

論文 鋳鉄を用いた新しい床版継手構造における曲げ性能の評価

篠原 紀夫*1・畠山 繁忠*2・鍵村 俊哉*3・藤田 学*4

要旨：PCaPC 床版間詰部の RC 継手において、工期短縮を目的とした新しい接合方法の一つとして、ループ鉄筋の内側に鋳鉄金物を設置する新しい床版継手構造を考案した。鋳鉄金物の取付け状況の差を確認するために、4 点曲げ試験にて曲げ性能の検証を行った。その結果、鋳鉄金物の取付け状況による差は無く、従来のループ継手に対しても同等の曲げ性能を有していることを確認した。

キーワード：鋳鉄金物, PCaPC 床版, 継手構造, 4 点曲げ試験

1. 緒言

車両の大型化や交通量の増加による既設道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）の損傷事例が増加しており、高速道路を中心とした大規模更新が全国で行われている。その 1 つとして劣化・損傷が生じた RC 床版をプレキャストプレストレストコンクリート床版（以下、PCaPC 床版）へ取替える工事が進んでいるが、PCaPC 床版は床版同士を一体化させるために接合部が必要であり、この接合部は輪荷重等により発生する曲げモーメントやせん断力などを伝達できる十分な耐荷力を有し、かつ経済的で施工性に優れたものが求められる。

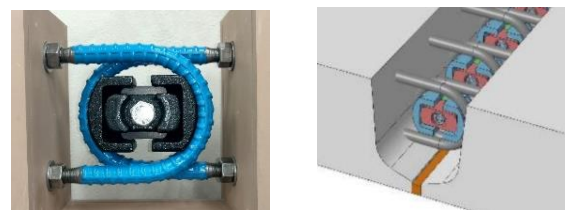
標準的な接合方法である RC ループ継手¹⁾は、コンクリートと鉄筋の直線部の付着力、曲線部の支圧力により荷重に対して抵抗する構造で、重ね継手より短い継手長で同等の耐荷力を有するが、それでも間詰部は 300～400mm と広く、さらに幅員方向配筋の施工制約等の理由で工期短縮が難しい。そのため、間詰部を狭くするために高強度繊維補強コンクリートを用いる接合方法²⁾等、様々なものが開発されている。著者らは、工期短縮および施工コスト低減を目的として、間詰部が 200mm 程度と狭く、かつ一般的なコンクリートが使用できる新しい継手構造（以下、本構造）を考案した（図-1）。

本研究では、本構造が十分な耐荷性能を有していることを確認するため、はり型供試体で 4 点曲げの有限要素法による数値解析シミュレーション（以下、FEM 解析）および載荷試験を実施した。

2. 本構造の概要

本構造の部品構成図を図-2 に示す。本構造は RC ループ継手同様に、左右から突出した向かい合う 2 つのループ鉄筋を用いるが、ループ鉄筋の重ね長さと隙間 5mm 程度で隣接する点が異なる。このため、本構造は重ねたループ鉄筋同士で形成される空間が長円形状ではなく円

状（図-1 (a)）となり、その内部に継手金物を配置することで鉄筋同士を連結し、鉄筋軸力を伝達する構造である。鋳鉄金物はループ鉄筋に内接する 2 つの半円筒鋳物（図中 B）をくさび鋳物（図中 A）およびボルトとナットプレート（図中 C）で挟み込んで極めて低い締め付けトルク（1N・m 程度）でループ鉄筋間に取り付ける。鋳鉄金物を分割構造とすることで床版架設時のずれを吸収することを期待した構造である。



(a) 写真 (b) 施工図
図-1 新しい継手構造（本構造）

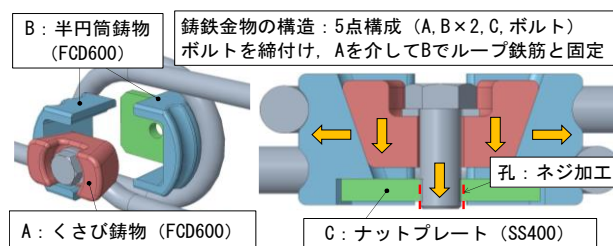


図-2 部品構成図

3. 試験概要

3. 1 試験ケースの設定

試験ケースは基準供試体として継手の無い直鉄筋を配置したものを ST、また、本構造の取付け方向の違いによる影響を確認するために鋳鉄金物を水平方向に配置したものを V-0、鉛直方向に配置したものを V-90 とした。試験ケースを表-1 に、鋳鉄金物の配置を図-3 に示す。

