ハーフプレキャストコンクリート基礎梁の一体性評価に関する基礎的研究

A FUNDAMENTAL STUDY ON UNIFORMITY OF HALF PRECAST CONCRETE FOUNDATION BEAM

佐々木建一 —*1 杉村義広 —*2
 夢田正明 —*3

Ken-ichi SASAKI —*1 Yoshihiro SUGIMURA —*2
 Masaaki TADA —*3

キーワード：
 ハーフプレキャストコンクリート, 場所打ちコンクリート, 型枠, 一体性, 曲げひび割れ

Keywords:
 Half-precast concrete, In-situ concrete, Form, Uniformity, Bending crack

Recently, method of construction using half precast concrete technique has come to public notice. But it is necessary to confirm the uniformity in the process of execution and the uniformity of structural members as finished products. In this paper, bending test results of beams are discussed for test specimens manufactured by technique of half precast concrete and in-situ concrete based on the following five measured items; 1) Relation of load-deflection and bending moment-curvature, 2) Relation of load-strain of reinforcing bars and at surface of test specimens, 3) Failure state, 4) Total width of bending cracks and 5) Electric resistance of carbon censors built in test specimens.

As the results of comparison, it is obtained that the parts of precast concrete form and in-situ concrete behave almost uniformly until the ultimate state. And also, structural property of the test specimens manufactured by technique of half precast concrete is very similar to the test specimens manufactured by in-situ concrete technique.

1. はじめに

近年、プレキャスト複合コンクリート工法（ハーフプレキャスト工法ともいわれている。以降ハーフ PCa 工法と称する）が注目され、1999 年度日本建築学会大会（中国）の材料パネルディスカッションでも取り上げられている。ハーフ PCa 工法は、従来の現場打ちコンクリート部材とプレキャストコンクリート部材の長所を取り入れたもので、工場生産における製品の高品質化と運搬における経費削減、さらに型枠工事における脱型作業を省略出来ることが特徴である。この工法は 1980 年代に型枠工事における生産性向上を目標に型枠をプレハブ化する研究開発が始まり、1980 年代後半に景気回復の急速化とともに現場作業員の不足と高齢化、熟練工の不足問題を改善する手法として建築生産現場に広く普及したといわれている¹⁾。現在では、ハーフ PCa 工法は昨今の経済状況において少数業者による高い生産性を有する工法として確立している²⁾。一方、建築生産の合理化という流れとは別に、地球環境問題の流れの中では、二酸化炭素等の温室効果ガスによる地球温暖化問題が盛んに議論され、建築生産においても施工時の環境負荷、すなわち材料資源としての熱帯雨林伐採・構造物の建築および解体における 2 次的な二酸化炭素発生などを低減する必要がある。建築施工現場で使用する型枠は膨大であり、従来からの工法で合板型枠を使用して生産活動を続けたならば、環境に負荷を与え続けるとともに、それらの素材を廃棄してしまうことになる。したがって、ハーフ PCa 工法は型枠の生産から除去にいたる過程で建築物のライフサイクル全体を通じたエネルギー削減を可能とする 1 つの工法と考えることが出来る。このような背景のもとで、現在では建築工事の生産性に関する問題と環境問題を解決できる工法として、ハーフ PCa 工法は建築および土木の施工現場において広く普及している^{3,4)}。

しかしながら、この工法は複合構造であるためプレキャストコンクリート

部分と現場打ちコンクリート部分（以後 PCa 型枠部分、場所打ち部分と呼ぶ）の施工時における充填性の確保（施工上の一体性）と、構造耐力の確保（構造上の一体性）が明確ではない点の解明が課題であると指摘されている⁵⁾。

