論文　繰返し加力を受けるコンクリートの支圧性状

安田　聡[*1]・小室　努[*2]・川端　一三[*1]・是永　健好[*1]

要旨：本研究では，比較的大きな円形断面を有する試験体を用いて，コンクリートの繰り返し加力下における支圧性状を把握するために圧縮載荷実験を行った。試験体数は4体で，支圧面積を変化させた。実験の結果，繰返し支圧応力を受ける場合のコンクリートのひび割れ発生時応力および破壊性状などを明らかにするとともに，支圧強度に及ぼす寸法効果および横補強筋の拘束効果の影響を示した。

キーワード：支圧強度，繰返し加力，ひび割れ，寸法効果

1．はじめに

コンクリートの局部的な部分に極めて大きい集中荷重が作用する支圧の問題は，構造物の設計でよく取り上げられる。例えば，鉄骨埋込（根巻き）型柱脚部やプレストレストコンクリートの緊張材定着部，最近では杭頭半剛接合構法における杭頭接合部[1)]などにその例が見られる。

支圧に関する既往の研究は，比較的小さい立方体（もしくは直方体）コンクリートブロックを用いた単調載荷による支圧強度について論じたものが多く，円形断面の供試体を用いた実験や繰返し加力を受ける場合のコンクリートの支圧性状について研究されているものは少ない。

そこで本研究では，円形断面の場合の支圧破壊性状および支圧強度を確認するために，予備実験として，強度試験用テストピースを用いた簡易な圧縮試験を行い，次に，比較的大きな断面を有する円柱試験体を用いて，繰返し加力を受けるコンクリートの支圧強度およびひび割れ発生応力などの支圧性状を把握するために繰返し圧縮実験を行うこととした。

2．テストピースを用いた簡易支圧試験

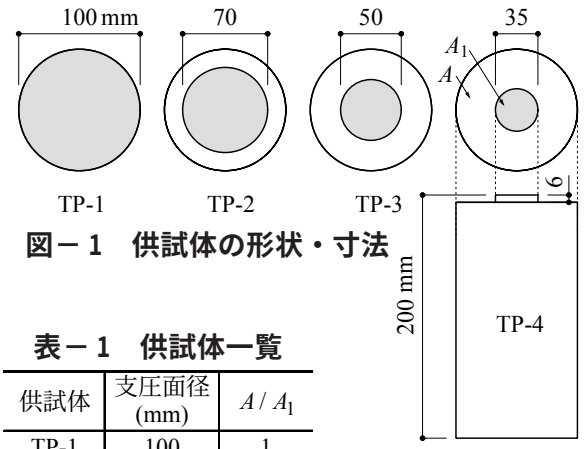
2.1 実験概要

表－1に供試体一覧を，**図－1**に供試体の形状・寸法を示す。供試体は直径φ100mm×高さ200mmの円柱で，支圧面積A_1に対する支承（軸部）面積Aの比A/A_1を4種類変化させた。供試体は各種類毎に3体用意した。コンクリートは，水セメント比61.3%，細骨材最大寸法5mm，粗骨材最大寸法25mm，細骨材率48.3%，普通ポルトランドセメントを使用した。

本試験では，支圧面となる鋼製の支圧板を用いず，後述する繰返し圧縮載荷実験の試験体を模擬して供試体端部を高さ6mm突起させることで支圧面を成形した。載荷は，300kNアムスラー試験機を用いて単調圧縮載荷を行った。

2.1 実験結果

写真－1に各供試体の最終破壊状況を示す。



図－1　供試体の形状・寸法

表－1　供試体一覧

供試体	支圧面径 (mm)	A/A_1
TP-1	100	1
TP-2	70	2
TP-3	50	4
TP-4	35	8

*1 大成建設（株）　技術センター　（正会員）
*2 大成建設（株）　構造設計部　（正会員）

いずれの供試体も支圧面縁から放射状に亀裂が発生し，材軸方向に大きな縦ひび割れとして進展した。コンクリートはつり後に，いずれの供試体も支圧面を底面とした円錐体が形成されているのが確認された。本試験の範囲における破壊モードは，立方体コンクリートブロックによる支圧実験[2]でも報告されているような，円錐体を形成するようなすべり破壊および円錐体コンクリートのくさび作用にともなう割裂破壊であったと考えられる。

