

ハーフPCaコンクリートの圧縮部材における コンファインド効果を考慮した断面構成に関する研究

陶山裕樹、小山田英弘、高巢幸二

北九州市立大学国際環境工学部

概要：本研究では、ハーフ PCa コンクリートを模した無筋モルタル供試体を用いて中心圧縮実験を行い、軸圧縮特性を検討した。結果、シェルを W/OPC 0.35、0.55、0.68 のモルタル、コアを W/OPC 0.55 のモルタルとした供試体の最大耐力は、累加強度式による計算値より高くなった。この最大耐力の増加は、軸剛性の増加を伴い、シェルとコアの最大応力時のひずみが同程度のときに生じた。

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の工法のひとつに、中空の PCa コンクリートを工事現場にて建込み後、内部にコンクリートを打ち込むハーフ PCa 工法がある。同工法は型枠工事を省略できるため、従来工法と比較して低コスト化および工期短縮、更に品質の安定化などの可能性を有する。また、フル PCa コンクリートと比較しても、1 個のセグメントの重量を 10ton 以下に抑えられるため、輸送が制限される市街地や仮設物を設けられない場所での施工に優位性を有する。

コンクリート工事において、同一区画で打ち込まれるコンクリートの種類は、管理上の問題から 1 種類に制限されることが殆どである。これを反映して、土木・建築材料の研究分野では、基本的に部材が 1 種類のコンクリートで構成されることが前提になっている。ハーフ PCa コンクリートのように、2 種類のコンクリートで構成された供試体を研究対象とした実験報告は少ない。一方、土木・建築構造の研究分野では、ハーフ PCa コンクリートを模した供試体を用いて中心圧縮実験および曲げせん断実験などが行われ、耐力や剛性の評価式が提案されている^{1)~6)}など。文献⁵⁾では、中心圧縮耐力の評価式に、PCa コンクリートのコンファインド効果による現場打ちコンクリートの強度上昇（計算値に対して約 1.02 倍）が見積もられている。しかしながら、文献¹⁾では断面を構成するコンクリートが 2 種類になることで最大耐力が約 0.8 倍に低下した実験結果が報告されている。こうした一見、矛盾した実験結果が生じた理由は、構造分野では、配筋を実験要因とした検討が主流であり、PCa コンクリートおよび現場打ちコンクリートの種類を 1 水準にした検討が行われているためである。PCa コンクリートおよび現場打ちコンクリートの圧縮強度の変化を検討する場合、コンクリートそのものを研究対象とした検討が必要と

いえる。

本研究では、ハーフ PCa コンクリートを模した供試体の軸圧縮特性について、コンクリートの種類を実験要因とした実験・検討を行った。研究申請時に筆者らは、PCa コンクリートによるコンファインド効果によって供試体の最大耐力が増加することを期待した。しかしながら、この最大耐力の増加は供試体の断面を 2 層にするだけで得られるものであった。本報告書では、無筋モルタル供試体を用いた実験によって上記知見が得られた過程を報告する。

なお、本報告書では供試体の PCa コンクリートが構成する外殻部分をシェル、現場打ちコンクリートが構成する中心部分をコアと称す。

2. 実験概要

2.1 モルタルの作成

本研究では、実部材を対象とする前段階の検討として、無筋モルタル供試体を用いた実験を行った。供試体を構成するモルタルの使用材料を表 1 に示す。また、モルタルの調合、圧縮強度および静弾性係数を表 2 に示す。同表の圧縮強度はφ100mm x 200mm の円柱供試体を用いて JIS A 1108 に基づいて測定した値であり、静弾性係数は JIS A 1149 に基づいて 50μm のひずみと圧縮強度の 1/3 の割線から求めた値である。シェルモルタルの水セメント比 (W/OPC) を 0.68、0.55 および 0.35 の 3 水準とした。W/OPC 0.68 のモルタルには、強度を

表 1 使用材料

上水道水 (W)
普通ポルトランドセメント (OPC)
密度 3.15g/cm ³ , 比表面積 3,300cm ² /g
フライアッシュ (FA)
密度 2.25g/cm ³ , 比表面積 3,470cm ² /g, 強熱減量 2.3%
海砂 (S)
表乾密度 2.60g/cm ³ , 粗粒率 2.45

