

論文 異種強度のコンクリートで構成される RC 柱の中心圧縮耐力

中西 靖直^{*1}・浜田 公也^{*2}・泉田 伸二^{*3}・南 宏一^{*4}

要旨：本論は、法的に必要な最低限の主筋と帶筋を内蔵した鉄筋コンクリート造ハーフプレキャスト部材の中空部にコンクリートを現場打設した、いわゆる異種強度のコンクリートで構成される柱の圧縮耐力性状を調べるために、9体の中心圧縮実験を行い、破壊メカニズムを明らかにするとともに耐力評価式を検討し、このRC柱の終局耐力は構成されるコンクリートおよび鉄筋の断面積と強度の積に補正係数を乗じた累加式で評価できることを示した。

キーワード：鉄筋コンクリート柱、ハーフプレキャスト、コンクリート強度、遠心成形

1. はじめに

最近、RC構造体の生産性向上を目的としたプレハブ化に関する研究が多く見受けられる中で、運送時の過積載による社会的問題、揚重機の小型化等から、ハーフプレキャスト部材が注目されている。しかし、この部材は現場でのコンクリート打設を伴い、最終的に構造体としては異種強度の組合せで構成されるために、コンクリートの強度差、境界面付着状態、帶筋量が耐力に及ぼす影響が明らかでない。そこで、異種強度のコンクリートで構成されるRC柱の基本的な圧縮耐力性状を把握するために、中心圧縮実験を行った。

2. 実験

2. 1 供試体の製作方法および形状

供試体の形状および配筋状況の一例を図-1に示す。本実験で用いたRC造ハーフプレキャスト部材（以下シェルと記す）の製作は、通常のPC杭と同様な遠心成形方法により、養生は常温蒸気養生によった。中空部のコンクリート（以下コアと記す）は、シェルを型枠代わりに縦打ちし、実験日まで1~2ヶ月間室内空中養生を行った。なお、付着の影響を調べるために、シェル内面には、欠込みを設ける場合と設けない場合があり、前者は成形後内面のブリージングを洗い流し、後者は水洗いをせずグリスを塗布した。

2. 2 供試体の種類

供試体の種類を表-1に示す。供試体は、シェルとコアお

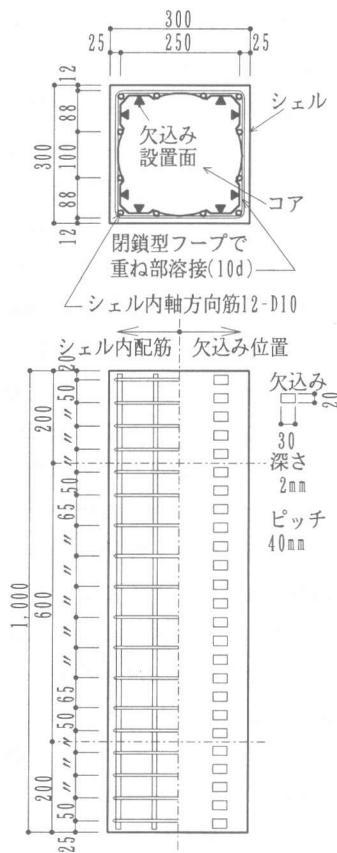


図-1 シェル内面に欠込みがある場合の供試体形状

*1 三菱建設(株)技術本部建築技術部部長、(正会員)

*2 三菱建設(株)技術本部建築技術部主任研究員、博(工) (正会員)

*3 三菱建設(株)技術本部建築技術部主任、

*4 福山大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

表-1 供試体の種類（個数は各々1体）

要因	供試体	シェル 欠込み	断面積 cm ²		圧縮強度kg/cm ²		軸方向 鉄筋	帯筋	加力方法
			シェル	コア	シェル	コア			
A	(コア加圧) 欠込み有無	① 無	—	676	—	225	—	—	①
		② 有	283	666	723	"	12-D10	5φ-65	②③
		③ 有	298	643	768	"	"	"	④
B	(シェル加圧) コア有無	④ 無	278	—	700	—	12-D10	5φ-65	⑤
		⑤ 無	276	663	734	225	"	"	⑥⑦⑧⑨
C	(全面加圧) 帯筋量 欠込み有無	⑥ 無	283	654	740	225	12-D10	5φ-65	⑩
		⑦ 有	298	649	711	"	"	"	⑪
		⑧ 有	284	655	712	"	D6-50	D6-25	⑫
・コンクリートに使用した骨材の最大寸法は、シェルは13mm、コアは10mmである。 ・シェルおよびコアの断面積は実測値である。 ・圧縮強度は、供試体と同一養生を行った振動成形シリンドーの圧縮強度を示す。									

