

U型PCa梁「クリアビーム」の開発(その2)

柱梁接合部構造性能実験

増田 安彦 米澤 健次
江戸 宏彰

U-shaped Precast Concrete Shell "Clear-Beam" (Part 2) Structural Experiments on Beam-Column Joint

Yasuhiko Masuda Kenji Yonezawa
Hiroaki Eto

Abstract

The "Clear-Beam" is a U-shaped precast concrete shell. Prestressing in the shell improves the bending behavior and constructability. R/C beams that use this Clear-Beam are suitable for long spans and enhance a building's life, as cracks and bending are controlled by the prestress.

This report describes results of structural experiments and FEM analysis of beam-column joints using prestressed Clear-Beam. The results are outlined as follows. The strength and deformation of beam-column joints are not greatly influenced by the Clear-Beam. However, under prestressing, beam deformation tends to concentrate at the beam's critical section.

概要

クリアビームはせん断補強筋を内蔵させたU型の外殻プレキャストであるが、この外殻部分にプレストレス(PS)を導入することで、軽量でありながら曲げひび割れ強度が上昇し、支保工が省略できるなど施工性が大きく改善される。同時に、このクリアビームを使用した合成梁は長期荷重に対するひび割れやたわみの発生が制御されるので、スパンの長大化や架構の長寿命化に貢献する。

本報告は、プレテンション方式でPSを導入したクリアビームを使用した場合の、柱梁接合部の短期荷重時力学性状を調べることを目的として実施した3体の内部柱梁接合部実験とFEM解析の結果について述べたものである。その結果、十字型架構の耐力・変形性状はクリアビームの有無により大きく影響を受けることはないこと、しかしながら、プレストレスを導入することで梁端危険断面に曲げ変形が集中する傾向があること等が得られた。

1. はじめに

近年、地球環境保護や廃棄物処理の問題などから、コンクリート系建築物の長寿命化が望まれている。その条件として、構造体が耐久的だけでなく、必要に応じて容易に間取り変更が可能で、用途そのものの変更にも対応できる使用性が高い構造であることが挙げられ、それらを満足する大スパン架構が求められている。

筆者らは施工性にすぐれ、耐久的でかつ大スパン架構の構築が可能な外殻プレキャスト「クリアビーム」を提案し、その施工性と純曲げ加力下の力学性状に付いて報告した^{1),2)}。本報告はクリアビームを用いた梁とRC柱の十字型接合部試験体を用いて、地震荷重時の力学性状を調べた結果について報告するものである。

2. 研究目的および実験概要

2.1 工法の概要と研究目的

本実験で用いたクリアビームにはプレテンション方式

によってプレストレスを導入している。これによって得られる長所として、(1)施工時の支保工減少、(2)長期荷重時のひび割れやたわみの制御とこれによる構造物の長寿命化、(3)ロングスパン化が可能などが挙げられる。

クリアビームは梁の内のりスパンに配置するものであり、梁端部断面はプレストレスのないRC断面となる。したがって、クリアビームを用いた場合には、地震時における梁や柱梁接合部の力学挙動や耐力性状を把握し、RC断面として設計可能かどうかを明確にする必要がある。また、梁のヒンジゾーンにおける曲げせん断ひび割れにより、プレストレスが部分的に失われることが考えられ、その喪失領域を把握しなければならない。本研究はこれらの課題に対して、十字型柱梁接合部実験およびFEM解析を実施することとした。

2.2 実験概要

2.2.1 試験体概要 試験体の概要をTable 1に、試験

Table 1 試験体の概要
Specification of Specimen

試験体	PC-FB	PC-JS	RC-FB
柱	b × D=350 × 350 (mm)		
	主筋 12-D19(SD685) 帯筋 罫-D6@80 (SD295) pw=0.45%		
梁	b × D=250 × 350 (mm)		
	St. □-D6@80 pw=0.32%		
	主筋 D16(SD345) 上端 4, 下端 5	主筋 D19(SD345) 上端 4, 下端 5	主筋 D16(SD345) 上端 4, 下端 4
クリアビームのPC鋼材	細径異形PC鋼棒:10.7mm × 3本		なし
接合部補強	罫-D6@120 (SD295) pw=0.3%		
Fc	クリアビーム Fc50, 後打ち Fc30		Fc30
(N/BDFc)	0.15 (N=540kN)		
クリアビーム	使用		なし
想定破壊モード	梁曲げ	接合部せん断	梁曲げ

