

柱梁接合部を PCa 化した RC 建物の柱主筋付着性状

建築本部	PC 建築部	福井剛
建築本部	建築部	小長光公和
技術研究所	建築構造研	渡辺一弘

概要: 柱梁接合部 PCa 化工法における RC 柱主筋の付着性能を明らかにするために、鉄筋引き抜き要素実験を行った。実験の主要因は、コンクリート強度・モルタル強度・シースの有無とし、各要因が付着性状におよぼす影響を明らかにした。さらに、同工法を用いた実物件について柱主筋の付着性能について検証を行い構造的な安全性を確認した。

Key Words : PCa, 柱梁接合部, 付着, 充填モルタル

1. はじめに

高層 RC 建物をプレキャスト化するにあたり、現場でのコンクリート打設を極力少なくすることが施工の合理性を高める上で重要である。これまでは柱および梁部材をプレキャスト製品とし、柱梁接合部を現場打ちコンクリートとする工法が一般的であった。しかし近年、柱梁接合部を柱主筋の挿入孔を設けたプレキャスト部材とする工法が普及しつつあり、これに関する研究報告も発表されている(例えば 3),4),5)。

柱梁接合部の PCa 化工法は、柱主筋が柱頭部から突出した柱部材に、柱主筋挿入用孔を設けた柱梁接合部プレキャスト部材をセットし、柱頭部目地と同時に柱主筋挿入用孔に充填するモルタルにより一体化するものである(写真-1, 図-1)。この工法と在来工法の構造的な相違点は、柱梁接合部内の柱主筋の付着条件である。柱主筋挿入孔には一般的にシーソ管が配されるが、柱主筋—モルタル間およびシーソ管を介したモルタル—コンクリート間の付着は所要の強度を保持する必要がある。

本研究は、柱梁接合部 PCa 化工法における柱主筋の付着性能を明らかにすることを目的とし、鉄筋引き抜き形式の付着試験を行ったものである。また、柱主筋挿入孔の製造方法と充填モルタルの性能が付着性能におよぼす影響も明らかにする。



写真-1 部材架設状況

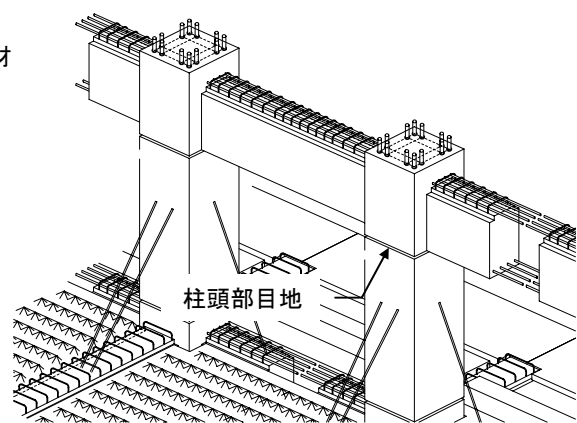
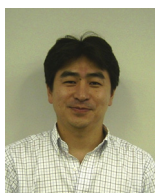


図-1 柱梁接合部 PCa 化工法概念図



福井剛



小長光公和



渡辺一弘

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は図-2に示す形状で、250mm×250mm×250mmのコンクリートブロックに鉄筋を挿入したものである。試験体のパラメータはコンクリートの圧縮強度，シース管の有無，充填モルタル強度，および割裂拘束筋の有無である。

コンクリート強度は，超高層建物の下層階柱と上層階柱を想定し $F_c=60\text{ N/mm}^2$ および 36 N/mm^2 を設定した。シース管の有無については，基準試験体として在来工法の一体打ち試験体，標準の1060番シース管を使用する試験体，鉄筋挿入孔を型枠で形成しモルタル充填した試験体および鉄筋挿入孔に凹凸を形成した試験体を比較試験体とした。充填モルタル強度は，市販品メーカー保証強度 50 N/mm^2 ， 70 N/mm^2 ， 100 N/mm^2 ，および開発段階の高性能モルタル目標保証強度 120 N/mm^2 を使用した。いずれのモルタルもプレミックスタイプで，水量はメーカー推奨値を用いているため実強度は多少高めとなる。鉄筋引き抜きに対するコンクリートの割裂拘束筋（D6をスパイラル形状で5巻き（D6-φ150@50））の有無もパラメータとした。以上のパラメータから11種類の試験体を設定し，各3体ずつ33体の鉄筋引き抜き形式の付着試験を行った。表-1に実験水準の割り付けを示す。

使用した鉄筋はD41-SD490で，鉄筋の付着区間は165mm（ $4d$ ： d は鉄筋の公称径）とした。非付着区間は鉄筋にスポンジとビニールテープを巻きつけて付着を絶縁した。鉄筋挿入孔（シース管径）はφ62mmで共通である。

表-1 実験水準の割り付け

試験体名	コンクリート		シース				モルタル				スパイラル	
	36	60	一体	無し	1060	凹凸	50	70	100	120	有り	無し
M-0	○		○								○	
M-1000-50	○				○		○				○	
H-0		○	○								○	
H-0-NS		○	○									○
H-1000-70		○			○		○				○	
H-1000-100		○			○			○			○	
H-1000-120		○			○				○		○	
H-R-70		○		○				○			○	
H-R-100		○		○					○		○	
H-R-120		○		○						○	○	
H-D-70		○				○		○			○	