より鉄筋の各耐力の累加が成立するかどうかの検討をするために、以下の3グループを計画した。

A：コアの耐力と付着の影響を調べるための供試体で、加圧はコアのみであり、形状はコアだけのものおよびコアとシェルで構成し欠込みの有るものと無いものである。

B：シェルの耐力を調べるための供試体で、加圧はシェルのみであり、形状はシェルだけのものおよびコアとシェルで構成し欠込みの無いものである。

C：シェルのコアに対する拘束効果を調べるための供試体で、加圧は全面であり、形状はコアとシェルで構成し欠込みの有るものと無いもの、さらに帯筋を変化させたものである。

2.3 加力および変形測定

加力方法は、500t万能試験機を使用し、破壊まで単調載荷した。変形の測定位置を図-2に示す。シェルおよびコアの相対変形は電気式変位計を、軸方向鉄筋、帯筋のひずみ度はW.S.G.を用いて測定した。また、コアの相対変形を測定するために寸切ボルトM12を埋込んだが、このボルトがシェルに接触しないようにシェルには予め20φの穴を開けクリアランスを設けた。シェルの相対変形を測定するための埋込みボルトは、シェルに16φの穴を開けておき、これにコア打設後エポキシ樹脂で固着した。

2.4 材料試験

本実験で用いた鉄筋の応力度 $s\sigma$ とひずみ度 $s\varepsilon$ の関係を図-3に、供試体と同一養生を行った振動成形シリンドーの応力度 $c\sigma$ とひずみ度 $c\varepsilon$ の関係を図-4に示す。

