

論文

[2115] プレキャスト PC 製ラーメン隅角部の挙動に関する研究

富田充宏*¹・前川幸次*²

1. はじめに

一般に、PC製ロックシェッドなどの構造物は、プレキャストコンクリート部材を接合した組み立て工法であるため、現場工期の短縮化、構造物の高品質化などの面で有利である。しかし、PC製ロックシェッドの主桁と柱のように互いに直角に交わる部材を接合する部分は、隅角部となるためその部分が弱点となるばかりでなく、接合部に関する設計上の仮定（剛結合）の妥当性が未だ解明されておらず、II種PCの設計と同様に曲げひびわれが生じない程度のコンクリート引張強度を許して設計しているのが現状である。また、近年この種の構造物の設計では、落石による不規則的な衝撃荷重に対しては、弾性理論に基づく許容応力度法より破壊に対する安全度の確保が合理的であると考え、部材のじん性（塑性変形能）を積極的考慮したエネルギー法を基本とした限界状態設計法の必要性が指摘されており[1]、終局状態での耐力のみならず変形挙動を把握することは、設計法を確立する上で重要な要因になると考えられる。

そこで本研究では、逆L型PC製ロックシェッドに落石が生じた場合の隅角部の力学的挙動を解明するための基礎的実験として、落石覆い屋根部と柱部の接合構造を想定したプレキャストPC製ラーメン隅角部の静的実験を行い、隅角部の力学的挙動を実験的に明らかにし、接合部に関する設計上の仮定である剛結合の妥当性などについて検討する。また、剛体-ばねモデルによる非線形解析を適用し、隅角部の変形特性について実験結果との比較、検討を行う。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験供試体は、逆L型ロックシェッド屋根部に相当する鉄筋コンクリート部材（以後はり部と称す）および親柱に相当する鉄筋コンクリート部材（以後柱部と称す）を、柱部にデッドアンカー（50*50*10mmの鋼板とナット）により定着したアンボンドPC鋼棒（ $\phi 11\text{mm}$ ）を用いて図-1のようにL型に緊張一体化させた。なお、接合面には、馴染みをよくするためにモルタル（圧縮強度 517kgf/cm^2 ）を1cmの厚さに打設して仮締めし、PC鋼棒のリラクゼーションを避けるため、載荷試験直前にプレストレスを導入した。そのプレストレスの導入には、センターホール型オイルジャッキを使用した。

L型に一体化するはり部および柱部の寸法、断面および配筋は、図-2に示す通りであり、逆L型ロックシェッドの実設計例における曲げ、せん断および軸力の割合と軸力による直応力と曲げ応力の比が実験においてもほぼ等しくなるように決定した。また、供試体は、表-1に示す2グループ、計8体とした。Aグループについては、プレストレス力をPC鋼棒一本につき10tfと等しくし、PC鋼棒の長さを変化させた。また、Bグループについては、PC鋼棒の長さを60cmと一定にし、異なったプレストレス力で緊張したが、それによる接合部外縁に導入される応力は、等しくさせてある。なお、Bグループにおいてプレストレス力0.0tfの場合、その位置にPC鋼棒

* 1 石川工業高等専門学校助手 土木工学科, 工修 (正会員)