表 2 モルタルの調合

用途	W/OPC	単位量, kg/m ³				時期	圧縮強度* N/mm ²	静弾性係数* kN/mm ²
		W	OPC	FA	S			
シェル	0.35	265	758	—	1,114	A 期	68.1, 70.1, 69.6	25.2, 27.5, 27.4
						C 期	61.1, 60.5, 58.0	29.4, 29.3, 30.2
						E 期	56.9, 65.8, 59.8	30.2, 31.3, 32.6
	0.55	265	482	—	1,342	B 期	37.3, 37.2, 37.7	26.3, 27.6, 24.0
						E 期	38.4, 37.7, 37.6	26.2, 25.9, 24.5
	0.68	265	386	96	1,312	D 期	27.2, 26.7, 27.1	22.0, 20.8, 21.9
コア	0.55	265	482	—	1,342	A 期	40.7, 39.7, 38.5	26.3, 25.9, 25.5
						B 期	38.9, 41.1, 35.5	27.0, 26.1, 26.3
						C 期	38.1, 38.2, 38.1	28.1, 24.9, 27.0
						D 期	35.0, 36.4, 35.1	23.7, 24.3, 24.7
						E 期	37.3, 37.2, 37.6	24.6, 25.3, 24.9

*シェルに用いるものは材齢 28 日に測定、コアに用いるものは材齢 31 日に測定。

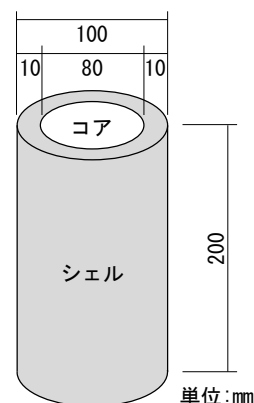


図 1 供試体の設計図

抑えつつ過度な材料分離を防ぐことを目的にフライアッシュ（JIS II 種）を混合した。コアモルタルは W/OPC 0.55 の 1 水準とした。一部の供試体では、W/OPC 0.55 のモルタルに、最大寸法 20mm の粗骨材（G）を混合したコンクリートをコアとした。

モルタルの練混ぜにはパン型ミキサーを使用した。練混ぜ時間は 5 分間とした。練り上がり時に打ち込み可能な流動性を有していること、および空気量が $6.8 \pm 1.5\%$ であることを確認した後、打ち込みを行った。

2.2 供試体の作成

供試体は図 1 に示す $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱とした。シェルの厚さは、実部材をスケールダウンした 10mm に設定した。供試体の作成にあたり、最初にシェルに成るモルタルを筒状の型枠に打ち込んだ。このとき、通常の突き棒を用いた打込み方法では充填不良が懸念されたため、テーブルバイブレーターを使用した。シェルを先に作製した理由は、実際のハーフ PCa コンクリートの施工手順を想定したためである。シェルを 20℃ の恒温室内で 3 日間封かん養生した後、脱型した。シェルとコアの付着を高めるため、脱型後のシェルの内側をワイヤーブラシで研磨し、霧吹きで 2mL 程度散水した。コアに成るモルタルの打込みには突き棒を使用した。その後、20℃ の恒温室内で 28 日間封かん養生し、中心圧縮実験に供した（図 2）。

2.3 実験方法

中心圧縮実験を JIS A 1108（コンクリートの圧縮試験方法）に準じて行った（全面載荷）。実験後の供試体を写真 1 に示す。このとき、検長 100mm のコンプレッソメーターを用いて圧縮軸の静ひずみを測定した。得られた荷重およびひずみから、JIS A 1149 に準拠した式（1）によって供試体の軸

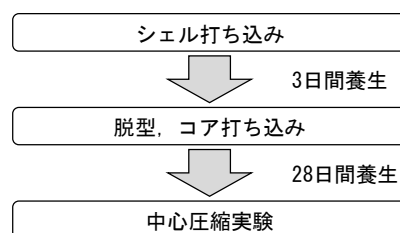


図 2 供試体の作成手順



写真 1 中心圧縮実験後の供試体

剛性を求めた。

$$K = \frac{P_1 - P_2}{\varepsilon_1 - 50\mu} \quad (1)$$

ここで、

K ：軸剛性の実験値（N）

P_1 ：最大耐力の 1/3（N）

P_2 ：50 μ ひずみのときの荷重（N）

ε_1 ： P_1 の荷重によって生じたひずみ

また、シェルによるコンファインド効果を検討することを目的に、一部の供試体でコアのみを部分載荷した。 $\phi 80\text{mm}$ の金属板を供試体の上下面の中心に設置して、中心圧縮実験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 最大耐力