本研究では、ハーフ PCa 工法により建築物の基礎梁を実現することを最終目的としている。基礎梁部材は他の部材と比較して地盤条件等の要因により施工が難しく、施工期間や品質に影響がやすい部分でもあり、ハーフ PCa 工法の恩恵を受ける効果は非常に大きいと考えられる。しかし、前述した施工および構造的な課題が未解決であることが工法の普及に対してかなりの障害になっているのも事実である。そこで本研究では、構造的な一体性に注目し、PCa 型枠部分と場所打ち部分からなる梁部材を製作して曲げ試験を行い、破壊までの構造上の一体性を観察と計測によって検証した結果を報告する。なお、検証するにあたり試験体中央における①たわみと曲率、②鉄筋および試験体表面に生ずる歪み、③破壊状況について構造上の一体性を検討した。さらに、試験体の純曲げ区間に生じる曲げひび割れに着目し④曲げひび割れの挙動と、それに連動した⑤カーボンセンサの電気抵抗値を計測し比較・検討することでハーフ PCa 梁の構造上の一体性を検討した。④に関して、試験体の曲げモーメントが大きくなる主要な区間（1m）においてはパイ型変位計を 105mm 間隔で千鳥に連続配置し曲げひび割れを漏れなく計測することを試みた。また、⑤は筆者らがこれまで行ってきた既製コンクリート杭の健全性モニタリングの研究^{6,7)}で用いた炭素繊維を素材とするカーボンセンサを適用したものである。あらかじめコンクリートにカーボンセンサを内蔵させ、電気抵抗値を計測することでコンクリートがひび割れなどの損傷を受けるとカーボンセンサも損傷を受け電気抵抗値（以後、抵抗値とする）が増大する原理を応用している。この計測は特に破壊時付近に強力な支援となることが予想されるので、④とあわせて曲げひび割れ発生から破壊までの挙動

*1 ㈱穴吹工務店 博士(工学)
 (当時東北大学工学研究科都市・建築学専攻 博士課程)
 (〒760-8520 香川県高松市藤塚町1-11-22)

*2 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

*3 前田製管㈱ 部長

*1 Anabuki Construction Inc., Dr. Eng.

*2 Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

*3 Maeta Concrete Industry Ltd.

表1 試験体一覧

試験体名	主筋		主筋断面積		主筋比		あばら筋	あばら筋断面積	あばら筋間隔	あばら筋比
	上端	下端	a_t (cm)	a_c (cm)	P_t (%)	P_c (%)		a_w	S (mm)	
hPC-V-50-1	3-D13	3-D13	3.81	3.81	0.42	0.42	D6	0.64	105	0.2
hPC-V-50-2	3-D13	3-D13	3.81	3.81	0.42	0.42	D6	0.64	105	0.2
hPC-H-50-1	3-D6	3-D6	3.50	3.50	0.43	0.43	D6	0.64	105	0.2
hPC-H-50-2	2-D13	2-D13	3.50	3.50	0.43	0.43	D6	0.64	105	0.2
hPC-H-50-3	2-D13	2-D13	3.50	3.50	0.43	0.43	D6	0.64	105	0.2
RC-1	3-D13	3-D13	3.81	3.81	0.42	0.42	D6	0.64	105	0.2
RC-2	3-D13	3-D13	3.81	3.81	0.42	0.42	D6	0.64	105	0.2

試験体寸法 幅300mm 高さ300mm 長さ3,500mm, t は引張側, c は圧縮側を示す
ひび割れ発生荷重27.6kN, 長期設計荷重37.6kN(34.6kN), 短期設計荷重
54.1kN(45.0kN), 終局荷重91.1kN(86.9kN) ()はhPC-H-50シリーズを示す。

表2 コンクリート強度試験結果

試験体名	部位	圧縮 σ_c (N/mm ²)	割裂 σ_t (N/mm ²)
hPC-V-50-1	型枠	30.2	2.92
	場所	39.7	3.40
hPC-V-50-2	型枠	37.5	3.30
	場所	39.2	3.30
hPC-V-50-3	型枠	37.5	2.72
	場所	43.8	2.74
hPC-H-50-1	型枠	37.2	2.92
	場所	39.1	3.40
hPC-H-50-2	型枠	35.0	3.30
	場所	38.4	3.30
hPC-H-50-3	型枠	37.3	2.72
	場所	37.6	2.74
RC-1	場所	38.6	2.99
RC-2	場所	35.0	3.37

表3 鉄筋材料試験結果

鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)
D13	361	516	23
D6	309	480	30

表4 載荷荷重階

サイクル	最大荷重	備考
1	30kN	曲げひび割れ発生
2	40kN	長期設計荷重
3	60kN	
4	60kN	短期設計荷重
5	60kN	
6	80kN	下端筋降伏
7	部材角1/100	たわみ15mm
8	部材角1/50	たわみ30mm
9	部材角1/20	たわみ75mm

