

論文 高強度横補強筋を用いたプレキャストコンクリート梁の耐震性能に関する研究

畑平章年^{*1}, 山口輝彰^{*2}, 今井弘^{*3}

要旨:高強度横補強筋を用いたプレキャストコンクリート(以下、PCa)梁に正負交番繰返しせん断力が与えられ、横補強筋比 P_w と横補強量 $P_w \sigma_y$ が最大耐力に与える影響が調べられた。実験結果より、横補強量を一定とした場合、普通強度の横補強筋の方が効果があり、横補強筋比を一定としたとき、高強度横補強筋の方が有効であった。また、Truss-Arch Modelで主筋の付着応力の実測値を検討することによりせん断破壊と付着破壊を区別することができた。

キーワード:高強度鉄筋、横補強筋比、横補強量、Truss-Arch Model、PCa梁、打ち継ぎ面

1. はじめに

PCa工法では、PCa部材間の接合方法が重要である。架構式PCa工法では、様々な接合方法が提案されており、耐震性、経済性及び施工性の良い工法の1つに主筋後挿入方式がある。

主筋後挿入方式とは、主筋の位置に予めシース管と添え筋を配筋し、打設後、現場で主筋を部材の両端から挿入し、高強度モルタルを注入することによって主筋を固定する工法である。従来の方式では、主筋がPCa部材内に打ち込まれるため、主筋とコンクリートの各接合位置が同じであったが、本方式では主筋は地震応力の比較的小さい部材中央付近で継ぎ、コンクリート部材は柱梁接合部で接合することができる。

本研究では、主筋後挿入方式による高強度横補強筋を用いたPCa梁のせん断耐力に与える横補強筋の降伏強度、横補強筋比及び横補強量の効果を調べる。

表-1 試験体の概要

試験体名	横補強筋	材質	横筋比 $P_w(\%)$	$P_w \cdot \sigma_y$ (kgf/cm ²)	破壊 状況
B31	4-D10@70	SD295A	1.20	36.0	S
B32	4-D10@80	SD345	1.05	36.7	S
B33	4-D10@185	SD785	0.45	36.0	Bo
B34	4-H7@170	USD1275	0.28	36.4	Bo
B35	4-D10@140	SD295A	0.60	18.0	Bo
B36	4-D10@140	SD345		21.0	Bo
B37	4-D10@140	SD785		48.0	S
B38	4-H7@80	USD1275	0.59	76.7	Bo

主筋: 8-D25(SD685), 添え筋: 4-D25(SD685)

S:せん断破壊、Bo:付着割裂破壊

2. 試験体の概要

試験体図とその概要を各々図-1と表-1に示す。試験体は中高層建物の低層部を想定した、2/3縮尺のものである。梁幅は34cm、梁せいは50cm、内法長さは200cmである。梁せいの下部35cmがPCaであり、上部15cmが場所打ちである。打ち継ぎ面は、全て打設直後のワイヤーブラシによる粗面仕上げである。試験体は8体製作され、主筋には8-D25(SD685、 $\sigma_y=7000\text{kgf/cm}^2$)を二段配筋し、せん断破壊型に設計した。B31~B34は、横補強量を一定($P_w \sigma_y=36\text{kgf/cm}^2$)とし、B35~B38は横補筋

*1 筑波大学大学院工学研究科(正会員)

*2 株木建設(株)技術研究所(正会員)

*3 筑波大学構造工学系、助教授、工博(正会員)

強比を一定($P_w=0.006$)とした。横補強筋は、B34とB38を除き2つの溶接閉鎖型筋を組み合わせ異形棒鋼4-D10を、B34とB38にはPC鋼棒4-H7を使用した。B31, B32, B35及びB36の横補強筋は普通強度の鉄筋とした。また、B33とB37にはSD785($\sigma_y=8000\text{kgf/cm}^2$)を、B34とB38にはUSD1275($\sigma_y=13000\text{kgf/cm}^2$)を用いた。添え筋は主筋と同じ径のものを外側の主筋に1本配し、重ね長さは $660\text{mm}=26.4d$ (d :主筋径)である。かぶり厚さは、30mmであり、径が42mmのシース管を使用した。梁PCa部材の端面にはシャークコッターがある。表-2に材料特性を示す。コンクリートとグラウトモルタルの設計圧縮強度は、それぞれ 300kgf/cm^2 と 600kgf/cm^2 である。