*1 ヒノデホールディングス（株）技術開発グループ 博（工）（正会員）

*2 （株）富士ピー・エス 技術センター いわき研究所 博（工）（正会員）

*3 エム・エムブリッジ（株）技術部 設計グループ

*4 宮地エンジニアリング（株）関西 設計・開発部 設計・開発グループ

表-1 試験ケース

試験ケース	継手鉄筋形状	鑄鉄金物配置方向
ST	直鉄筋	—
V-0	ループ鉄筋	水平
V-90	ループ鉄筋	鉛直

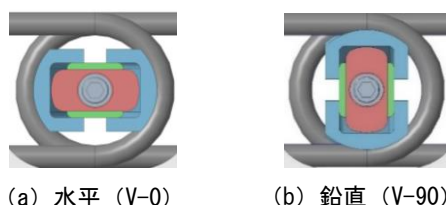


図-3 鑄鉄金物配置図

3. 2 供試体概要

供試体は長さ 3000mm、幅 600mm、厚さ 220mm とし、図-4 に示すように、まず 2 枚のプレキャスト部コンクリートを打設し、脱枠後に目地部の目粗しを行った。その後、一定の間詰部（下面で 220mm、上面で 260mm の逆台形状）を確保してループ鉄筋に鑄鉄金物で設置後、間詰部にコンクリートを充填して接合した。なお ST についても同様に間詰部を設け、同じ配合のコンクリートで 2 枚のプレキャスト部を接合した。供試体の諸元および使用材料規格値を表-2 に配筋図を図-5 に、間詰部断面（A-A）を図-6 に示す。

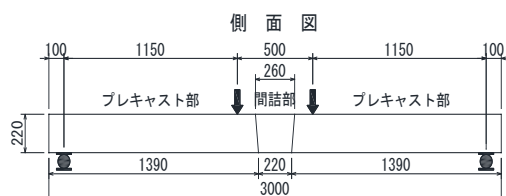


図-4 試験概要図（単位：mm）

表-2 供試体諸元および使用材料規格値

床版寸法	3000mm×600mm×220mm		
載荷点距離	500mm		
支点間距離	2800mm		
コンクリート	プレキャスト部、間詰め部とも設計基準強度50N/mm ²		
主鉄筋 D13	SD345	降伏点345N/mm ²	引張強度490N/mm ² 伸び18%
配力筋 D19	SD345	降伏点345N/mm ²	引張強度490N/mm ² 伸び18%
鑄鉄金物	FCD600	降伏点370N/mm ²	引張強度600N/mm ² 伸び3%

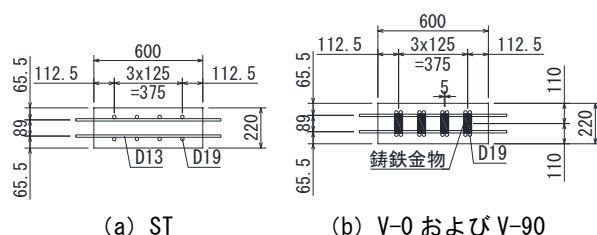
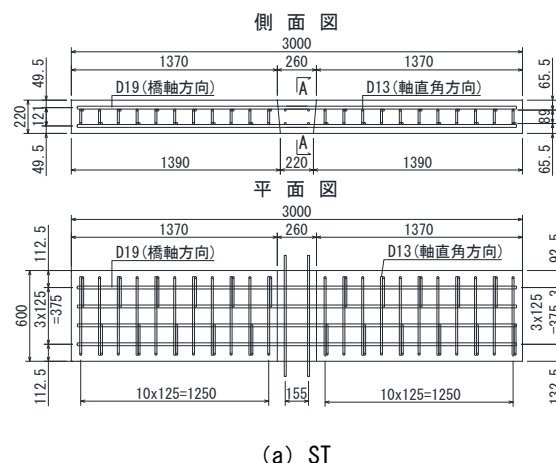
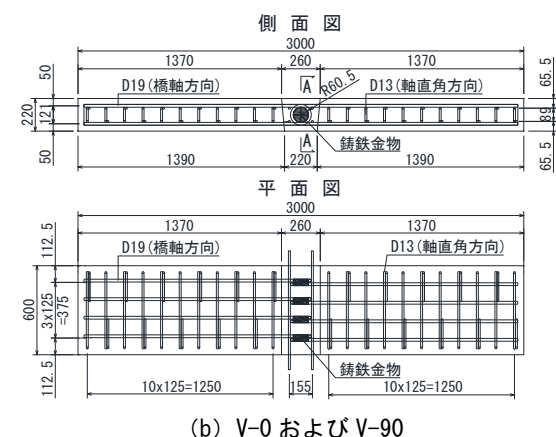