を比較することに重点をおいた。

2. ハーフPCa基礎梁の概要と製作

2.1. ハーフPCa基礎梁の概要

本研究で製作したハーフPCa基礎梁の概要を図1に示す。この工法の施工順序は、あらかじめ工場内であばら筋を配置して製作された(あばら筋は突出している)PCa型枠板を現場に搬入し、現場にて捨てコンクリート上の所定の位置に向かい合うように置き、突出しているあばら筋を結束後、あばら筋の内側に主筋を配置して結束線で固定し、場所打ち部分のコンクリートを打設して基礎梁を完成させるものである(図1a)。

2.2. ハーフPCa基礎梁の製作

PCa型枠部分(幅50mm, 高さ300mm, 長さ3,500mm)は、自重と運搬および組立て時の損傷を考慮し、組立て補強筋として異型鉄筋(D6, SD295)を長辺方向に3本、短辺方向にはあばら筋を兼ねて105mmピッチで格子状に配置し、交差する部分で結束線により結束した(図1b)。PCa型枠本体のコンクリート打設に際して、組立て補強筋はあらかじめPCa型枠板の厚さを確保できるように等辺山形鋼(L-50×50×5×6.5×3)で縁取りされている土台に載せ、丸型スペーサーでかぶり厚さを確保した後、コンクリート(設計基準強度30N/mm²)を打設した。その後振動機による締め固めを行い、蒸気養生(60℃, 6時間)を経て屋外に14日間静置した(図1c)。コンクリート強度が所定強度に達した後、PCa型枠2枚を所定の位置に(試験体の幅が300mmになるように)向かい合わせて設置し、PCa型枠から伸びるあばら筋を重ねて結束線で結束した(図1d)。その後、主筋(上端筋・下端筋とも3-D13, SD295)を通し配筋し主筋とあばら筋が交差する位置で緊結した後、コンクリート(設計基準強度30N/mm², PCa型枠と同じ)を打設して試験日(材齢28日)まで大気中にて養生を行った。

3. 実験概要

試験体の一覧を設計諸元とともに表1に、試験体断面を図2に示す。試験体はPCa型枠を左右に配置した場合をhPC-Vシリーズ、上下に配置した場合

(a) ハーフPCa基礎梁のイメージ

(b) 組立て補強筋

(c) PCa型枠部分

(d) 試験体本体の製作

図1 ハーフPCa基礎梁のイメージ及び製作過程

図2 試験体断面図

をhPC-Hシリーズ(以後、単にVシリーズ, Hシリーズと略記する), 在来工法の完全場所打ちによるものをRCシリーズとする。試験体のばらつきを考慮してVおよびHシリーズは各3体, RCシリーズは2体, 合計8体を製作した。試験体材料の強度等を表2および表3に示す。本実験で、梁材として扱うのに断面を正方形としたのは、一体性として最も不利な場合として90°回転させたHシリーズを想定し、他のシリーズと比較するために断面形状としては同一であることを意図したからである。実際には、このような使い方はしないので、一体性の厳密な比較はVシリーズとRCシリーズが対象となる。なお、PCa型枠の内側表面(場所打ちコンクリートと接する面)にはシアコッター等は設けず、金ごてで仕上げただけの処理方法を取っている。

加力方式は、支点間隔3m, 載荷点間隔1mとする単純梁2点曲げ試験とした(図3)。載荷は数段階に分け、最大荷重を増大させながら載荷と除荷を繰り返す、最終的に試験体中央のたわみが75mm(部材角R=1/20)になるか、それを超えるまで継続した(表4)。計測項目は、試験体表面歪み測定用歪みゲージ(Vシリーズでは左右PCa型枠部分と場所打ち部分上下各面で3点ずつ合計6点(図3b, 図3c)。以後、RCシリーズとも共通させて左右表面歪み上下, 中央表面歪み上下と略記する。), Hシリーズでは中央表面歪み上下の2点, 鉄筋歪み測定用歪みゲージ(VシリーズとRCシリーズでは共通して左右鉄筋歪み上下4点[左右PCa型枠部分に対応]と中央鉄筋歪み上下2点(図2および図3a), Hシリーズでは中央鉄筋歪み上下の2点), 標点距離300mmの曲率測定用パイ型変位計(VシリーズとRCシリーズでは共通して左右表面曲率上下4点[PCa型枠部分に対応]と中央表面曲率上下2点(図3bおよび図3c), Hシリーズでは中央表面曲率上下2点), 標点距離100mmの界面の幅・ずれ測定用パイ型変位計20点(試験体中央・載荷点と支点の中