3.1.1 全面載荷の場合

全面載荷の中心圧縮実験によって得られた最大耐力を考察するため、実験値の比較対象として累加強度式による最大耐力を計算した。累加強度式とは、供試体を構成するシェルおよびコアの圧縮強度と断面積の積を累加して最大耐力を計算する式であり、式 (2) によって表される。

$$P_{e2} = \sigma_s \cdot A_s + \sigma_c \cdot A_c \quad (2)$$

ここで、

P_{e2} : 累加強度式による最大耐力 (N)

σ_s : シェルの圧縮強度 (N/mm²)

A_s : シェルの断面積 (mm²)

σ_c : コアの圧縮強度 (N/mm²)

A_c : コアの断面積 (mm²)

(シェルの圧縮強度 > コアの圧縮強度)

シェルが W/OPC 0.35 かつコアが W/OPC 0.55 のモルタルで構成された供試体の最大耐力の実験値を図 3(a)に示す。実験値は累加強度式による算定値を平均で 21kN 上回った。分散分析の結果 (F = 13.30, df = 1/12, p < 0.01)、最大耐力の実験値は累加強度式による算定値より高いといえる。

(シェルの圧縮強度 ≒ コアの圧縮強度)

シェルおよびコアがともに W/OPC 0.55 のモルタルで構成された供試体の最大耐力の実験値を図 3(b)に示す。実験値は累加強度式による算定値を平均で 34kN 上回った。分散分析の結果 (F = 14.94, df = 1/11, p < 0.01)、最大耐力の実験値は累加強度式による算定値より高いといえる。

(シェルの圧縮強度 < コアの圧縮強度)

シェルが W/OPC 0.68 かつコアが W/OPC 0.55 のモルタルで構成された供試体の最大耐力の実験値を図 3(c)に示す。実験値は累加強度式による算定値を平均で 24kN 上回った。分散分析の結果 (F = 11.96, df = 1/7, p < 0.05)、最大耐力の実験値は累加強度式による算定値より高いといえる。

3.1.2 部分載荷の場合

部分載荷の中心圧縮実験によって得られた支圧強度を図 4 に示す。同図では、下記の 3 水準の供試体の中心 (φ80mm) を載荷したときの支圧強度を比較している。

- ① W/OPC 0.55 のコアを一体打ち
- ② W/OPC 0.35 のシェルと W/OPC 0.55 のコア
- ③ W/OPC 0.55 のシェルと W/OPC 0.55 のコア

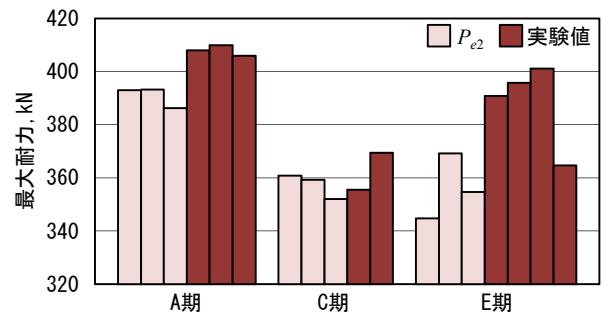


図 3(a) 最大耐力 (シェル W/OPC 0.35、コア W/OPC 0.55)

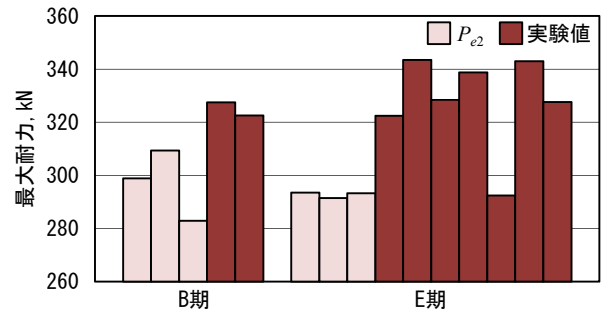


図 3(b) 最大耐力 (シェル W/OPC 0.55、コア W/OPC 0.55)