図-6 間詰部断面（A-A）図（単位：mm）



(a) ST



(b) V-0 および V-90

図-5 配筋図（単位：mm）

3. 3 材料強度

コンクリートは、供試体間詰部へコンクリートの打設時にφ100×200mm のテストピースを作製し、載荷試験日に圧縮強度試験（JIS A 1108）、割裂引張強度試験（JIS A 1113）および静弾性係数試験（JIS A 1149）の各種材料試験を行った。また鉄筋(D19)は引張試験（JIS Z 2241）を行った。材料試験結果を表-3 に示す。

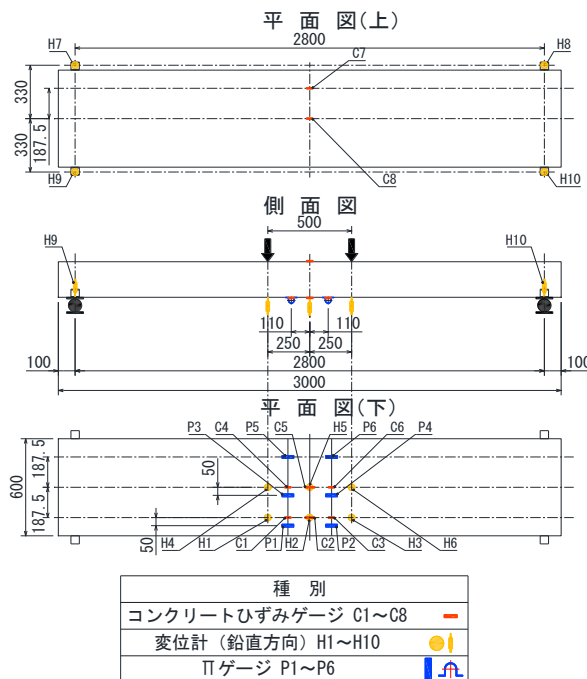
表-3 材料試験結果

部位	項目	単位	設計値	実測値(平均)	
				プレキャスト部	間詰部
				試験初日 (材齢68日)	試験初日 (材齢55日)
コンクリート	圧縮強度	N/mm ²	50	76	79
	曲げ引張強度	N/mm ²	3.0	5.5	5.6
	ヤング係数	N/mm ²	33,000	39,200	38,400
	引張強度	N/mm ²	490	570	
鉄筋 (D19)	降伏応力度	N/mm ²	345	372	
	ヤング係数	N/mm ²	200,000	190,000	
	引張強度	N/mm ²	600		
	降伏応力度	N/mm ²	320		
鑄鉄金物	ヤング係数	N/mm ²	170,000		