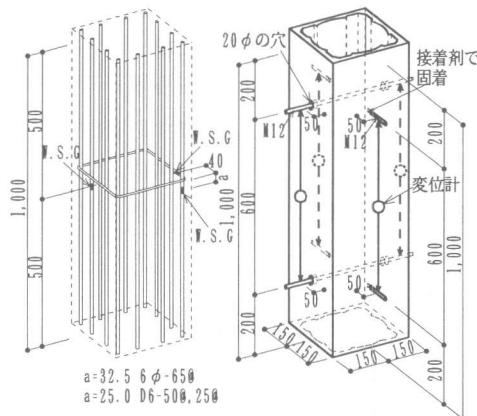


図-2 変形およびひずみ度の測定位置

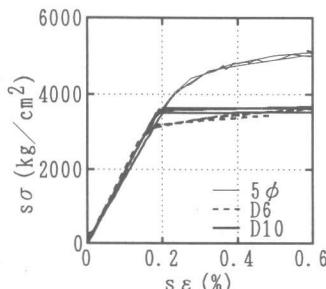


図-3

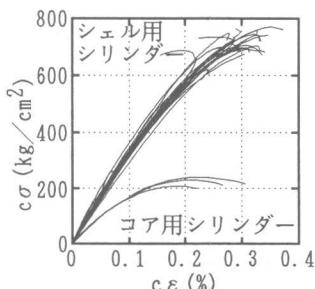
鉄筋の $s\sigma - s\varepsilon$ 関係

図-4

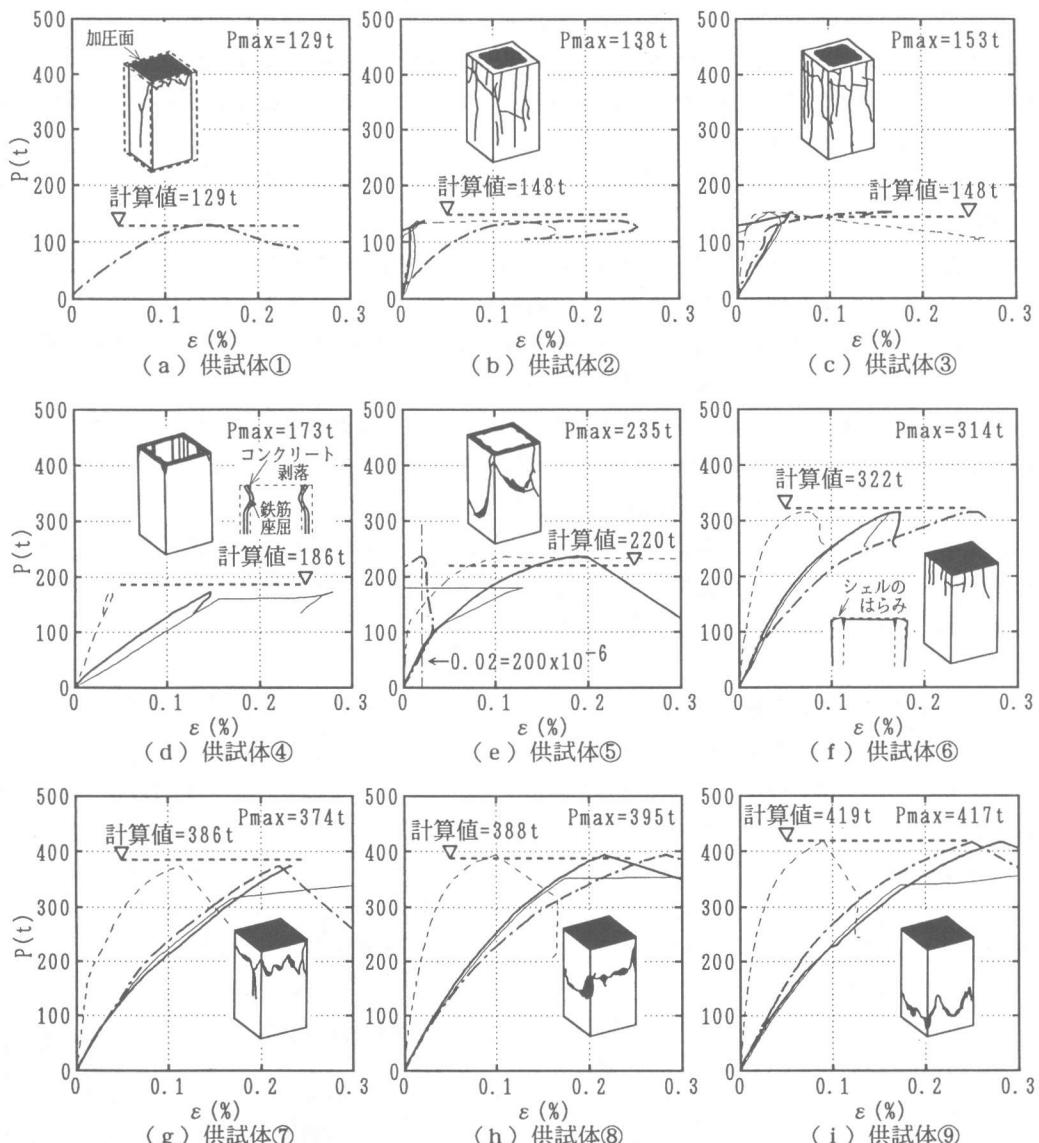
シリンドーの $c\sigma - c\varepsilon$ 関係

3. 実験結果

全供試体について荷重とひずみ度の関係を図-5に示す。縦軸は荷重、横軸は測定した区間の変位から求めた平均ひずみ度、軸方向鉄筋の平均ひずみ度、帯筋のひずみ度である。また図中には、各供試体の最終破壊状態のスケッチを併せて示した。各々の供試体の破壊過程を以下に記す。

供試体①：コアだけの供試体であり、荷重が129tで圧縮破壊した。図-4で示すシリンダー圧縮時の $\sigma - \varepsilon$ 曲線と比べると、 P_{max} 時のひずみが若干小さい程度である。

供試体②：荷重が125t程度でシェルに縦ひびわれが発生し、かつコアの剛性低下が認められ降伏性状を示したが、ひびわれおよび帯筋のひずみが増加しながらもシェルの拘束効果のために荷重