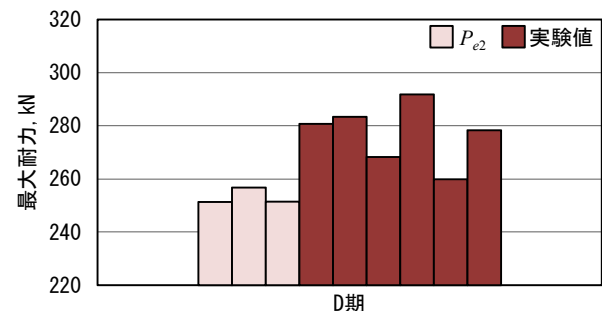


図 3(c) 最大耐力 (シェル W/OPC 0.68、コア W/OPC 0.55)

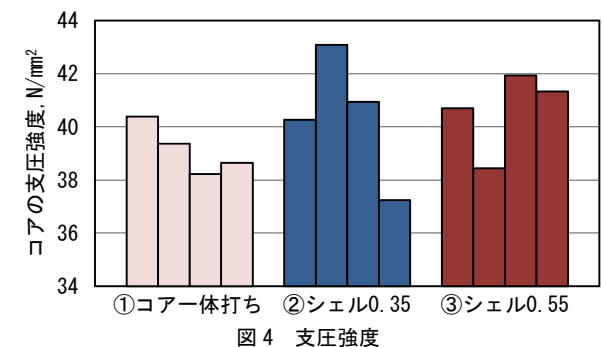


図 4 支圧強度

分散分析の結果 (F = 0.81, df = 2/9, n.s.)、3 つの供試体の支圧強度に差があるとはいえない。

3.1.3 耐力増加についての考察

断面が 2 層の供試体の最大耐力は、全面載荷されたとき、累加強度式による計算値より増加した。研究申請時点で、この最大耐力の増加はコンファインド効果に起因し、シェルの圧縮強度がコアより高い場合 (図 3(a)) にのみ生じると予想した。

しかしながら、シェルの圧縮強度がコアと同等もしくはそれ以下の場合（図 3(b)、(c)）でも最大耐力が増加した。

また、コンファインド効果による最大耐力の増加量は、拘束応力が高いほど大きくなることが知られている⁷⁾。よって、最大耐力の増加がコンファインド効果に起因するのであれば、高強度のシェルで覆われたコアの支圧強度は、同程度の強度のシェルで覆われたコアより高くなると考えられる。しかしながら、両者の支圧強度に有意差は確認できなかった（図 4）。

これらの実験結果から、断面を 2 層にすることで生じる最大耐力の増加は、コンファインド効果ではない別の要因で説明する必要があるといえる。

3.2 軸剛性（全面載荷）

軸剛性を考察するため、実験値の比較対象として累加強度式による軸剛性を計算した。累加強度式による軸剛性は、式（3）によって表される。

$$K_{e3} = E_S \cdot A_S + E_C \cdot A_C \quad (3)$$

ここで、

K_{e3} ：累加強度式による軸剛性（N）

E_S ：シェルの静弾性係数（N/mm²）

E_C ：コアの静弾性係数（N/mm²）

また、別の比較対象として、別途シェルモルタルおよびコアモルタルを一体打ちした供試体（ ϕ 100mm x 200mm）に生じたひずみ（図 5）の加重平均で荷重を除して軸剛性を計算した。この計算式を本報告書では加重平均ひずみ式と称す。同式による軸剛性は、式（4）によって表される。

$$K_{e4} = \frac{P_1 - P_2}{\frac{\varepsilon_{1S} \cdot A_S + \varepsilon_{1C} \cdot A_C}{A_A} - 50\mu} \quad (4)$$