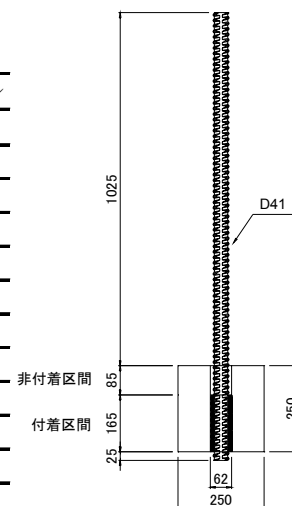


図-2 試験体図

2.2 载荷および測定方法

加力は図-3および写真-2に示すようにコンクリートブロックに耐圧盤を載せ，その上に1200kNセンターホールジャッキ，ロードセル，球座，ロックナットをセットし，単調引張载荷した。耐圧盤の孔径はφ100mmで，コンクリートブロックに直置きとした。

測定はロードセルの荷重と，コンクリート下面から25mm突出させた鉄筋の自由端の変位を高感度変位計（1/1000mm：CDP10）により測定した。実験では自由端変位が6～8mm程度で荷重ならびに変位の測定を終了したが，ロードセルおよび変位計を撤去後，鉄筋を完全に引き抜き破壊モードを判定した。



写真-2 載荷状況

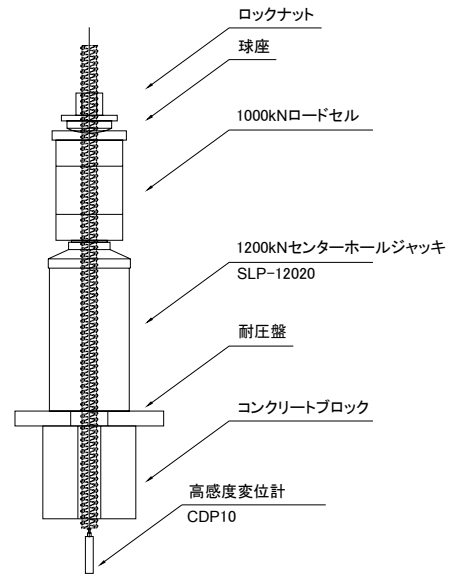


図-3 載荷装置概要

2.3 使用材料

表-2にコンクリートおよびモルタルの材料試験結果、図-4に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。

表-2 コンクリートおよびモルタルの材料試験結果

		σ_B (N/mm ²)	E_c ($\times 10^3$ N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)
コンクリート	Fc36	44.6	36.7	4.3
	Fc60	60.9	39.6	6.6
モルタル	Fc50	99.1	30.6	7.0
	Fc70	104.3	35.4	7.4
	Fc100	113.8	33.3	10.3
	Fc120	148.3	37.8	7.9

