論文　超軽量人工骨材を用いたコンクリートの圧縮特性に関する実験的研究

田中　卓[*1]・中野　克彦[*2]・松崎　育弘[*3]・杉山　智昭[*4]

要旨：本研究では，超軽量人工骨材を使用した超軽量コンクリート（LAC），およびLACにビニロン短繊維を混入した繊維補強超軽量コンクリート（FRA）の中心軸圧縮実験を行い，基本となる普通コンクリート（NC）と比較することで，横補強筋の拘束効果を含めた基本的な圧縮特性を明らかにした。結果として，横補強筋で拘束することで圧縮靭性が向上すること，LACおよびFRAはNCに比較して横補強筋の拘束効果が小さいこと等を示した。

キーワード：超軽量人工骨材，ビニロン短繊維，横補強筋，拘束効果，圧縮特性

1. はじめに

筆者らは，地震力の低減を意図した建物の軽量化，環境保全といった理由から，非造粒型人工超軽量骨材を使用した超軽量コンクリート（以下LAC），および，LACにビニロン短繊維（**図-1 参照**）を混入した繊維補強超軽量コンクリート（以下，FRA）の新構造用コンクリートを構造部材として利用することを目指して，梁･柱等の部材実験を行い，これらの構造性能について報告している[1) 2)]。しかし，LAC，FRA 部材の構造性能について明確な評価を行うためには，これらの圧縮特性を把握する必要がある。

本実験で用いた人工超軽量骨材[3)]（**図-2 参照**）の特徴は，砕石のように角張った形状をしており，絶乾密度が 0.8g/cm^{2}と 1.3g/cm^2，吸水率が 2.5%と非常に低いことなどがあげられる。また，ビニロン短繊維は径0.4mmで，長さは粗骨材径の2倍の30mmである。

本研究では，LAC，FRA について，中心軸圧縮実験を行い，基本となる普通コンクリート（以下，NC）と比較することで，横補強筋の拘束効果を含めた基本的な圧縮特性を明らかにすることを目的としている。

図-1　ビニロン短繊維

図-2　粗骨材

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に試験体一覧，**表-2** および**表-3** にコンクリートの調合表，**図-3** に試験体形状および配筋図一例を示す。試験体は，直径150mm，高さ400mm，試験区間 300mm の円柱型試験体であり，補強筋にはφ6.4mm丸鋼PC鋼棒で円形スパイラル筋（降伏強度1275N/mm^{2}級）を使用した。ビニロン短繊維は，φ0.4×30mmの線状のものを使用し混入率は 1.0%とした。なお，コアコンクリートの性状を把握するため，かぶりはなしとした。変動要因は NC（Fc=24，36，60N/mm^2），LAC（Fc=36，60N/mm^2），FRA（Fc=24，60N/mm^2）の 7 種類，せん断補強筋比（p_w=0.0，0.6，0.8，1.2%）の 4 水準とした。

2.2 加力および測定方法

図-4 に加力および測定装置を示す。加力は，2000kN 万能試験機を用い，試験体を載荷テー

*1 新潟工科大学大学院　工学研究科修士課程　（正会員）
*2 新潟工科大学　工学部建築学科准教授　博（工）　（正会員）
*3 東京理科大学　工学部建築学科教授　工博　（正会員）
*4 東京理科大学　工学部建築学科助手　博（工）　（正会員）

