

論文

軽量プレキャスト合成床版の鉄筋継手構造に関する実験的研究

滝本和志*, 田中博一*, 朱暁旭*, 大久保宣人**, 山本将士***, 東山浩士****

*博 (工), 清水建設株式会社, 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

**博 (工), 日本ファブテック株式会社, 技術開発部 (〒302-0038 茨城県取手市下高井 1020)

***日本ファブテック株式会社, 橋梁設計部 (〒550-0001 大阪府大阪市西区土佐堀 1-3-7)

****博 (工), 近畿大学教授, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

床版取替工事における急速施工を目的に, 軽量コンクリートと角形鋼管を用いたプレキャスト鋼コンクリート合成床版を開発した. 本論文では, 橋軸方向および橋軸直角方向の鉄筋継手構造に関して, 接合部実験によりそれぞれの継手性能を確認した結果を報告する. 橋軸方向は, 機械式定着筋により重ね継手長 $5d$ (d : 鉄筋径) で, 橋軸直角方向は, 直角フックと添フック 2 組により, 一体ものと同等の性能を有することを確認した.

キーワード: プレキャスト合成床版, 軽量コンクリート, 分割施工, 機械式定着筋

1. はじめに

近年, 社会インフラの老朽化が顕在化してきているが, 高速道路においても, 経過年数の増加とともに床版の劣化が進んでいることが報告¹⁾されている. 東・中・西日本高速道路 3 会社の統計データ²⁾によると, 2013 年度末に供用から 30 年以上経過した橋梁延長は全体の約 4 割に達し, 大規模更新計画で床版取替が予定されている橋梁延長は約 224km となっている. 大規模更新工事の床版取替においては, 工事による交通影響を軽減させるため, プレキャスト PC 床版を用いることが多くなっている.

一方, 鋼コンクリート合成床版 (以下, 合成床版) は, 剛性が大きく高い耐荷力および耐久性を有しており, 底鋼板により型枠・支保工を省略できることから, 長支間床版としての採用事例が増えてきている. また, プレキャスト合成床版の開発³⁾により, 床版取替工事にも適用され始めている. 高速道路の床版取替工事は, 施工時間や施工空間といった制約条件の他に, 下部構造の耐震性能確保や新旧床版の段差解消の観点から, 取替床版の厚さや重量にも制約を受ける場合がある. そこで, 既設道路橋の床版取替工事に適用することを目指して, 軽量コンクリートと角形鋼管を用いることで, 軽量で薄肉化が可能なプレキャスト合成床版の開発^{4)~6)}を行ってきた.

プレキャスト化で構造上最も問題となるのが接合部であるが, 合成床版であることから底鋼板は添接板を介したボルト接合となり, 確実な接合が可能である. 一方, 圧縮鉄筋の継手に関しても, 連続合成桁の中間支点近傍のように負曲げを受ける箇所もあることから, 確実な接

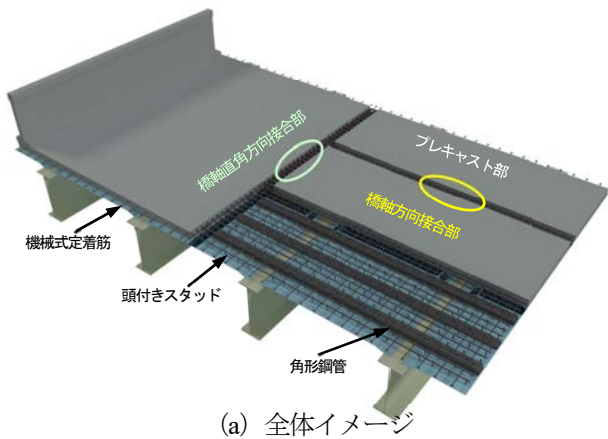
合方法が必要となる.

本論文では, プレキャスト化で必ず必要となる橋軸方向の鉄筋継手構造だけでなく, 全面通行止めができない場合に採用される分割施工時に必要となる橋軸直角方向の鉄筋継手構造に関して, 接合部実験によりそれぞれの継手性能を確認した結果を報告する.