(a) TP-2　(b) TP-3　(c) TP-4

写真－1　最終破壊状況

2.2 支圧強度

表－2に試験結果一覧を示す。表中の支圧強度実験値$_e\sigma_b$は，最大荷重を支圧面積A_1で除した値である。**図－2**に支圧強度比$_e\sigma_b/\sigma_c$－A/A_1関係を示す。ここで，σ_cはシリンダー圧縮強度（TP-1の圧縮強度）である。支圧強度は，既往の研究から支圧面積A_1に対する支承面積Aの比とシリンダー圧縮強度σ_cに関係することが報告されており，以下に示す式(1)で表される。

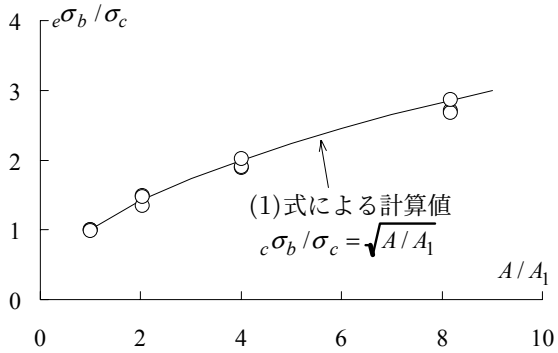
$$_c\sigma_b = \alpha \cdot (A/A_1)^{\beta} \cdot \sigma_c \qquad (1)$$

αおよびβの値は，載荷状態や支圧を受けるコンクリートブロックの高さ幅比などによって変わるとされているが，日本建築学会「プレストレストコンクリート設計施工規準」では，既往の実験を参考にしてα=1, β=0.5と規定している。**図－2**中の実線はα=1，β=0.5とした式(1)による計算値を表す。これより，円形断面の場合においても，支圧強度実験値は式(1)による計算値と良い対応を示すことが確認された。

表－2　試験結果一覧

供試体	A/A_1	支圧強度 (N/mm^2) 実験値 $_e\sigma_b$	支圧強度 (N/mm^2) 計算値 $_c\sigma_b$	$_e\sigma_b/_c\sigma_b$	$_e\sigma_b/\sigma_c$
TP-1	1	32.5 32.8 32.1	32.5	-	-
TP-2	2	48.5 43.9 47.8	46.7	1.04 0.95 1.03	1.49 1.35 1.47
TP-3	4	61.4 61.8 65.9	63.0	0.95 0.95 1.01	1.89 1.90 2.03
TP-4	8	88.1 87.2 93.1	89.4	0.95 0.94 1.00	2.71 2.68 2.86

※ σ_c：シリンダー圧縮強度（TP-1の圧縮強度）



図－2　$_e\sigma_b/\sigma_c$－A/A_1関係

3．繰返し圧縮載荷実験

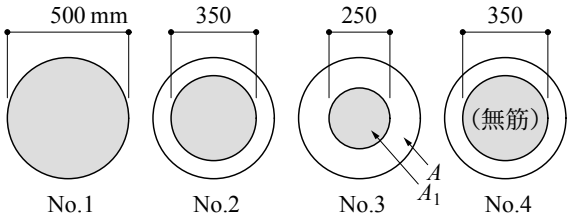
3.1 試験体

表－3に試験体一覧を，**図－3**に支圧面の形状を示す。**図－4**に試験体図を示す。試験体は，直径φ500mm，高さ1000mmの円柱部材で，試験体数は4体である。実験パラメータは，A/A_1と横補強筋の有無とした。試験体は，横補強筋を配したものを基本とし，No.4のみ無筋とした。No.1はA/A_1=1の試験体である。No.2～4は錘台形状のテーパーを設けて支圧面を形成させた試験体で，No.2，4はA/A_1=2，No.3はA/A_1=4とした。また，テーパー角度は，支圧面からの応力の拡がりを阻害しないように30°とした。