表-１　試験体一覧

試験体名	使用材料							実験結果				
	コンクリート				横補強筋			構造特性		最大耐力時		
	種類	圧縮強度 σ_B (N/mm^2)	ヤング係数 E_c ×10^4 (N/mm^2)	比重	材質	横補強筋比 p_w (%)	横補強筋体積比 ρ_h (%)	初期剛性 E_c ×10^4 (N/mm^2)	ポアソン比 υ	圧縮応力度 ${}_e\sigma_{MAX}$ (N/mm^2)	歪度 ${}_e\varepsilon_{\sigma MAX}$ (%)	横補強筋歪度 ${}_e\varepsilon_h$ (%)
NC−24−00	NC	24.4	2.71	2.35	-	0.0	0.0	3.20	0.18	20.5	0.13	-
NC−24−06					SBPD 1275/142	0.6	1.1	2.58	0.18	24.7	1.30	0.30
NC−24−08						0.8	1.4	2.10	0.23	33.0	2.33	0.42
NC−24−12						1.2	2.1	1.54	0.27	52.2	2.98	0.60
FRA−24−00	FRA	24.9	1.33	1.26	-	0.0	0.0	1.67	0.22	21.5	0.17	-
FRA−24−06					SBPD 1275/142	0.6	1.1	1.28	0.20	21.7	0.21	0.05
FRA−24−08						0.8	1.4	1.62	0.21	22.7	0.22	0.05
FRA−24−12						1.2	2.1	1.45	0.20	23.7	0.30	0.10
NC−36−00	NC	43.9	2.52	2.35	-	0.0	0.0	3.02	0.19	38.5	0.18	-
NC−36−06					SBPD 1275/142	0.6	1.1	2.74	0.19	38.7	0.27	0.13
NC−36−08						0.8	1.4	2.61	0.18	47.6	1.10	0.58
NC−36−12						1.2	2.1	2.23	0.18	69.0	1.80	0.92
LAC−36−00	LAC	35.8	1.51	1.37	-	0.0	0.0	1.95	0.23	31.1	0.20	-
LAC−36−06					SBPD 1275/142	0.6	1.1	2.27	0.22	33.4	0.23	0.06
LAC−36−08						0.8	1.4	2.12	0.21	32.8	0.24	0.06
LAC−36−12						1.2	2.1	1.93	0.21	36.3	0.29	0.09
NC−60−00	NC	61.2	2.82	2.36	-	0.0	0.0	3.10	0.18	51.2	0.21	-
NC−60−06					SBPD 1275/142	0.6	1.1	2.64	0.22	54.0	0.27	0.16
NC−60−08						0.8	1.4	2.83	0.16	59.3	0.34	0.26
NC−60−12						1.2	2.1	2.54	0.24	81.8	1.52	1.1
LAC−60−00	LAC	56.3	2.09	1.58	-	0.0	0.0	2.27	0.22	45.4	0.24	-
LAC−60−06					SBPD 1275/142	0.6	1.1	2.64	0.21	45.4	0.21	0.20
LAC−60−08						0.8	1.4	2.21	0.22	47.3	0.27	0.11
LAC−60−12						1.2	2.1	2.20	0.19	49.5	0.29	0.09
FRA−60−00	FRA	60.1	2.18	1.56	-	0.0	0.0	2.17	0.22	46.3	0.25	-
FRA−60−06					SBPD 1275/142	0.6	1.1	2.24	0.27	47.7	0.26	0.12
FRA−60−08						0.8	1.4	2.15	0.21	49.0	0.30	0.13
FRA−60−12						1.2	2.1	2.18	0.20	56.7	0.40	0.21

注）コンクリートのヤング係数（E_c），試験体の初期剛性（E_c）およびポアソン比は最大耐力の1/3 耐力時の値とした。

表-２　NC 調合

骨材種類	水セメント比 (%)	W	C	SS	G	AE減水剤
		単位量(kg/m^3)				
NC-24	66.0	173	263	876	959	2.63
NC-36	47.0	185	394	712	975	4.22
NC-60	36.0	170	472	825	875	6.38

注）W:水,C:普通ポルトランドセメント
SS:砂（砕石+陸砂）,G:砕石

表-３　LAC, FRA 調合

骨材種類	水セメント比	W	HC	S			NG		短繊維		AE減水剤	表面活性剤
				SS	NLS	MS	W	L				
	(%)	単位量(kg/m^3)							(kg/m^3)	混入率(%)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
FRA-24	40.5	170	420	278	170	80	−	251	13	1.0	3.08	0.16
LAC-36	39	160	410	265	142	70	−	307	-	-	3.83	0.16
LAC-60	33.3	150	450	421	107	50	440	−	-	-	3.83	0.16
FRA-60	34.8	160	460	441	128	60	360	−	13	1.0	3.76	0.14