3. 4 試験方法および計測項目

試験は支間長 2800mm、せん断スパン 1150mm、載荷点間距離 500mm、の 4 点曲げ試験とした。載荷は載荷フレ

ーム上部に設置した 300kN の油圧ジャッキを用い、載荷治具を介して行った。荷重は、今回の供試体を複鉄筋矩形断面として引張側鉄筋の発生応力が $\sigma_s=120\text{MPa}$ となるとき曲げモーメント $M=19.6\text{kN}\cdot\text{m}$ をせん断スパン (1150mm) で除して算出した荷重 $P=34.1\text{kN}$ を設計荷重とした。載荷はコンクリートのひび割れ挙動を確認するために図-7 に示す通りに各ステップで 3 回ずつの繰返し載荷を実施し、鉄筋降伏以降はコンクリートの破壊により荷重低下が生じるまで載荷した。計測項目は載荷時の荷重、曲げ変形時の鉛直変位、打継目の目開き量、各ひずみ (コンクリート、鉄筋、鋳鉄金物) とし、載荷中連続測定を行った。図-8 に各試験ケースの計測位置図を示す。また、一定の荷重毎にひび割れ性状の目視確認を行い、ひび割れ進展状況はひび割れに沿ってマーキングをした。



(a) 共通
(b) ST ひずみゲージ位置
(c) V-0 および V-90 ひずみゲージ位置

図-8 計測位置図 (単位: mm)

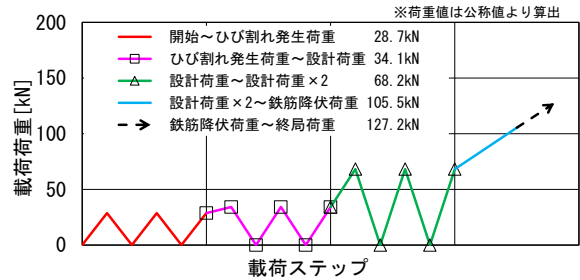
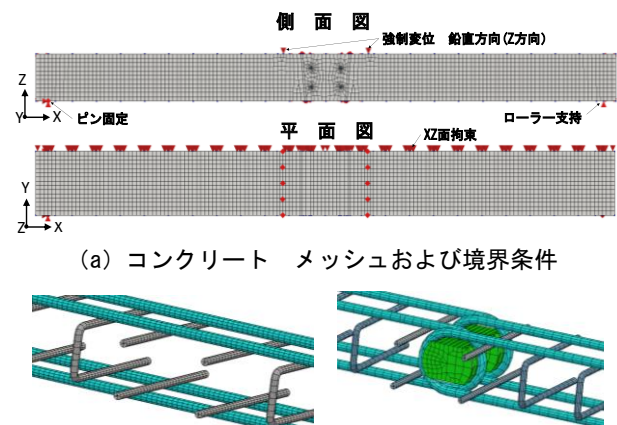


図-7 載荷ステップ

3. 5 解析概要

鋳鉄金物の荷重伝達メカニズムの検討を行うために、ST および V-0 の 2 ケースで FEM 解析を行った。各解析モデルを図-9 に示す。解析ソフトは DIANA Release10.6 を使用した。使用要素は 6 面体 1 次と 5 面体 1 次のソリッド要素とし、解析ソフトの自動メッシュ作成機能にて作成した。本構造は複数の部品から構成されるが、解析モデルではモデルの簡略化のために 1 部品に統合した。供試体の RC 部と間詰部の打継目は一体化しているものと考え、本解析では間詰部のモデル化を省略した。また、幅方向 (Y 方向) に対称と仮定し、1/2 モデルとした。ここで、1/2 モデルは 1/1 モデルの 4 点曲げ解析の荷重-変位関係の解析値と同等であることを事前に確認している。コンクリートと鉄筋の材料物性値は表-3 の材料試験結果、鋳鉄金物は設計値から設定した。材料構成則について、コンクリートは全ひずみひび割れモデルとし、圧縮側はコンクリート標準示方書³⁾の前川モデル、引張側はコンクリート標準示方書の引張軟化モデルの構成則、鉄筋は Von Mises 塑性モデル、鋳鉄金物は弾性モデルとした。それぞれの材料間について、コンクリートと鉄筋およびコンクリートと鋳鉄金物は完全付着、鋳鉄金物と鉄筋は摩擦係数 0.3 を定義した。なお、鉄筋周りはテンションステイフィングの考慮はしない。また、供試体下面の 2 辺の支持部をピン・ローラーで拘束し、上面の載荷点に強制変位を与えた。