Table 2 使用材料
Characteristics of Material

・鉄筋					
径	y	y	u	Es	使用部位
D19(SD685)	718	3450	918	2.08	柱主筋
D19(SD345)	400	2160	595	1.94	梁主筋 PC-JS
D16(SD345)	385	2160	582	1.90	梁主筋 PC-FB
D16(SD345)	350	1890	552	1.89	梁主筋 RC-FB
D6(SD295)	336	1830	462	1.87	せん断補強筋
10.7(SBPDN)	1460	-	1492	2.00	PC鋼棒

y:降伏強度、 u:引張強度(N/mm²)
Es:ヤング係数 (× 10³N/mm²)、 y:降伏ひずみ(× 10⁻⁶)

・コンクリート

部位	c	t	Ec
クリアビーム(PS導入時)	56.2	-	3.04
クリアビーム(試験時)	74.1	4.36	3.13
コア:PC-FB,PC-JS(試験時)	29.8	2.57	2.12
RC-FB(試験時)	35.3	2.47	2.42

c:圧縮強度、 t:引張強度(N/mm²)、 Ec:弾性係数(× 10⁴N/mm²)

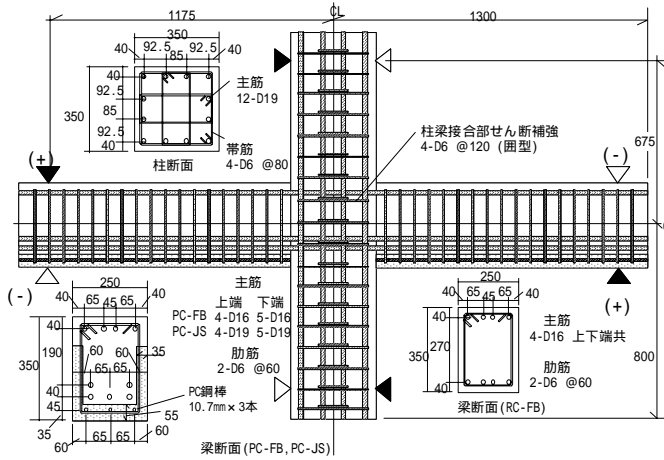


Fig.1 断面および配筋図
Sections and Reinforcement

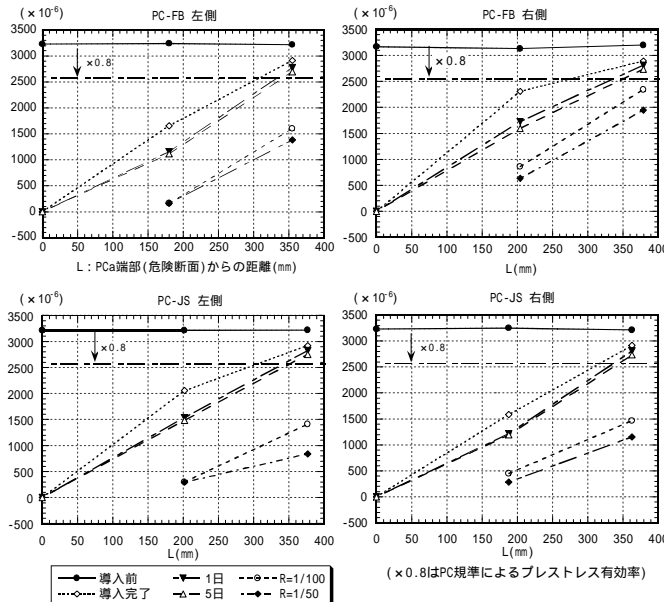


Fig.2 PC鋼棒ひずみ分布
Strain Distributions of PC-bar

体形状および配筋図をFig.1に示す。試験体は、梁にあら筋を内蔵させたクリアビームを使用し、梁曲げ破壊となるよう計画したPC-FB試験体、接合部せん断破壊型に計

画したPC-JS試験体、ならびに在来工法で製作し、PC-FB試験体と比較用のRC-FB試験体の計3体とした。クリアビームを用いた試験体では、クリアビームの厚みによって梁下端筋が断面中央へ移動し、曲げ耐力が小さくなる。これを考慮し、逆対称加力時に左右の梁の曲げ耐力を等しくするために梁下端主筋の本数を多くした。一方、在来工法のRC-FB試験体では梁の上端下端の主筋量は等しい。
2.2.2 使用材料 Table 2に使用材料の一覧を示す。PC鋼材には細径異形PC鋼棒を使用した。実大のクリアビームに使用を検討している総ネジPC鋼棒と比べ、リブ(溝)の形状や高さが異なることや、断面積に対する表面積が異なるなどの問題がある。これはプレテンション方式におけるPC鋼材の定着・付着強度を考える上で重要な問題であるが、この検討は別の機会に行いたい。