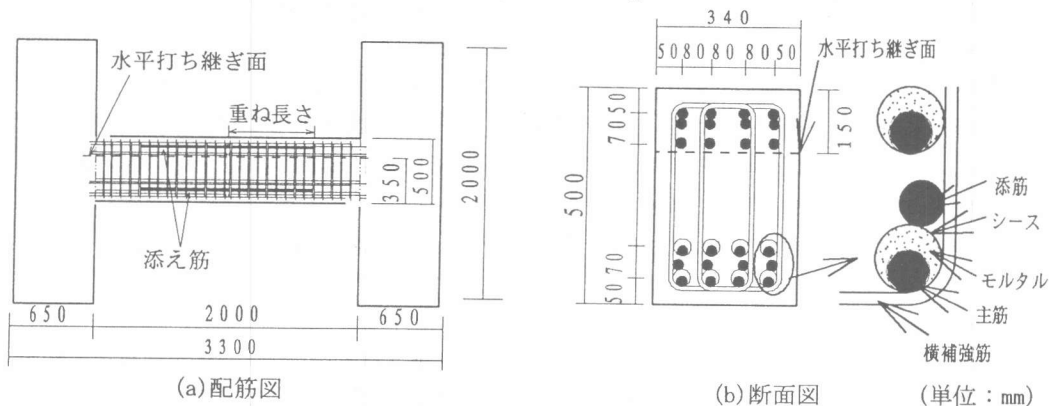


図-1試験体図

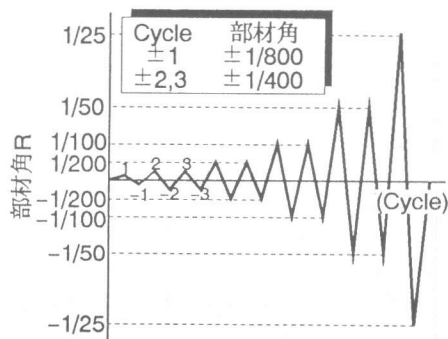
表-2 材料特性 (単位: kgf/cm^2)

試験体		B31	B32	B33	B34	B35	B36	B37	B38
鉄筋	主筋	降伏強度							
		6840 (D25)							
	横補強筋	引張強度							
		8840 (D25)							
コンクリート	圧縮強度	PCa	339	348	357	360			
		RC	344	339					
	割裂強度	PCa	34.7	35.6	35.0	34.7			
		RC	34.6	35.5					
	圧縮強度(材令)		581(7日)	714(28日)	778(43日)				

PCa:プレキャスト部、RC:場所打ち部

3. 実験方法

試験体の柱部は、鉛直アクチュエータ2機とオイルジャッキによって水平に保ち、地震力を想定した逆対称曲げモーメントが作用するようにし、正負交番繰り返しせん断力を水平アクチュエータで与えた。加力履歴を図-2に示す。部材変形角 $R=\pm 1/800$ を1回ずつ、その後 $\pm 1/400$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/50$ をそれぞれ2回ずつ加力し、 $\pm 1/25$ は1回行った。ここで、部材変形角 R は、両端の相対変



形量 δ を梁部材長(2m)で除したものである。変位の測定には図-3に示すように、精度1/100の変位計(LVDTs)により柱間の全体変位 δ を梁中央で直接測定する方法と、梁を11等分しクリップゲージを用い部分的なせん断変形と曲げ変形を測定する方法を採用した。また、水平打ち継ぎ面の滑りを5カ所測定し、主筋、添筋及び横補強筋のひずみも測定した。