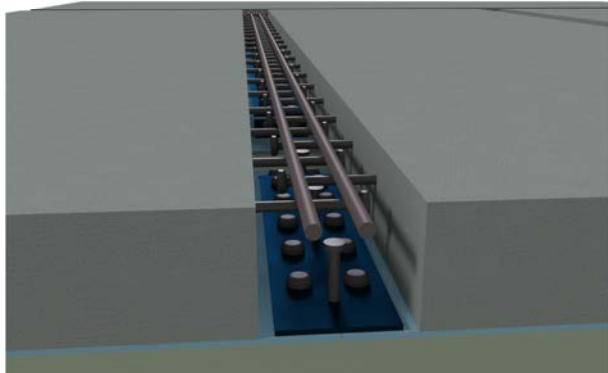
2. プレキャスト合成床版の概要

本論文で提案するプレキャスト合成床版のイメージ図を図-1 (a) に示す. 橋軸直角方向に角形鋼管を配置し, 底鋼板に断続溶接することで, 床版断面に 10% 程度の中空部を設けることができる. 角形鋼管には, 軽量化だけでなく, 底鋼板の補剛と橋軸方向のずれ止めとしての機能も期待している. 橋軸直角方向のずれ止め機能と底鋼板とコンクリートを上下に分離しようとする力に対しては, 頭付きスタッドを配置する. プレキャスト部には, 設計基準強度 $50\text{N}/\text{mm}^2$ の軽量コンクリート 1 種を用いる.

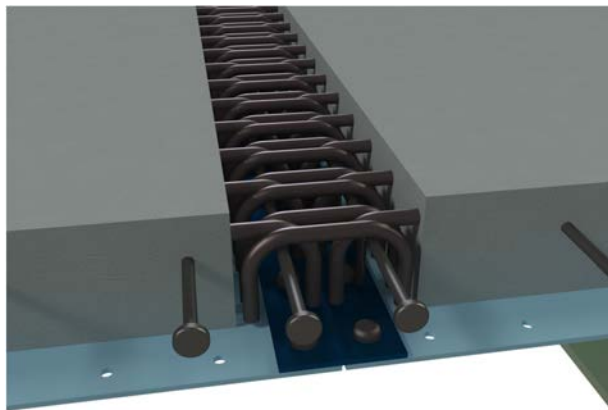
橋軸方向接合部の詳細を図-1 (b) に示す. 底鋼板は添接板を介してボルト接合する. 配力鉄筋はあき重ね継手とし, 両端を加熱成形によって拡径部を設けた機械式定着筋 (Tヘッド工法鉄筋) とすることで, 継手長の短縮を図るものである. この継手により, 床版厚さは 180mm まで薄くすることが可能となった. ただし, 底鋼板よりも機械式定着筋の端部が 100mm 程外側に飛び出した形状となるため, 設置作業では, 新しく設置する床版の底鋼板が, 設置済みの床版の鉄筋とぶつからないように, 設置位置の数 cm 上で横にスライドさせる必要がある.



(a) 全体イメージ



(b) 橋軸方向接合部詳細



(c) 橋軸直角方向接合部詳細
図-1 プレキャスト合成床版の概要

橋軸直角（車線間）方向接合部の詳細を図-1 (c) に示す。橋軸方向と同様に底鋼板は添接板を介してボルト接合する。橋軸方向にスライドさせる必要があることから、主鉄筋の継手には重ね継手を使うことは難しい。また、機械式定着筋を用いると、拡径部のかぶりを確保するために、一般部のかぶりを厚くする必要がある。これを避けるために、主鉄筋端部は直角フックとして接合部からの抜け出しを防止することとした。また、接合部中央で主鉄筋が繋がっていないことから、接合部には添フックを配置することとした。

