

論文 U型ハーフプレキャスト部材を用いた合成梁の曲げ性状について

服部尚道*1・増田芳久*2・得能達雄*3・玉井真一*4

要旨：U形ハーフプレキャスト梁を架設し、その内部に中詰めコンクリートを場所打ちして構築する合成梁は、断面が一水平線上に2種類の材料で構成されるとともに、プレキャスト梁のみにプレストレスが導入されているので、断面における一水平線上に2種類の維ひずみが存在する。さらに、ひび割れを許容するPRC構造では、ひび割れ発生後、断面各部の断面係数が刻々と変化する。そこで、断面各部の応力度を算出するため、断面に対して鉛直方向と水平方向の2種類のひずみ分布を考慮できるファイバーモデルを提案した。さらに、PRC合成梁の静的曲げ載荷実験を実施し、提案手法により算出される鉄筋ひずみを用いひび割れ幅の検討ができることを確認した。

キーワード：ハーフプレキャスト・合成部材・曲げ性状・ファイバーモデル

1. はじめに

プレキャスト部材の軽量化や支保工の簡略化を目的としたU形ハーフプレキャスト梁を、梁断面の一部として機能させることは、施工の急速化や合理化の面で有効である。¹⁾

一般に用いられるI形断面のプレキャスト桁を用いた合成桁は、プレキャスト桁の上方にスラブコンクリートを打設するので、合成桁断面における一水平線上の材料は、プレキャスト桁またはスラブコンクリートのどちらか一種類であり、一水平線上の維ひずみは一義的である²⁾。従って、プレキャスト桁単独断面および合成桁断面の鉛直方向の維ひずみが、各断面の中立軸からの距離に比例するとし、鉛直方向の一種類のひずみ分布を考えることで、断面各部の維ひずみを求めることができる(図-1(a)参照)。

一方、U形ハーフプレキャスト梁を架設し、その内部に中詰めコンクリートを場所打ちして一体化する合成梁は、断面が一水平線上に2種類の材料で構成されるとともに、プレキャスト梁のみにプレストレスが導入されているので、合成梁の断面における一水平線上に2種類の維ひずみが存在する(図-1(b)参照)。さらに、ひび割れを許容するPRC構造(以下、PRC合

成梁)では、ひび割れ発生後、断面各部の断面係数が刻々と変化する。従って、このようなPRC合成梁の使用限界状態における鉄筋応力度の増加量を的確に捉え、ひびわれ幅を予測することは、構造物の耐久性を確保する上で非常に重要である。そこで、断面各部の応力度を算出するため、断面に対して鉛直方向と水平方向の2種類のひずみ分布を考慮できるファイバーモデルを構築した。さらに、提案手法の妥当性を検証するため、PRC合成梁の静的曲げ載荷実験を実施した。

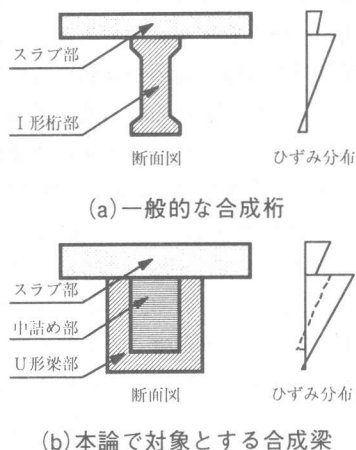


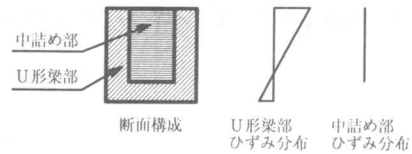
図-1 合成桁および梁の断面内のひずみ分布

*1 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室 工修(正会員)
 *2 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室(正会員)
 *3 川田建設(株) 工事本部 製品開発部(正会員)
 *4 (財)鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 構造物技術開発事業部 工修(正会員)

