

報告 けた高を制限したプレキャスト PC げたの連結構造に関する 実験的研究

中村敏之^{*1}・石田博樹^{*2}・横田 勉^{*3}・阿部浩幸^{*4}

要旨:近年、橋梁の連続化へのニーズが強まっている。プレキャスト単純げたを連続化する手段としてRC連結構造が一般的であるが、連結部にて一定のけた高を必要とする。市街地等でけた高制限を受ける場合、RC連結構造にプレストレスを導入するPRC連結構造が考えられる。本文では、実橋の1/3スケールの試験体を製作し、連結部をRC構造とPRC構造にした試験体の曲げ疲労载荷試験を実施した。試験結果から、連結部の引張鉄筋応力を制御したPRC構造が優れたひび割れ特性と疲労特性を有することを確認し、けた高制限を受けるプレキャストげたの連結構造に適用できることを検証した。

キーワード:連結げた, けた高制限, PRC, 連結鉄筋, 貫通ひび割れ, 疲労試験

1. はじめに

橋梁構造物において交差条件などから、けた高を低く制限されることがあり、PCげたのけた高を限界までに制限したパイプレストレス方式PCげたの適用も増加してきている。また、一方では、耐震性、走行性、耐久性の向上のために橋梁の連結化・連続化が一般に求められている。

プレキャストPCげたの連結構造による連続化は、プレキャストげた端部から突出させた鉄筋を重ね継手にて連結し、場所打コンクリートにて一体化した構造である。これはプレキャストげた架設のメリットを生かし、簡単かつ経済的に連結げたが施工できることに利点がある。

(図-1,2参照)

しかしながら、けた高を制限した橋梁については、連結部の構造高が低くなり連結鉄筋の量が増大し、設計・施工上ともに困難になる為、一般に連結化は見送られてきた。

近年、コスト縮減などを反映して、ひび割れを許容するPRC構造が一般化されつつあり、けた高が低い連結部の構造についても、PRC構造とすることが考えられる。連結部のPRC構造は、施工可能な範囲の連結鉄筋を配置した連結部に必要最小限のプレストレスを付与することによって、ひび割れ特性を改善し、耐久性を確保しながら、施工性と経済性を満たすものである。本研究は、けた高が制限されたPC橋の連結化を可能とするPRC連結構造の性能を実験的に確認することを目的とした。

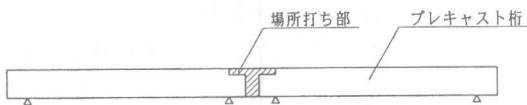


図-1 連結げたの構造

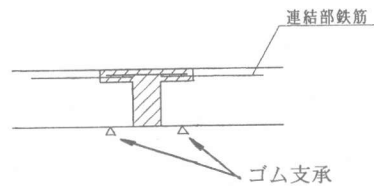


図-2 連結部の構造

- *1 バイプレストレス工法協会 技術部会 (正会員)
- *2 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 工博 (正会員)
- *3 バイプレストレス工法協会 技術部会 (正会員)
- *4 オリエンタル建設(株)本社技術研究所 主任研究員 工修

2. 試験概要

2.1 概要

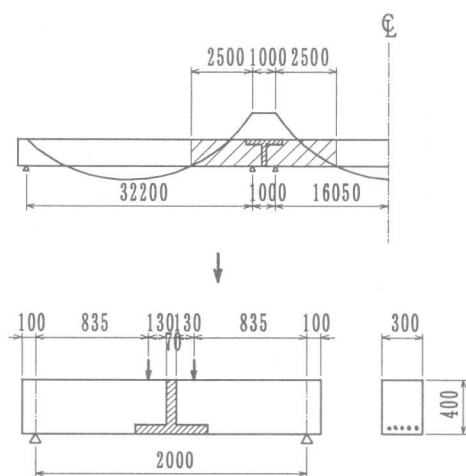
平成10年度に施工された木更津南部3号橋は、3径間連結バイプレ方式プレキャスト中空げた橋で支間32mのプレキャストPCげたのけた高を1.2mとし、支間長の1/27程度まで、けた高を制限したものである。