2.3 試験体製造方法

2.3.1 クリアビームの製造 クリアビームは緊張したPC鋼材にせん断補強筋と型枠をセットし、コンクリートを打込んで製作した。PC鋼材緊張力は、導入時にクリアビーム各部のコンクリート応力度が許容応力度を下回るように計画し(パーシャルプレストレスの許容応力を使用)、コンクリート打込み直前で191.4kN(63.8kN/本 × 3本)とした。脱型は材令4日で行い、材令7日でPC鋼材の緊張力を開放し、プレストレスの導入を行った。導入時クリアビームのコンクリート強度はTable 2に示している。導入直前のPC鋼材緊張力は182.7kNであった。その後コアコンクリートを打込むまで気中養生とした。

2.3.2 接合部試験体の製作 PC-FB、PC-JS試験体は全体のコンクリートを一度に打込んで製作した。RC-FBは最初に梁プレキャストと下側柱を打設し、これらを組み立てた後、柱梁接合部と上側柱を打設した。

2.4 荷重方法

荷重は左右の梁に均等に変位を与える変位制御とし、層間変形角1/400, 1/200, 1/100, 以後1/100の倍数の変位で各2回繰返す正負交番繰返し荷重とした。軸力は540kNで一定とした。

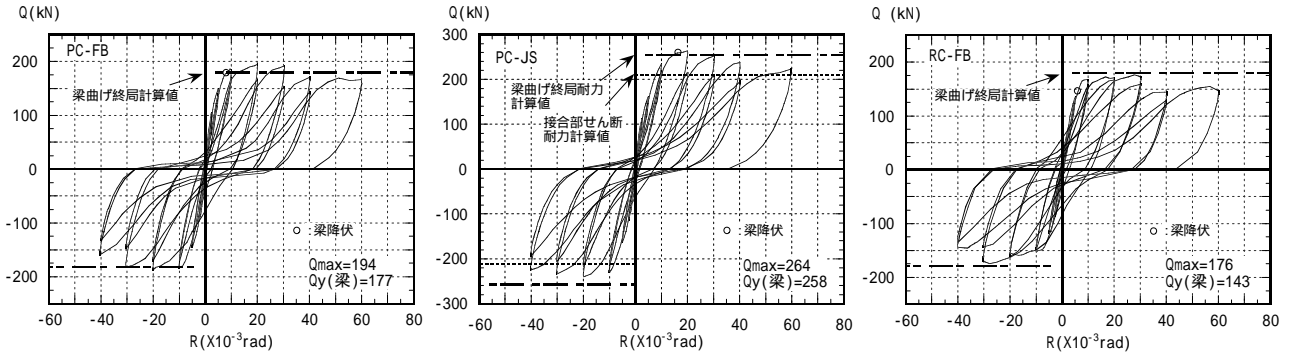


Fig.3 層せん断力(Q) - 層間変形角(R)関係
Story Shear Force - Story Drift Angle Relationships

Table 3 実験結果一覧
Test Results

試験体	PC-FB	PC-JS	RC-FB
梁曲げひび割れ	25.5	43.12	34.1
同 計算値	28.0	28.2	28.0
実験値/計算値	0.91	1.53	1.22
柱曲げひび割れ	120	111	140
同 計算値	111	111	111
実験値/計算値	1.08	1.00	1.26
梁主筋曲げ降伏	177	258	143
同 計算値	(138,162)	(202,235)	135
実験値/計算値	1.28	1.28	1.06
最大耐力実験値	194	264	176
曲げ耐力計算値	(178,219)	(254,292)	179
接合部せん断耐力計算値	210	210	249
実験値/min(曲げ,せん断)	1.09	1.25	0.98
破壊モード	接合部から主筋拔出しを伴う梁曲げ破壊	降伏後接合部せん断破壊	接合部から主筋拔出しを伴う梁曲げ破壊