曲線の凡例： ——— シェル、 ----- コア、 —— 軸方向鉄筋、 - - - せん断補強筋

図-5 荷重とひずみ度の関係

は若干上昇し、最大荷重138tに達した。なお、欠込みを設けていないために初期荷重段階からシェルとコアのひずみは異なっている。

供試体③：荷重が130t程度でシェルに縦ひびわれが発生し、荷重の増加に伴いひびわれおよび帶筋のひずみ度が増加し、最大荷重153tに達した。コア自体は約125tで剛性低下が認められ降伏性状を示し、シェルの拘束効果のために脆性的な破壊は生じず、若干の荷重の上昇が認められた。なお、コアのみ圧縮したにもかかわらず、100t程度まではシェルとコアのひずみは同程度である。

供試体④：載荷板の大きさが若干小さかったため、図中のように供試体上端部分の軸方向鉄筋の座屈とシェルの圧縮すべり破壊を生じた。しかし、図-4で示したシリンダー圧縮時の $\sigma - \varepsilon$ 曲線と比べると、最大荷重まではほぼ同じ曲線を示している。

供試体⑤：荷重が約200tでシェルに縦ひびわれが発生し、若干のひびわれの進行を伴いながら最大荷重235tに達した。欠込みを設けていないにもかかわらず、100t程度まではシェルとコアのひずみはほぼ一致している。逆に100tを過ぎると、コアのひずみは徐々に小さくなる代わりにシェルと帶筋のひずみは大きくなっている。

供試体⑥：図中のように供試体上端部分が部分的に破壊したために、載荷途中のシェルとコアのひずみは一致していない。

供試体⑦：荷重が約320tで変形測定用埋込みボルトの穴周辺にひびわれが生じたが、荷重の増加に伴いひびわれが少し増加した程度で最大荷重374tに達した。シェルとコアのひずみは最大荷重まで同程度であり、軸方向鉄筋のひずみも降伏するまでは同様であった。帶筋のひずみは荷重の増加とともに増加しているが最大荷重時でも降伏には至っていない。

供試体⑧：供試体⑦と比べて帶筋量が約2倍であるが、 $P - \varepsilon$ 曲線は最大荷重付近まではほぼ同様な傾向を示した。荷重が約380tで変形測定用埋込みボルトの穴周辺にひびわれが生じ、その後顕著なひびわれは生じないまま最大荷重395tに達した。

供試体⑨：供試体⑦と比べて帶筋量が約4倍であるが、 $P - \varepsilon$ 曲線は最大荷重付近まではほぼ同様な傾向を示した。荷重が約325tで変形測定用埋込みボルトの穴周辺にひびわれが生じ、その後顕著なひびわれは生じないまま最大荷重417tに達した。

4. 結果についての考察

4. 1 軸方向鉄筋の圧縮耐力の評価

図-5の内、全面を加圧した⑥⑦⑧⑨供試体からわかるように、最大荷重時の軸方向鉄筋のひずみは降伏ひずみを超えており、軸方向鉄筋の圧縮耐力は、通常のRC柱と同様に鉄筋の断面積に降伏強度を乗じた値で表すことができる。

4. 2 シェルの圧縮耐力の評価

遠心成形製品のコンクリート圧縮強度は、振動成形で製品同一養生のシリンダー圧縮強度と異なるが、今回のシリンダー圧縮強度 σ_{BS} が 700kg/cm^2 程度であれば、ほぼこの値で製品の圧縮強度を評価できると報告されている[1][2]。

しかし、これら実験ではシェルの厚さは5~12cm

$$\sigma = k \frac{E \pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{a}\right)^2 \frac{1}{b}$$

仮定
 $k = 7.4$
 $a = 100\text{cm}$ $h = 2.5\text{cm}$
 $b = 30\text{cm}$
 $E = 3.4 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$
 $\nu = 1/5$