* 2 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科, 工博

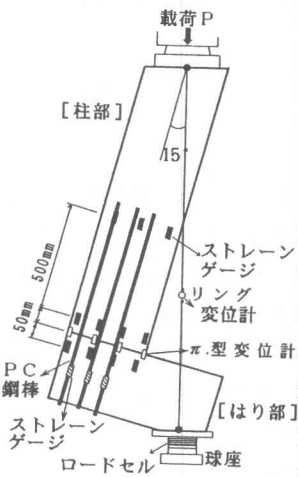


図-1 実験方法

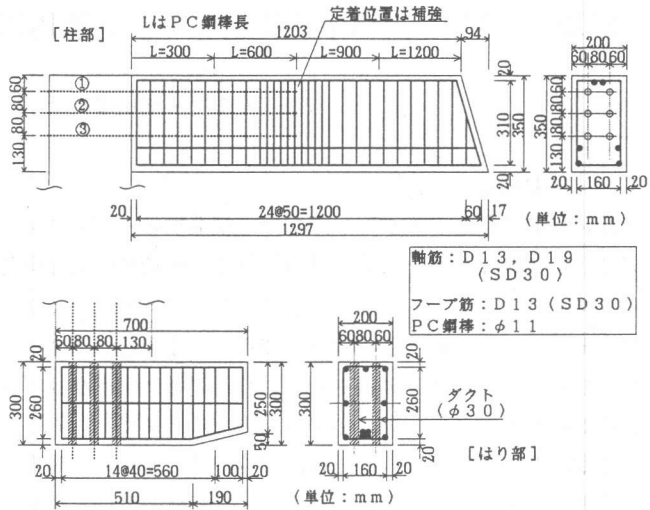


図-2 供試体寸法および配筋図

は挿入していない。表-2に使用したコンクリートおよびPC鋼棒の力学的特性を示す。

2.2 載荷方法および測定項目

載荷方法は、製作されたL型供試体を、図-1に示すようにはり部を下にして15°傾け、はり部の下に鋼板、球座、ロードセルを介してセットし、変位制御(1mm/0.5mm/min)により載荷した。測定項目としては、図-1に示すようにアンボンドPC鋼棒のひずみと、コンクリート表面のひずみ(接合面より柱軸方向に5cmの位置8箇所およびPC鋼棒定着部の3箇所)をワイヤーストレインゲージで、接合面の開き幅および縮み幅(4箇所)をπ型変位計で、また、鉛直変位を供試体の上側載荷板と下側支持板の間にピアノ線を介して取り付けたりんご型変位計で測定した。なお、測定は荷重値が約0.5tf上がるごとにラムを停止させて行った。

3. 実験結果と考察

3.1 接合面の開口荷重と開き角の関係

開口荷重とは、接合面の引張外縁において、プレストレスによって導入された圧縮応力が載荷荷重による引張応力とつり合った荷重、すなわち引張外縁のコンクリートの応力度がゼロになったときの荷重である。また、設計上ではプレキャストPC部材を連続のPC部材として考えており、ロックシェッドのようにII種PC構造の場合、コンクリートの設計基準強度600kgf/cm²に対し許容引張強度を28kgf/cm²としている。そこで、引張外

表-1 実験供試体の種類

	供試体名	P C 鋼棒長さ	プレストレス力(tf)		
			①	②	③
A	L03P111	30cm	10.0	10.0	10.0
	L06P111	60cm			
	L09P111	90cm			
	L12P111	120cm			
B	L06P333	60cm	3.52	3.52	3.52
	L06P505		5.28	0.0	5.28
	L06P014		0.0	10.0	4.0
	L06P509		5.0	0.0	9.0

表中の①②③は、図-2のPC鋼棒の位置①②③を表す。

表-2 材料の力学的性質

コンクリート	
ヤング係数 (kgf/cm ²)	3.3×10 ⁵
圧縮強度 (kgf/cm ²)	602.0
引張強度 (kgf/cm ²)	44.8
P C 鋼棒	
ヤング係数 (kgf/cm ²)	2.03×10 ⁶
降伏強度 (kgf/cm ²)	14800
引張強度 (kgf/cm ²)	15200

縁のコンクリートの応力度が許容引張応力になったときの荷重を許容荷重とし、表-3に理論的に求めた各供試体の開口荷重および許容荷重を示す。また、図-3は、Aグループの各供試体の接合面から5.0cm柱部側で、引張外縁から2.5cmの位置の荷重-コンクリートひずみの関係を示す。この図から開口荷重より小さい範囲の時、荷重-ひずみ曲線はほぼ線形を示しているが、開口荷重より大きい範囲では接合部が開き始め、応力が伝達しなくなることがわかる。

表-3 開口荷重および許容荷重

	供試体名	開口荷重	許容荷重
A	L03P111	20.97tf	25.25tf
	L06P111		
	L09P111		
	L12P111		
B	L06P333	7.38tf	11.66tf
	L06P505		
	L06P014		
	L06P509		

図-4(a)・(b)は、実験における接合面の位置の曲げモーメント-開き角の関係を示している。なお、開き角とは、供試体接合面に取り付けた π 型変位計の変位量の差を設置間隔で除して求めたものである。また、各図に示した直線は、最小二乗法により求めた初期勾配である。表-4は、開口荷重および許容荷重での実験結果の開き角と初期勾配直線より求めた開き角の比を表したものである。図-4および表-4より実験結果は、理論的に求めた開口荷重および設計上の許容荷重まで初期勾配の直線とほぼ同様の線形的な勾配を示すが、PC鋼棒が柱部の全長と等しい供試体L12P111および引張側にPC鋼棒を配置していない供試体L06P014については、開口荷重時で初期勾配直線より求めた開き角より約20%程度大きい値となり、多少の剛性低下が見られる。このことより、接合部は必ずしも剛結合とは考えられず、PC鋼棒の長さおよび緊張位置が影響すると思われる。しかし、開口による剛性低下の割合は小さく、実構造物においてモーメント分布などが大きく異なることは考えにくい。