層間変形に占める割合

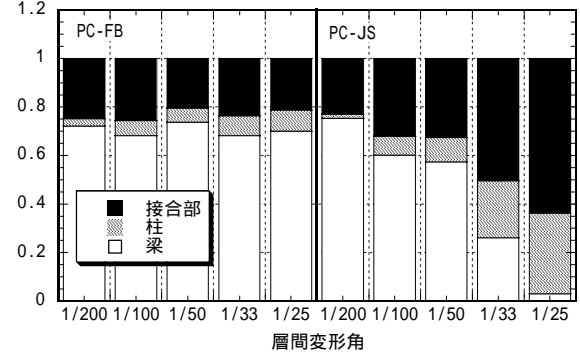


Fig.4 層間変形に占める各部の変形割合
Deformation Ratio of Structural Members to Story Drift

耐力計算値は層せん断力に換算した数値(単位 kN)

曲げ降伏・終局耐力：計算値は外殻強度を考慮するファイバーモデルによる断面解析による。正曲げと逆曲げで耐力が異なり、それぞれ括弧内に示す。

実験値/計算値は小さいほうの計算値を用いている。

接合部せん断耐力：日本建築学会終局強度型指針による。靱性保証型指針では 170kN

曲げひび割れ耐力： $M_c=1.8 \sigma_{t'} Z_e + \sigma_{t''} Z_e$ による。 $\sigma_{t'}$ はコア強度を使用

3. 実験結果および考察

3.1 プレストレス導入時ひずみ計測結果

Fig.2はクリアビーム端部におけるPC鋼棒のひずみ分布例を示す。4体を同時に製造したが、ひずみ分布に大差無く、断面端部から約400mmの位置でほぼ定常状態になっていることがひずみ分布の勾配より推定される。導入完了後のひずみの変動は、端部から200mmの位置における最初の1日が最も大きく、その後の変動はあまり生じなかった。また、同図には載荷時のひずみ分布も記入しているが、これに関しては後述する。

3.2 柱梁接合部実験の結果および考察

3.2.1 荷重 - 変形関係と破壊性状 実験結果を Table 3に、各試験体の層せん断力(柱せん断力) - 層間変形(梁に対する柱の相対変形)関係を Fig.3に、柱・梁・接合部の変形割合を Fig.4に、試験体のひび割れ状況を Fig.5に示す。

PC-FB試験体は、層間変形角 $R=0.8/100$ で梁主筋が降伏し、 $R=1/50$ で荷重がピークに達すると梁の曲げ圧壊と梁

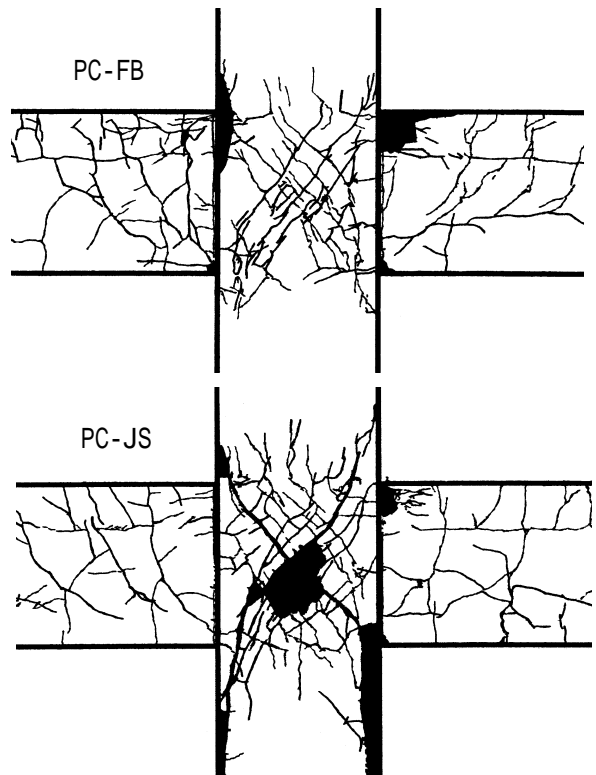


Fig.5 接合部周辺の最終ひび割れ状況
Final State of Specimens

主筋の抜け出しが顕著となり、荷重が徐々に低下した。

荷重 - 変形関係は Fig.3 に示すように、 $R=1/50$ の第1ループまでは紡錘形のループを描いたが、後打ちコンクリートが圧縮側となる梁の端部で圧壊が開始すると逆S形のループとなった。梁の曲げ圧壊は $R=1/50$ 以降、後打ちコンクリート側で繰り返し載荷に伴い進展したが、クリアビーム側にはほとんど生じなかった。

PC-JS試験体は、 $R=1.5/100$ で梁主筋が降伏し、 $R=1/50$ で荷重がピークに達した。その後、接合部せん断ひび割れが拡大しながら徐々に荷重が低下する接合部せん断破壊を生じた。