表－4に使用した鉄筋の機械的性質を示す。軸方向筋にSD295A(D13)を，横補強筋に杭頭半剛接合構法[1]の杭に用いられている高強度異形PC鋼棒のスパイラル鉄筋を使用した。横補強筋

表－3　試験体一覧

試験体	支承面径（軸径）mm	支圧面径 mm	A/A_1	配筋
No.1	500	500	1	[軸方向筋] SD295A / 8-D13 [横補強筋] 異形PC鋼棒 / U5.1@55
No.2		350	2	
No.3		250	4	
No.4		350	2	無筋



図－3　支圧面の形状・寸法

比は0.15%である。**表－5**に実験時のシリンダー圧縮強度を示す。コンクリートは，上述した簡易試験と同じものを使用した。

3.2 加力・測定方法

写真－2に実験状況を示す。加力は，10MN試験機により行った。加力サイクルは，支圧応力（=荷重P/支圧面積A_1）で制御し，応力増分1/3σ_c（σ_c：シリンダー圧縮強度）で各3サイクルづつの繰返し載荷とした。最大耐力到達後の加力（その応力レベルの2，3サイクル）は変位制御とし，最大耐力時の変位（軸縮み）を目標に加力した。各応力レベルの3サイクル終了後には，**写真－2**に示すように，試験体を持ち上げて，支圧面の損傷状況の観察を行った。

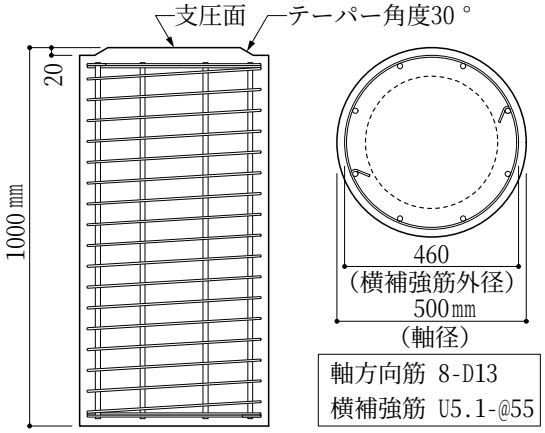
なお，本実験では，支圧面にコンクリート部材が接する場合を想定し，支圧面における拘束力を鋼板ではなくコンクリートの拘束力とするために，コンクリートブロック（□-700mm立方体）を介して支圧面に圧縮力を与えた。

3.3 実験結果

(a) 実験結果および破壊性状

表－6に実験結果一覧を示す。**写真－3**に各試験体の最終破壊状況を示す。いずれの試験体も材軸方向に沿った縦ひび割れが発生した。この縦ひび割れは，No.1は材長中間部側面に，No.2～4は支圧面側端部側面に発生し，支圧面縁から放射状に進展したひび割れと繋がっていた。No.2，3のひび割れは小さく，分散していたのに対し，No.4のひび割れは大きく，4箇所に集中していた。

No.1は，材長中間部のかぶりコンクリートがはらみ出すような破壊を示し，軸方向筋の座屈および2本の横補強筋の破断が確認された。



図－4　試験体図（No.2）

表－4　鉄筋の機械的性質

呼び径	鋼種	降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	伸び (%)	使用部位
D13	SD295A	378	532	18.2	軸方向筋
U5.1	SBPD1275/1420	1448	1475	8.7	横補強筋

表－5　実験時コンクリート強度

試験体	No.1	No.2	No.3	No.4
圧縮強度	32.1	31.7	32.3	32.7
引張強度	2.64	2.57	2.67	2.76

※現場封緘養生供試体による　　[単位：N/mm^2]

写真－2　実験状況

無筋のNo.4は，実験終了後に支圧面を底面とした円錐体が形成されているのが確認された。最終的に，この円錐体コンクリートの進入による割裂作用により破壊したのがわかる。

一方で，横補強筋を有するNo.2，3は，支圧面を底面とする円錐体コンクリートの先端が圧壊していた。また，無筋であるNo.4の円錐体の角度はおよそ60°程度であったのに対して，A/A_1が同じで横補強筋のあるNo.2の角度は90°に近くなっており，横補強筋の有無がすべり破壊面の角度に影響を与えていたことがわかる。No.2, 3は，横補強筋の拘束効果により割裂作用が抑止されたために，横補強筋内のコンクリートが有効に荷重を伝え，最終的には円錐体コンクリート先端の圧壊が耐力に影響を与えたものと思われる。