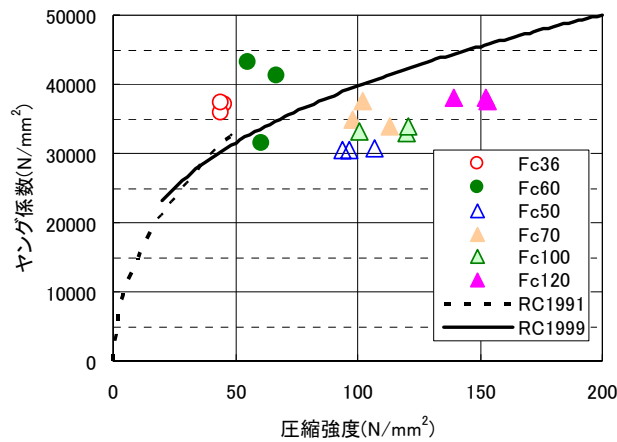
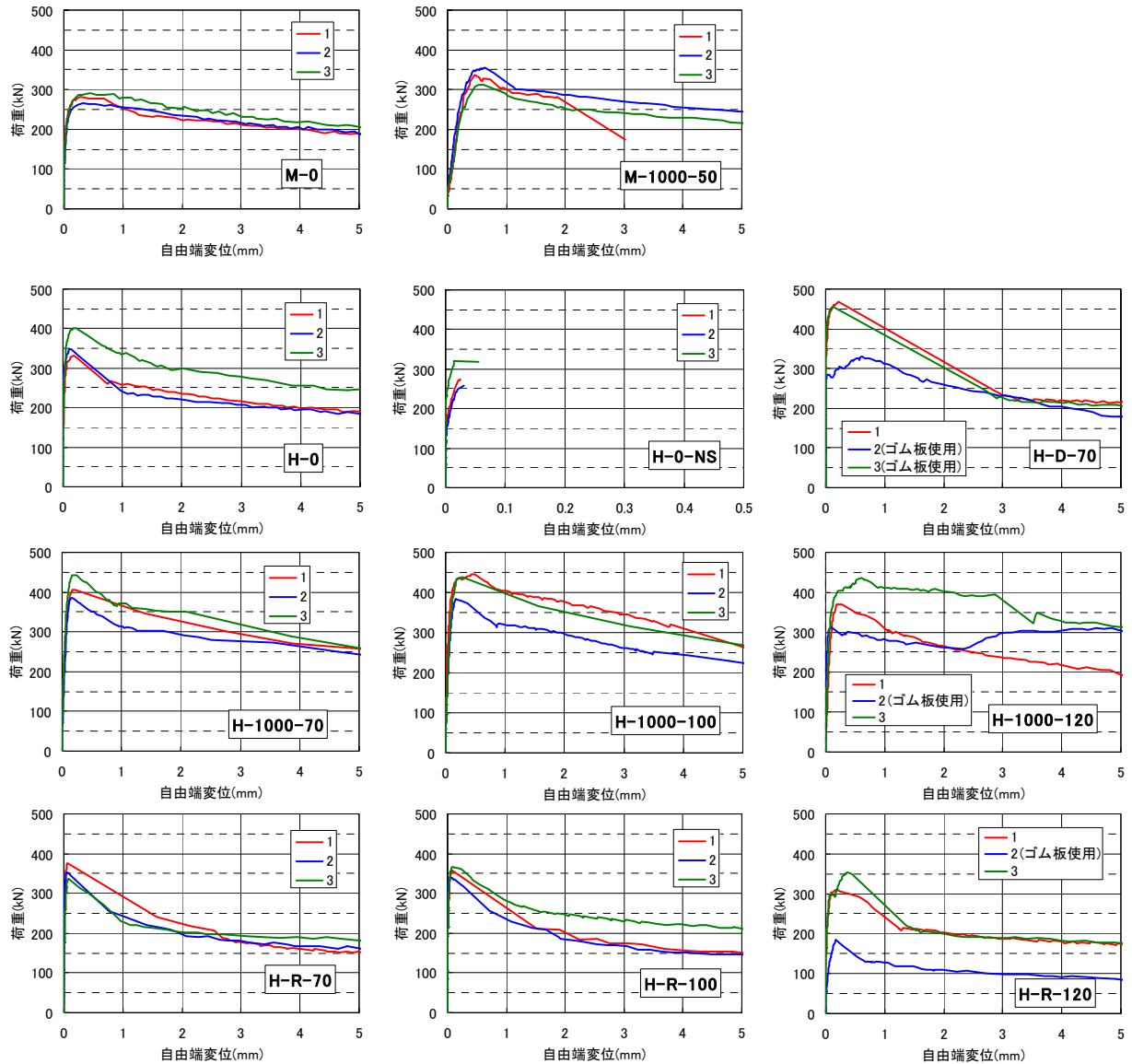


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

3. 実験結果

3.1 荷重－変位関係

図－5に荷重－自由端変位関係を示す。割裂拘束筋が無い試験体(H-0-NS)以外は、いずれも最大荷重を経験後、鉄筋の抜け出しを伴いながら徐々に耐力低下を生じている。自由端変位については、載荷初期および最大荷重時とも一体打ちの試験体に比べて、シース管を用いた試験体の方が若干大きい。また、シース管を用いない試験体はシース管を用いた試験体より小さい。



図－5 荷重－自由端変位関係

3.2 最大荷重および破壊モード

表－3に実験結果一覧を、図－6に一体打ち試験体(M-0, H-0)の最大荷重を基準とした各試験体の最大荷重の比を示す。表中破壊モードを示しているが、これは鉄筋を完全に引き抜いた後の状況から観察したものであり、最大耐力時の破壊モードとは厳密には相違している可能性がある。また、スパイラル筋が無い試験体(H-0-NSシリーズ)は、初期ひびわれ発生とほぼ同時にブロックの割裂破壊を生じた。

表-3 実験結果一覧

試験体名	破壊荷重平均値 (kN)	最大荷重比	破壊モード	自由端変位平均値 (mm)
M-0	279.6	1.00	RC	0.35
M-1000-50	334.7	1.20	RM	0.17
H-0	360.5	1.00	RC	0.02
H-0-NS	284.7	0.79	-	0.57
H-1000-70	411.8	1.14	MS	0.18
H-1000-100	422.7	1.17	MS	0.07
H-1000-120	403.5	1.12	MS	0.17
H-R-70	355.5	0.99	MC	0.31
H-R-100	355.5	0.99	MC	0.07
H-R-120	331.6	0.92	MC	0.28
H-D-70	462.0	1.28	RM	0.28