荷重 - 変形関係は、 $R=1/50$ で接合部のせん断ひびわれが拡大するとともに逆S形のループとなった。曲げ圧壊はPC-FB試験体ほど顕著ではないが、後打ちコンクリート側に生じ、クリアビーム側にはほとんど生じなかった。最終ひび割れ状況より典型的な接合部破壊であることがわかる。

クリアビームと後打ちコンクリートの一体性は、いずれの試験体も側面の打継ぎ部分にヘアクラックが生じた程度で良好であった。

Fig.4において、PC-JS試験体では層間変形が進むに従い、全体変形に占める接合部の変形割合が増加すること、PC-FB試験体では各部の変形割合がほぼ一定であること等の傾向が表れている。

RC-FB試験体は、PC-FB試験体と同様に、梁主筋の曲げ降伏後、曲げ圧壊と共に梁主筋抜け出しを伴う破壊を生じた。Fig.3の荷重 - 変形関係のループでは、PC-FB試験体と比べてスリップが少ない傾向を示しているが、これはPC-FB試験体よりも接合部のコンクリート強度が約20%高く、梁主筋強度が約10%低いことに起因していると推定される。

Fig.6はPC-FB試験体における左右の梁の荷重 - 変形関係を別々に示したものである。同図で荷重は梁に作用するせん断力を、変形は梁加力点の鉛直変形を表わす。左側の梁は下方への変形(上端主筋引張)が正、上方(下端主筋引張)が負。右側の梁は上方が正で、下方への変形を負としている。同図中で荷重低下を生じている時の加力方向は、左右いずれの梁も下端主筋が引張となっている時である。すなわち、後打ちコンクリート側の圧壊が梁の曲げ耐力の低下や架構の耐力低下をもたらしたことから、クリアビーム側は曲げ圧壊を生じにくいことが分かる。この結果は、プレストレス入りクリアビームを使用することによりクリアビーム部分に曲げせん断ひび割れが生じにくくなり、端部危険断面に変形が集中したことから、さらに断面配筋上応力中心間距離が小さいことから曲率が大きくなり、局所的な圧壊の進行が大きくなったことが原因と考えられる。

3.2.2 柱梁接合部のせん断耐力性状 Table 3に示すように、接合部のせん断耐力の実験値(PC-JS試験体)は、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針」に示されている計算式により、安全側に比較的精度良く捉えることができる。また、同「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針」

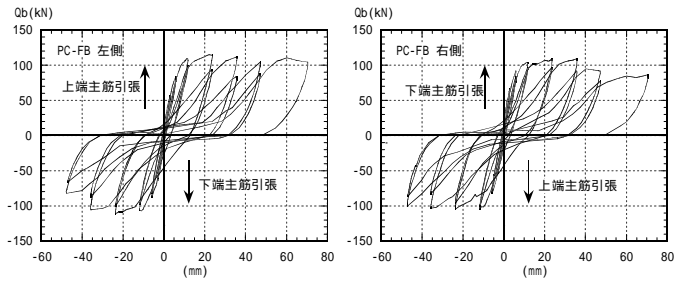


Fig.6 梁のせん断力(Qb) - 梁の変形()関係
Beam Shear Force - Beam Deformation Relationships

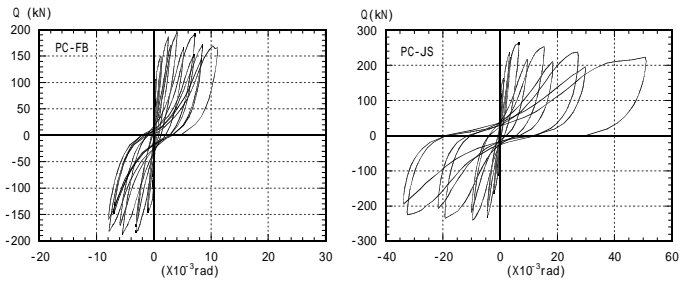


Fig.7 層せん断力(Q) - 接合部せん断変形角()関係
Story Shear Force - Joint Shear Deformation Relationships

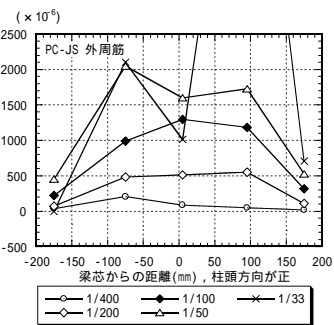
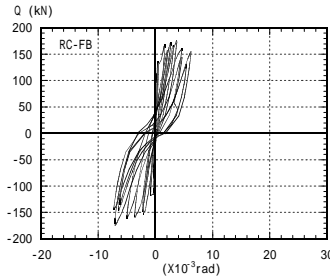