この橋梁をモデルに、連結部の構造についてRC連結とPRC連結2種類を試設計し、それぞれを縮小化した曲げ試験体を3体製作した。連結部に作用する設計断面力は、変動荷重である活荷重の占める割合が大きい。載荷試験は設計荷重レベルの活荷重を最大とする曲げ疲労試験とし、荷重の繰返しとひび割れの進展に着目することとした。

試験結果は試験体相互の相対的評価を基本として、RC連結構造を基準とした時のPRC連結構造の性能を比較することとした。

2.2 試験体

試験体は、連結げたの中間支点連結部の負の曲げモーメントに対する性状を把握するため、曲げモーメント交番点を支点とした単純げたとして取り出したものとした。



(寸法単位：mm)

図-3 試験体のモデル化

試験体は図-3に示すように支間32.2mの連結げたの6m部分を取り出してモデル化し、1/3に縮小したもので、連結部に2点設置されるゴム支承位置を反転して載荷点とした2点載荷の曲げ試験体とした。連結部は実橋の縮小を基本として、鉄筋の重ね継手として鉄筋径の25倍の長さを確保できる後打ちコンクリート部の寸法とした。(図-3参照)

試験体は実際の施工と同様の施工順序にて製作され、先行施工された2本のプレキャストげたを後打ちコンクリートの連結部にて接合して一体化したもので、PRC連結構造試験体には一体化された後にPC鋼棒を油圧ジャッキにて緊張して所定のプレストレスを導入した。

2.3 鉄筋およびPC鋼材配置

試験体には、実橋レベルで設計計算された鋼材量を試験体レベルに縮小配置し、鉄筋比と鉄筋引張応力度および導入プレストレスを実橋と同等となるように計画した。

実橋レベルのRC連結構造の設計計算では、設計荷重に対する許容ひび割れ幅によって連結鉄筋の量が決まり、異径鉄筋D32mmが7cm間隔にて配置する鉄筋量が必要となる。この鉄筋量は、現実的には重ね継手を基本とするRC連結構造には配置することは不可能である。縮小化した試験体レベルでは、RC連結の基本試験体CASE-1に示すように異径鉄筋D16mmを5cm間隔で配置することによって、所定のあきを確認しながら同等の鉄筋比を実現することができた。(図-4参照)

PRC連結構造には、実橋のRC連結構造に通常配置される連結鉄筋量(D25mmが12.5cm間隔程度)を最小量として配置し、プレストレス量の異なる2種類の試験体を用意した。

CASE-2はRC基本試験体と同様に設計荷重作用時の許容ひび割れ幅を満足するように設計され、必要なプレストレス量を導入したもので、CASE-3は経済性を目的にCASE-2のプレストレスの75%程度に減じたもので、設計荷重時

表-1 試験体の鋼材配置量と設計値

			CASE-1		CASE-2		CASE-3	
			実橋	試験体	実橋	試験体	実橋	試験体
コンクリート断面積 A (cm ²)			10920	1213	10920	1213	10920	1213
鋼材配置	鉄筋	配置鉄筋	12-D32	5-D16	7-D25	5-D10	7-D25	5-D10
		鉄筋量 (cm ²)	95.30	9.93	35.47	3.57	35.47	3.57
		鉄筋比 (%)	0.87	0.82	0.32	0.29	0.32	0.29
	PC鋼材	配置鋼材	-	-	4-40T	4-φ9.2	3-40T	3-φ9.2
		鋼材量 (cm ²)	-	-	21.99	2.66	16.49	1.99
		鋼材比 (%)	-	-	0.20	0.22	0.15	0.16
		軸力P (kN)	-	-	1300	140	975	105
P/A (N/mm ²)	-	-	1.2	1.2	0.9	0.9		
設計計算	設計荷重作用時	作用モーメント (kNm)	1423	49	1423	49	1423	49
		コンクリート応力度 (N/mm ²)	8.1	8.2	9.3	9.2	9.1	8.9
		鉄筋応力度 (N/mm ²)	148.1	152.0	134.4	129.3	154.8	147.5
	終局荷重作用時	設計モーメントM (kNm)	2474	85	2474	85	2474	85
		抵抗モーメントR (kNm)	3064	103	2749	101	2559	94
		安全率 F=M/R	1.24	1.21	1.11	1.19	1.03	1.11