注）W:水,HC:早強ポルトランドセメント,SS:砕石
NG:中国産人工軽量骨材（粗骨材）
NLS:中国産人工軽量骨材（細骨材）MS:マイクロセルズ

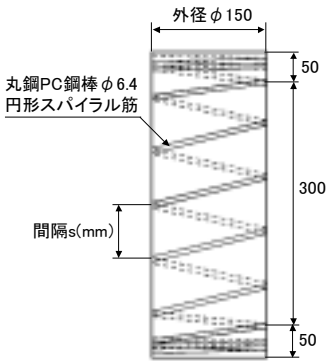


図-３　試験体形状

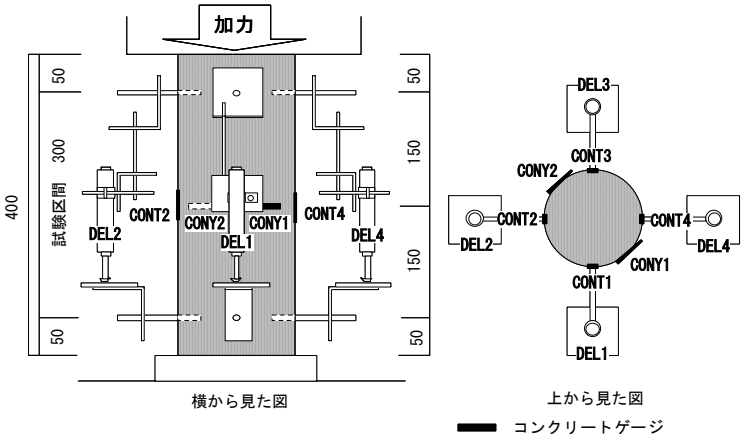


図-４　加力および測定位置

ブル中央に配し，上面には，球座を介して載荷を行った。

軸方向ひずみ度は，コンクリート内部に挿入したネジに取り付けた 4 側面の電気式変位計より算出した値とコンクリート表面に貼付したひずみゲージによる値とした。

また, ポアソン比は, 縦, 横に貼付したコンクリートひずみゲージにより測定した。

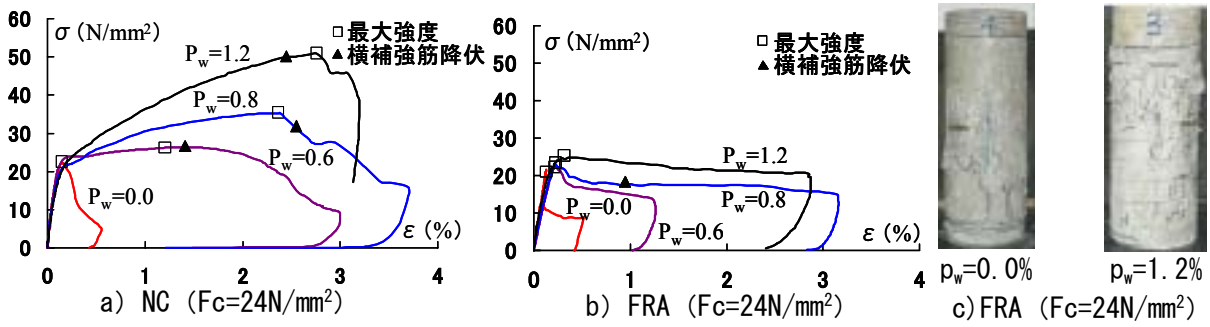


図-5　Fc=24 の σ－ε 関係および破壊状況

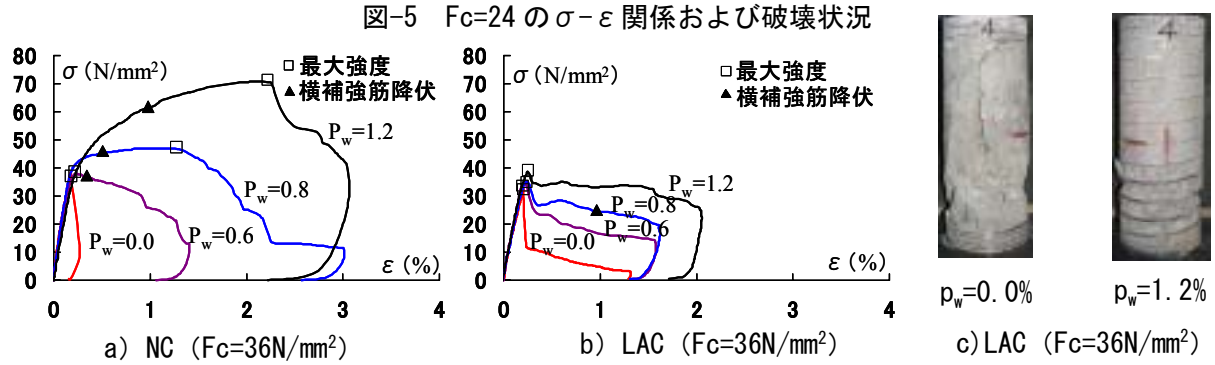


図-6　Fc=36 の σ_c－ε 関係および破壊状況

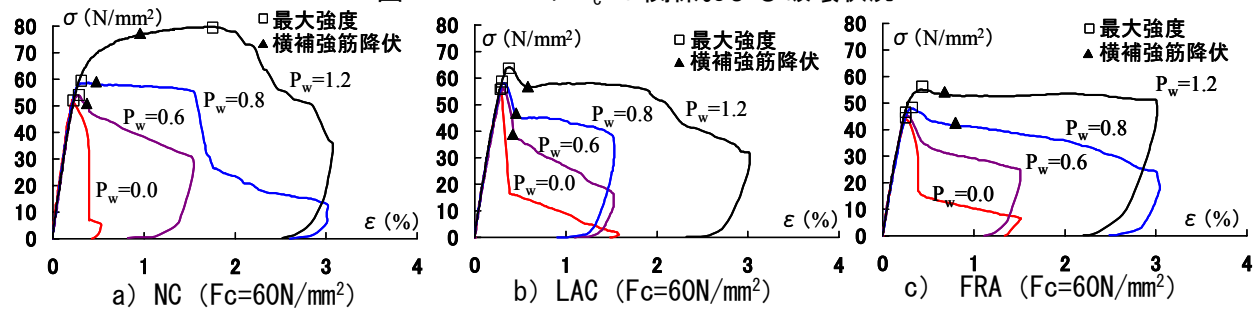


図-7　Fc=60 の σ－ε 関係

3.実験結果および検討

3.1 破壊性状および σ－ε 関係

図-5～7 に圧縮応力度(σ)-軸方向ひずみ度(ε)関係，および最終破壊状況一例を示す。