図3 載荷と計測の概要

表5 実験結果 [荷重P(kN)とたわみδ(mm)]

試験体名	曲げひび割れ時		主筋降伏時		終局時		破壊状況
	P	δ	P	δ	P	δ	
hPC-V-50-1	31.3	2.43	86.6	11.83	105.0	75.00	圧壊
hPC-V-50-2	31.3	2.45	80.6	10.75	105.3	75.00	圧壊
hPC-V-50-3	26.1	2.01	80.3	11.66	96.0	70.00	圧壊
hPC-H-50-1	30.0	1.92	74.4	18.00	95.5	*	圧壊
hPC-H-50-2	35.0	2.46	70.6	13.42	103.3	79.50	圧壊
hPC-H-50-3	30.0	2.21	73.7	14.57	97.9	78.40	圧壊
RC-1	25.4	1.44	84.9	11.27	105.1	76.72	圧壊
RC-2	20.0	2.09	85.0	12.56	101.8	78.54	圧壊

*変位計が破壊するのを避ける目的で変位計を取り外したため計測できなかった。

間、支点と端面の中間の上下界面、図3bの①～⑤、標点距離120mmのひび割れ測定用パイ型変位計33点(試験体下面、図3c、ただしHシリーズは11点)、カーボンセンサ(VシリーズとRCシリーズのみ、引張側の左右鉄筋下[PCa型枠部分に対応]と中央鉄筋下の3点、図3a)、変位計(中央と支点の3点、図3d)である。ひび割れ測定用パイ型変位計は左右下[PCa型枠部分]と中央下[場所打ち部分]において、載荷点区間1m内のひび割れはもれなく抽出するようにパイ型変位計を7.5mmづつ重複させながら千鳥に連続配置している。

4. 実験結果

実験結果を表5に示す。曲げひび割れ発生時は、試験中に目視でひび割れが確認された荷重とそれに対応するたわみであり、主筋降伏時は歪みゲージを貼った主筋の歪み値が急激に増加を示した荷重とそれに対応するたわみを示している。ひび割れ発生荷重においては、RCシリーズで2割程度、他シリーズで2割弱程度のばらつきが生じている。主筋降伏荷重はRCシリーズとVシリーズでは85kN前後であり、たわみは11～12mm付近に集中している。また終局荷重においては105kN程度を示す試験体が多く、ほぼ同様な傾向にあることが確認できる。一方、Hシリーズは、ひび割れ発生荷重は他シリーズとおおむね同じ荷重を示しているが、主筋降伏荷重および終局荷重は明らかに小さく、主筋降伏時のたわみは大きくなっている。これはHシリーズの配筋が、RCシリーズおよびVシリーズのものと異なるためである。したがって、以後の一体性の詳細な比較検討ではVシリーズではhPC-V-50-1を、RCシリーズではRC-1を代表試験体として選定し相互比較を行い、Hシリーズは、破壊状況についてのみ報告することとする。

4.1. たわみおよび曲率による比較・検討

VシリーズとRCシリーズの荷重-たわみ関係を図4に、曲げモーメント-曲率関係を図5に示す。たわみに関しては両シリーズとも最終状況までほぼ同一の履歴を描いている。曲率は、図5aと図5bの包絡線を比較すれば終

図4 荷重-たわみ関係

図5 曲げモーメント-曲率関係

図6 荷重-歪み関係 (Vシリーズ)

図7 荷重-歪み関係 (RCシリーズ)

局荷重時および残留値に多少の差異が生じている程度で全体としては類似した関係にあるとみられる。各位置ごとのM-φ関係の比較では、RCシリーズで最終除荷時にわずかな差が生じている以外は、ほぼ同一の履歴を示している。したがって、変形形状の点から見るとVシリーズのPCa型枠部分と場所打ち部分は一体性を確保しているといえ、RCシリーズともよく対応しているといえる。