ここで、

K_{e4} ：加重平均ひずみ式による軸剛性（N）

ε_{1S} ：シェルモルタルを一体打ちした供試体において P_1 の荷重によって生じたひずみ

ε_{1C} ：コアモルタルを一体打ちした供試体において P_1 の荷重によって生じたひずみ

A_A ：全断面積（mm²）

（シェルの圧縮強度 > コアの圧縮強度）

シェルが W/OPC：0.35 かつコアが W/OPC：0.55 のモルタルで構成された供試体の軸剛性の実験値を図 6(a)に示す。実験値は累加強度式による軸剛

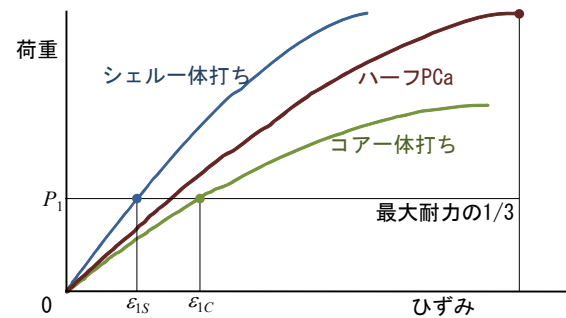


図 5 加重平均ひずみ式における ε_{1S} 、 ε_{1C}

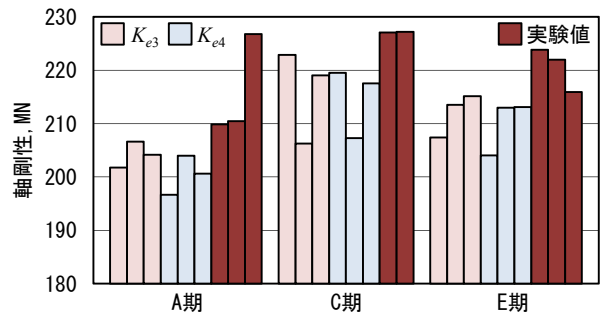


図 6(a) 軸剛性（シェル W/OPC 0.35、コア W/OPC 0.55）

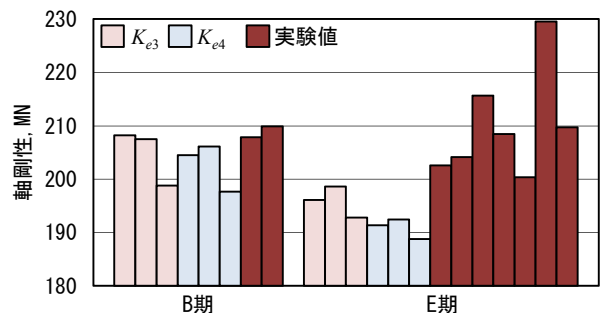


図 6(b) 軸剛性（シェル W/OPC 0.55、コア W/OPC 0.55）

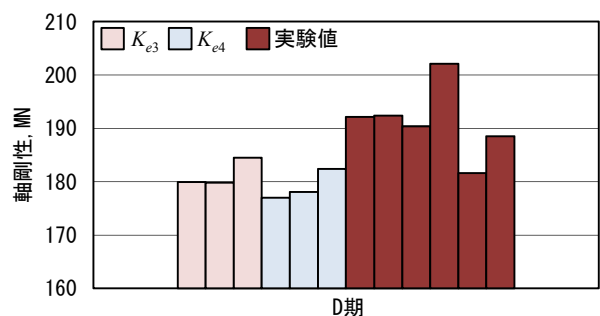


図 6(c) 軸剛性（シェル W/OPC 0.68、コア W/OPC 0.55）

性を平均で 10MN 上回り、加重平均ひずみ式による軸剛性を平均で 13MN 上回った。分散分析の結果（ $F = 11.87$, $df = 1/11$, $p < 0.01$ and $F = 19.18$, $df = 1/11$, $p < 0.01$ ）、軸剛性の実験値は累加強度式および加重平均ひずみ式による算定値より高いといえる。

（シェルの圧縮強度 ≒ コアの圧縮強度）

シェルおよびコアがともに W/OPC:0.55 のモル

タルで構成された供試体の軸剛性の実験値を図 6(b)に示す。実験値は累加強度式による軸剛性を平均で 12MN 上回り、加重平均ひずみ式による軸剛性を平均で 16MN 上回った。分散分析の結果 ($F = 4.18$, $df = 1/11$, $p < 0.1$ and $F = 8.34$, $df = 1/11$, $p < 0.05$)、軸剛性の実験値は累加強度式および加重平均ひずみ式による算定値より高いといえる。

(シェルの圧縮強度<コアの圧縮強度)

シェルが W/OPC : 0.68 かつコアが W/OPC : 0.55 のモルタルで構成された供試体の軸剛性の実験値を図 6(c)に示す。実験値は累加強度式による軸剛性を平均で 10MN 上回り、加重平均ひずみ式による軸剛性を平均で 12MN 上回った。分散分析の結果 ($F = 5.64$, $df = 1/7$, $p < 0.05$ and $F = 8.52$, $df = 1/7$, $p < 0.05$)、軸剛性の実験値は累加強度式および加重平均ひずみ式による算定値より高いといえる。