横補強筋が無い（p_w=0.0%）試験体の σ-ε 関係は，コンクリート種類，強度に関係なく，最大耐力付近まで直線的な挙動を示し，突発的に縦方向のひび割れが生じるとともに最大耐力に達し，同時に脆性的に耐力低下した。最終破壊状況は，コンクリート強度に関係なく NC，LAC，が大きく剥落するのに対して，FRA では，ほとんど剥落は生じなかった。

横補強筋で拘束された場合，NC と LAC，FRA では異なる性状を示した。NC では，ひび割れが発生し剛性が低下した後も圧縮応力度，軸方向ひずみ度が増加し最大耐力に至った。NC では，p_w が増加するほど耐力は上昇し特にコンクリート強度が低いほど耐力の上昇率が大きくなる傾向がみられた。

一方 LAC，FRA では，剛性が低下した直後に最大耐力に達し，それと同時にひび割れの進展が顕著となり耐力が若干低下した。その後，耐力が徐々に低下あるいは維持しながら軸方向ひずみ度が増加し，コンクリートの剥落に至った。この時，LAC に対して FRA は耐力をより維持し続け，コンクリートの剥落は抑制され，ひび割れは分散して発生した。

LAC，FRA では，p_w の増加による耐力上昇率は，NC と比較して小さかった。なお，LAC，FRA ではコンクリート強度による p_w の増加による耐力上昇率の違いは顕著ではなかった。