4.2. 鉄筋歪みと表面歪みによる比較・検討

VシリーズとRCシリーズにおける荷重-歪み関係を図6、図7に示す(変化点となる荷重を線表示)。まず、Vシリーズについてみると30kN付近あるいはそれを少し超える荷重段階までは、左右、中央とも上下面の表面歪みおよび鉄筋歪みはほぼ対称性を示していることがみられる。曲げひび割れが生

図 8 (a) 試験体 RC-1 最終最大荷重 105.1kN, 最大たわみ 76.72mm, 最終破壊状況 試験体上部圧壊

図 8 (b) 試験体 V-50-1 最終最大荷重 105.0kN, 最大たわみ 75.00mm, 最終破壊状況 試験体上部圧壊

図 8 (c) 試験体 hPC-H-50-2 最終最大荷重 103.3kN, 最大たわみ 79.50mm, 最終破壊状況 試験体上部圧壊

じた後は、特に曲げ引張り側（下側）の表面歪み（図 6a）および鉄筋歪み（図 6b）の履歴が崩れだし、50kN 付近では中央の歪みが左右の歪みよりやや大きく、80kN 付近で中央における表面歪みと鉄筋歪みがそれぞれ 4000μ 、 2000μ に達した後は歪みが急増するか、値の信頼性を失うに至っている。曲げ圧縮側（上側）の歪みについては、85kN を超えたあたりからは表面歪みは圧縮側を保持しているのに対して（図 6c）、鉄筋歪みは圧縮側から引張り側に転じていることが特徴的である（図 6d）。これは、中立軸が上側鉄筋位置よりもさらに上側に移動したことを暗示している。左右と中央の比較では、表面歪みは大差ない変化を示しているのに対し（図 6c）、鉄筋歪みは左右での値が中央よりも引張り側への進行が早い（図 6d）。その後、100kN を超えても表面歪みは圧縮歪みを保ち（図 6c）、荷重が上がらない終局の状態では 3500μ 程度に達しており圧壊に達した状態にあったと判断できる（表 5 参照）。一方、鉄筋歪みはさらに急増して、除荷後でも中央で 1100μ 、左で 2000μ 程度、右で 2800μ 程度の引張り残留歪みが残っており（図 6d）、左右の鉄筋歪みの進行が早くなっている。したがって、終局荷重時では中立軸は上側の表面と鉄筋位置との間に移動しており、除荷後もほとんどそのままの状態が残留したものとして推定できる。

一方、RC シリーズは曲げひび割れが生じた以降も、歪みが急増する 80kN 付近までは線形的に歪みが進行し、曲げ引張り側（下側）の表面歪みと鉄筋歪みがそれぞれ 4000μ （図 7a）、 2000μ （図 7b）に達した後急増している。また、左右と中央の歪み変化はほぼ同等であり、V シリーズの中央ともよく対応している。圧縮側（上側）の最終除荷時での表面歪みにおいて残留歪みに差が生じていることがみられるが（図 7c）、鉄筋歪みでは終局荷重時で 700μ 程度、残留歪みで 1100μ 程度に達しているものの（図 7d）、左右と中央がほぼ同一履歴を示しており一様な挙動を示している。

4.3. 最終破壊状況の比較・検討

最終破壊状況の比較を行うため、実験終了後各シリーズの最終状態を写真撮影した結果を図 8 に示す。ひび割れは、どの試験体も載荷点間およびその周辺に集中している。RC シリーズ（図 8a）では、比較的大きなひび割れがおおむね等間隔であればら筋に沿って 11 本程度生じている。V シリーズ（図 8b）は RC シリーズのようにおおよそあばら筋の周辺に大きなひび割れが発

生しているほか、図では読み取れない程度の比較的小さなひび割れがいくつか生じている。一方、H シリーズ（図 8c）では試験体底面にあたる PCa 型枠部分とその内側の場所打ち部分でひび割れが連続しないもののみみられる。この現象は同シリーズにおける他の 2 つの試験体でも認められている。また、終局状態に近い段階では上界面で滑りが生じ、図示したように最終的には試験体両端面に斜めひび割れが生じていることが特徴である。