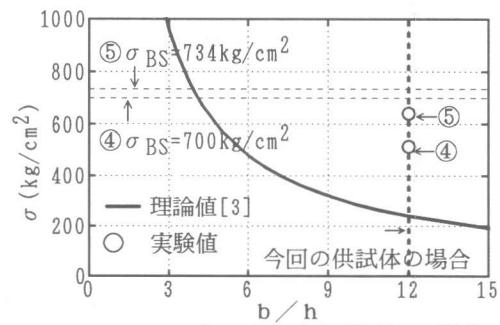


図-6 座屈応力度と幅厚比の関係

であり、これに比して、本実験で用いたシェルの厚さは約2.5cmで半分以下となり、圧縮強度に及ぼす局部座屈の影響が考えられる。そこで、板の弾性理論から求めた座屈強度[3]と幅厚比の関係を検討し、図-6の実線で示す。同図にシェルだけ加圧した供試体④⑤の実験値から逆算したシェルの最大荷重時圧縮強度をプロットしている。実験値は、供試体④からは{(最大荷重:173t)-(鉄筋の耐力: $0.71\text{cm}^2 \times 12\text{本} \times 3.56\text{t/cm}^2 = 30\text{t}$)}/(シェルの断面積:278cm²)=514kg/cm²、供試体⑤からは{(235t-30t)-(コアの応力負担分: $2.1 \times 10^{-5}\text{kg/cm}^2 \times 663\text{cm}^2 \times 200 \times 10^{-6} = 28\text{t}$)}/(シェルの断面積:276cm²)=641kg/cm²として求めたものである。実験値は弾性理論による座屈強度ほどは低下しておらず、シリンダー強度に対して73~87%の強度となっている。このようにシェルだけが圧縮され面外に拘束されていないと考えられる場合には、シェルの圧縮強度はシリンダー強度の80%で評価する。しかしながら、実際にはシェルだけが圧縮されることではなく一体化に寄与するコアが伴うため、座屈に対する強度低下は上記のシェルだけの場合に比べより小さいものと予測される。従って、供試体⑦⑧⑨の場合には、前述したようにシェルとコアの圧縮ひずみの挙動がほぼ同じであるため、シェルの圧縮強度はシリンダー強度と等しく評価した。なお、供試体⑥については、供試体⑦と較べて、全面加圧している点では同じであるが、境界面に付着を無くしていることが異なっており、シェルの圧縮強度は、面外に拘束されていないとして供試体④⑤と同様の評価をした。

4. 3 コアの圧縮耐力の評価

コアだけの供試体①から破壊時圧縮強度を求めるとき、 $129\text{t}/676\text{cm}^2 = 191\text{kg/cm}^2$ であり、シリンダー圧縮強度 σ_{BC} (225kg/cm²)の85%の値となる。このことから、コアが一軸応力を受ける場合には、圧縮耐力はコアの断面積とシリンダー圧縮強度 σ_{BC} と寸法効果による低減係数0.85の積で表すことができる。しかしながら、実際にはコアはシェルに拘束され、三軸応力状態になっているものと考えられ、コアの圧縮耐力は、コアの強度は当然のことながら、鋼管コンクリートの充填コンクリートの場合と同様に、境界面の付着状態、シェルの周辺方向の強度に影響される。既往の研究では、松藤等が、シェルが遠心成形された円形の供試体を使用して帶筋の割合とピッチを変化させた実験を行い、シェルとコアのそれぞれの断面積と圧縮強度の積の和に対して実験耐力は0.7~1.5倍の範囲であると報告している[4]。また、正方形鋼管コンクリートの場合のコンファインド効果については、塑性理論に基づいて半理論的に実験から求める方法[5][6]がある。しかし、今回の供試体のようにシェルがコンクリートで角形のものは応力状態が複雑であるため、帶筋の径 d とピッチ S の関係を用いて、実験値からシェルのコアに対する拘束効果による割増係数 β_c (= σ_c' / σ_c)を求め、その結果を図-7に示す。 σ_c' は最大荷重から鉄筋およびシェルの圧縮耐力を除いた時のコアの圧縮応力度、 σ_c はコア用のシリンダー強度 $\sigma_{BC} \times 0.85$ として求めた。この値は境界面の付着状態、帶筋量によって1.0~1.5の範囲にあり、 d/S が増加すると β_c も増加することが認められる。そこで本論では、 β_c と d/S の関係を部分的に破壊した供試体⑥を除いて、最小二乗法による回帰直線式で表し、