表-2 材料仕様および特性

コンクリート	仕様	圧縮強度 (N/mm ²)		引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	鋼材	仕様	耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
		7日強度	28日強度							
プレキャスト桁	σ _{ck} =40N/mm ²	40.0	42.3	3.5	34.1	鉄筋	D10 SD295A	36.82	-	197
							D16 SD295A	36.47	-	198
連結部	σ _{ck} =30N/mm ²	36.3	38.9	3.3	28.3	P C鋼棒	φ9.3 B種 2号	1080	1138	201

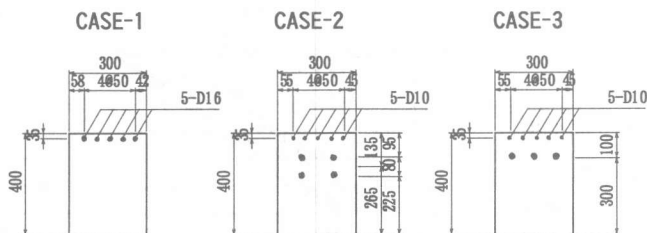


図-4 試験体断面図 (寸法単位: mm)

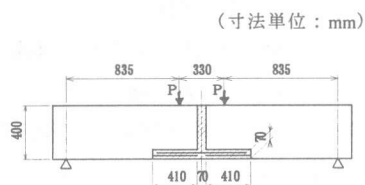


図-5 試験体側面図 (寸法単位: mm)

の連結部鉄筋の引張応力度が $\sigma_{sa} = 158\text{N/mm}^2$ (1600kgf/cm²) 以下となるように設計され、同時に終局耐力を満足させたものである。

試験体の設定にあたって、連結部の鉄筋量とプレストレス量を可能な限り実橋と相似化した。実橋レベルと試験体レベルそれぞれの鋼材量と設計計算結果を表-1に一覧し、3体の試験体の鋼材配置概要を図-4、5に示す。また、試験体に使用したコンクリートと鋼材の仕様および材料特性を表-2に示す。

2.4 試験方法

曲げ試験は、図-3に示すように、支間2mの単純げた試験体の支間中央部の下側に連結部を配置し、連結げたの支承相当位置を載荷点とする2点載荷にて荷重を与えた。設計荷重まで

の静的漸増載荷の後、設計荷重の曲げモーメントの最大・最小値を上・下限値とする200万回の繰り返し載荷を行った。なお、疲労試験には能力300kN型の疲労試験機を使用し、4Hzの加振速度にて載荷した。

疲労試験では、繰返し回数の対数比例関係を目安に、途中で14回の設計荷重までの静的載荷を実施し、各段階の変位、ひび割れ幅、鉄筋ひずみなどの履歴を測定した。疲労試験終了後、油圧ジャッキにて部材の破壊まで静的載荷を行い、終局耐力と破壊形態を確認した。

なお、各試験体の鉛直変位は、ダイヤルゲージ型変位計にて、ひび割れ幅はパイ・ゲージおよびコンタクトゲージにて測定し、支間中央部の鉄筋およびP C鋼材のひずみをひずみゲージにて測定した。