4.4. 曲げひび割れの挙動に関する比較・検討

4.4.1. 試験体下面のひび割れ状況

試験終了後に観察スケッチした V シリーズと RC シリーズにおける試験体下面のひび割れ状況を図 9 に、各 120mm パイ型変位計の計測区間とともに示す。なお、図 9 中のひび割れを示す線はひび割れの位置のみを示すものであり、ひび割れ幅の大きさは反映されていない。また、図 8 の写真と図 9 中の右側面が対応している。RC シリーズでは、ひび割れはほぼあばら筋に沿って主筋方向と垂直な方向に生じている。一方、V シリーズでは RC シリーズと同じくあばら筋に沿って主筋と垂直方向に生じているほか、PCa 型枠との境界付近では場所打ち部分と連続しないものが生じ、界面を境に分散し PCa 型枠部分でひび割れの数が増える傾向（図 9a の左 1、左 5、左 9 など）が見られるのが特徴である。

4.4.2. 左右と中央のひび割れ幅総和による比較・検討

試験体下面に生じる個々の曲げひび割れを左右と中央で計測した結果、各位置での荷重-ひび割れ幅関係がほぼ一致したのは、11 箇所の計測区間中 V シリーズは 5 点、RC シリーズでは 8 点であった。一致しなかった V シリーズの 6 計測区間を図 10 に示す。図 9 との関係の詳細に検討してみると、計測区間 1 ではひび割れは左 1 を通り中 1 を迂回して右 1 に至っているが、左 1 ではひび割れが 2 本、さらに左 1 下にも 1 本、中 2 からも 1 本生じている（図 9a）。左 1 では計測範囲外に生じたひび割れが優勢であるため、最終除荷時でのひび割れ幅の大きさは右 1、左 1、中 1 の順番になったと思われる（図 10a）。計測区間 2 では第 7 サイクルまでは左 2、中 2、右 2 に生じるひび割れが優勢で各列のひび割れ幅はほぼ同等に進行していたが、第 8 サイクル以降は左 2 と中 2 の間で左 1 へ分岐するひび割れが優勢になり左 1 へひび割れの進行が移ったため除荷時には左 2 が小さく他の部分と 1mm 程度の差が生じたと思

図9 試験体下面曲げひび割れスケッチ

われる(図10b)。計測区画5では、ひび割れが左5に2本、中5と右5には1本生じている。第7サイクルで左5に計測区画6から分岐するひび割れが加わったため最終除荷時では左5が大きな値を示したと思われる(図10c)。計測区画6では、左6と中6の中間付近から左5へひび割れが加わったため左6のひび割れ幅はあまり進展せず最終除荷時では中6と右6より小さくなっている(図10d)。計測区画8では第9サイクルで中7と右7を通過するひび割れが中8にも生じたため中8の最終除荷時のひび割れ幅が4.4mm程度と大きくなっている(図10e)。計測区画10では左10のバイ型変位計取付けコマ直下にひび割れが生じ、ひび割れ幅を十分に計測できなかったため他と比べて左が小さくなっている。

以上から、ひび割れが計測区間に分岐する場合やバイ型変位計が試験体に固定されずに完全に計測できない場合を除いて、同一計測区間に生じるひび割れ幅は載荷の初期段階では左右と中央の各位置で一致するが、主筋が降伏し変形が急激に進行するようになるとひび割れの分岐による影響が生じて各位置でのひび割れ幅は一致しなくなる場合がある。しかし、当初計測されていた計測区間から外れて分岐したひび割れは他の計測区間で計測されていることが多いので同列における11箇所のひび割れ幅の総和を用いれば全体的な一体性の評価には有効であると思われる。

そこで、VシリーズおよびRCシリーズにおける左右および中央各列の11計測区間の曲げひび割れの総和を求めた履歴関係を図11a、図11bに、各サイクルの最大荷重時および除荷時の曲げひび割れの総和関係を図11c、図11dに示す。なお図11dにおいてRCシリーズは第7サイクルと第8サイクルは

図10 各計測区間における荷重-ひび割れ幅関係 (Vシリーズ)