接合部には、両方向ともに物質透過抵抗性や付着強度が高く、急速施工が期待できるラテックス改質速硬コンクリート (LMFC) ¹⁰⁾を用いる。

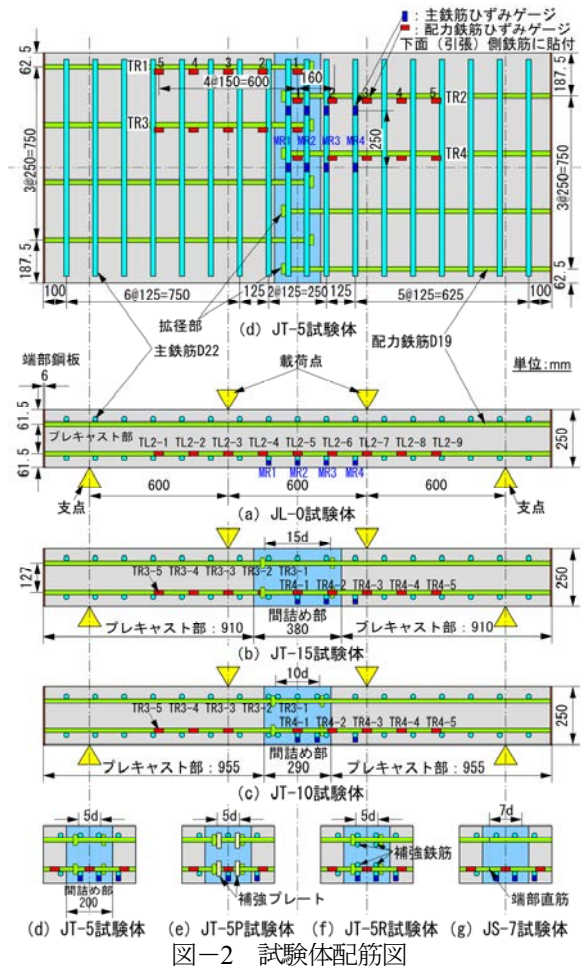


図-2 試験体配筋図

表-1 試験体の一覧

試験体名	継手長	接合部長さ(mm)	補強方法等
JL-0	なし	—	一体もの
JT-15	15d	380	補強なし
JT-10	10d	290	補強なし
JT-5	5d	200	補強なし
JT-5P	5d	200	補強プレート
JT-5R	5d	200	主鉄筋追加
JS-7	7d	200	端部直筋

角形鋼管と軽量コンクリートを使用することにより、同じ厚さのRC床版と比較して約10%、従来の合成床版に対しては約20%の軽量化となる。

3. 橋軸方向の鉄筋継手試験

3.1 試験概要

試験体は、実構造物を想定した実大スケールとした。鉄筋継手の性能が問題となるのは、中間支点部近傍の負曲げモーメントを受ける場合であるので、試験体は底鋼板を省略した複鉄筋断面の鉄筋コンクリート (RC) 試験体とし、引張側および圧縮側は同じ鉄筋継手とした。

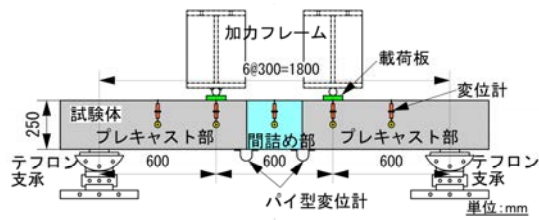


図-3 載荷装置図

試験体の種類を表-1に示す。試験体は7体とした。試験パラメータは、継手の有無、継手長、補強の有無と種類および鉄筋端部の形状とした。機械式定着筋の継手長は拡張部の首下間の距離とした。拡張部の幅が約1dなので、鉄筋端部が直筋のJS-7とJT-5の配力鉄筋長さは同じである。試験体両端の端部鋼板に鉄筋を溶接して定着した。

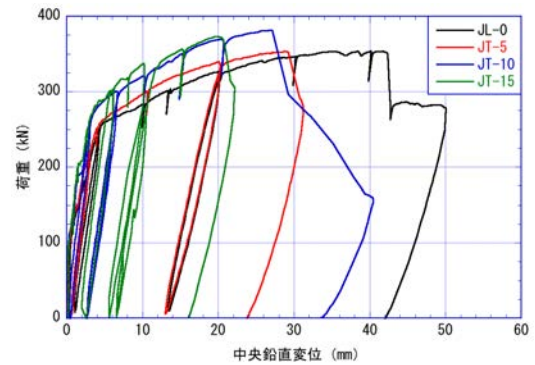
図-2に試験体の配筋図と鉄筋ひずみの計測位置と番号を示す。継手長5dの試験体とJS-7は接合部のみを示す。プレキャスト部の配筋はJT-15、JT-10と同じである。形状寸法はすべて幅1,000mm、厚さ250mm、全長2,200mmとした。床版の主鉄筋は橋軸直角方向に配置されるため、試験体短手方向に配置する鉄筋が主鉄筋、長手方向に配置する継手部を有する鉄筋が配力鉄筋となる。鉄筋はSD345で、主鉄筋はD22を125mmピッチで、配力鉄筋はD19を250mmピッチで配置した。せん断補強鉄筋は配置していない。