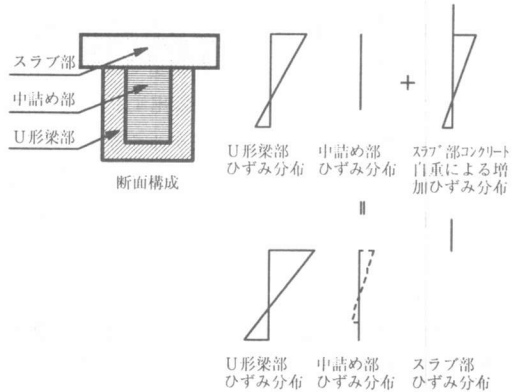
2. 2種類のひずみ分布が考慮できるファイバーモデルの提案

U形プレキャスト梁を架設し、その内部に中詰めコンクリートを場所打ちする合成梁では、合成梁の断面における一水平線上の材料は、U形プレキャスト梁と中詰めコンクリートの両方である。これらのうち、U形プレキャスト梁のみにプレストレスが導入されているので、合成梁断面における一水平線上のひずみはU形プレキャスト梁と中詰めコンクリートで異なることになる。そこで、この2種類の維ひずみが考慮できるように、鉛直方向のみでなく水平方向のひずみ分布も考慮して断面各部の維ひずみを求める必要がある。また、ひび割れを許容しないP C構造の場合は、断面各部の維ひずみは断面各部の断面係数を用いて求めることができるが、ひび割れを許容するP R C構造では、ひび割れ発生後、断面各部の断面係数が刻々変化する。そこで、断面に対して鉛直方向と水平方向の2種類のひずみ分布を考え、メッシュに分割した断面内の各要素ごとに維ひずみを求めて、応力度を算出するファイバーモデルを構築した。

本論で対象とするP R C合成梁に構築したファイバーモデルを適用した場合、ある施工段階で作用する断面力に対しては、その時点での合成断面が一体として挙動すると仮定し、維ひずみの増加量が合成断面の中立軸からの距離に比例するとして断面各部の応力度を求める。例えば、U形ハーフプレキャスト梁を架設後、中詰めコンクリートを打設した時点の断面各部のひずみ分布を図-2(a)に示す。この時点では、U形ハーフプレキャスト部のみで中詰めコンクリート自重に抵抗するので、U形ハーフプレキャスト部にのみひずみが生じ、中詰めコンクリートにはひずみが生じない。その後、ある期間をおいてスラブコンクリートを打設する時点のひずみ分布を図-2(b)に示す。この時点では、スラブコンクリート自重に抵抗する断面は、U形ハーフプレキャスト部と中詰めコンクリート部となる。従って、スラブコンクリート自重による維ひずみの増加量が、U形ハーフプレキャ



(a) 中詰めコンクリート打設時のひずみ分布



(b) スラブコンクリート打設時のひずみ分布

図-2 P R C合成梁の施工時のひずみ分布

スト部と中詰めコンクリート部に加算される。すなわち、維ひずみの増加量がこの時点における合成断面の中立軸からの距離に比例するとして断面各部のひずみ分布を求める。ただし、スラブコンクリート部は硬化時であるのでひずみは生じない。

次に、ラーメン構造の梁に本論で対象とするP R C合成部材を適用する場合、断面応力度の算定は表-1に示す施工順序に従った構造解析モデルを用いて行う。この場合、プレストレス力、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、鋼材の拘束力の影響なども断面の構成要素ごと同時に考慮する必要がある。そこで、構造解析はクリープ・乾燥収縮と鋼材の拘束力を考慮できる線形解析プログラムを用い、永久荷重作用時までの各施工段階における断面力を算出する。各施工段階の断面力により生じる断面要素ごとの応力度は、図-3の断面解析フローチャートに従って求めていく。例えばStep2において、中詰めコンクリート打設時の応力状態を断面要素の維ひずみとして考慮する。次に、構造解析で