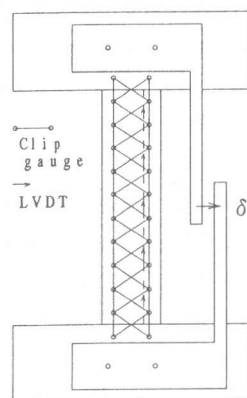


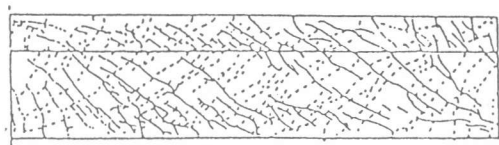
図-3測定器配置図

4. 実験結果

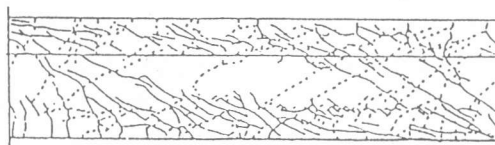
4.1 ひび割れ状況と破壊様式

$R=1/50$ における典型的なひび割れ状況を図-4に示す。全ての試験体において、初期曲げひび割れが $R=1/800$ で、せん断ひび割れは $R=1/400$ で生じた。図-4(a)にせん断破壊型の典型的な例としてB32のひび割れ状況を示す。普通強度の横補強筋を用い、横補強筋間隔が狭いB31及びB32はせん断破壊した。これは、横補強筋が降伏してもその間隔が狭いのでコンクリートを拘束することができ、せん断破壊に至ったと考えられる。高強度鉄筋を用いたB37の場合には、同じ高強度鉄筋を用いたB34より横補強筋間隔が狭いため、せん断破壊に至ったと思われる。横補強筋間隔が小さいB31及びB32では、最大耐力時($R=1/50$)での梁側面の最大ひび割れ幅は、約1mmであったが、横補強筋間隔が大きいB37の最大ひび割れ幅は、 $R=1/50$ で約3mmであった。

一方、図-4(b)には、付着割裂破壊の例として、B34の $R=1/50$ におけるひび割れ状況を示す。B33及びB34の横補強筋は高強度鉄筋であるが、横補強筋間隔が大きいので、主筋に沿った付着割裂破壊に至っている。また、B35及びB36も、横補強筋間隔が広く鉄筋の強度が小さいため、付着割裂破壊が起きた。B38の場合、高強度鉄筋を用い、横補強筋間隔が狭いにも関わらず、付着割裂破壊が起きた。これは、横補強筋の強度に対して、コンクリートの強度が小さいため、主筋周りのコンクリートの付着破壊が先行したと考えられる。普通鉄筋を使用し、横補強筋間隔が大きいB36のみ、せん断ひび割れが梁側面に一様に広がった後に付着割裂破壊が生じた。B36を除く他の試験体は、梁中段付近にひび割れが集中することなく、主筋に沿って付着ひび割れが生じ、最終的に顕著な付着割裂破壊に至った。梁中央での水平打ち継ぎ面のすべり変形は、どの試験体においても最大耐力に到達した後、生じ始め、最終段階でも全て10mm以下だった。



(a)B32 せん断破壊型



(b)B34 付着破壊型

図-4ひび割れ状況 ($R=1/50$)

4.2 荷重変形曲線

典型的な付着割裂破壊型とせん断破壊型の荷重変形曲線を各々図-5(a)と(b)に示す。破壊様式に関わらず、履歴性状に大きな違いは見られない。横補強量が他の試験体より小さいB35とB36は、 $R=1/50$ 以前に最大耐力に達し、 $R=1/50$ の耐力は最大耐力より約15%から20%減少した。 $R=1/50$ までに全ての試験体は最大耐力に到達し、その後、荷重は急激に減少した。

4.3 主筋及び添筋のひずみ分布

二段目主筋、一段目主筋、添筋及びこれらのひずみの和の半分の分布を、それぞれ図-6(a), (b), (c)及び(d)に示す。図-6(d)で、ほぼ直線的であることから、主筋と添筋は1本の鉄筋のように力を伝達していることが認められる。また、最大耐力まで主筋と添え筋は、降伏しなかった。