Fig.8 接合部せん断補強筋のひずみ分布
Strain Distributions on Shear Reinforcing Bar of Joint

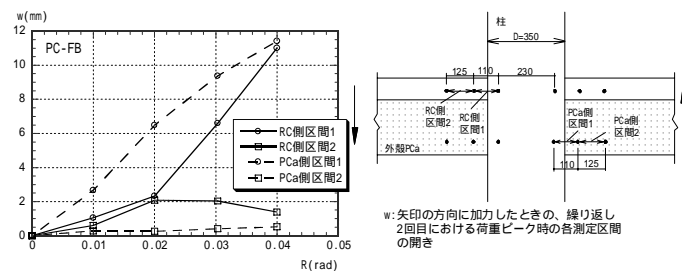


Fig.9 梁端部の主筋抜け出し量
Slip Deformation of Main Bar at Beam's Critical Section

による計算式では、さらに安全率が高くなる傾向がある。

Fig.7は各試験体の層せん断力と接合部せん断変形の関係を調べたものである。PC-JS試験体は最大耐力後、せん断変形が増大していく様子が伺える。一方、PC-FB試験体のQ- θ 関係は、RC-FB試験体と大差無く、クリアビームを使用することが接合部のせん断変形に及ぼす影響は見られない。

Fig.8は接合部内に配筋したせん断補強筋のひずみを示している。同図によれば、接合部せん断破壊を生じたPC-JS試験体が最大耐力に達し、接合部のひび割れ拡大や、かぶりコンクリートの剥落が顕著となり、ひずみが不安定となるR=1/33までは、PC-FBとPC-JS両試験体のひずみ分布に大差はなく、破壊モードの違いがせん断補強筋のひずみに及ぼす影響はあまり大きくないことが伺える。すなわち、せん断補強筋が接合部せん断耐力にあまり影響を及ぼさないとする、上記各指針をはじめとした既往の研究結果³⁾と矛盾しない結果となっている。

3.2.3 その他の変位・ひずみ計測結果 (1)梁主筋の抜け出し

Fig.9に梁主筋の抜け出しを計測した各測定区間の開き変形と層間変形の関係を示す。同図はPC-FB試験体の例を示している。上端主筋が引張となる側(図ではRC側と記載)では、最大耐力(R=1/50)以降で区間2の開きは減少傾向となり、区間1の変形が急増している。すなわち接合部及び隣接する区間2からの主筋の抜け出し量が増加していることが推定される。一方、下端主筋が引張となる側(図中PCa側)では、RC側の2区間の合計にほぼ等しい開き変形が区間1に生じており、端部危険断面に変形(ひび割れ)が集中する傾向が現れている。

(2)PC鋼棒の付着 Fig.2のクリアビーム端部のPC鋼棒ひずみ分布に層間変形R=1/100と1/50時のひずみ分布も示した。ただし、これらのひずみは後打ちコンクリート打込み前のひずみを基準として算出し、クリープや乾燥収縮ひずみはキャンセルしていない。同図より、架構の終局限界変形に近いR=1/50では、梁端部から約175mm(D/2, D:梁せい)の位置でPC鋼棒の応力はほぼ失われており、約350mm(D)の位置で応力は導入力の1/2程度に低下している。この傾向はPC-FB, PC-JS試験体とも同様であった。したがって、ヒンジゾーンでは曲げせん断ひびわれによるPC鋼棒の付着劣化を考慮して、端部から梁せい

に相当する範囲のプレストレス喪失を想定した設計が必要と思われる。

4. 解析的検討

4.1 解析概要

ここではPC-FB試験体およびPC-

JS試験体を対象としてFEM解析を行った結果を示す。試験体はFig.10に示すようにモデル化した。すなわち、コンクリートは平面要素、柱梁の主筋およびPC鋼材はトラス要素としてモデル化した。梁のクリアビームと後打ちコンクリートは別々の節点と要素で定義し、その節点間に長さを持たないリンク要素を用いた。初期ステップでクリアビームにプレストレスを導入するときにはリンク要素の剛性は零とし、外力を加えるステップでは剛性を無限大とした。主筋およびPC鋼材の付着は完全付着と仮定している。なお、解析プログラムにはFINALを使用した。