表-3 試験結果一覧表

記号	連結構造	導入 フレストレス P/A (N/mm ²)	ひびわれ発生荷重 (kN)		ひびわれ幅 (最大値: mm)		ひびわれ幅 (残留値: mm)		終局耐力 (kN)	
			計算値	実験結果	設計荷重 載荷時	200万回 載荷時	設計荷重 載荷後	200万回 載荷後	計算値	実験結果
CASE-1	RC	-	77	66	0.063	0.078	0.019	0.029	308	366
CASE-2	PRC	1.2	118 *)	114 *)	0.052	0.084 *)	0.004	0.005	292	307
CASE-3	PRC	0.9	116	114	0.072	0.101	0.014	0.023	269	316

*)但し、10万回繰り返し後の値

3. 試験結果

試験結果として、ひび割れ特性、終局耐力などの主要な結果を表-3に示した。また、載荷荷重と試験体の中央の鉛直変位について図-6と図-8に、図-7には設計荷重段階のひび割れ発生状況について報告している。

3.1 曲げ疲労試験

(1) 曲げ剛性の変化 (P~δ関係)

設計荷重段階と疲労試験での荷重Pと支間中央の鉛直変位δの関数の履歴を図-6に示す。

- ① 各試験体とも、場所打ちコンクリート部を貫通するひび割れが発生するまでは、ほぼ全断面有効の曲げ剛性を有している。
- ② CASE-1は、設計荷重の7割程度で場所打ちコンクリート部に貫通ひび割れが発生し、RC構造としての剛性低下を起すが、CASE-3は設計荷重段階まで、CASE-2は設計荷重の10万回繰り返し載荷後まで貫通ひび割れは発生せずに曲げ剛性の低下もほとんど生じない。
- ③ 貫通ひび割れ発生直後は、各試験体ともほぼ同程度の曲げ剛性の低下を示し、残留変位も同程度発生する。
- ④ 200万回疲労試験後でも各試験体とも貫通ひび割れ発生直後の曲げ剛性を保持しており、大きな剛性低下は生じない。
- ⑤ 疲労試験後の残留変位も少ないが、CASE-1とCASE-3は同程度であるが、CASE-2の残留変位は30%程度少ない。

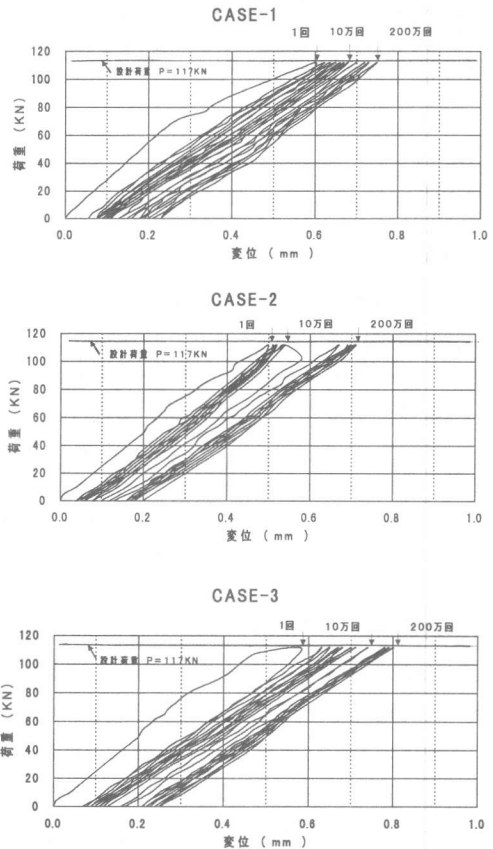


図-6 荷重と鉛直変位の履歴曲線(疲労試験時)

(2) ひび割れ性状

各試験体のひび割れ発生状況図を図-7に、場所打ちコンクリート部分に貫通ひび割れが発生した後の最大ひび割れ幅の推移を表-3に示す。

これらの結果から各試験体のひび割れ性状をまとめると以下のことがいえる。

① PRC 連結構造の CASE-2 試験体では、設計荷重段階では場所打ち部を貫通するひび割れは発生しなかった。

② 貫通ひび割れ発生後の最大ひび割れ幅は PRC 連結構造が RC 連結構造よりも大きくなった。

③ 荷重除荷後の残留ひび割れ幅は、PRC 連結構造が小さく、CASE-2 では $w = 0.004\text{mm}$ となり、ひび割れがほとんど閉じる傾向にある。