表-1 ラーメン構造の梁に PRC 合成梁を適用した解析手順

施工段階	構造系	荷重	断面の構成	応力度		
				発生応力度		注3 合成応力度
				ハーフプレキャスト 梁	中詰め・ スラブ	
1 → 架設	単純梁	ハーフプレキャスト 梁自重 + プレストレス	U形断面			
↓	単純梁	クリープ・ 乾燥収縮の 影響	U形断面			
2 ↓	単純梁	中詰め コンクリート 自重 (+作業荷重) 注1	U形断面			
3 → スラブコン クリート打設	ラーメン: 梁・柱のみ	ハーフプレキャスト スラブ自重 + スラブ コンクリート 自重 (+作業荷重) 注1	矩形断面			
↓	ラーメン: 全断面	クリープ・ 乾燥収縮の 影響	T形断面			
4 → 完成	ラーメン: 全断面	橋面荷重 (+作業荷重) 注1	T形断面			
↓	ラーメン: 全断面	クリープ・ 乾燥収縮の 影響 (終了まで)	T形断面			
5 ↓	ラーメン: 全断面	変動荷重	T形断面			

注1) 作業荷重は、各施工時の検討を行う際に考慮する荷重である
 注2) 合成応力度については、がU形ハーフプレキャスト梁およびスラブの応力度分布を
 ----- が中詰め部の応力度分布を示す

算出したスラブコンクリート打設時までの材齢を考慮したクリープ・乾燥収縮による断面力に対し、その時点での合成断面、すなわちU形ハーフプレキャストと中詰めコンクリートの合成断面が一体として挙動すると仮定し、維ひずみの増加量が合成断面の中立軸からの距離に比例するとして断面各部の応力度を求める。この応力度を増加維ひずみとして、断面力作用前のプレキャスト部と中詰めコンクリート部のひずみ分布に累加する。以降、

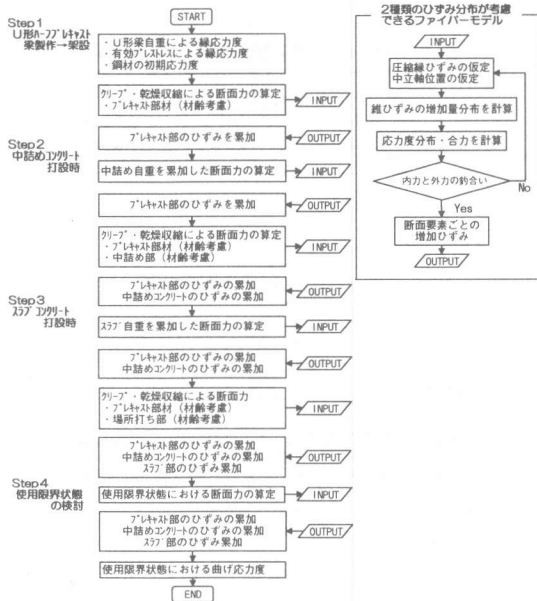


図-3 断面解析フローチャート

同様な解析手順により最終的には、使用限界状態における断面各部の応力度を求める。

また、終局限界状態における曲げ耐力の算出は、2種類のひずみ分布が考慮できるファイバーモデルを適用した場合と通常のファイバーモデルを適用した場合とでは相違がない。これは、終局状態における中立軸がスラブコンクリート部にあるので圧縮側コンクリートは場所打ち部のみになることや、引張縁鋼材は降伏するのでプレストレスが導入されていても引張縁鋼材の最大引張力は同様であるからである。

3. 合成梁の曲げ載荷実験

3.1 実験概要

試験体の形状は、図-4に示すようにラーメン梁支間部の実物大断面を有し、支間長を10000mm、

等曲げ区間を3000mm，せん断スパンを3500mm，せん断スパン比は3.07とした。試験体の配筋を図-5に示す。使用材料について，表-2に鉄筋の材料試験結果，表-3にミルシートによるPC鋼材の仕様，表-4にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

試験体の製作は，図-6に示すように実際の施工手順（表-1参照）に従った。まず，U形ハーフプレキャスト梁部材の製作を行い，コンクリートが所定の強度に達した後，プレストレスを導入した。さらに，U形ハーフプレキャスト梁部材を荷重時の支点位置で支持し，中空部に鉄筋を配筋後中詰めコンクリートを打設した。こ