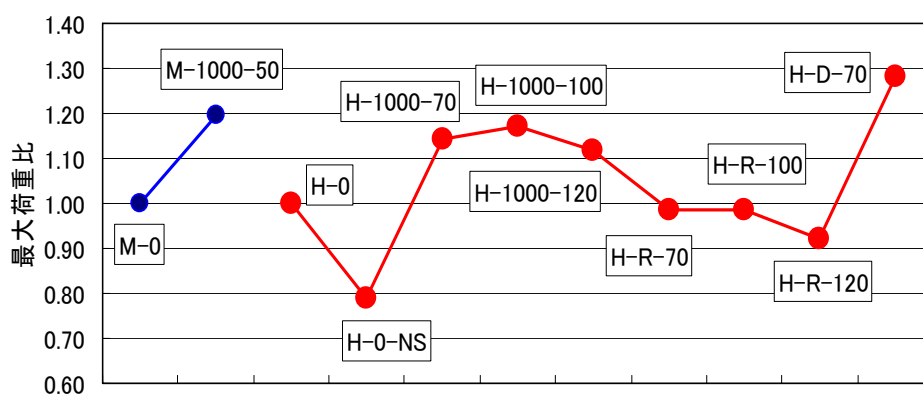
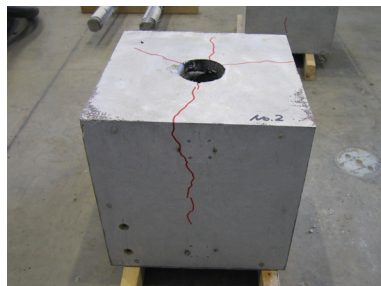
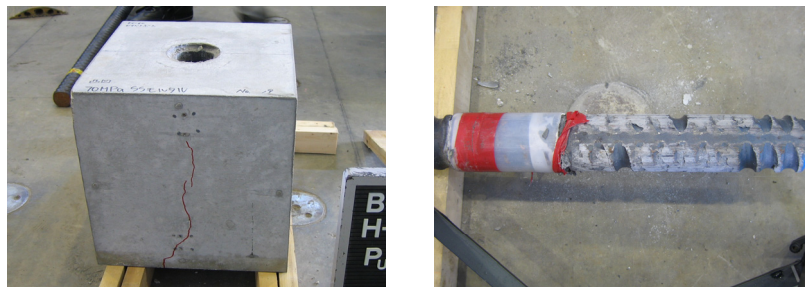


図-6 最大荷重比

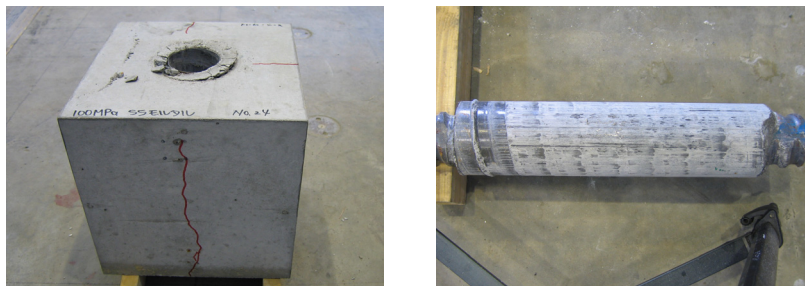
RC モード：鉄筋とコンクリート間の付着破壊で，一体打ちのすべての試験体で生じた．引き抜いた鉄筋のふしの頂部に沿ってコンクリートがせん断破壊している．



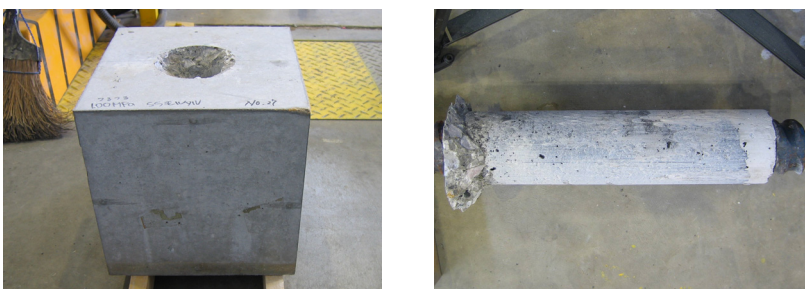
RM モード：鉄筋とモルタル間の付着破壊で、M-1000-50 シリーズおよび H-D-70 シリーズの試験体で生じた。コンクリートブロックのひびわれは少なく、RC モードと同様に引き抜いた鉄筋の横筋の頂部に沿ってモルタルがせん断破壊している。



MS モード：モルタルとシースの付着が切れて鉄筋とモルタルがシースから滑脱する破壊モードで、Fc60 シリーズでシースを用いたものすべてに生じた。モルタルがシースに擦れながら抜け出すため、断続的な金属音を伴った。



MC モード：モルタルとコンクリートの付着が切れて鉄筋とモルタルがシースから滑脱する破壊モードで、鉄筋挿入孔をシースを用いずに型枠で形成したシリーズ(H-R シリーズ)のすべての試験体で生じた。



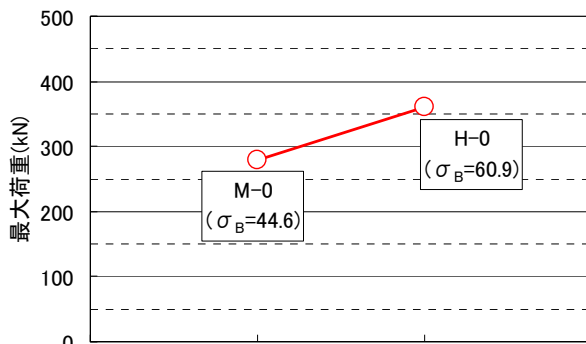
3.3 実験変数による比較

図-7.1~7.6にコンクリート強度による比較、スパイラル筋の有無による比較、シースを使用したFc60試験体のモルタル強度による比較、シースを使用しないFc60試験体のモルタル強度による比較、Fc36試験体の比較、Fc60試験体の形状による比較をそれぞれ示す。ここで、各試験体の最大荷重は3体の平均値とした。