④ 疲労試験後も載荷時の最大ひび割れ幅は PRC 連結構造が大きくなるが、除荷後の残留ひび割れ幅は PRC 連結構造が小さくなる。

3.2 曲げ破壊試験

各試験体とも 200 万回の曲げ疲労試験を終了した後に曲げ破壊試験を行った。各試験体の曲げ耐力は全て計算値を上回り、疲労試験の影響もなく、十分な耐力を有していることが確認された。(表-3参照)

終局時の破壊状況は、RC 連結構造と PRC 連結構造では破壊の形態が異なった。RC 連結構造の試験体 CASE-1 は、最終段階に連結部下側に縦方向のひび割れが発生して、連結部の鉄筋の重ね継手にて付着破壊を生じて終了した。一方、PRC 連結構造の試験体 CASE-2, 3 は 2 体とも、コンクリートの圧縮縁が限界ひずみに達しても、連結鉄筋の継手部の付着切れ破壊の兆候は顕れず、急激な耐力低下も生じなかった。(図-8参照)

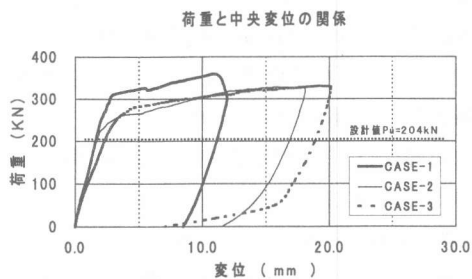


図-8 荷重と鉛直変位の関係(破壊試験時)

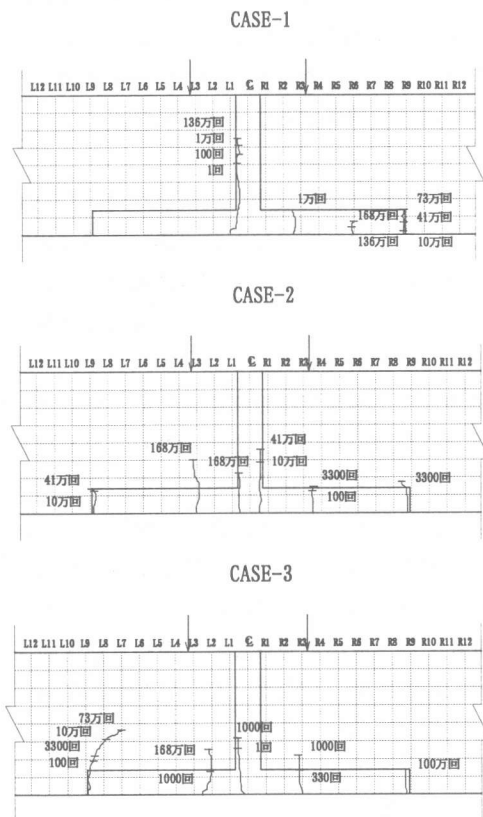


図-7 ひび割れ発生状況図(疲労試験時)

4. 結果の考察

① 連結部の貫通ひび割れ

連結部に場所打ちコンクリートを打設して、一体化する連結げた構造(図-1参照)では、連結部上側の場所打ちコンクリート部を貫通する曲げひび割れが発生し、プレキャストげたとの打継ぎ目地が開くまで、連結部の剛性低下はほとんど生じない。

PRC 連結構造では、導入されたプレストレスが明らかにひび割れ抵抗を増大させている。RC 連結構造は、静荷重レベル ($P = 71\text{kN}$) ですでに貫通ひび割れが発生しているが、PRC 連結構造では設計荷重段階まで貫通ひび割れは発生せず、初期の剛性を保持している。また、設計荷重段階でひび割れが発生しても、残留ひび割れ幅が極めて小さく、荷重が除去さ