載荷方法および変位計測位置を図-3に示す。テフロン支承で単純支持した試験体に、接合部が等曲げ区間となるように、3等分点載荷した。載荷板長さは試験体幅とした。計測項目は、載荷荷重、試験体の鉛直変位、プレキャスト部と接合部の界面の開き、鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみとした。

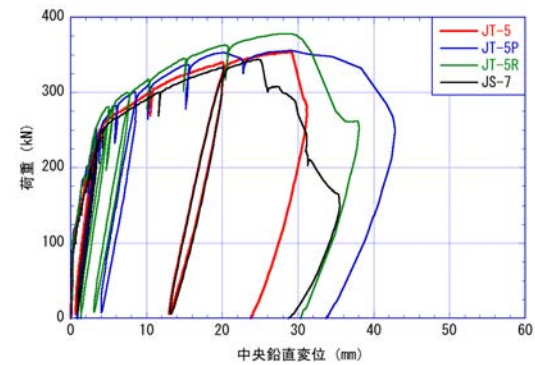
3.2 試験結果と考察

表-2に試験結果一覧を示す。2回に分けて実験したことから、軽量コンクリートとLMFCの試験時強度を表中に示す。等曲げ区間内の配力鉄筋の鉄筋比も示す。図-4に荷重-変位関係の比較を示す。図-4(a)が継手長の影響を、図-4(b)が補強や鉄筋端部の形状による影響を比較したものである。

図-4(a)より、耐力は継手長が長いほど高い傾向が見られる。これは、等曲げ区間内の鉄筋体積比が大きいことが原因と考えられる。図-4(b)と表-2の破壊形態より、鉄筋端部が直筋のJS-7は引張鉄筋が抜け出し、付着割裂破壊に至ったのに対



(a) 継手長の影響



(b) 補強等の影響

図-4 荷重-変位関係の比較

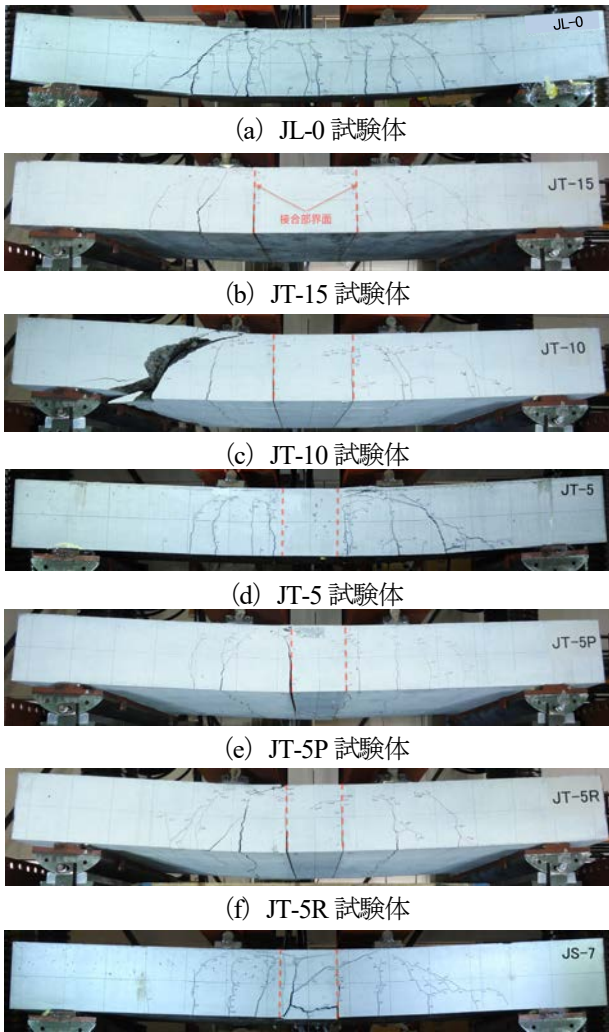
して、継手長5dで機械式定着筋を用いた3体の試験体は、すべて接合部のないJL-0と同様に、鉄筋降伏後に十分なじん性能を示してプレキャスト部の圧壊で終局に至っており、機械式定着筋の有効性が明らかとなった。また、継手長5dまでは補強の必要がないものと判断できる。