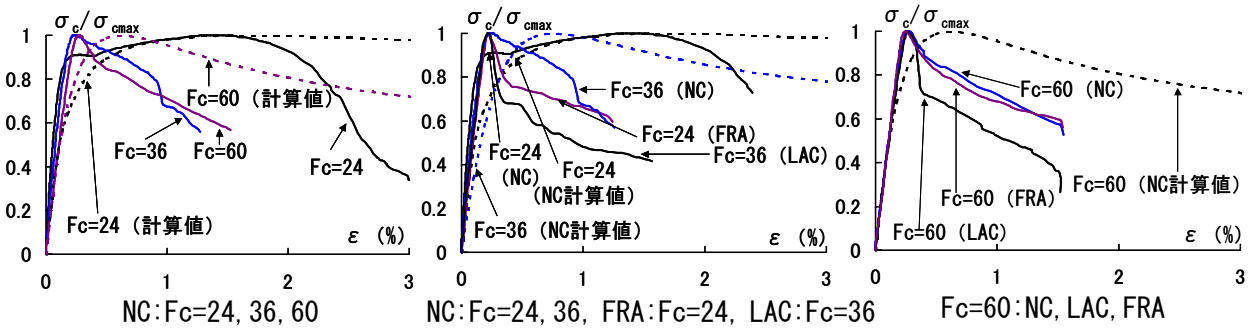


図-8　$\sigma_c/\sigma_{cmax}-\varepsilon$ 関係（p_w=0.6%）

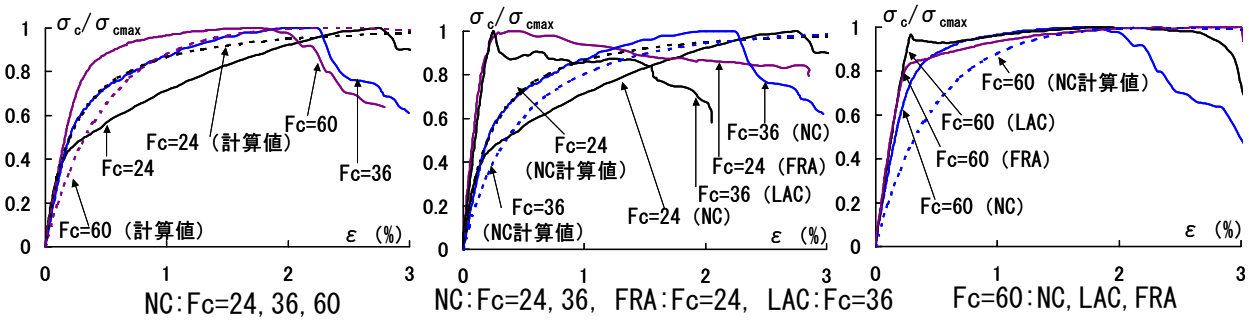


図-9　$\sigma_c/\sigma_{cmax}-\varepsilon$ 関係（p_w=1.2%）

3.2　$\sigma_c/\sigma_{cmax}-\varepsilon$ 関係

図-8 に p_w が 0.6%, **図-9** に p_w が 1.2%の $\sigma_c/\sigma_{cmax}-\varepsilon$ 関係をそれぞれ示す。ここでの σ_{cmax} は，最大圧縮強度である。

(1) コンクリート強度による違い（NC の場合）

p_w が 0.6%の試験体では，3 種類とも 3．4 節で後述する計算値（以下同様）よりも剛性が大きかった。Fc が 24N/mm^2 の試験体では，剛性低下後も耐力は上昇した。Fc が 36 N/mm^2 と 60 N/mm^2 の試験体では，最大耐力後に後最大耐力に急激に耐力低下した。

p_w が 1.2%の試験体では，強度が高い程剛性が高く剛性低下後も耐力は上昇していった。Fc が 24 N/mm^2 の試験体では，計算値よりも低い剛性を示した。それぞれ最大耐力後計算値に比べて急激に耐力低下した。

(2) Fc が 24 N/mm^2 での NC，FRA の違い

p_w が 0.6%の試験体での NC では，剛性低下後も耐力は上昇し続けたが FRA では，剛性低下後最大耐力に達しその後急激に耐力低下した。

p_w が 1.2%の試験体での NC ではひずみ度とともに耐力が上昇していったが FRA では剛性が高く剛性低下後最大耐力に達しその後耐力を維持する傾向がみられ緩やかに耐力低下した。