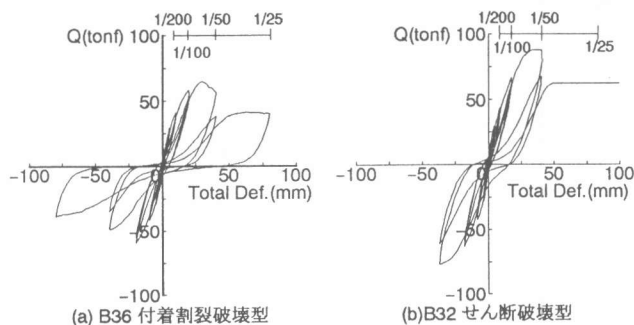


図-5 荷重変形曲線

4.4 横補強筋のひずみ分布

全ての試験体において、横補強筋のひずみは、 $R=1/200$ まで 800μ 以下であり、 $R=1/100$ 以降に急に伸び始めた。普通鉄筋を用いた (B31, B32, B35及びB36) ではB33を含めて図-7(a)に示すように、 $R=1/50$ に到達後ほとんどの横補強筋が降伏した。しかし、高強度鉄筋を用いた試験体(B34, B38)は、図-7(b)に示すように、最終段階においても、降伏ひずみの50%から80%であった。

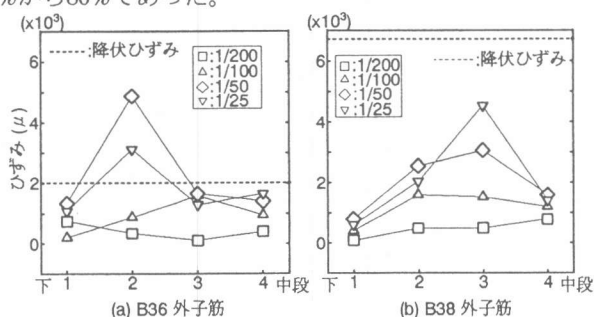


図-7 せん断補強筋のひずみ分布

4.5 高強度横補強筋の効果

横補強量 $P_w \sigma_y$ を一定にした場合、図-8(a)に示すように、普通強度で間隔が狭いB31及びB32では、中央部分の横補強筋は降伏ひずみに到達するが、高強度で間隔が広いB33とB34では降伏ひずみ以下であった。つまり、高強度鉄筋を用いても、その効果は十分には得られない。横補強筋比を一定にしたとき、普通鉄筋を用いたB35及びB36の横補強筋のひずみは $25F_c$ (日本建築学会A法の境界条件) の相当値より大きい。しかし、高強度鉄筋を使用したB37及びB38のひずみは $25F_c$ の相当値よりも小さく、 $18F_c$ の相当値がより適合する。

4.6 曲げ変形とせん断変形の割合

横補強筋量 $P_w \sigma_y$ が一定であるB31~B34において、 P_w が減少するとせん断変形の割合が増加している。図-9(a)に示すようにB33及びB34において、せん断変形は $R=1/400$ で急に増加している。これは、普通鉄筋を密に配筋した方が、高強度鉄筋を粗く配筋するよりも効果的であるこ

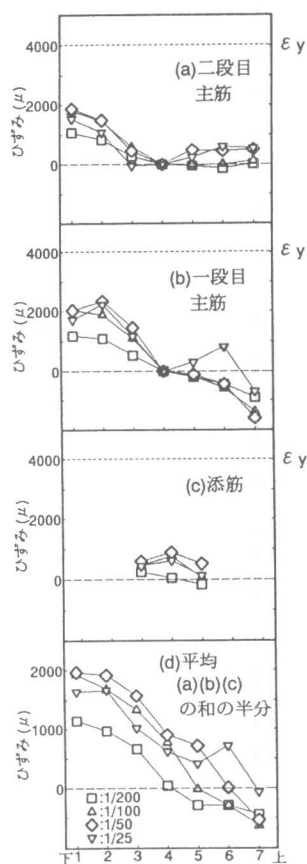


図-6 主筋及び添筋のひずみ分布 (B35下端筋)

とを示している。

一方、横補強筋比 P_w が一定であるB35～B38の試験体では、図-9(b)に示すように、B35とB36のせん断変形の割合はB37及びB38より大きかった。これは、横補強筋間隔を同じにした場合、高強度鉄筋を使用した方が普通鉄筋より効果があることを示している。