図11 荷重-ひび割れの総和関係

載荷を行わなかったため、代わりに第9サイクルにおける部材角1/100と1/50にあたるひび割れ幅総和を示している。計測区画1mに生じた曲げひび割れの総和は、VシリーズおよびRCシリーズでは短期設計荷重にあたる60kNの繰返し載荷(第3~5サイクル)まではおおむね一致しているといえ、この傾向は80kN(第6サイクル)まで続いている。Vシリーズでは部材角1/100(たわみ15mm)に対応する第7サイクルおよび部材角1/50(たわみ30mm)に対応する第8サイクルには最大荷重時と左右と中央にわずかな差を生じ始め、部材角1/20(たわみ75mm)の第9サイクルになると最大荷重時に±3mm程度、除荷時に±2mm程度の差が生じている(図11c)。しかし、計測区画1の左1と中1でひび割れがバイ型変位計の計測範囲外に生じた(図9a)ため計測されていないことを考慮すれば荷重-ひび割れ幅の総和関係はおおむね類似しているといえる。一方、RCシリーズでは第9サイクルの終局荷重付近で0.9mm弱、除荷時に0.6mm弱の差を生じている以外は左右と中央各列のひび割れ幅の総和はほぼ同様な履歴を示しているといえる(図11d)。

表6 ひび割れ幅

計測 範囲	86kN時			0kN時		
	PC左	場所打	PC右	PC左	場所打	PC右
1	0.29	0.14	0.43	0.10	0.02	0.11
2	0.34	0.44	0.52	0.11	0.18	0.20
3	0.18	0.18	0.16	0.05	0.04	0.03
4	0.32	0.33	0.35	0.12	0.12	0.12
5	0.59	0.38	0.37	0.32	0.19	0.16
6	0.58	0.95	1.01	0.47	0.72	0.74
7	0.28	0.30	0.30	0.08	0.07	0.08
8	0.37	0.31	0.19	0.13	0.09	0.05
9	0.27	0.26	0.30	0.07	0.07	0.09
10	0.48	0.61	0.60	0.29	0.36	0.34
11	0.40	0.35	0.36	0.15	0.10	0.10
合計*	1.65	1.56	2.12	1.08	1.08	1.28

* カーボンセンサに損傷を与えたと判断した計測範囲の値の合計を示す

4.5. カーボンセンサによる抵抗値の比較・検討

V シリーズと RC シリーズの荷重-カーボンセンサの抵抗値関係を図 12a, 図 12b に示す。V シリーズではカーボンセンサの抵抗値は第 7 サイクルの 86kN で急増し、除荷時には中央 [場所打ち部分] と左 [PCa 型枠部分] ではほぼ同じ値を示し、右 [PCa 型枠部分] では 4 倍程度の値となっている。これは図 11a で右の残留ひび割れ幅の総和が大きかったことに対応している。RC シリーズでも第 7 サイクルの 85kN 付近で 3 箇所のカーボンセンサ抵抗値が変化し、荷重の継続とともに増大し、完全に破断に至ったため、残留抵抗値は無限大という他は計測できなかった。したがって、カーボンセンサの抵抗値の上昇過程と残留抵抗値の両者を計測できた V シリーズについてひび割れ幅と抵抗値の関係を詳細にみると以下のとおりである。センサに使用した炭素繊維 (DIALEAD-K13A10, 引張強度 2600Mpa, 弾性率 790Gpa, いずれもカタログ値) の破断伸びは 0.36% である。よって、ひび割れ測定用パイ型変位計の標点距離が 120mm であることより、試験体のひび割れ幅が約 0.44mm を超えるとカーボンセンサに破断が生じ抵抗値が上昇することになる。表 6 に示したひび割れ幅の実験結果から、86kN 時で 0.44mm を超えた計測点は左 [PCa 型枠部分] で 3 カ所、中央 [場所打ち部分] で 2 カ所、右 [PCa 型枠部分] で 3 カ所であり、それぞれ合計ひび割れ幅が 1.65mm, 1.56mm, 2.12mm となっている。また、除荷時にはそれぞれ 1.08mm, 1.08mm, 1.28mm となっている。この結果から、最大荷重時において右 PCa 型枠部分が他部位より大きなひび割れを生じたためにカーボンセンサの損傷も大きく、抵抗値が突出したことが説明できる。