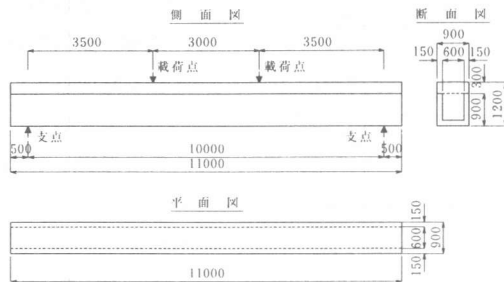


図-4 試験体一般図

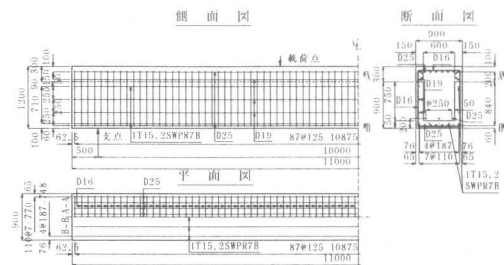


図-5 試験体配筋図

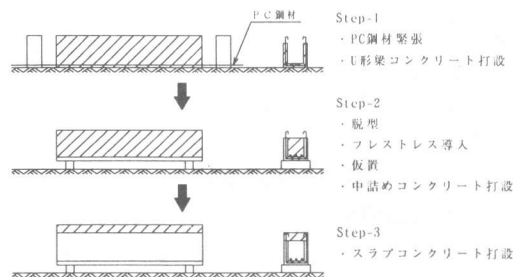


図-6 施工順序図

こで，打継面には一体性を確保するため円形の凹凸を設けており，凹凸の寸法はコンクリート強度比を考慮した表面積が凹部と凸部で等価なものとし，その高さは5mm³⁾とした。さらに，スターラップの上側鉄筋とスラブ鉄筋を配筋後，スラブコンクリートを打設した。ここで，中詰めコンクリートとスラブコンクリートの打継面は粗面仕上げとした。なお，スラブの幅は梁幅とした。その後，一定期間の養生を行い，荷重実験を実施した。

図-7に荷重実験装置を示す。鉛直力はサーボ制御の5000kNアクチュエータにより，二点一方向荷重とした。計測は，試験体製作時の鉄筋ひずみと荷重実験時の荷重，鉄筋ひずみ，ひびわれ幅について行った。

表-2 鉄筋の材料試験結果 (N/mm²)

鉄筋の種類	降伏強度	引張強度	弾性係数
D25(SD345)	368	577	1.90×10 ⁵
D19(SD345)	371	571	1.91×10 ⁵
D16(SD345)	360	553	1.92×10 ⁵

表-3 PC鋼材の仕様 (N/mm²)

種類	降伏強度	降伏強度	PC鋼材緊張応力度
IT15.2	1746	1912	1411
SWPR7BN			

表-4 コンクリートの圧縮強度試験結果 (N/mm²)

部位	プレストレス導入時	荷重試験時
U形梁部	38.5(材齢4日)	61.2
中詰め部	—	42.8
スラブ部	—	44.1

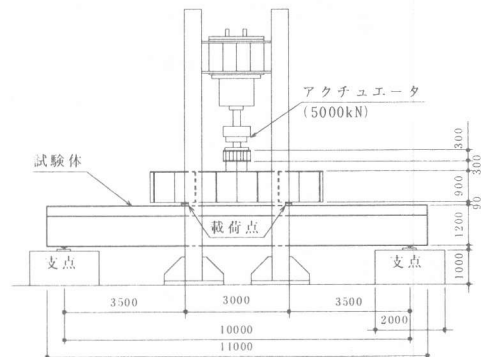


図-7 荷重装置図

3.2 実験結果および考察

図-8に施工中から完成までにおける各施工段階ごとのスパン中央における断面内ひずみ分布図を示す。ここで、実験値は主鉄筋に貼付したひずみゲージで計測したものである。なお、解析に使用したコンクリートおよび鋼材の応力～ひずみ関係は土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕⁴⁾に準じた。同図より、荷重点断面のひずみ分布においては実験値にややばらつきがあるものの解析値にはほぼ一致し、断面高さ方向に直線関係にあることが確認できた。