表-4 開き角の比較

	供試体名	開口荷重	許容荷重
A	L03P111	1.15	1.21
	L06P111	1.10	1.18
	L09P111	1.14	1.21
	L12P111	1.24	1.34
B	L06P333	1.00	1.04
	L06P505	1.02	1.11
	L06P014	1.24	1.65
	L06P509	1.00	1.13

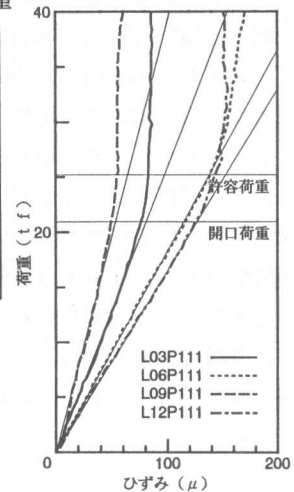


図-3 荷重-ひずみ関係

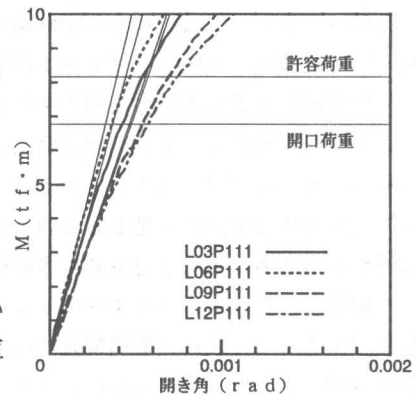


図-4(a) モーメント-開き角関係 (Aグループ)

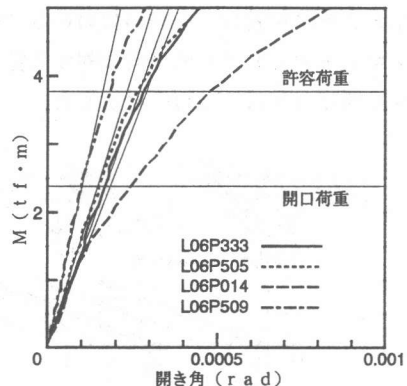


図-4(b) モーメント-開き角関係 (Bグループ)

3. 2 破壊時までの変形特性

図-5(a)・(b)は、実験における接合面の位置の曲げモーメント-開き角の破壊時までの関係を示している。図より、接合面の開口後は、急激に開き角が増大していることがわかる。P C鋼棒の長さの違うAグループの場合、P C鋼棒の長さの影響はさほどないが、鋼棒が長い程より大きい変形が生じている。この変形量の大きさが圧縮側のコンクリートの圧壊を早め、その結果破壊耐力が低下していると思われる。また、緊張力の違うBグループの場合、全く異なった変形特性を示しており、隅角部の変形ならびに破壊耐力に大きく影響していることがわかる。

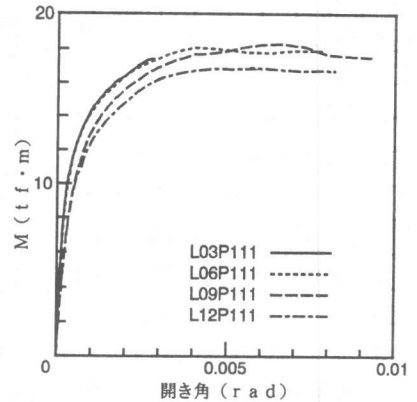


図-5(a) モーメント-開き角関係 (Aグループ)

4. 解析概要

4. 1 解析モデル

剛体-ばねモデルは、川井らが終局状態での挙動を評価しようと開発した離散化モデルであり、鉄筋コンクリート構造物の非線形解析にも適用されている[2]。剛体-ばねモデルの利点として、部材接合面の開口の取扱いが容易であることやプレストレスによる緊張から荷重載荷による部材の破壊状態に至るまでの挙動を、連続的に非線形解析できることなどである。本解析の要素分割を図-6に示す。鉄筋およびスターラップについては、異方性板要素として、鉄筋は配筋位置とほぼ同様に図-6の網掛けで示した要素間のばねに、スターラップは全要素間に平均化して、それぞれの剛性を付加した。また、アンボンドP C鋼棒は、材料非線形を有する要素として直接取扱い、P C鋼棒要素とコンクリート要素を図-7に示すように付着特性を持つばねのみで結合させたが、アンボンドのためせん断方向に対する抵抗はないと考え、せん断ばね K_s は 0 kgf/cm^2 とした。