なお，支圧面には，試験体側・加力用コンクリートブロック側ともに，ひび割れなどの損傷は一切観察されなかった。

(b) 荷重－変位関係

図－5に各試験体の荷重P－変位δ関係を示す。ここで変位δは，**図－5**に示すように，支圧面から400mmの区間の変位である。図中の破線は式(1)から計算される支圧耐力計算値を示す。いずれの試験体も，縦ひび割れが試験体側面に発生するまでは，繰返し加力下においても弾性的な挙動を示した。

横補強筋を有する試験体の最大耐力到達時の変位は，A/A_1が大きい試験体ほど大きくなっている。横補強筋の降伏は，ある程度変位が大きくなったところで確認され，また，最大耐力到達後，円錐体が形成された範囲の横補強筋が破断して破壊に至った。

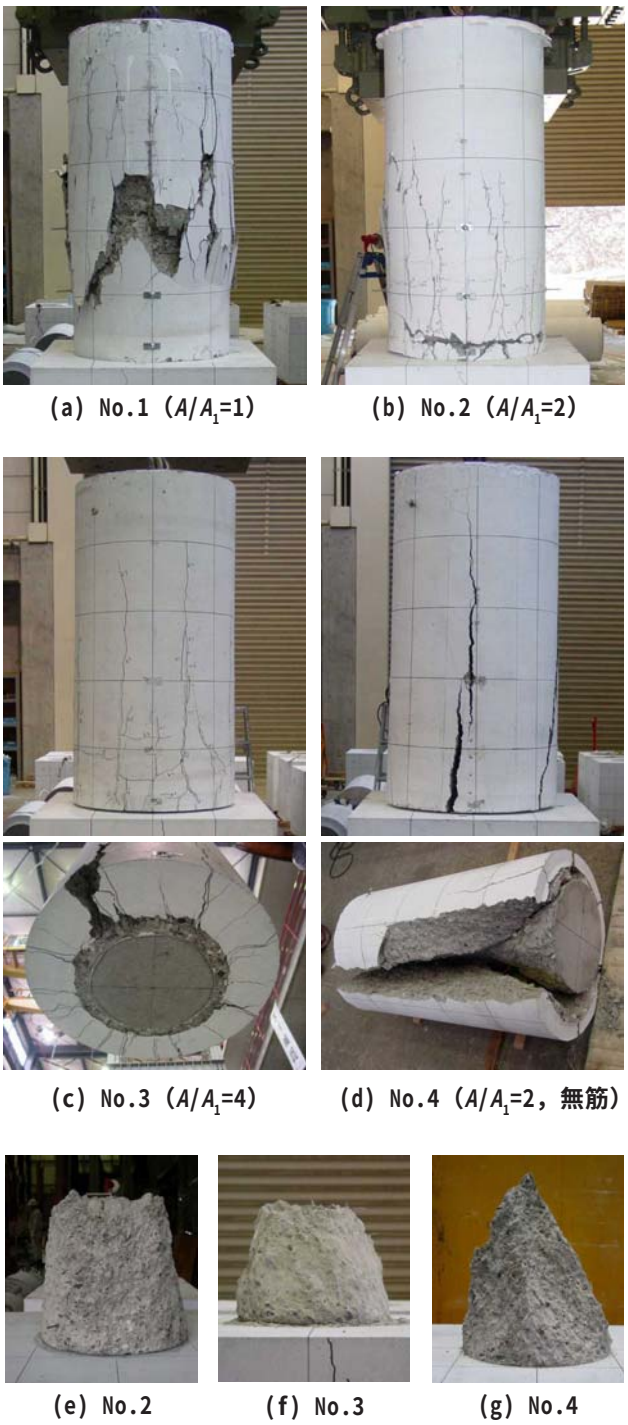
無筋のNo.4は，最大耐力到達後，荷重が少し低下したところで縦ひび割れが大きく進展して脆性的に破壊した。