4.2 解析結果

Fig.11に層せん断力 - 層間変形関係の解析結果と実験結果を比較して示す。同図より初期剛性、ひび割れ後の剛

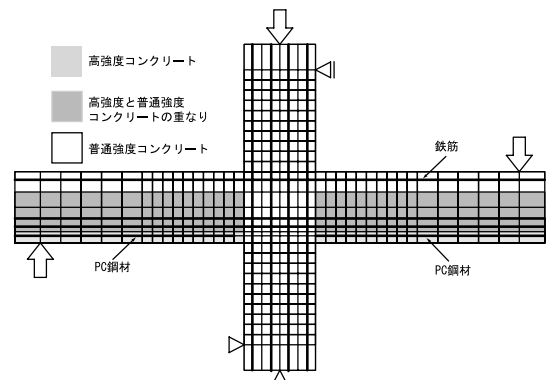


Fig.10 要素分割 Finite Element Meshes

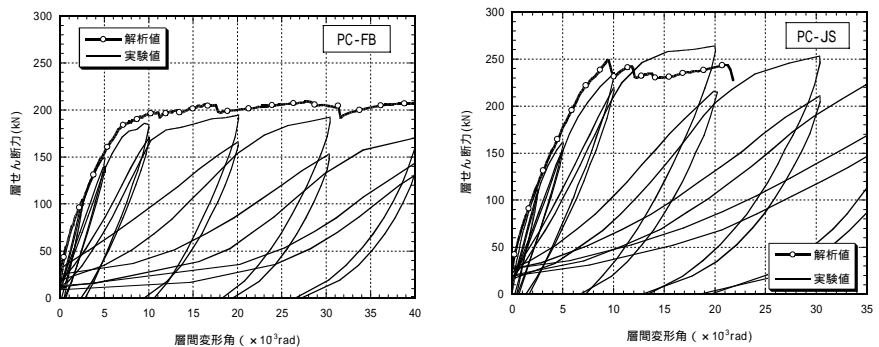


Fig.11 層せん断力(Q) - 層間変形角(R)関係 Story Shear Force - Story Drift Angle Relationships

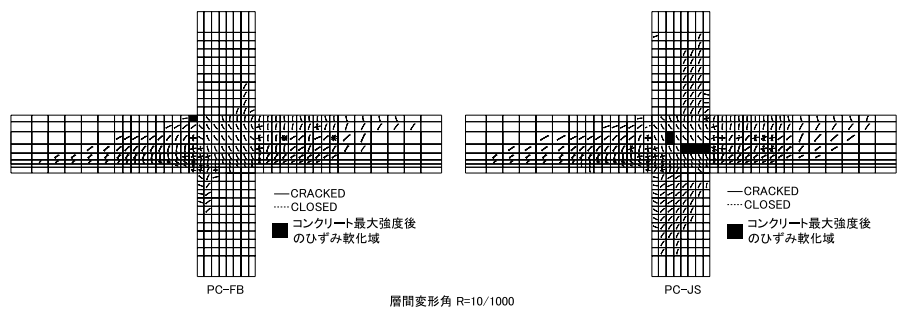


Fig.12 ひび割れ状況 Concrete Cracking state

性、梁曲げ降伏荷重、ならびに最大荷重において解析結果は実験結果を良く捉えていることが分かる。また、Fig.12は解析から得られた各試験体のひび割れ状況を示す。同図よりPC-FB試験体の梁端後打ちコンクリート部分に圧壊が生じることや、PC-JS試験体の柱梁接合部コンクリートにせん断破壊が生じる現象など破壊モードにおいても良好に実験結果を再現できていることが分かる。

4.3 数値実験

本解析モデルがクリアビームを用いた柱梁接合部の力学性状を良好に捉えることができることを確認したことにより、導入プレストレスを変数とした数値実験を実施した。対象とした試験体はPC-FB試験体で、クリアビームに導入するプレストレスをTable 4に示すレベルで変化させ、層せん断力-層間変形関係を調べた。