(3) Fc が 36 N/mm^2 での NC, LAC の違い

p_w が 0.6%の試験体での NC では，ともに剛性低下後最大耐力に達し NC は，その後緩やかに耐力低下していったが LAC は，急激に耐力低下した。

p_w が 1.2%の試験体での NC は，剛性低下後も耐力が上昇していったが LAC は，剛性低下後最大耐力を向かえその後耐力低下していった。p_w が 0.6%の試験体よりも耐力は，維持する傾向がみられた。

(4) Fc が 60 N/mm^2 での違い

p_w が 0.6%の試験体では，3 種類とも剛性低下後最大耐力に達しその後耐力低下していった。計算値よりも急激に耐力低下した。特に LAC では，急激に耐力低下した。

p_w が 1.2%の試験体では，3 種類とも剛性低下後も耐力の上昇，維持を続けた。その後最大耐力に達し急激に耐力低下した。それぞれ計算値よりも高い剛性を示した。

どの試験体も最大耐力後の耐力が計算値に比べ急激に低下する傾向が見られた。

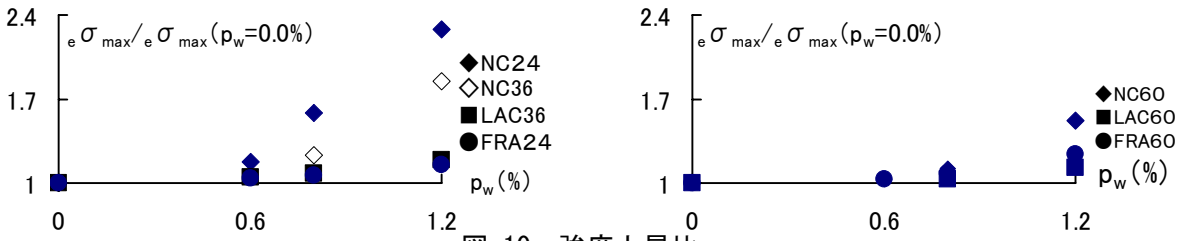


図-10　強度上昇比

3.3　横補強筋の拘束効果

ここでは最大圧縮応力度（$_e\sigma_{max}$）に対する拘束効果について述べる。図-10 に強度上昇比（p_w=0.0%の $_e\sigma_{max}$ に対する比）と p_w の関係，図-11 に最大圧縮応力度時の横補強筋ひずみ分布を示す。強度上昇比については，コンクリート強度に関係なく NC に対して LAC，FRA は，p_w の増加に伴う最大耐力の上昇する割合が小さい傾向が確認された。さらに NC では，コンクリート強度が小さい程強度上昇比は，大きい傾向を示した。ここで図-11 に示す最大耐力時の横補強筋のひずみに注目すると，NC では，横補強筋が拘束効果を発揮し最大耐力に至っているのに対し，LAC，FRA では，横補強筋の効果を十分に発揮しないで最大耐力に至っていることがわかる。特にコンクリート強度が低いほど横補強筋の拘束効果が低いことがわかる。よって，LAC，FRA では，骨材が NC と比べ弱いため圧縮強度に対する横補強筋の拘束効果が小さいという特性を持つことがいえる。

3.4 既往の評価式との適合性

図-12 に最大圧縮応力度（σ_{max}）に関する実験値（$_e\sigma_{max}$）-計算値（$_c\sigma_{cB}$）関係を示す。最大圧縮応力度の計算値は NewRC のコンファインドコンクリート WG の提案モデル[4] を使用した。最大圧縮応力度の算出式を以下に示す。