(a) コンクリート メッシュおよび境界条件 (b) ST 鉄筋メッシュ (c) V-0 鉄筋メッシュ

図-9 解析モデル

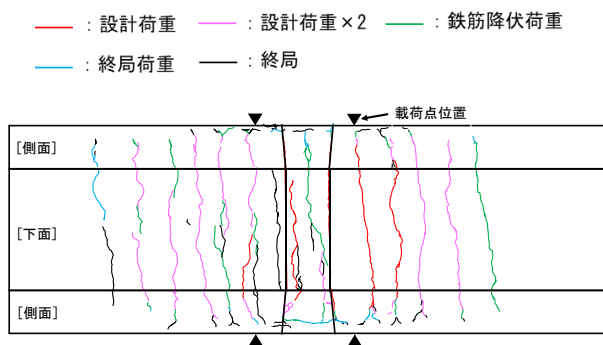
4. 実験結果および考察

4. 1 荷重-鉛直変位関係

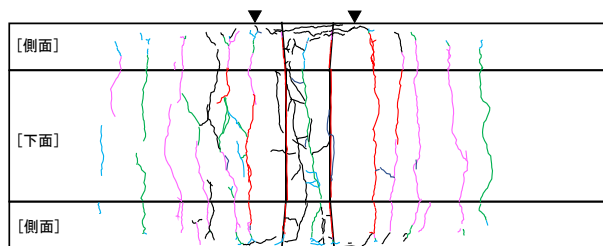
図-10 に、支間中央位置 H5 における荷重-鉛直変位関係を示す。なお、図は図-8 に示す載荷ステップの最終ステップにおける結果を示している。全ケースで共通して、曲げによる圧縮側コンクリートの圧壊を呈して終局を迎えた。V-0 および V-90 は ST 同様に終局に至るまで十分な靱性を有しており、また、剛性は ST と同等であることを確認した。さらに、畠山らの実験結果⁴⁾で、荷重-変位関係を本実験の供試体幅に合わせた形で修正したところ、本構造は従来のループ継手と同等の曲げ耐荷挙動を示すことも確認した。

4. 2 ひび割れ図

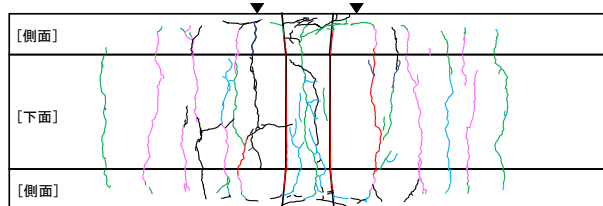
ひび割れ図を図-11 に示す。設計荷重段階で ST、V-0、V-90 とも目開きが生じ、ST のみ間詰部にひび割れが生じた。V-0、V-90 のひび割れは設計荷重を超えた際に、等曲げ区間から少し離れたところから発生した。また、鉄筋降伏荷重および終局荷重時に等曲げ区間内で一気にひび割れが進展したことを確認したものの、ST と比較して特筆すべき差異は認められなかった。



(a) ST



(b) V-0



(c) V-90

図-11 ひび割れ図

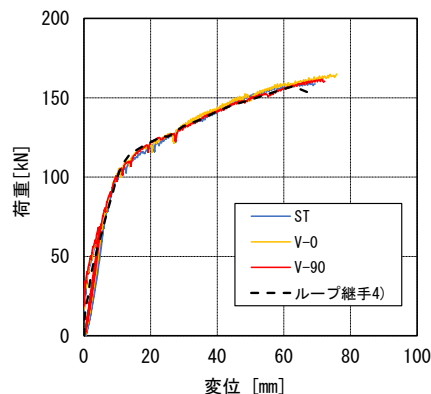
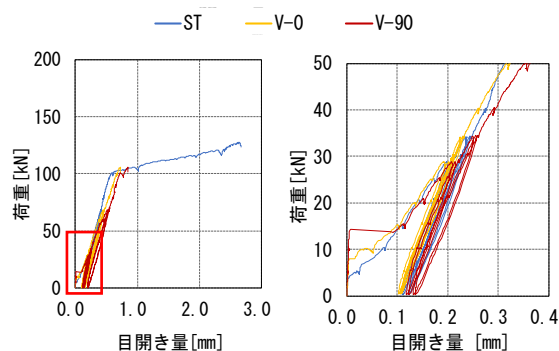