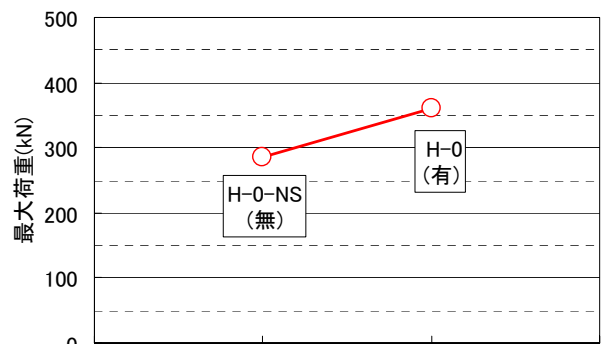
これらの図から以下の点が指摘できる。

- ・コンクリート強度の比較では、破壊モードがRCであるため、コンクリート強度が高い方が最大荷重が大きい。(図-7.1)

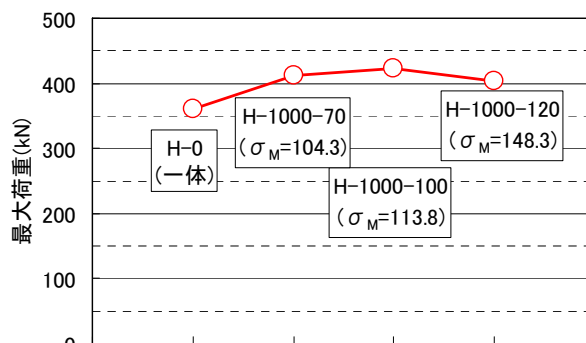
- ・スパイラル筋の有無の比較では、スパイラル筋無しの試験体はコンクリートブロックが割り裂かれる破壊となっており、荷重—自由端変位関係からもわかるとおり強度が小さい（スパイラル筋有りの試験体に比べて79%）。（図—7.2）
- ・Fc60でシース管を使用しモルタル強度を変化させた試験体の比較では、一体打ち試験体と比べて12~17%最大荷重が上昇するが、モルタル強度の上昇に比例して最大強度は上昇していない。これは強制的に引き抜いた破壊モードはモルタル—シース間の付着破壊であったが、最大荷重時にはシース—コンクリート間の付着破壊が生じていたものと思われる。（図—7.3）
- ・Fc60でシース管を使用せずモルタル強度を変化させた試験体の比較では、いずれの試験体も一体打ち試験他に比べて最大強度が小さく92~99%であった。（図—7.4）
- ・Fc36の一体打ち試験体とシース管使用の試験体を比較すると、Fc60試験体と同様にシース管使用の試験体の方が20%最大強度が上昇した。（図—7.5）
- ・Fc60でモルタル強度を同一とし鉄筋挿入孔形状を変化させた試験体の比較では、シース無し<一体打ち<シース管<凹凸の順に強度が上昇し、凹凸試験体は一体打ち試験体に比べて28%強度が上昇した。（図—7.6）