以上の実験結果から、断面を 2 層にすることで生じる最大耐力の増加は、軸剛性の増加を伴うことが示される。

3.3 荷重 - ひずみ関係 (全面載荷)

全面載荷の中心圧縮実験において供試体に生じた荷重 - ひずみの関係を図 7(a)~(c)に示す。同図には、最大耐力時までの曲線を描き、別途シェルモルタルおよびコアモルタルを一体打ちした供試体 ($\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$) の結果を併記している。図 7(a)~(c)では、シェルとコアの圧縮強度が異なった (両者の差が最大で 25N/mm^2 程度に達した) が、最大応力時のひずみは同程度 (500μ の範囲内) であった。このとき、図 3(a)~(c)で示したように、最大耐力の増加が確認された。

一方、シェルを W/OPC 0.35 のモルタルとし、コアを W/OPC 0.55 のコンクリート (粗骨材混合) とした供試体では、図 8 に示す荷重 - ひずみ関係が得られた。同供試体では、シェルとコアの最大応力時のひずみが異なる (倍程度違う)。このとき最大耐力の実験値の平均は、表 3 に示すように、累加強度式の最大耐力より低くなった。供試体が最大耐力を発揮するとき、シェルが比較的大きな余力を残したままコアの破壊が先行し、結果、供試体の最大耐力が増加しなかったと考えられる。

以上の実験結果から、断面を 2 層にすることで生じる最大耐力の増加は、シェルとコアの最大応力時のひずみを同程度にすることが必要条件であると考えられる。

4. まとめ

本報告書の実験によって得られた知見を以下に示す。

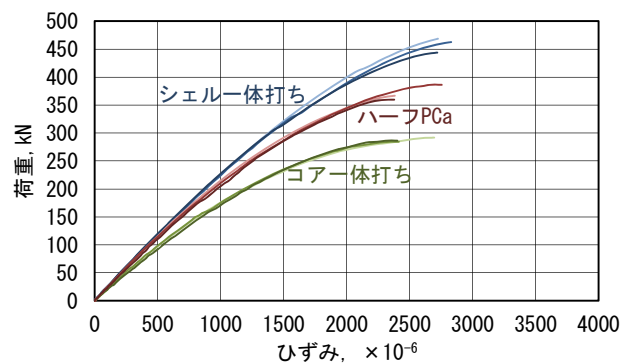


図 7 (a) 応力-ひずみ関係 (シェル W/OPC 0.35、コア W/OPC 0.55)

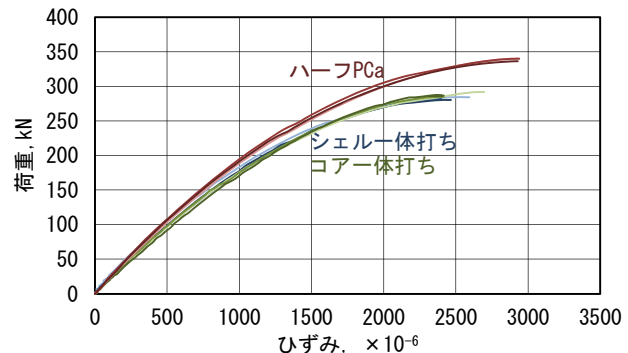


図 7 (b) 応力-ひずみ関係 (シェル W/OPC 0.35、コア W/OPC 0.55)

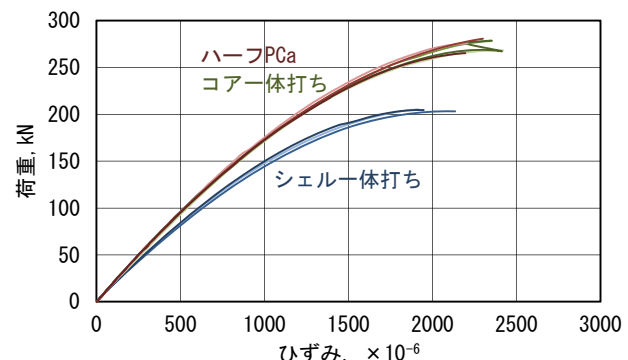


図 7 (c) 応力-ひずみ関係 (シェル W/OPC 0.35、コア W/OPC 0.55)