5. 結論

以上、あばら筋を内蔵した PCa 型枠を使用するハーフ PCa 梁部材の曲げ実験を行った結果から得られた結論を列記すると、以下のとおりである。

- ① V シリーズと RC シリーズでは、目視での確認によるひび割れ発生荷重に 2 割程度のばらつきが生じたが、主筋降伏荷重とそれに対応するたわみ、終局荷重についてはおおむね同様な値を示した。一方、H シリーズは配筋の差による耐力低下が認められた。
- ② V シリーズと RC シリーズの、各サイクルにおけるたわみ・曲率の履歴関係はほぼ同等である。また、V シリーズの中央部と端部に生じる曲率は最終状況まで同様の挙動を示した。
- ③ RC シリーズでは最終除荷時の圧縮側表面歪み以外は、鉄筋歪み、表面歪みとも左右 PCa 型枠部分と中央場所打ち部分でほぼ同様な履歴を示す。V シリーズおよび RC シリーズにおける引張側の表面歪みと中央鉄筋歪みはそれぞれ同程度の歪み値に達した以後に急増し、両シリーズの試験体中央の応力状態は同等であると思われる。
- ④ 左右 PCa 型枠部分および場所打ち部分にそれぞれ配置した 11 箇所のパイ型変位計によるひび割れ幅総和の履歴関係は、V シリーズの終局荷重

(a) Vシリーズ

(b) RCシリーズ

図12 荷重-抵抗値関係

付近で±3mm 程度、除荷時で±2mm 程度の差が生じた以外はほぼ対応し、RC シリーズの履歴曲線とも対応している。このことより、V シリーズでは PCa 型枠部分と場所打ち部分が一体的に挙動し、RC シリーズとも同等なひび割れ分布を示しているといえる。

- ⑤ V シリーズおよび RC シリーズとも 3 ヶ所に埋め込んだカーボンセンサの電気抵抗値が同一荷重で上昇し、また、左右 PCa 型枠部分と場所打ち部分の除荷時残留抵抗値の大小関係はひび割れ幅の総和の大小関係とよく対応していることから、モニタリングの可能性も確認できた。

以上を総合すると、V シリーズの PCa 型枠部分と場所打ち部分は構造的に一体性を確保しているといえ、RC シリーズとの対応性もよいと結論される。

〔謝辞〕

本研究を実施するにあたり前田製管 (株) 常務取締役の高橋則久氏 (当時宮城工場長) と宮城工場の小山裕幸氏ならびに本社技術部の増田伸也氏、今田幸人氏、田村有氏および当時東北大学学生に加賀谷和明君には、試験体の準備から実験の実施まで多大な協力をいただきました。また、清水建設 (株) 技術研究所の石井清博士、ならびに和泉研究室の稲田裕氏にはカーボンセンサの提供と有益な助言をいただきました。これらの方々への心よりの謝意を表します。

参考文献

- 1) 建築技術: 特集 型枠工事の新しい流れ, No.597, pp.96-172, 1999.11
- 2) 日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点 '96, 1996.9
- 3) 大江真平, 濱本敬治, 阿部正治, 奥村一彦: プレキャスト型枠工法による高橋脚の急速化施工—丹波綾部走路乙味川橋工事—, コンクリート工学, Vol.40, No.46, pp.22-27, 2002.6
- 4) 田口耕一, 小島博, 杉本訓洋: RC 造形装置を使用した高層 RC 造集合住宅の設計・施工, コンクリート工学, Vol.40, No.46, pp.28-33, 2002.6
- 5) 建築雑誌: 建築論壇 投稿「コンクリートと学会」および材料施工委員会からの回答, Vol.115, No.1457, pp.104-109, 2000.7
- 6) 石井清, 稲田裕, 杉村義広: 炭素繊維束カーボンセンサの開発と性能評価 杭の健全モニタリング手法の開発 (その 1), 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.129-136, 2002.7
- 7) 稲田裕, 石井清, 杉村義広, 佐々木建一: 炭素繊維束センサの杭の損傷検知に対する性能評価 杭の健全モニタリング手法の開発 (その 2), 日本建築学会構造系論文集, No.563, pp.91-98, 2003.1

[2002年10月18日原稿受理 2003年2月25日採用決定]