4.7 計算値と実験値の最大耐力による比較

日本建築学会（AIJ）の終局強度型耐震設計指針のせん断耐力式A法による耐力 cQ_{su} と、実験値 eQ_{max} の関係を計算曲げ耐力 cQ_{mu} で無次元化して、図-10に示す。全体的に、最大耐力時の実験値と計算値の差は小さい。A法の条件($\sigma_y \geq 25F_c$ の時、 $\sigma_y = 25F_c$ とす

る)に該当する試験体は、B34及びB38であった。B34において、 $\sigma_y = 25F_c$ を適用せず、 σ_y を式に直接代入した場合、計算値は $\sigma_y = 25F_c$ を採用したときと比較して30%高い。また、 $\sigma_y = 25F_c$ とした時の計算値は、実験値に近い。一方、B38において、 $\sigma_y = 25F_c$ を適用してもその効果は小さいが、 $\sigma_y = 18F_c$ とした場合、理論値は実験値と等しくなる。従って、この場合、 $\sigma_y = 18F_c$ の方が $\sigma_y = 25F_c$ よりよく対応する。

4.8 主筋のひずみ分布における Truss-Arch Modelの理論値と実験値の比較

図-11(a)と(b)に各々せん断破壊したB31と付着割裂破壊したB38を例として示す。Truss-Archの理論値を算出する際、付着強度には、藤井・森田式と角・張式をそれぞれ代入して求めた。B31の主筋のひずみは、せん断破壊によって決まるひずみ分布と上下端筋ともよく対応していることから、せん断破壊が生じたことを裏付けて

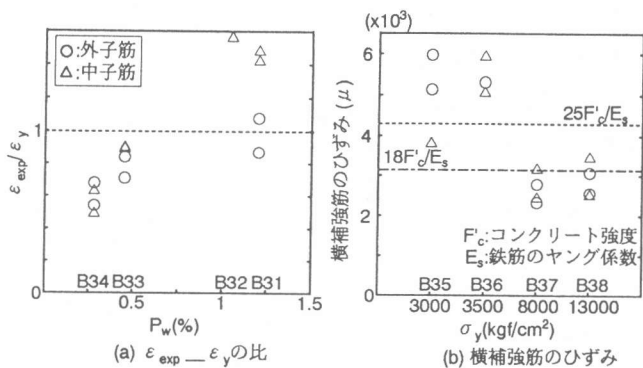


図-8 中央部の横補強筋のひずみ

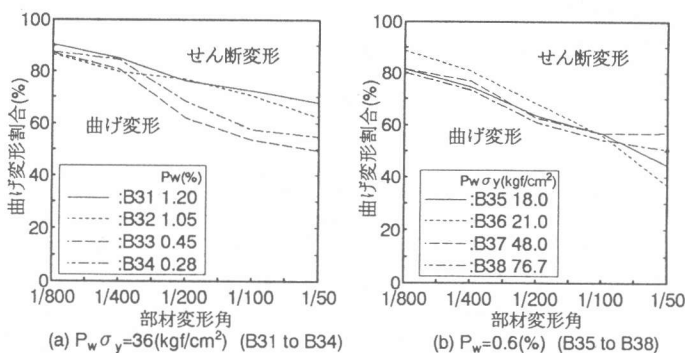
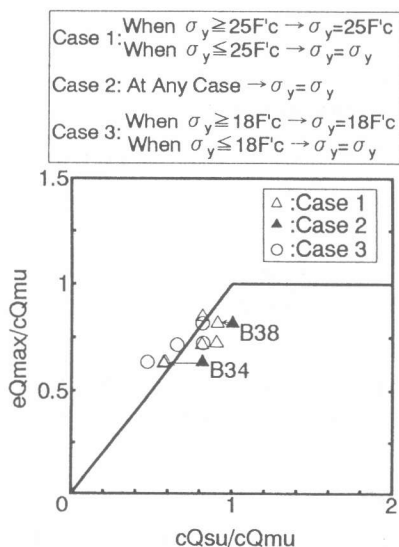