図-5に最終破壊状況を示す。JT-10はプレキャスト部の圧壊直後に左せん断スパン内のひび割れが大きく開いたため、せん断破壊したように見える。JS-7は接合部内で引張鉄筋が抜け出して付着割裂破壊となった。機械式定着筋を用いた試験体の接合部界面が大きく開いて弱点となることはなかった。

図-6にJL-0とJT-5の配力鉄筋のひずみ分布を示す。どちらも最初の降伏は載荷点位置で発生している。JT-5の試験体中央におけるひずみがJL-0の半分程度になっているのは、JT-5の試験体中央における配力鉄筋量が、JL-0

表-2 試験結果の一覧

試験体名	軽量コンクリート / LMFC 強度 (MPa)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	等曲げ区間内鉄筋体積比(%)	破壊形態
JL-0	63.1 / 67.2	249.9	353.9	0.92	プレキャスト部の圧壊
JT-15	62.1 / 67.3	316.8	373.2	1.65	プレキャスト部の圧壊
JT-10	62.1 / 67.3	261.7	381.6	1.51	プレキャスト部の圧壊
JT-5	63.1 / 67.2	216.4	353.9	1.38	プレキャスト部の圧壊
JT-5P	62.1 / 67.3	243.8	356.3	1.38	プレキャスト部の圧壊
JT-5R	62.1 / 67.3	267.7	378.4	1.38	プレキャスト部の圧壊
JS-7	63.1 / 67.2	235.6	344.1	1.13	鉄筋抜け出し、付着割裂破壊



(g) JS-7 試験体
図-5 最終破壊状況

の2倍になっているためと考えられる。

4. 橋軸直角方向の鉄筋継手試験

交通量が多い場合や上下線の切替えが難しい場合のように、全面一括施工ができない場合、床版を分割して施工する必要がある。この場合は橋軸直角方向にも継手が必要となる。2章で示したように橋軸直角方向の鉄筋継手は、鉄筋端部を直角フックとし、直角フック同士が突き合わせ配置となるように主鉄筋を配置し、接合部中央には主鉄筋の横に添フックを配置した。

4.1 試験概要

試験体は、橋軸方向と同様に実構造物を想定した実大スケールとした。配筋も同様に底鋼板を省略した複鉄筋断面のRC試験体とし、引張側および圧縮側は同じ鉄筋継手とした。ただし、圧縮側鉄筋端部は直筋とした。モデル化の方向が90度異なるため床版主鉄筋に着目した試験体である。試験体の種類を表-3に示す。試験体は5体である。試験パラメータは、継手の有無、接合部内に設置