荷重時の試験体の状態は、荷重約451kNで等曲げ区間中央のU形梁下縁側に曲げひび割れが発生し、荷重約549kNで中詰め下縁側にひび割れ発生が確認された。その後、荷重約2078kNで等曲げ区間の曲げひび割れが上部打継面位置を貫通するとともにU形梁の下縁側鉄筋が降伏後、荷重約2196kNで支点部の曲げ圧縮破壊に至った。

図-9に最終ひび割れ状況を示す。また、写真-1に荷重終了後の、図-9に示す位置のコア抜き供試験体を示す。これより、打継面に沿うひび割れは発生せず、曲げひび割れは打継面位置を貫通していることが確認できた。従って、場所打ちコンクリートとハーフプレキャスト部材の一体性は、部材降伏以降終局状態まで確保されていることが確認できた。

図-10(a), (b)に支間中央における荷重とU形梁下縁側鉄筋のひずみの関係を示す。ここで、実験値および解析値は、荷重直前を初期状態として図示している。また、解析値は提案手法に従い、コンクリートの構成則はU形梁下縁側のひび割れ発生までコンクリートの引張強度を有効とし、ひび割れ発生後はコンクリートの引張強度を無視するものとした。同図より、U形梁下縁のひび割れ発生荷重について、実験値と解

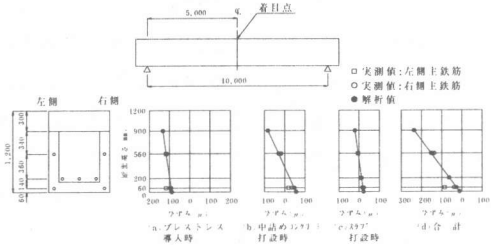
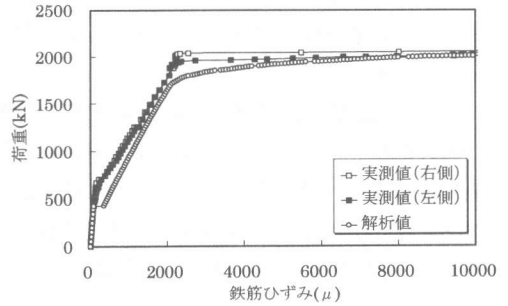
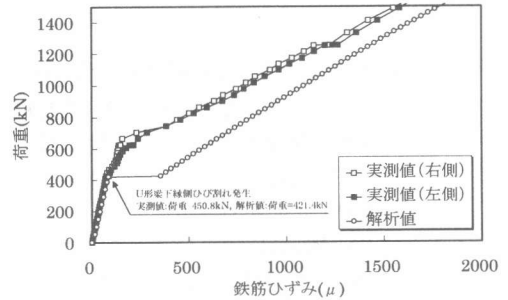