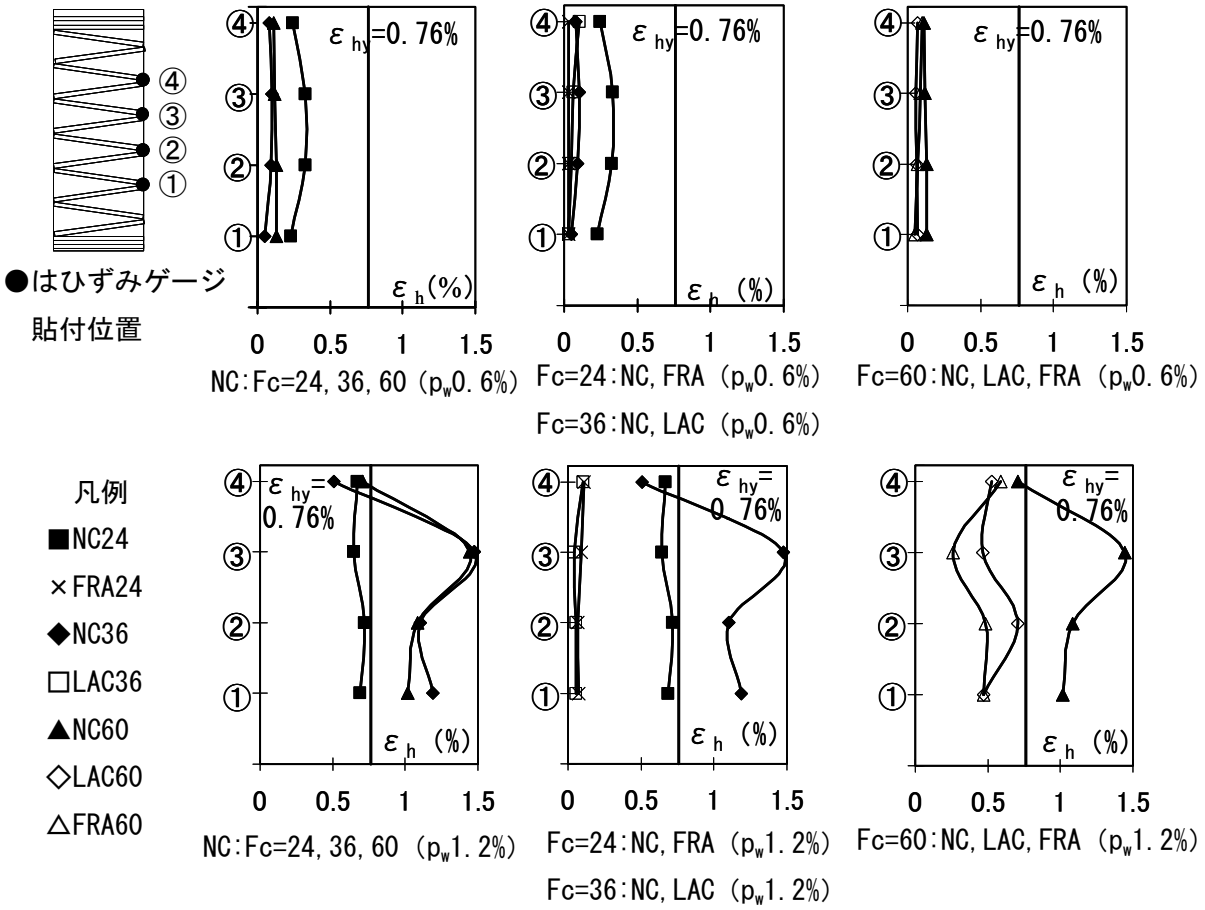
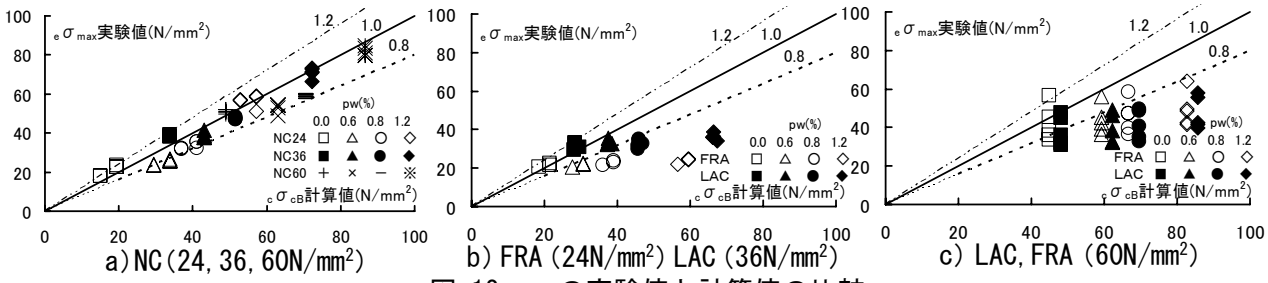