図-10 荷重-鉛直変位関係

4. 3 打継目の目開き量

打継目の目開き量はパイ型変位計で図-8 (a) に示す 6 か所で計測した。各ケースの載荷履歴と目開き量の一例を図-12 に示す。各ケースとも 10kN 前後と早い段階で目開きが発生した。また、V-0 および V-90 の目開き量は ST と同等であることが確認できる。



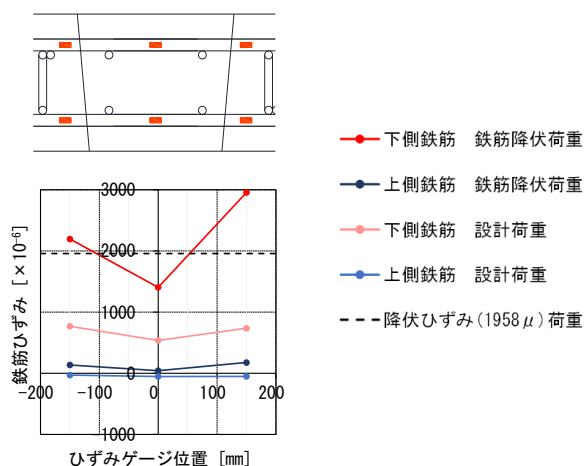
(a) 全体図

(b) 赤枠詳細図

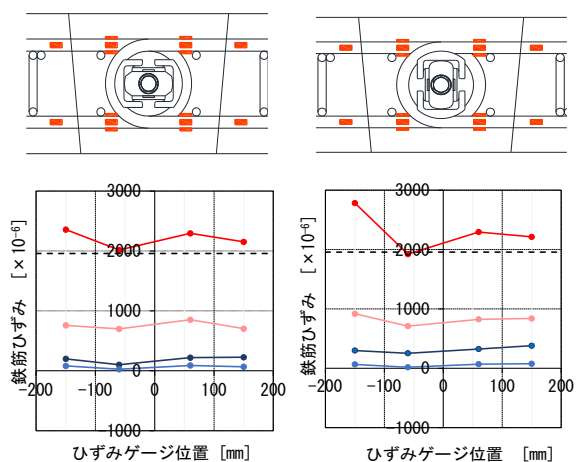
図-12 荷重-目開き量関係

4. 4 鉄筋ひずみ

各ケースで鉄筋のひずみ計測を行い、鉄筋の降伏状況の確認を行った。載荷重 0kN でひずみの 0 μ 点を設定した。鉄筋降伏荷重は、図-8 のひずみゲージ位置に赤印で示した下側鉄筋の N1 から N4 (または V1 から V4) のひずみの平均が、材料試験より得られた鉄筋降伏ひずみ (1958 μ) に達した時点の荷重とした。図-13 に代表として各ケースの鉄筋のひずみ分布の一例を示す。設計荷重時において、ST の上側鉄筋は圧縮ひずみが生じているのに対し V-0 および V-90 の上側鉄筋は引張ひずみが発生していることを確認した。また、鉄筋降伏荷重において ST の下側鉄筋はプレキャスト部のみ降伏しているが、V-0 および V-90 の下側鉄筋は間詰部およびプレキャスト部とも鉄筋が降伏していることを確認した。計測位置の違いによる影響も考えられるが、目開きの発生する打継目に近い下側鉄筋は早期に降伏すると考えられる。



(a) ST



(b) V-0

(c) V-90

図-13 鉄筋ひずみ分布の一例

4. 5 曲げ耐力の評価

各ケースの実験結果の一覧を表-4、実験値（ひび割れ発生、鉄筋降伏、終局）と設計値との比を図-14に示す。ここで、表-4に用いている各設計値は間詰部コンクリートおよび鉄筋の実強度、ひずみゲージ貼付時に生じた鉄筋の断面欠損、供試体の自重を考慮して再計算した値を用いている。表-4より、ひび割れ発生荷重はST以外のケースにおいて、設計値よりも低い荷重となったものの、鉄筋降伏荷重は全ケースにおいて設計値と同等の荷重となり、終局荷重は全ケースにおいて設計値を上回った。また、鉄筋降伏荷重および終局荷重はSTと同様の値を示していることを確認した。これらより、V-0およびV-90はSTと同様の曲げ耐力を有していると考えられる。