図-9変形成分の割合



$$cQ_{su} = bjtP_w\sigma_y \cot \phi + \tan \phi (1 - \beta) b D_v F'_c / 2$$

$$cQ_{mu} = 0.9 * 2 A_t \sigma_y d / l'$$

図-10 AIJのせん断耐力式A法の計算値と実験値による終局強度の比較

いる。また、B38は、上下端筋ともせん断破壊による理論線よりも付着割裂破壊による理論線とよく対応している。これは、B38が付着割裂破壊したことと対応する。従って、4.7でB38が、 $\sigma_y = 18F_c$ とした時によく実験値と対応するのは、付着破壊が先行し、横補強筋が十分に効果を発揮できなかったためであると考えられる。

5. まとめ

- (1) 本実験の試験体は粗面仕上げによる水平打ち継ぎ面を有しており、最大耐力時まで打ち継ぎ面での滑りは確認されなかった。
- (2) 横補強筋 $P_w \sigma_y$ を一定にした場合、普通強度の横補強筋を用い、間隔を狭く配筋した方が効果的である。

- (3) 横補強筋比 P_w が一定のとき、高強度横補強筋の方が普通鉄筋より有効であると考えられる。
- (4) 日本建築学会のせん断耐力式A法の計算値は、本工法によるPCa梁のせん断耐力と概ねよく一致した。
- (5) Truss-Arch Modelによるせん断破壊時と付着破壊時の主筋の理論ひずみ分布と実験値を比較することで破壊形式を判別することができた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造物の終局強度型耐震設計指針・同解説、せん断と付着に対する設計、pp.112-123
- 2) 斎藤潔・山口輝彰・今井弘：重ね継手を用いたプレキャストコンクリート梁の耐震性能に関する研究、コンクリート工学、Vol. 16、No. 2、1994.6

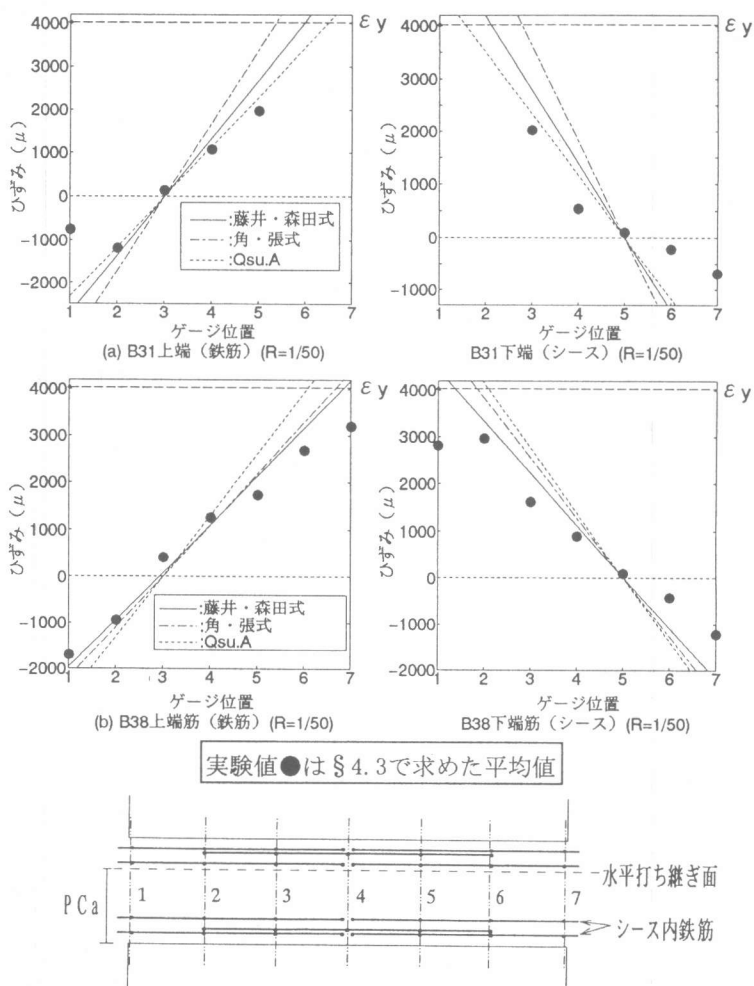


図-11 Truss-Arch Modelによる主筋のひずみの理論値と実験値の比較