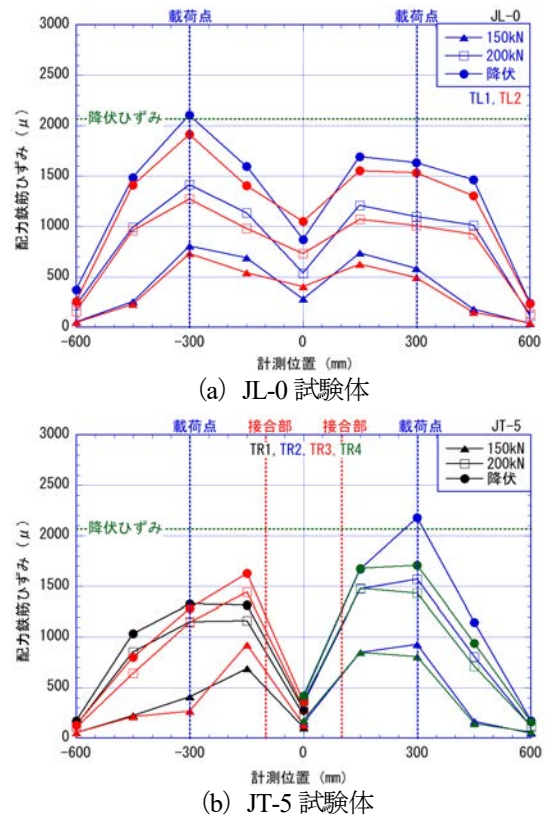


図-6 配力鉄筋のひずみ分布

表-3 試験体の一覧

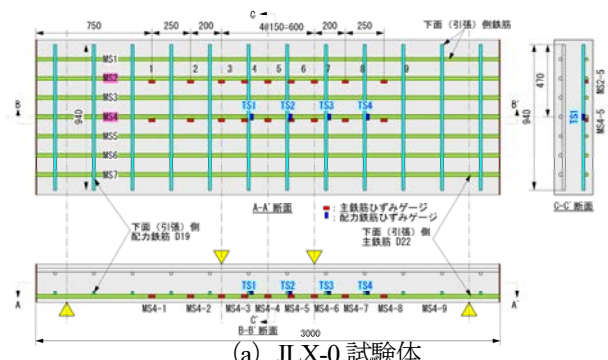
試験体名	添フック組数	継手長	接合部長さ (mm)
JLX-0	なし	なし	—
JTX-5S	1組	5d	250
JTX-5D	2組	5d	250
JTX-7S	1組	7d	340
JTX-7D	2組	7d	340

する添フックの組数および継手長(接合部長さ)とした。

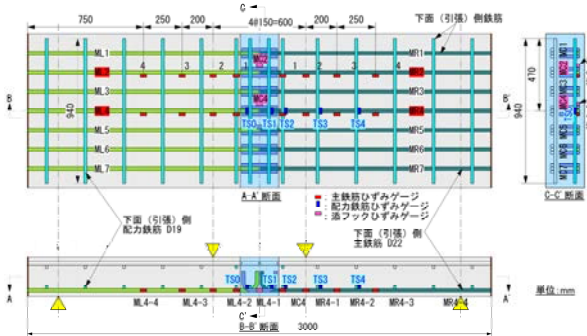
図-7にJLX-0とJTX-5Dの配筋図と鉄筋ひずみの計測位置と番号を示す。図-7 (b) に示すゲージ貼付位置は継手試験体共通とした。図-7 (c) に接合部の拡大図を示す。形状寸法はすべて幅1,000mm, 厚さ250mm, 全長3,000mmとした。鉄筋はSD345で、主鉄筋はD22を125mmピッチで、配力鉄筋はD19を250mmピッチで配置した。せん断補強鉄筋は配置していない。橋軸方向継手試験体に比べて軸方向鉄筋比が大きいことから、せん断破壊を防ぐためにせん断スパンを600mmから1000mmに延長した。載荷方法は3章の橋軸方向接合部試験と同様とした。

4.2 試験結果と考察

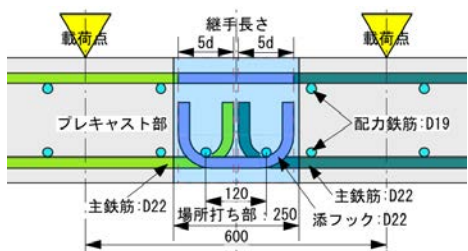
表-4 に試験結果一覧を示す。軽量コンクリートとLMFCの試験時強度はそれぞれ59.5MPa, 67.1MPaであった。等曲げ区間内の主鉄筋の鉄筋比も示す。図-8に荷重-変位関係の比較を示す。図-8 (a) が全試験体の