表-4 実験結果一覧

試験ケース	項目	ひび割れ発生	鉄筋降伏	終局
ST	設計値[kN]	32.1	101	127
	実験値[kN]	34.1	96.7	159
V-0	設計値[kN]	32.1	101	127
	実験値[kN]	28.7	97.6	165
V-90	設計値[kN]	32.1	101	127
	実験値[kN]	28.7	96	162

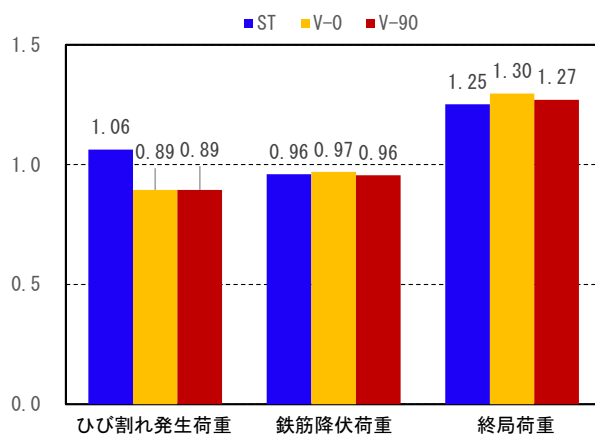


図-14 実験値と設計値の比

次に、FEM解析の妥当性評価として荷重-変位関係を図-15に、プレキャスト部の鉄筋ひずみと荷重の関係の一例を図-16に示す。また、V-0の実験値より、上面コンクリートひずみと鉄筋ひずみを整理したものを図-17に示す。まず、図-15よりSTとV-0の解析値を比較すると、剛性に差がみられた。これは、解析値は載荷初期段階では全断面有効の剛性であるが、初期ひび割れ以降はRCとしての剛性となり、50kN以降は実験値と同様の傾向を示している。また、鉄筋降伏荷重はV-0のほうが高く推移した。これは支間中央に配置した鉄金物が鋼材量の増加に寄与し、降伏耐力が増加したものと考えられる。一方、実験値ではその差がほとんど確認できなかった。また、解析値と実験値を比較すると、鉄筋降伏荷重は実験値の方が低くなった。ここで、図-16(a)よりSTの上側鉄筋のひずみは降伏荷重まで圧縮側となっているが、図-16(b)および(c)よりV-0の上側鉄筋は載荷初期段階の10kN付近で圧縮側から引張側になっている。さらに、図-17より中立軸の位置の推定をすると、荷重が増加するにつれて中立軸の位置は上昇し、設計荷重付近(40kN)では上側鉄筋よりも上側に位置することが分かった。これらの結果より、鉄筋降伏荷重が低下した原因は、繰返し載荷により打継目の目開きが徐々に進行したため、載荷初期から中立軸が上昇し、打継目付近の引張鉄筋が早期に降伏したものと考えられる。