図-11　ひずみ分布



a) NC(24, 36, 60N/mm²)　b) FRA (24N/mm²) LAC (36N/mm²)　c) LAC, FRA (60N/mm²)

図-12 σ_{max} の実験値と計算値の比較

$$ {}_c\sigma_{cB} = \sigma_p + \kappa \cdot \rho_h \cdot \sigma_{hy} \qquad (1) $$

$$ \sigma_p = 0.8\,{}_c\sigma_B \qquad (2) $$

$$ \kappa = 2.09\left(1 - \frac{s}{2D_c}\right)^2 \qquad (3) $$

${}_c\sigma_{cB}$：コンファインドコンクリートの強度
σ_p：　プレーンコンクリートの強度
ρ_h：　横補強筋の体積比
σ_{hy}：横補強筋の降伏点応力(≦11300kgf/cm²)
${}_c\sigma_B$：コンクリートのシリンダー強度
s：　横補強筋の間隔
D_c：　周辺横補強筋の断面内の中心間距離

図-12a) より NC に関しては，コンクリート強度に関係なく計算値と実験値は概ね適合している。LAC，FRA に関しては，コンクリート強度に関係なく**図-12b)**，c) より p_w が 0.0%の試験体では概ね適合しているものの，横補強筋で拘束した試験体では計算値の方が高い値となっている。LAC，FRA では，骨材が NC と比べ弱いため，圧縮強度に対する横補強筋の拘束効果が NC ほど得られないためであり，この効果を適切に評価する必要がある。そこで，計算式で算出した最大圧縮応力度（${}_c\sigma_{cB}$）に式（4）で算出した値を乗じた結果，**図-13** のようになり概ね適合しているといえる。

$$ {}_c\sigma_{cB}' = \frac{\gamma'}{\gamma_{NC}} \cdot {}_c\sigma_{cB} \qquad (4) $$

γ' :LAC，FRA の比重
γ_{NC}:NC の比重

4. まとめ

1）横補強筋で拘束することにより圧縮靭性が向上した。
2）NC では p_w が増加するほど耐力が向上した。

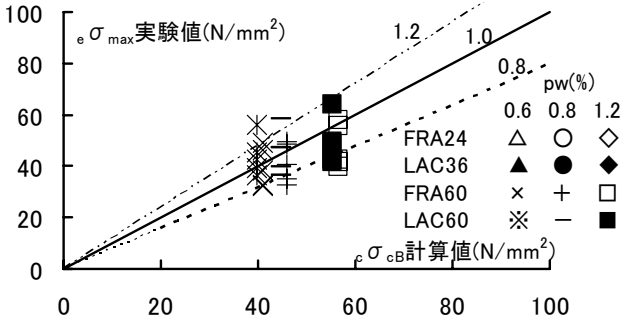


図-13 σ_{max} の実験値と修正計算値の比較

特にコンクリート強度が低い程耐力が上昇する割合が大きかった。一方，LAC，FRA では，p_w が増加しても耐力の上昇は，顕著ではなかった。

3）基準となる NC との比重の比を用いる事で LAC，FRA の最大圧縮応力度（${}_c\sigma_{cB}$）について，NC に用いられている評価式で評価できる。

参考文献

1） 松崎育弘，中野克彦　他，多機能人工骨材を用いた RC 柱の構造性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No. 2，pp337-342，2003
2） 松崎育弘，中野克彦　他，高性能コンクリートの付着性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 2，pp. 835-840，2002
3） 九々正武　他，中国産人工超軽量骨材を使用したコンクリートの物性，JCI 年次論文集，Vol. 23-2，pp. 43-48，2001
4） 建設省総合開発プロジェクト・コンファインドコンクリート WG，鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化の技術開発報告書，（C-7）コンファインドコンクリートの力学特性に関する資料のとりまとめ，建設省，（1993）