(a) JLX-0 試験体



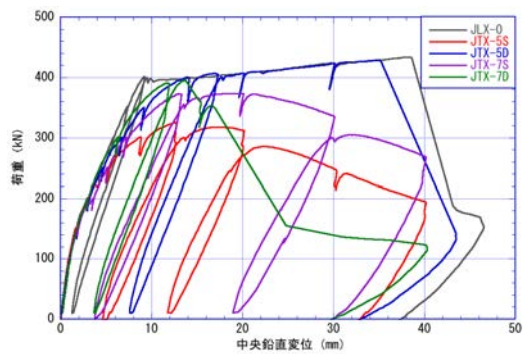
(b) JTX-5D 試験体



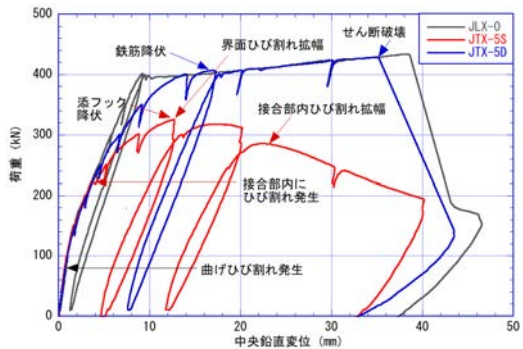
(c) JTX-5D 接合部拡大図

図-7 試験体配筋図

結果を、図-8 (b) が継手長 5d 試験体の荷重-変位関係に及ぼす添フックの組数の影響を示す。添フックが 1 組の JTX-5S は、添フックが降伏した時点でほぼ最大荷重となっており、降伏後は徐々に荷重が低下する挙動を示した。添フックが 2 組の JTX-5D は、1 組の試験体よりも降伏荷重で約 25% 大きくなっている。降伏時の挙動は少し異なるが、JTX-5D は継手のない一体もの試験体である JLX-0 と同様の挙動を示した。継手のない JLX-0 もせん断破壊したが、この理由として、曲げせん断耐力比 (V_y/V_{mu}) が 1.03 であったことと、圧縮側の鉄筋量を引張側と同量にしたため、圧縮側鉄筋の分担力が増加し、コンクリートが圧壊しづらくなることが考えられる。設計せん断耐力は 397kN であった。降伏後のじん性能も十分あることから、継手性能の評価に影響ないものと考えられる。



(a) 全試験体



(b) 添フック組数の影響 (継手長 5d)

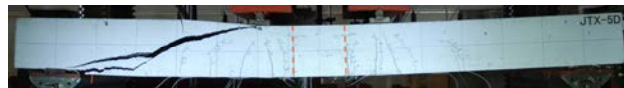
図-8 荷重-変位関係の比較



(a) JLX-0 試験体



(b) JTX-5S 試験体



(c) JTX-5D 試験体



(d) JTX-7S 試験体

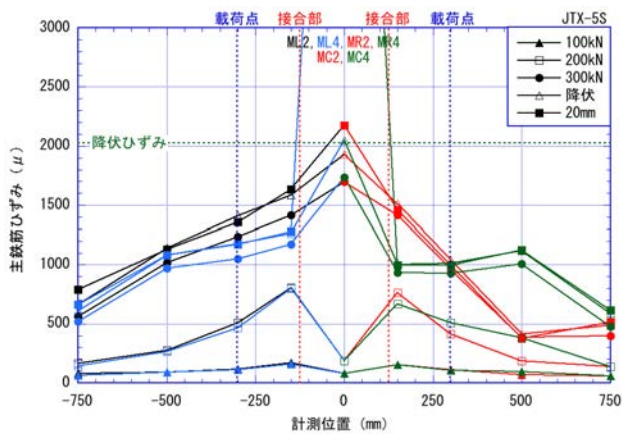


(e) JTX-7D 試験体

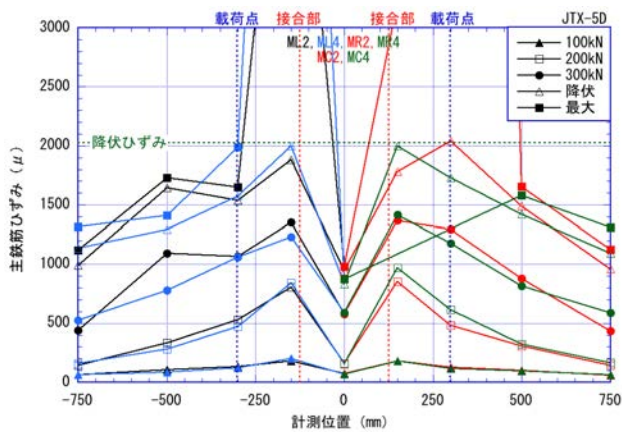
図-9 最終破壊状況

表-4 試験結果の一覧

試験体名	ひび割れ発生荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	等曲げ区間内鉄筋体積比(%)	破壊形態
JLX-0	110	399.4	433.8	2.17	曲げ降伏後のせん断破壊
JTX-5S	80	324.3	325.9	5.23	鉄筋抜け出し
JTX-5D	80	406.5	428.9	7.82	曲げ降伏後のせん断破壊
JTX-7S	90	369.1	373.7	4.98	鉄筋抜け出し
JTX-7D	90	388.0	395.5	7.45	曲げ降伏後のせん断破壊