図－6に最大耐力時の各区間変位の全変位δに占める割合を示す。No.1を除き，支圧面

表－6　実験結果一覧

試験体	A/A_1	σ_c N/mm^2	ひび割れ発生時		最大耐力時		
			荷重 kN	支圧応力 N/mm^2	荷重 kN	支圧応力 N/mm^2	応力上昇率※
No.1	1	32.1	6102	31.1	6142	31.3	0.97
No.2	2	31.7	3621	37.6	4740	49.3	1.55
No.3	4	32.3	2492	50.8	3326	67.8	2.10
No.4	2	32.7	3620	37.6	3814	39.6	1.21

※応力上昇率 ＝ 最大支圧応力度／シリンダー圧縮強度σ_c

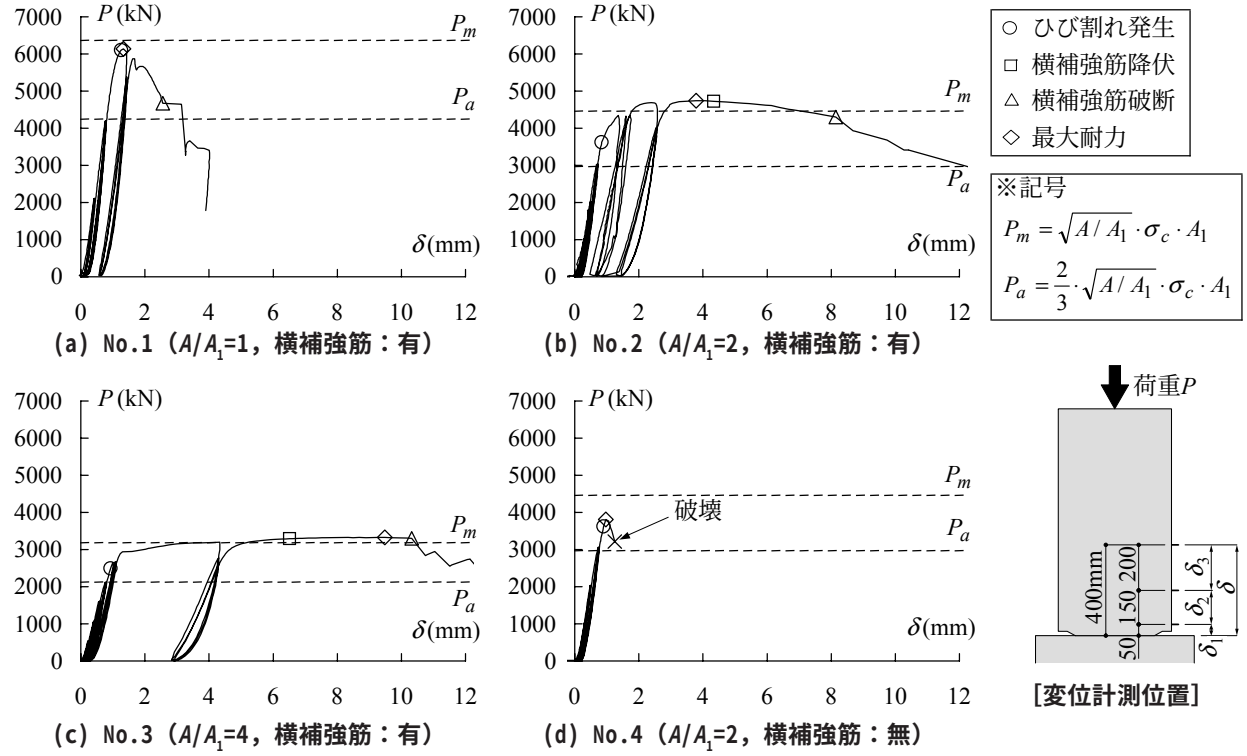


(a) No.1 (A/A_1=1)　(b) No.2 (A/A_1=2)

(c) No.3 (A/A_1=4)　(d) No.4 (A/A_1=2，無筋)