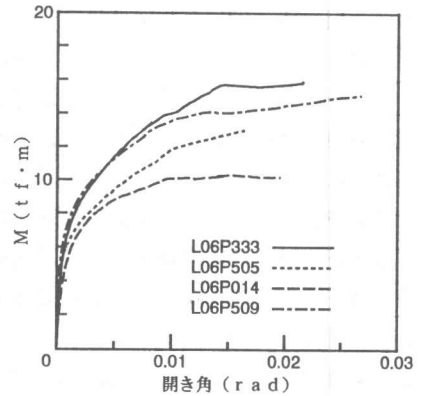


図-5(b) モーメント-開き角関係 (Bグループ)

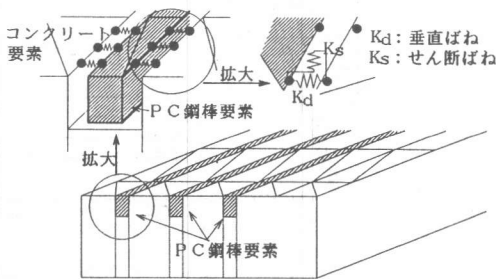


図-7 P C 鋼棒のモデル化

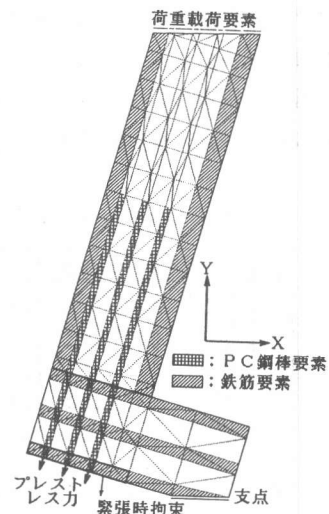


図-6 要素分割図

解析手順は、プレストレスによる緊張時の解析と荷重の載荷時の解析を連続的に計算しているが、緊張時の計算では、部材端のコンクリート要素を拘束し、プレストレスを集中荷重として部材端のPC鋼棒要素に与えて、PC鋼棒およびコンクリートの応力を求めた。そして、荷重載荷の解析では荷重増分の決定に r_{min} 法を修正した荷重増分法[3]を用い、コンクリートのクラックや圧壊による解放力を荷重量に加えて繰り返し計算ができるように考慮した材料非線形の解析を行った。

4.2 材料特性

剛体ばねモデルは、要素間の境界に存在する分布ばねに材料特性を直接導入することができる。そこで、コンクリートの材料特性として、引張特性は、図-8に示すように引張強度に達す

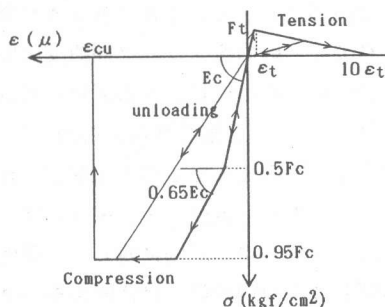


図-8 コンクリートの応力-ひずみ

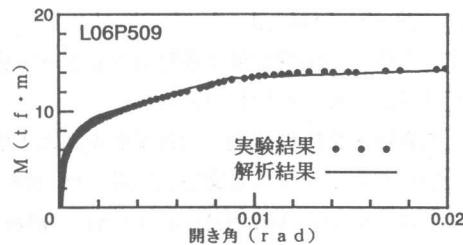
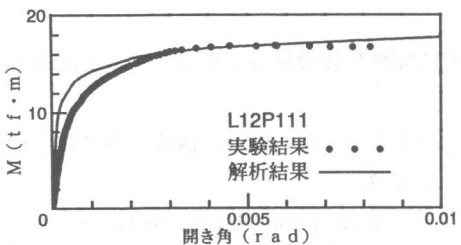
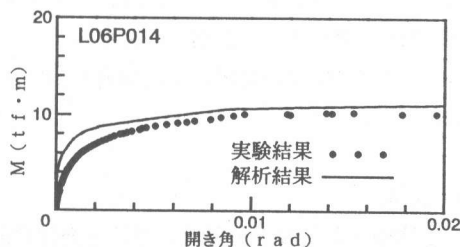
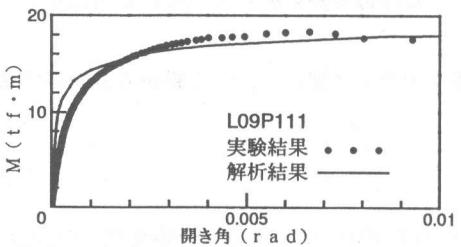
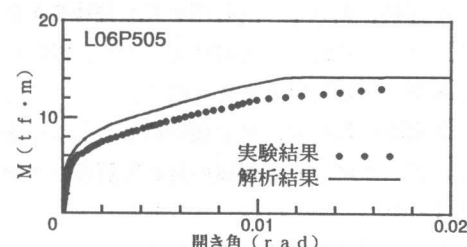
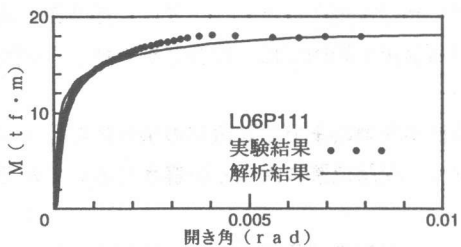
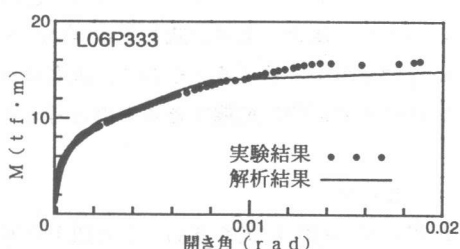
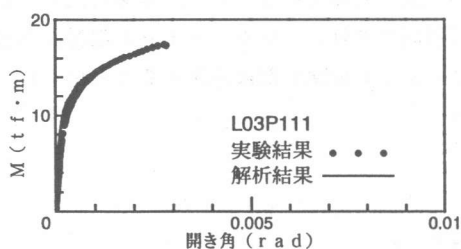