Table 4 数値実験一覧 Numerical Experiment

	PC-FB	CASE1	CASE2
導入力	176.5 kN	0 kN	353.0 kN
備考	基本	導入力なし	基本×2

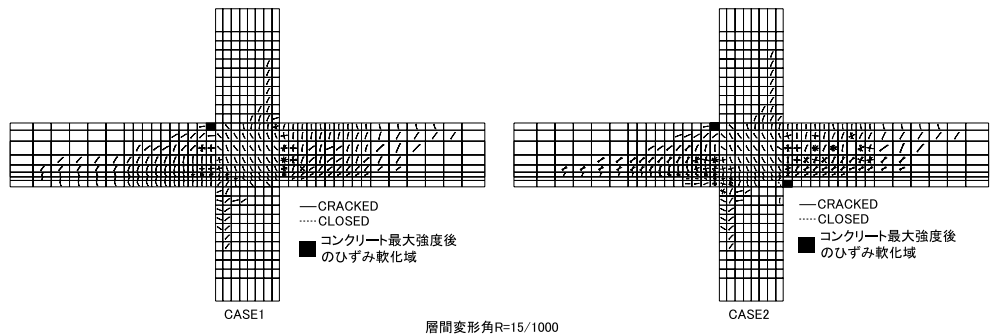


Fig. 14 ひび割れ状況 (CASE1, CASE2) Concrete Cracking state

Fig. 13に解析結果を示す。同図によれば、クリアビームに導入されたプレストレスの大きさが層せん断力-層間変形関係や梁主筋の曲げ降伏荷重に及ぼす影響は小さいことが伺える。一方、後打ちコンクリートの圧壊が生じる時の層間変形は、プレストレスを導入しない場合(R=11/1000)は導入した場合(R=7~8/1000)に比べ約1.5倍であることから、プレストレスによる梁端部への曲率集中の傾向が現われていると言えよう。圧壊による急激な耐力低下は生じていないが、あばら筋を密に配置するなど、曲げ圧縮側コンクリートをコンファインドコンクリートとする配慮が必要である。

Fig. 14はR=15/1000における損傷を比較したものである。同図によれば、導入力が大きくなるとクリアビーム側にも曲げ圧壊が生じ易くなる傾向がみられる。

5. おわりに

プレストレスを導入したクリアビームを使用した梁と在来工法による柱の十字型接合部の実験および解析より得られた結果を以下にまとめる。

- (1)クリアビームを用い、梁の曲げ降伏後、梁主筋の抜け出しを伴う曲げ圧壊を生じた試験体の耐力性状や破壊モードは、在来工法による比較用試験体と同様であった。
- (2)クリアビームを使用し、梁曲げ降伏後接合部せん断破壊を生じた試験体の接合部せん断耐力は、終局強度型指針に示されている計算式により比較的精度良く安全側に捉えることができ、梁にクリアビームを使用することが接合部せん断耐力へ及ぼす影響はほとんどみられなかった。

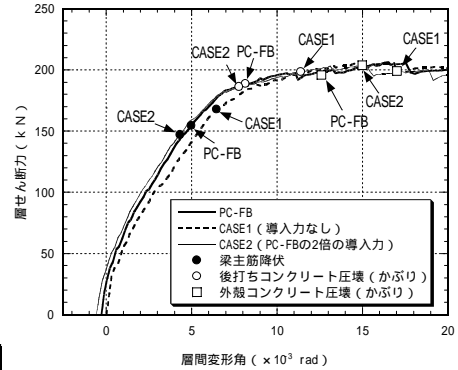


Fig.13 数値実験結果 Results of Numerical Experiment

(3)プレストレスを導入するクリアビームを使用した場合、梁下端における端部危険断面にひび割れが集中する。またクリアビーム内部に主筋を配置する場合、応力中心間距離の減少に伴い、後打ちコンクリート側に比較的早期に曲げ圧壊が生じる傾向がある。逆に高強度のクリアビーム側には圧壊はほとんど生じなかった。ただし、解析結果より、導入力を大きくした場合には圧壊が生じ易い傾向が見られた。

(4)プレテンション方式を用いてクリアビームにプレストレスを導入した場合、梁ヒンジゾーンでは曲げせん断ひび割れにより、PC鋼棒の付着劣化が生じるため、設計上の配慮が必要である。

参考文献

- 1) 杉本訓祥, 増田安彦, 江戸宏彰: U型断面PCaを用いた鉄筋コンクリート造梁部材の純曲げ実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vo.22 No.3, pp.829-834, 2000
- 2) 増田安彦, 杉本訓祥, 江戸宏彰: U型PCa梁「クリアビーム」の開発(その1) - 型枠性能確認実験および梁部材純曲げ実験 -, 大林組技術研究所報, No. 62, pp.37-72, 2001
- 3) たとえば, 後藤康明, 城攻, 柴田拓二: RC十字型柱はり接合部のせん断抵抗性状に対するせん断補強筋の効果について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11 No.2, pp.543-548, 1989