$$\beta_c = \sigma_c' / \sigma_c = 1 + 2.1 d / S \quad (1)$$

で評価した。

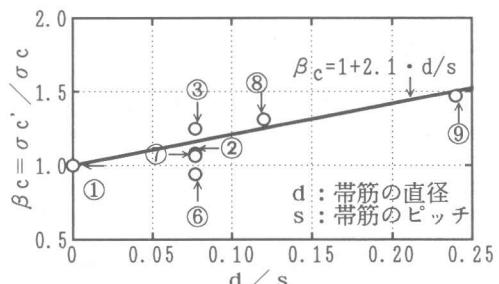


図-7 σ_c' / σ_c と d / s の関係

4. 4 耐力評価式

4. 1～3から、異種強度のコンクリートで構成されるRC柱の中心圧縮耐力 P_u は今回の実験結果から推定すると、軸方向鉄筋、シェル、コアの累加耐力で表され、

$$P_u = sA \cdot s\sigma + \alpha_s \cdot A_s \cdot \sigma_{bs} + \alpha_c \cdot \beta_c \cdot A_c \cdot \sigma_{bc} \quad (2)$$

ただし

sA ：軸方向鉄筋の断面積 $s\sigma$ ：軸方向鉄筋の降伏点強度

α_s ：シェルの幅厚比による低減係数

面外拘束有り(欠込み有り)： $\alpha_s = 1$ 、面外拘束無し(欠込みなし)： $\alpha_s = 0.8$

A_s ：シェルの断面積

σ_{bs} ：シェルのシリンダー圧縮強度

α_c ：コアの寸法効果による低減係数($\alpha_c = 0.85$)

β_c ：シェルのコアに対する拘束効果による割増係数

($\beta_c = 1 + 2.1 d/S$ 、 d ：シェル内の帶筋の直径、 S ：シェル内の帶筋のピッチ)

A_c ：コアの断面積

σ_{bc} ：コアのシリンダー圧縮強度

となる。式(2)で求めた耐力と実験の最大荷重を比較検討した結果を図-8に示す。同図により、実験値と計算値の比は0.9～1.1の範囲であり、式(2)で耐力が評価できることが示される。

5.まとめ

本実験の供試体で設けたシェル内面の欠込みは、シェルとコアを一体にする効果を持つことが明らかになった。また、コアはシェルの拘束効果によって三軸応力状態になるので、今回の実験範囲におけるシェルのコアに対する拘束効果による割増係数 β_c を式(1)のように求めた。さらに、主筋と帶筋を内蔵して製作したシェルと現場打設したコアの、異種強度のコンクリートで構成されるRC柱の中心圧縮耐力は、式(2)

の累加強度式で表せることを示した。しかしながら、本実験ではシェルの形状およびコアの強度を実験変数にしていなかったので、これらが耐力に及ぼす影響は数値的に明らかにならなかった。

参考文献

- 1) 福沢公夫ほか：ヒューム管における管体コンクリートの圧縮強度管理用供試体の選定実験、コンクリート工学年次論文報告集、9-1、pp. 527-530、1987. 6
- 2) 古森徳二：遠心力締固めコンクリートの圧縮試験方法について、セメントコンクリート、No. 262、pp. 12-21、1968. 12
- 3) 土木学会：構造力学公式集、技報堂、pp. 365-367、1991. 1
- 4) 松藤浩一ほか：遠心力成形PC部材に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C構造II、pp. 535-536、1990. 10
- 5) Chen W.F. ほか監訳：コンクリート構造物の塑性解析、丸善、pp. 278-291、1985
- 6) 松村弘道：充填型鋼管コンクリート構造に於ける鋼管とコンクリートの付着性能の影響に関する研究、九州大学学位請求論文、1990

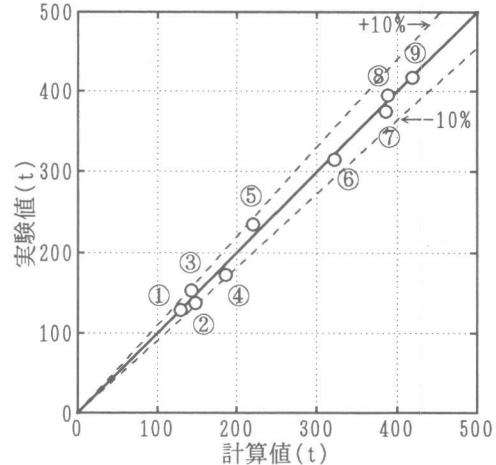


図-8 実験値と計算値の比較