(a) JTX-5S 試験体



(b) JTX-5D 試験体

図-10 主鉄筋ひずみ分布の比較 (継手長 5d)

図-9に最終破壊状況を示す。JTX-0, JTX-5Dは曲げ降伏後のせん断破壊となったが、JTX-5Sは添フック降伏直後に接合部から鉄筋が抜け出し、界面で折れ曲がる挙動を示した。JTX-7Dは、等曲げ区間内の鉄筋体積比が非常に大きいことから、降伏直後にせん断破壊に至ったものと考えられる。

図-10にJTX-5S, JTX-5Dの主鉄筋ひずみ分布を示す。JTX-5Sは添フックのみが降伏して、接合部に損傷が集中したのに対して、JTX-5Dはプレキャスト部が降伏して、最大荷重時にも添フックは降伏せず、接合部が弱点とならないことを示している。このことから添フックは2組必要と考えられる。

5. まとめ

プレキャスト合成床版の開発において、プレキャスト化で最も問題となる接合部の鉄筋継手構造に関して、橋軸方向および橋軸直角方向の接合部実験によりそれぞれの継手性能を確認した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 橋軸方向の鉄筋継手に関して、あき重ね継手で鉄筋端部を機械式定着筋とすることで、重ね継手長 5d で、一体ものと同等の挙動を示すことが確認できた。

- (2) 橋軸方向の鉄筋継手に関して、鉄筋端部が直筋のJS-7は最終的に接合部の鉄筋が抜け出し、接合部に付着割裂ひびわれが発生したことから、プレキャスト同士の接合部における鉄筋端部には、安全のために抜け出しを防止するフックや機械式定着等の対策が必要である。
- (3) 橋軸直角方向の鉄筋継手に関して、突き合わせ配置で鉄筋端部を90度フックとし、添フックを2組とすることにより、継手長 5d で、一体ものと同等の挙動を示すことが確認できた。
- (4) 橋軸直角方向の鉄筋継手に関して、接合部で損傷させないためには、添フックが2組必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省, 床版の損傷事例 : http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_4.pdf (閲覧日: 2020年8月25日)
- 2) 国土交通省, コンクリート橋(上部構造)の損傷事例 : http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_2.pdf (閲覧日: 2020年8月25日)
- 3) 東・中・西日本高速道路の更新計画について <http://www.e-nexco.co.jp/assets/pdf/activity/safety/koushin/150116.pdf> (閲覧日: 2020年8月25日)
- 4) 水野浩, 鳥山裕史, 松井繁之, 街道浩: プレキャスト合成床版の合理化継手構造の継手挙動, 土木学会第65回年次学術講演会論文集, I-308, pp.615-616, 2010.9
- 5) 滝本和志, 田中博一, 山本将士, 東山浩士: プレキャスト床版の継手構造に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.577-582, 2018.7
- 6) 朱曉旭, 滝本和志, 大久保宣人, 東山浩士: 角形鋼管のずれ止め性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1165-1170, 2018.7
- 7) 滝本和志, 田中博一, 朱曉旭, 大久保宣人, 山本将士, 東山浩士: 角形鋼管を用いた軽量プレキャスト鋼コンクリート合成床版の開発, 第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.183-188, 2018.11
- 8) 大久保宣人, 山本将士, 滝本和志, 田中博一: 角形鋼管を用いた軽量鋼コンクリート合成床版の型枠合成試験, 土木学会第74回年次学術講演会論文集, I-346, 2018.8
- 9) 滝本和志, 田中博一, 朱曉旭, 大久保宣人, 山本将士, 東山浩士: 角形鋼管を用いた軽量プレキャスト合成床版の開発, 第13回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム論文報告集, pp.470-477, 2019.11
- 10) 郭度連, 森山守, 李春鶴, 山中俊幸: ラテックス改質速硬コンクリート(LMFC)の基礎物性と耐久性, 第24回プレ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.541-544, 2015.10

(2020年7月17日受付)