(e) No.2　(f) No.3　(g) No.4

写真－3　破壊状況



(a) No.1（A/A_1=1，横補強筋：有）　(b) No.2（A/A_1=2，横補強筋：有）

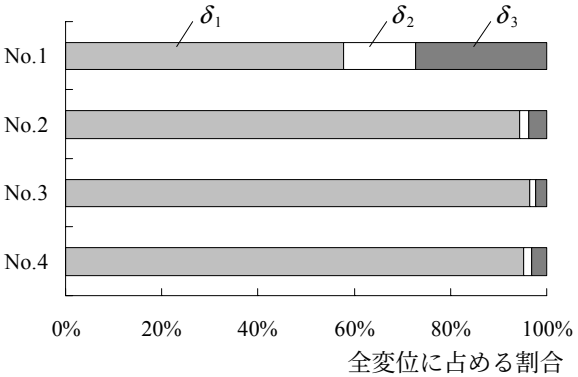
(c) No.3（A/A_1=4，横補強筋：有）　(d) No.4（A/A_1=2，横補強筋：無）

図－5　荷重－変位関係

から50mmの区間変位δ_1が計測区間全変位δの9割以上を占めている。これは，試験体の破壊状況から，上述した支圧面を底面とする円錐体コンクリートが試験体内部に進入したため，試験体表面から計測した場合，見かけ上δ_1の値が大きくなったものと考えられる。

(c) 荷重－コンクリート内部のひずみ関係

図－7にNo.2の荷重P－コンクリート内部のひずみε関係を示す。コンクリート内部のひずみは，試験体中心軸上に埋設した埋込型ひずみゲージ（検長60mm）により測定した。各計測点ともにひび割れが発生するまでは弾性的な挙動を示している。ひずみの進展が支圧面直上よりも離れた位置の方が大きくなっているのは，円錐体コンクリートを形成するようなすべり破壊が生じる過程で，支圧面による変形の拘束が小さくなる円錐体コンクリート先端にひずみが集中したためと考えられる。これは，No.2，3の円錐体コンクリートの先端が圧壊していたことと対応し，横補強筋を有するNo.2，3の円錐体コンクリートの試験体内部への進入は，この圧壊に伴うものと考えられる。



図－6　各区間変位の全変位に占める割合

3.4 コンクリートの支圧強度

図－8に支圧強度比${}_e\sigma_b/\sigma_c$－A/A_1関係を示す。図中の実線はα=1，β=0.5とした場合の式(1)による計算値を示す。無筋のNo.4（A/A_1=2）の支圧強度は，テストピース（A/A_1=2）の支圧強度に対して15%程度低下している。これは，寸法効果によるものと思われる。コンクリートの圧縮強度は，直径のほぼ10乗根に反比例して減少するという弱い寸法効果を示す[3)]。テストピース（φ100mm）を基準とした場合，試験体（φ500mm）の寸法効果による強度低下率は15%となり，本実験結果と対応する。

一方で，A/A_1 が同じ No.2 と No.4 を比較した場合，横補強筋の補強効果により，支圧強度は20%程度上昇している。本実験だけでは定量的なことは言えないが，六車・岡本[2)]は，立方体コンクリートブロックを用いてスパイラル筋による補強効果を検討し，B/A_1=1.5～2.5（B：スパイラル筋に囲まれるコンクリート断面積）になるような場合，支圧強度は効果的に増加することを報告している。

支圧に対する寸法効果や横補強筋の拘束効果については，破壊性状，A/A_1，B/A_1 および補強筋の量・配置方法など，支圧強度に影響を与える因子が多く，今後更なる検討が必要である。