れるとひび割れが閉じて繰り返し疲労の影響も少ないことが明らかになった。これらはプレストレスの導入されたP R C連結構造の特徴としてあらためて確認することができた。

② 連結部の鋼材量

P R C連結構造に貫通ひび割れが発生した場合には、最大ひび割れ幅がR C連結構造に比較して大きくなる場合がある。本試験ではプレストレス導入量の少ないCASE-3の最大ひび割れ幅がCASE-1よりも大きくなった。また、R C連結構造に比較して継目部の鉄筋の引張ひずみも大きくなる傾向にあった。これらはP R C連結構造がR C構造に比較して連結部の鋼材量が少なく、付着の良い異形鉄筋量が少なく、ひび割れ分散性に劣ることから、連結部継ぎ目にひずみが集中するものと思われる。

本試験では、最小鉄筋量として連結鉄筋を断面の0.3%程度配置したが、P R C連結部には必要とするプレストレス量と一定量の連結鉄筋を配置することが重要となる。⁴⁾

③ 破壊形態

連続げた橋の中間支点上に位置する連結部は活荷重の変動荷重の影響が大きく、荷重の繰返し作用の影響によって耐久性が左右される。

疲労試験終了後に実施した破壊試験では、連結部の重ね継手の早期の付着破壊が懸念されたが、P R C連結構造の2体が継手部の付着破壊を生ずることなく計算値の曲げ破壊耐力を満足する結果を示した。

連結げたの連結部のように太径の鉄筋の重ね継手部が一箇所に集中する場合は付着割裂破壊を起こすことが多い。³⁾ 本実験の限られた範囲ではあるが、P R C連結構造の試験体が終局荷重まで連結鉄筋の付着割裂破壊を生じなかったことは大いに評価されるものと思われる。本実験の縮小モデル化による連結鉄筋の付着特性の有利性を考慮して評価しても、P R C連結構造が鉄筋量を低減化し、施工性に優れた重ね継手を有効に利用できる構造であることを示している。

5. まとめ

R C連結構造はその施工性の良さから、連結鉄筋の重ね継手によって構成されている。これにプレストレスを導入したP R C連結構造の特徴を以下に示して、本文のまとめとする。

- (1) 連結部のプレストレスは後打ちコンクリート部の曲げ引張抵抗性能を高め、貫通ひび割れへの抵抗を大きくすることができる。
- (2) 施工性を低下させずに、配置可能な連結鉄筋の有効性を高めることによって、破壊形態を改善し、じん性を高めることもできる。
- (3) けた高制限を受けた連結部構造高の低い連結構造に適用することができる。
- (4) P R C連結部に貫通ひび割れを発生させる場合は、ひび割れ発生後の剛性を確保するために最小鋼材量を配置する必要がある。

本実験は限られた条件の範囲ではあるが、一定のプレストレスレベルと連結鉄筋量を配置することによって、耐久的で施工性の良いP R C連結構造が実現可能であることを確認できた。最適な配置鋼材量、プレストレス量など詳細な検討を要する事項もあるが、不十分な点は今後の課題として、さらに検討する所存である。

謝辞：本研究の試験を実施するにあたり木更津高等専門学校環境都市工学科の須賀技官と平成10年度の卒論生に多大なご協力をいただいた。ここに、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献：

- 1) 建設省土木研究所ほか：プレキャスト連結げたの設計法に関する共同研究報告書，1992.2
- 2) プレレスト・コンクリート建設業協会：P C連結げた橋設計の手引き(案)，1998.6
- 3) 池田隆盛ほか：北関東自動車道 六美高架橋の設計・施工，第8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.459-464，1998.10
- 4) 出雲淳一：P R Cはりの最小鋼材量に関する検討，土木学会論文集，No.606/V-41，pp.151-164，1998.11