図-8 スパン中央における断面内のひずみ分布



(a) 荷重と鉄筋ひずみの関係



(b) (a)の荷重1500kNまでの荷重と鉄筋ひずみの関係

図-10 荷重とU形梁下縁側鉄筋ひずみの関係

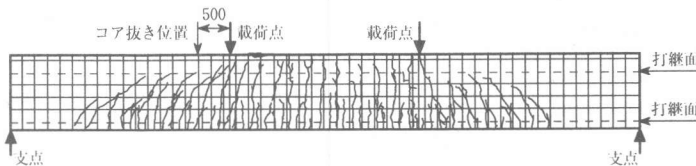


図-9 最終ひび割れ状況

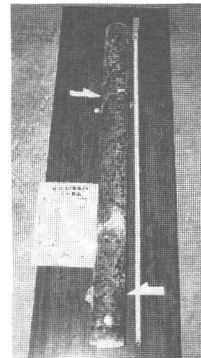


写真-1 コア抜き供試験体

析値ではほぼ一致することが確認できた。ひび割れ発生後は、同一荷重における鉄筋ひずみの実験値は解析値を下回り、荷重の増加とともに解析値に漸近する結果となった。これは、ひび割れ発生位置と鉄筋ひずみ計測位置が若干ずれているので、コンクリートのテンションステフニング効果として現れたものと考えられる。従って、提案手法による解析は、コンクリートの引張強度をひび割れ発生後に無視することも踏まえて、鉄筋応力度を精度よく算出することができることが確認できた。

図-11に支間中央断面における荷重とひび割れ幅の関係を示す。解析値は、提案手法により最外縁鉄筋ひずみを逐次計算し、式(1)に示すコンクリート標準示方書[設計編]のひび割れ幅算定式⁴⁾でひび割れ幅を計算したものである。

$$\omega = k \{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \} \left[\frac{\sigma_{sc}}{E_s} \left(\text{または} \frac{\sigma_{pe}}{E_p} \right) + \varepsilon'_{csd} \right] \cdot (1)$$

ここに、 k : 鋼材の付着性状の影響を表す定数で、一般に、異形鉄筋の場合1.0、普通丸鋼およびPC鋼材の場合に1.3としてよい

c : かぶり(mm)

c_s : 鋼材の中心間隔(mm)

ϕ : 鋼材径(mm)

ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値

σ_{sc} : 鉄筋応力度の増加量(N/mm²)

σ_{pe} : PC鋼材応力度の増加量(N/mm²)

同図より、ひび割れ発生後、解析値と実験値は同様な傾向を示すものの、解析値はやや安全側の値を示す結果となった。

4. まとめ

本論は、U形ハーフプレキャスト梁に中詰めコンクリートを打設したP R C合成梁を対象とし、使用限界状態における断面各部の応力度を算定するため、維ひずみの増加量が中立軸からの距離に比例すると仮定したファイバーモデルを提案した。また、P R C合成梁の静的曲げ

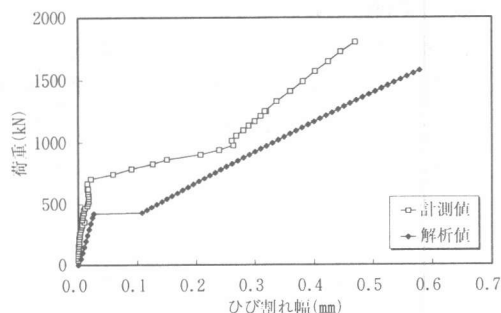


図-11 荷重とひび割れ幅の関係

実験を実施し、以下のことを確認した。

(1) 打継面の凹凸による合成梁の一体性が、部材降伏以降、終局状態まで確保できた。

(2) 提案手法により算出した鉄筋応力度を用い、コンクリート標準示方書[設計編]のひび割れ幅算定式により算出したひび割れ幅の解析値は、実験値と同様な傾向を示すもののやや安全側の値を示す結果となった。

以上のことから、提案手法の妥当性が確認できた。従って、U形ハーフプレキャスト梁に中詰めコンクリートを打設したP R C合成梁の使用限界状態は、提案手法により算出される鉄筋ひずみを用いたひび割れ幅算定値で検討することができるものとする。

【参考文献】

- 1) 服部尚道・宮城敏明・得能達雄・玉井真一：鉄道ラーメン高架橋のプレキャスト構築工法（その1）—ハーフプレキャスト部材を用いた合成梁の載荷実験—，第8回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム，pp.117-120，1998.10.
- 2) 道路橋示方書・同解説（コンクリート橋編），日本道路協会，平成8年12月
- 3) P R C合成床版工法の設計施工指針（案），コンクリートライブラリー第62号，土木学会，昭和62年3月
- 4) コンクリート標準示方書[設計編]，土木学会，平成8年3月