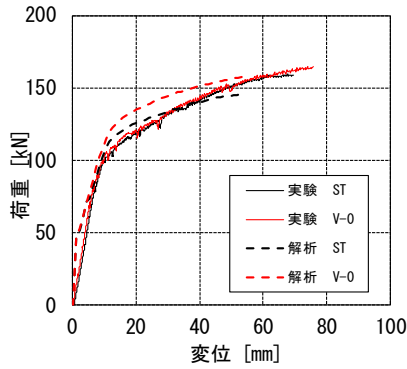


図-15 荷重-変位関係 解析結果との比較

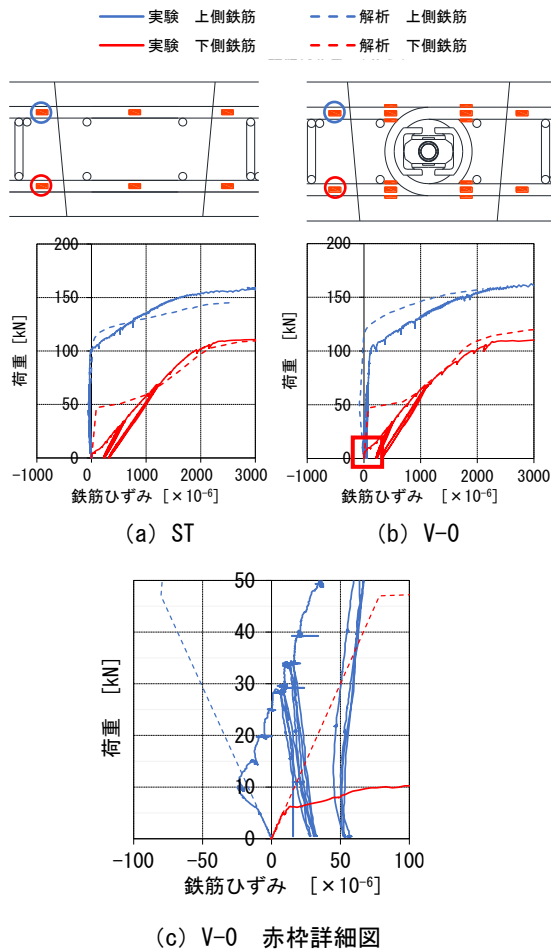


図-16 荷重-ひずみ関係 解析結果との比較

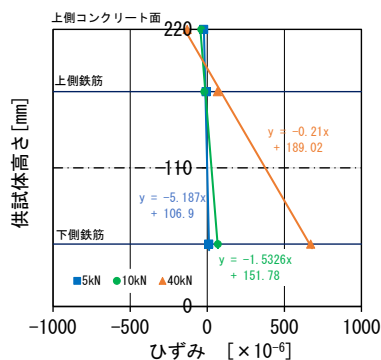


図-17 V-0 ひずみ状態図

5. 結言

本研究により得られた結果を次に示す。

- (1) 全ケースで共通して、終局状態は上縁側コンクリートの圧壊による曲げ破壊であった。荷重-変位関係は基準供試体となる直鉄筋を配置したケース (ST) と同様に、本構造(V-0, V-90)は一般的な RC 構造としての挙動を示し、終局荷重に至るまで十分な靱性を有していることを確認した。
- (2) V-0, V-90 のひび割れは ST と同等であり、特筆すべき差異は認められなかった。
- (3) 各ケースのひび割れ発生荷重はばらつきがあるものの、鉄筋降伏荷重および終局荷重は ST と同様の値を示していることを確認した。このことより、V-0 および V-90 は ST と同等の曲げ耐力を有していると考えられる。
- (4) FEM 解析の妥当性評価として曲げ耐力について考察を行った。実験値と解析値より、V-0 は ST と比較して鉄筋降伏荷重の解析値が大きくなった。これは間詰部の鋼材量 (鉄筋と鋳鉄金物) が ST と比較して多いことが要因と考えられる。また、両ケースとも鉄筋降伏荷重は実験値の方が低くなった。これは繰り返し載荷により打継目のひび割れが徐々に進行したことで、載荷初期から中立軸の位置が上昇し、打継目付近の引張鉄筋が早期に降伏したものと考える。

今後の課題として、鋳鉄金物の荷重伝達メカニズムについて、鋳鉄金物に発生するひずみやループ鉄筋と鋳鉄金物間の力の伝達状況などを調べ、検討を行う。

謝辞

本研究の実施にあたり、終始適切なご指導、ご鞭撻を賜った大阪大学 松井繁之名誉教授に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東日本, 中日本, 西日本高速道路株式会社: 設計要領 第2集橋梁保全編, 平成29年7月
- 2) 佐々木一成, 岩城孝之, 富永高行, 野村敏雄: 超高強度繊維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研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.583-588 2018
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2017
- 4) 畠山繁忠, 日野伸一, 正木守, 左東有次: 傾斜配置したループ継手を間詰部に用いた床版の曲げ耐荷性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.589-594, 2018