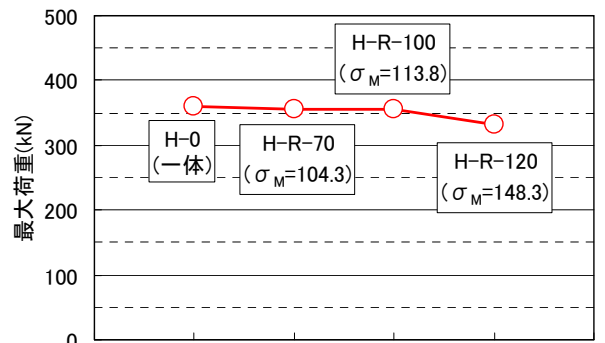
図—7.1 コンクリート強度の比較



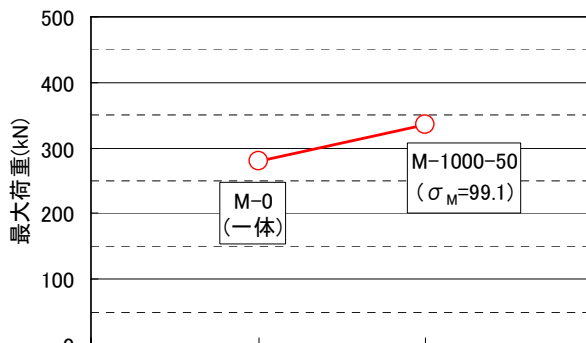
図—7.2 スパイラル筋有無の比較



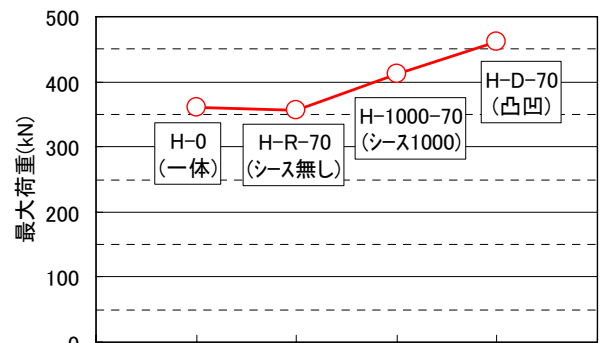
図—7.3 モルタル強度の比較 1



図—7.4 モルタル強度の比較 2



図—7.5 Fc36の比較



図—7.6 孔形状の比較

3.4 付着応力度

実験結果より鉄筋、およびシース管の付着強度を検討した。

付着強度は、鉄筋とコンクリートもしくはモルタルの付着 (τ_{u1}) の場合、付着面積を D41 の公称周長 (130mm) × 付着長さ(165mm)により求め、シース管とコンクリートもしくはモルタルとコンクリートの付着 (τ_{u2}) の場合、付着面積はシース管周長もしくは孔径 (62mm × π) × 250mm として求めた。

結果を表-4に示す。参考に旧 RC 規準¹⁾による短期許容付着応力度および RC 靱性設計指針²⁾の柱梁接合部内柱主筋の付着強度をあわせて示す。計算式中 F_c および σ_B にはコンクリートまたはモルタルの圧縮強度を用いた。

$$\text{旧RC規準(短期)} \quad f_b = \min\left(\frac{1}{10}F_c, 13.5 + \frac{1}{25}F_c\right) \times 1.5 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{RC靱性設計指針} \quad \tau_u = 0.7 \times \sigma_B^{2/3}$$

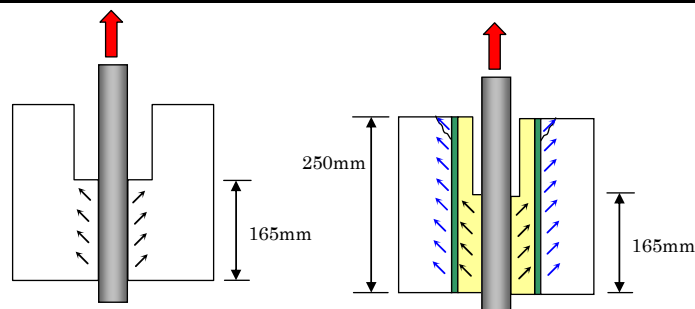
いずれの試験体も旧 RC 規準の短期許容付着応力度および RC 靱性設計指針の柱梁接合部内柱主筋の付着強度を上回った。H-1000 および H-R シリーズ実験結果による付着強度平均値 τ_{u1} は 19.24N/mm²、16.20N/mm² となり、モルタルを充填した試験体の方が一体打ち試験体よりも破壊荷重が大きくなっている。これはモルタルの強度がコンクリートより高くなったことと、破壊面の付着長さが一体打ちよりも長い (165 → 250mm。下図参照) ことが原因であると考えられる。

鉄筋の付着破壊によって耐力が決定した破壊モード (RC および RM、表中緑網掛け) の試験体の付着強度は、いずれも靱性指針の値を上回っていることが分かる。一方、鉄筋挿入孔界面で破壊した試験体 (表中橙網掛け) は鉄筋とモルタルの付着強度は不明だが、H-D-70 の結果から 21.54N/mm² 以上であることが推察できる。H-1000 および H-R シリーズの τ_{u1} はこれを下回っていることから破壊モードの判別が妥当であると言える。

設計的には鉄筋の付着強度を靱性指針式で、シースの付着強度を実験結果 τ_{u2} から算定し、負担できる鉄筋張力として小さい方を付着強度と見なせば良い。

表-4 付着強度の比較

試験体名	破壊荷重 (kN)	付着強度			RC規準短期		靱性指針		破壊モード	
		τ_{u1} (N/mm ²)	τ_{u2} (N/mm ²)		コンクリート (N/mm ²)	モルタル (N/mm ²)	コンクリート (N/mm ²)	モルタル (N/mm ²)		
M-0	279.6	13.04	-	-	-	4.7	---	8.8	---	RC
M-1000-50	334.7	15.60	-	6.88	-	---	8.0	---	15.0	RM
H-0	360.5	16.81	-	-	-	5.7	---	10.8	---	RC
H-0-NS	284.7	13.27	-	-	-	5.7	---	10.8	---	---
H-1000-70	411.8	19.20		8.46		---	8.3	---	15.5	MS
H-1000-100	422.7	19.71		8.69		---	8.9	---	16.4	MS
H-1000-120	403.5	18.81	19.24	8.29	8.48	---	11.0	---	19.6	MS
H-R-70	355.5	16.57		7.30		---	8.3	---	15.5	MC
H-R-100	355.5	16.57		7.30		---	8.9	---	16.4	MC
H-R-120	331.6	15.46	16.20	6.81	7.14	---	11.0	---	19.6	MC
H-D-70	462.0	21.54	-	9.49	-	---	8.3	---	15.5	RM



3.5 実施工建物への適用性の確認

ここでは、柱梁接合部 PCa 化工法を採用した建物の構造的安全性について確認を行う。

3.5.1 基本プラン

基本プランは図-8に示すように X 方向 28.3m (6 スパン), Y 方向 29.13m (6 スパン) の 31 階建て集合住宅である。基準階高は 3m である。なお、本建物は免震構造であり、極めて稀に起こる地震においても部材は短期許容耐力以下となる設計になっている。