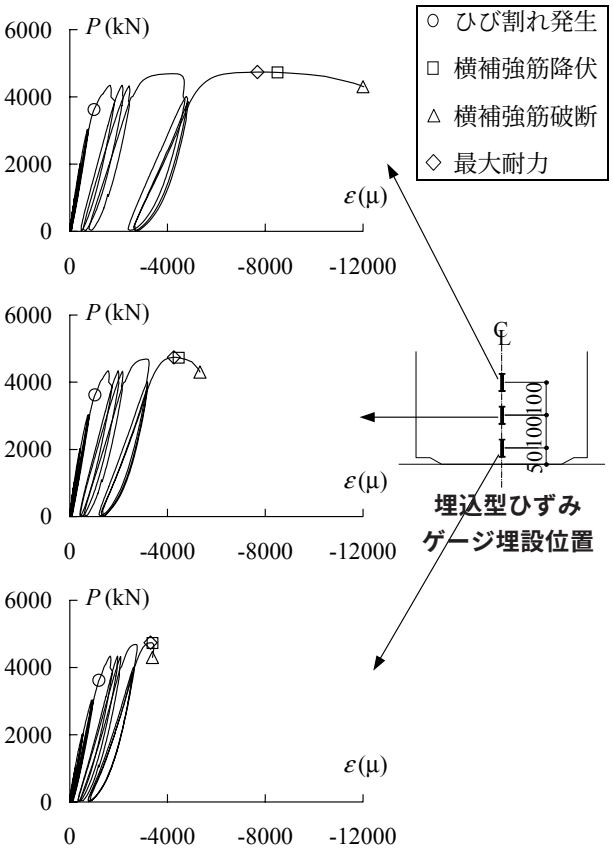
図－8 にはひび割れ発生時の支圧応力度比 ${}_e\sigma_a/\sigma_c$ も併せて示している。図中の破線は，建築基準法施行令で定められている許容圧縮応力度の強度に対する割合を参考にして，式(1)を2/3倍した値を示す。これより，式(1)による計算値を2/3倍した値は，ひび割れ発生時の支圧応力を十分に安全側に評価しており，この値以下の支圧応力ならば繰返し加力を受けた場合においても弾性的な設計が可能であると考えられる。

4．まとめ

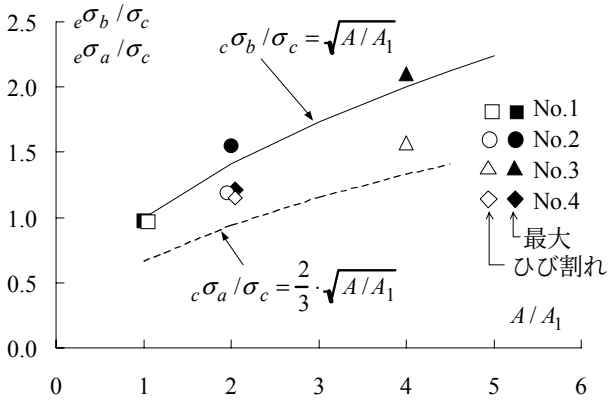
(1) 支圧を受ける円柱コンクリートの破壊は，A/A_1=2～4の範囲において，無筋の場合は支圧面を底面とした円錐体コンクリートのくさび作用に伴う割裂破壊であり，横補強された場合は円錐体先端の圧縮破壊と横補強筋の破断が複合した破壊であった。

(2) 比較的大きな円形断面を有し，高強度異形PC鋼棒で横補強された試験体において，支圧強度と支圧面積に対する支承面積の比とに相関が見られた。ただし，支圧強度の算定においては，寸法効果や横補強筋の拘束効果に影響を与える因子が多く，今後更なる検討が必要である。

(3) 繰返し支圧応力を受けるコンクリートのひび割れ発生時応力を確認し，この応力以下ならば弾性的な設計が可能であることを示した。



図－7 荷重－ｺﾝｸﾘｰﾄ内部のひずみ関係(No.2)



図－8　支圧応力度比－A/A_1 関係

参考文献

1) 安田聡ほか：場所打ちｺﾝｸﾘｰﾄ杭における杭頭半剛接合構法の開発，ｺﾝｸﾘｰﾄ工学，Vol.41，No.8，pp.17-24，2003.8

2) 六車熙，岡本伸：局部荷重を受けるｺﾝｸﾘｰﾄの支圧強度に関する実験的研究，ｾﾒﾝﾄ技術年報，XVIII，pp.368-372，1964

3) 塩屋俊幸ほか：ｺﾝｸﾘｰﾄ構造物の寸法効果，ｺﾝｸﾘｰﾄ工学，Vol.30，No.8，pp.5-15，1992.8