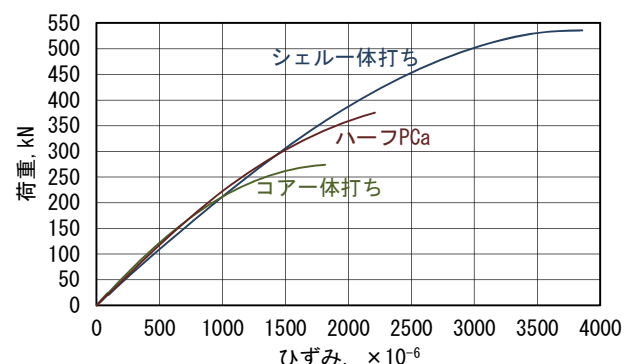


図 8 応力-ひずみ関係 (シェル=モルタル、コア=コンクリート)

表 3 最大耐力 (シェル=モルタル、コア=コンクリート)

	最大耐力, kN
累加強度式による計算値	368, 373, 373 (Av. 371)
実験値	374, 388, 366 (Av. 366)

- (1) 断面がシェルおよびコアの 2 層で構成された供試体の最大耐力は、全面載荷されたとき、累加強度式による計算値より高くなる。シェルが W/OPC 0.35, 0.55, 0.68 のモルタルでコアが W/OPC 0.55 のモルタルのとき、この最大耐力の増加が確認された。
- (2) 上記の最大耐力の増加は、コンファインド効果ではない別の要因で説明する必要がある。
- (3) 上記の最大耐力の増加は、軸剛性の増加を伴う。
- (4) 上記の最大耐力の増加は、シェルとコアの最大応力時のひずみを同程度にすることが必要条件である。

本報告書の他学会等への投稿

- (1) 佐藤剛、陶山裕樹、高巢幸二、小山田英弘：二種類のコンクリートで断面が構成された圧縮部材の基礎的研究—無筋モルタル供試体における検討—、日本建築学会九州支部研究報告、第 53 号・1〔構造系〕、pp.113-116、2014 年 3 月
- (2) 向江賢、佐藤剛、陶山裕樹、高巢幸二、小山田英弘：二種類のコンクリートで断面が構成された圧縮部材の基礎的研究 その 2 無筋モルタル供試体による耐力増加の条件の検討 1、日本建築学会学術講演梗概集（近畿）、2014 年 9 月（投稿中）
- (3) 佐藤剛、向江賢、陶山裕樹、高巢幸二、小山田英弘：二種類のコンクリートで断面が構成された圧縮部材の基礎的研究 その 3 無筋モルタル供試体による耐力増加の条件の検討 2、日本建築学会学術講演梗概集（近畿）、2014 年 9 月（投稿中）
- (4) Ken Mukae, Hiroki Suyama, Koji Takasu, and Hidehiro Koyamada: A study on compression characteristics of concrete comprised of bilayer -Examination by non-line mortar specimen-, 39th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 2014（投稿中）

参考文献

- 1) 松藤浩一、他：遠心力成形 PC 部材に関する実験的研究 その 3 圧縮実験、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、pp.535-536、1990
- 2) 中野克彦、松崎育弘：PCa および RC 柱の圧縮性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.505-510、1992
- 3) 増田安彦、吉岡 研三：外殻に薄肉プレキャスト管を使用した鉄筋コンクリート柱の耐力特

性に関する研究、日本建築学会構造系論文集（458）、pp.109-118、1994

- 4) 久保倉拓、柳沢延房、磯健一、村上右：薄肉ハーフ PCa 部材の力学的挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、pp.757-762、1994
- 5) 中西靖直、浜田 公也、泉田伸二、南宏一：遠心成形ハーフプレキャスト角型管を用いた鉄筋コンクリート柱の中心圧縮耐力、日本建築学会構造系論文集（492）、pp.79-88、1997
- 6) 細矢博、浅野芳伸、小河義郎、今井弘：外殻 PCa を用いた鉄筋コンクリート柱の構造特性と最大耐力、日本建築学会構造系論文集（544）、pp.117-124、2001
- 7) F. E. Richart, A. Brandtzaeg and R. Brown: A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, University of Illinois Bulletin; Vol.26, No.12, 1928