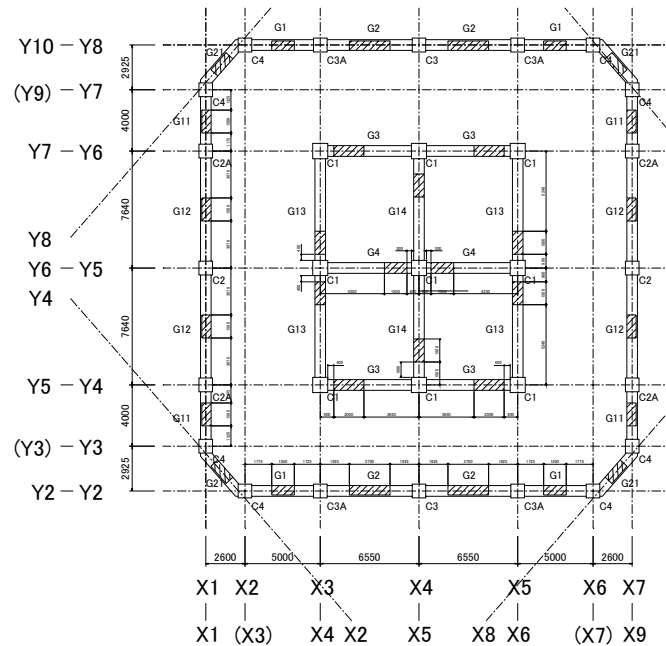


図-8 基準階プラン

3.5.2 部材応力

設計用せん断力作用時の 3,4 階代表柱梁架構の応力図を図-9に示す。また柱梁単位架構の柱せん断力 cQ - 層間変形角 R 関係を図-10に示す。図中の破線は設計せん断力と層間変形角を示している。フレームは梁降伏型で設計されており、層の耐力は梁の降伏で決定している。また、設計せん断力作用時においても柱には曲げひび割れは生じておらず、弾性範囲内であることが分かる。

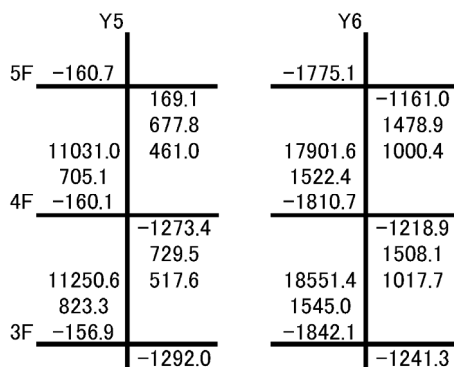


図-9 代表柱梁架構短期応力図

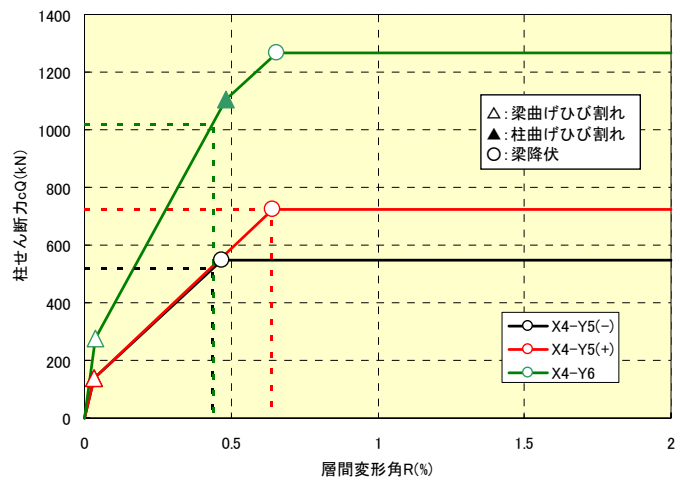


図-10 柱せん断力-層間変形角関係

3.5.3 柱梁接合部内の柱主筋付着応力度

前述したように本建物は、設計せん断力時に作用する柱せん断力に対して、柱は曲げひび割れが生じない結果となっている。したがって、柱梁接合部内の柱主筋付着応力度は、**図-11**に示す断面内の釣合条件から弾性応力状態を仮定して算定できる。**図-12**に単位架構の一例を示す。

柱主筋の付着応力度の算定結果を**図-13**に示す。ト型架構では柱せん断力が小さいため付着応力度 τ は $0.27\sim 0.47\text{N/mm}^2$ となった。十字型架構ではY方向X4-Y6架構が最大で 0.67N/mm^2 となった。いずれの柱梁接合部内柱主筋の付着応力度はRC規準の短期許容付着応力度 5.52N/mm^2 に比べると小さい。

