継手では、静載荷時にSTEP-2の荷重を載荷)、それ以降はエンドバンド継手およびループ継手の活荷重たわみは、各ステップにおいて、ほぼ同等であった。これより、エンドバンド継手は、ループ

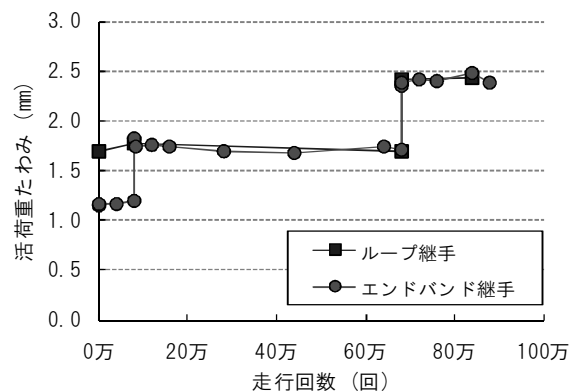


図-12 継手構造と活荷重たわみの変化

継手と同等の疲労耐久性を有していると考えられる。

4. FEM 解析

4.1 解析モデル

実験に先立ち3次元線形FEM解析を実施した。FEM解析はSTEP-1の荷重強度196kNのケースを実施した。線形解析であるため、それ以降のSTEPは荷重強度の比率から算出した。解析モデルはプレキャストPC床版、

表-4 コンクリートの材料特性

弾性係数	36.6kN/mm ²
ポアソン比	0.167
単位重量	24.5kN/m ³

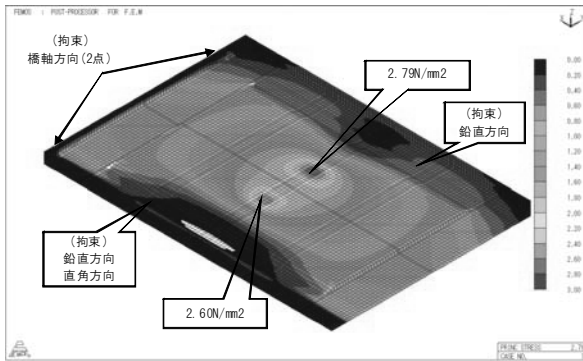


図-13 主応力図 (STEP-1 床版下面)

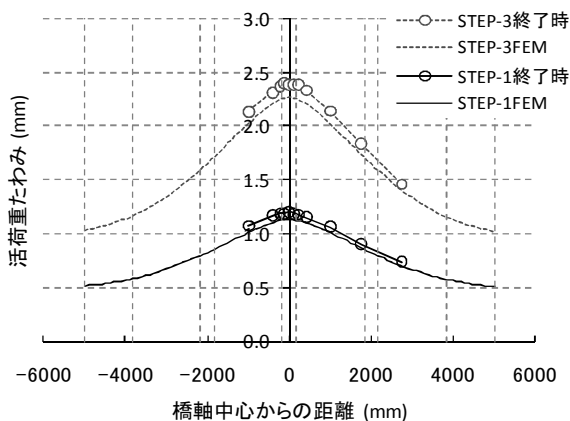


図-14 活荷重たわみの比較

接合部，場所打ち部全体を一枚の版として扱い，ソリッド要素によりモデル化した。コンクリートの材料特性を表-4に示す。弾性係数は，実績から推定した値を用いているため，材料試験結果とは異なる値となっている。

FEM解析結果を図-13に示す。図は試験体中央に輪荷重を載荷した場合の床版下面に発生する主応力の結果である。コンクリート標準示方書【設計編】⁸⁾に記載されている引張強度の算定式 $f_{tk}=0.23f_{ck}^{2/3}$ より，設計基準強度 50N/mm² では，引張強度が 3.12N/mm² となる。STEP-1では，図に示すように最大主応力が 2.79N/mm² と引張強度以下であり，実験においてひび割れが発生していないことと一致する。

4.2 実験結果との比較

STEP-1とSTEP-3の移動載荷終了時における活荷重による橋軸方向のたわみ分布とFEM解析結果の比較を図-14に示す。各荷重ステップの実験結果と解析結果はほぼ一致し，試験体は弾性体に近い挙動を示している。

よって，輪荷重走行試験により，試験体は大きな損傷を受けていないと考えられる。

5. まとめ

エンドバンド継手を有するプレキャスト PC 床版の輪荷重走行疲労試験から，以下のことが明らかとなった。

- 1) PC 床版の橋軸方向および橋軸直角方向の設計曲げモーメントと等価な荷重強度 (STEP-3) で，接合部には橋軸および橋軸直角方向，PC 床版には橋軸直角方向のひび割れは生じたが，ひび割れ幅は最大で 0.06mm と小さく，貫通ひび割れも発生していないことから，剛性はほとんど低下していない。
- 2) 活荷重によるたわみは，各ステップ内では増加することが無く，また，PC 床版と接合部の連続性は保たれている。
- 3) 活荷重による鉄筋ひずみは，各ステップ内において増加することなく，また，値も小さいことからエンドバンド継手は，十分な疲労耐久性を有する。
- 4) 試験を実施した範囲内では，エンドバンド継手はループ継手と同等の疲労耐久性を有する。

参考文献

- 1) 江本幸雄：PC 合成床版の力学的特性に関する研究，九州工業大学大学院修士論文，1994.6
- 2) 市川，照井：新しい RC 接合を用いたプレキャスト PC 床版 (SLJ スラブ) の設計と施工，第 17 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.187-190，2008.11
- 3) 山本，今村，三浦，藤木：日交通量 10 万台区間における RC 床版取替工事—九州自動車道・向佐野橋—，コンクリート工学，Vol.49，No.3，pp.30-35，2011.3
- 4) 大谷，阿部，中村，原：新しい RC 接合構造を用いたプレキャスト PC 床版の輪荷重走行試験，第 16 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.191-194，2007.10
- 5) 佐々木，太田，八部，西川，内田，宮崎：RC ループ継手を有するプレキャスト PC 床版の輪荷重走行実験，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，CS セッション，pp.40-41，1998.10
- 6) 松井，角，向井，北山：RC ループ継手を有するプレキャスト PC 床版の移動載荷試験，第 6 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.149-154，1996.10
- 7) 松井：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文集，Vol.9，No.2，pp.627-632，1987
- 8) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，p.34，2007.12