図-9 (a) モーメント-開き角の比較 (Aグループ)

図-9 (b) モーメント-開き角の比較 (Bグループ)

るまで線形とし、その後はクラックが発生したとしてばねを切断し、クラック発生直前までに蓄えられていた応力をクラック面直交方向のひずみの一次減少関数として解放した。また、クラック面でのせん断剛性は、せん断ばね K_s にクラック面直交方向のひずみの関数である低減率を採用した[4]。一方、圧縮特性は、応力-ひずみ関係をTri-Linearで近似して表し、圧縮限界ひずみに達すると圧壊とみなし応力を解放した。せん断すべりに対しては、Mohr-Coulombの降伏条件を採用した。また、鉄筋、スターラップおよびP C鋼棒は、応力-ひずみ関係をBi-Linearとした。接合面については、引張に対しては剛性を持たず、圧縮に対してのみ剛性を持つばねとして扱い、圧縮側のばねの剛性は、接合面をモルタル処理していることから、モルタルの一軸圧縮試験の応力-ひずみ関係をTri-Linearで近似して用いた。

4. 3 実験および解析結果の比較と考察

図-9(a)・(b)は、実験と解析における接合面の位置の曲げモーメント-開き角の結果について示している。図より、解析結果は耐力時までの実験結果を精度良く近似でき、特に変形特性の異なるBグループについても、その変形特性の違いを良く表している。また、本解析法ではP C鋼棒のひずみの変化や破壊形式などについても解析可能であり、プレキャストP C部材の非線形解析に有効な手法と言える。そして、実際のロックシェッドの隅角部に適用することにより、その変形特性を解析的に把握できるものと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- ① 本実験において、引張側にP C鋼棒を配置しない特殊な場合などについては、接合部の剛性低下が見られたがその割合も小さく、設計における荷重の範囲では、接合部を剛結合と仮定しても差し支えないと考えられる。
- ② 本実験において、P C鋼棒の長さおよび緊張位置が破壊時までの隅角部の挙動に与える影響を比較したが、P C鋼棒の長さの影響はさほどなく、緊張位置に大きく影響されることが明らかになった。
- ③ 剛体-ばねモデルの適用により、プレキャストP C部材の隅角部の挙動を解析的にかなりの精度で推定できることが明らかになった。

最後に、本実験において多大な御協力を頂いた日本サミコン(株)に、深く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- [1]吉田博他：落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ，土木学会論文集，No.421，pp.213-222，1990.9.
- [2]川井忠彦・上田眞稔他：鉄筋コンクリート構造物の離散化極限解析(その1)，生産研究，38巻4号，pp.181-184，1986.4.
- [3]上田眞稔・竹内則雄他：川井モデルによる鉄筋コンクリート梁の解析，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，14巻，pp.449-454，1990.7.
- [4]Cedolin,L. and Dei Poli,S. : Finite Element Non-linear Plane Stress Analysis of Reinforced Concrete, Studi e Rendiconti,Costruzioni in Cement Armato, Vol.13, Politecnico di Milano, pp.3-33, 1976.