また、実験結果の付着強度は十分に大きいことから、本建物のPCa柱梁接合部内柱主筋で、有害な付着劣化が生じる可能性は低いと判断できる。

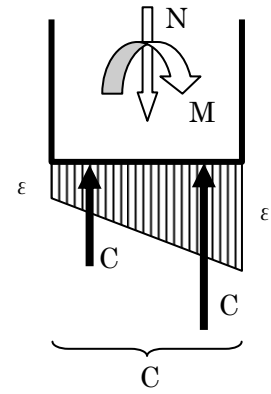


図-11 断面内の釣合条件

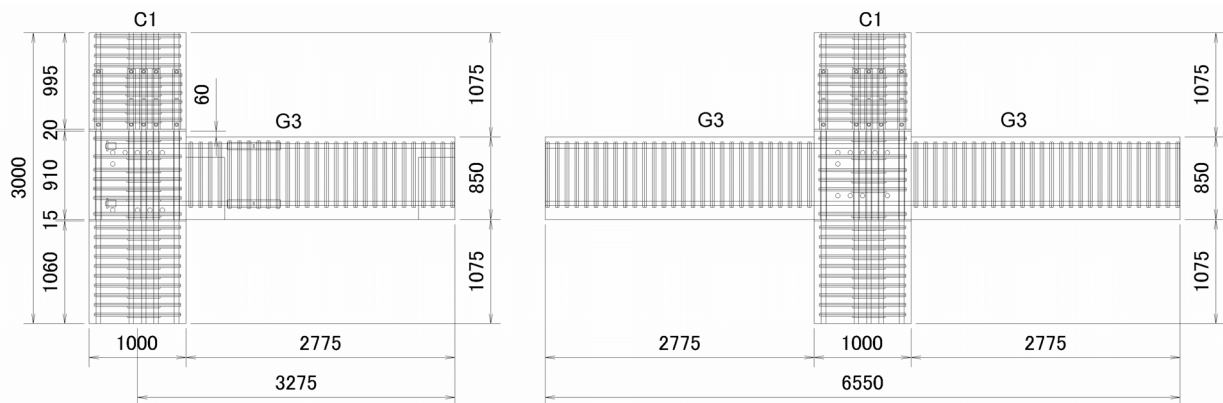


図-12 X方向単位架構

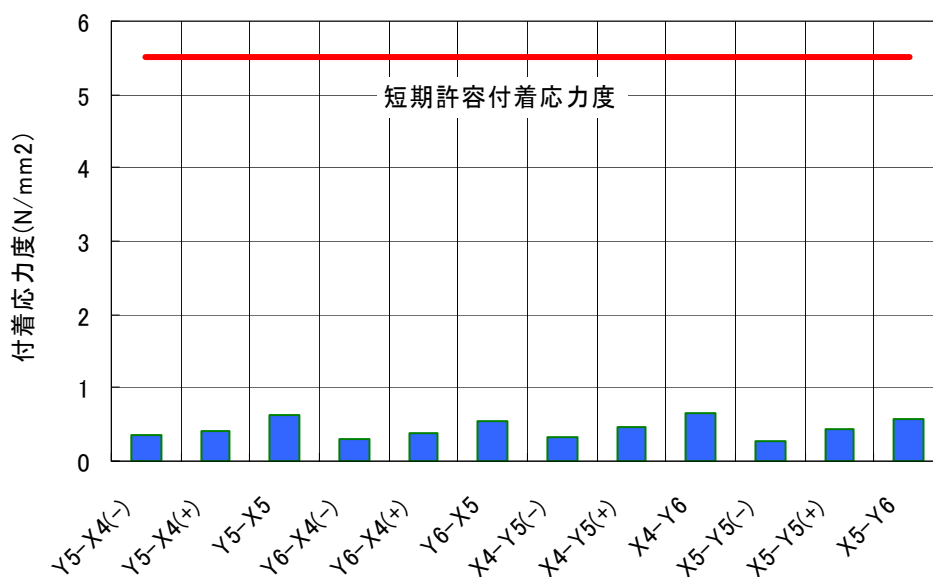


図-13 柱梁接合部内柱主筋付着応力度算定結果

4. まとめ

柱梁接合部 PCa 化工法の柱主筋の付着性状について、コンクリートの圧縮強度・シース管の有無・充填モルタル強度をパラメーターとする引張試験による要素実験を行ない、諸要因が最大荷重におよぼす影響を示した。その結果、本実験の範囲では、シース管を用いた試験体は一体打ちの試験体よりも大きな付着耐力を有していること、鉄筋挿入孔の形状が付着耐力に影響をおよぼすことを示した。また、実験より求まる付着強度は、RC 規準短期許容付着応力度および靱性保証型設計指針付着強度を上回ることを示した。

実施工建物への柱梁接合部 PCa 化工法の適用事例を示し、実験結果との対比から十分な構造安全性が確保されていることを示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1991.4
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999.8
- 3) 杉本訓祥・増田安彦・江戸宏彰：柱梁接合部のシース管内通し主筋の付着性状確認実験，コンクリート工学論文集，Vol.26, No.2, pp.817-822, 2004
- 4) 丸田誠・境治彦：超高層 RC を対象としたプレキャスト骨組の実験的研究，コンクリート工学論文集，Vol.23, No.3, pp.739-744, 2001
- 5) 山中久幸・小坂英之・新上浩・松本啓二：柱梁接合部一体型のプレキャスト梁を用いた RC 造架構の加力実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.869-872, 2004.8