

# 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

中野 克彦\*      田中 卓\*\*

(平成 19 年 10 月 31 日受理)

## Compressive Properties of Concrete used Artificial Super Lightweight Aggregate

Katsuhiko NAKANO\*      Suguru TANAKA\*\*

In this paper, the axial compression experiment of the super lightweight concrete (LAC) which uses super lightweight artificial aggregate, and the fiber reinforcement super lightweight concrete (FRA) which mixed the vinylon fiber in LAC is conducted. In this experiment, the fundamental compression properties including the confined effect of shear reinforcements is clarified by comparing with basic normal concrete (NC).

As a conclusion, the following knowledge is suggested.

- a) Confined effects by shear reinforcements improve the compression ductility.
- b) LAC and FRA have the small confined effects as compared with NC.
- c) Maximum compressive stress can be evaluated using the specific gravity of concrete.

Key words: artificial super lightweight aggregate, vinylon fiber, compressive properties, confined effect, specific gravity

### 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（Fig.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<sup>[1], [2]</sup>。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<sup>[3]</sup>（Fig.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  $0.8\text{g/cm}^3$  および  $1.3\text{g/cm}^3$  と非常に軽く、吸水率が 2.5% と非常に小さ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

---

\* 建築学科 准教授

\*\* 大学院工学研究科 大学院生 博士前期課程

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。

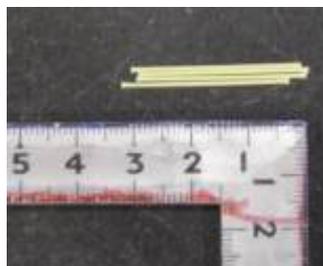


Fig.1 Vinylon Fiber

Fig.2 Super Lightweight Aggregate

Tab.1 Specimens and Experimental results

試験体名	使用材料					実験結果						
	種類	コンクリート		比重	材質	横補強筋		構造特性		最大耐力時		
		圧縮強度 B (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E <sub>c</sub> × 10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )			横補強筋比 P <sub>w</sub> (%)	横補強筋 体積比 h (%)	初期剛性 E <sub>c</sub> × 10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン 比	圧縮 応力度 e <sub>MAX</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	歪度 e <sub>MAX</sub> (%)	横補強筋 歪度 e <sub>h</sub> (%)
NC - 24 - 0.0	NC	24.4	2.71	2.35	SBPD 1275/142	0.0	0.0	3.20	0.18	20.5	0.13	
0.6						1.1	2.58	0.18	24.7	1.30	0.30	
0.8						1.4	2.10	0.23	33.0	2.33	0.42	
1.2						2.1	1.54	0.27	52.2	2.98	0.60	
FRA - 24 - 0.0	FRA	24.9	1.33	1.26	SBPD 1275/142	0.0	0.0	1.67	0.22	21.5	0.17	
0.6						1.1	1.28	0.20	21.7	0.21	0.05	
0.8						1.4	1.62	0.21	22.7	0.22	0.05	
1.2						2.1	1.45	0.20	23.7	0.30	0.10	
NC - 36 - 0.0	NC	43.9	2.52	2.35	SBPD 1275/142	0.0	0.0	3.02	0.19	38.5	0.18	
0.6						1.1	2.74	0.19	38.7	0.27	0.13	
0.8						1.4	2.61	0.18	47.6	1.10	0.58	
1.2						2.1	2.23	0.18	69.0	1.80	0.92	
LAC - 36 - 0.0	LAC	35.8	1.51	1.37	SBPD 1275/142	0.0	0.0	1.95	0.23	31.1	0.20	
0.6						1.1	2.27	0.22	33.4	0.23	0.06	
0.8						1.4	2.12	0.21	32.8	0.24	0.06	
1.2						2.1	1.93	0.21	36.3	0.29	0.09	
NC - 60 - 0.0	NC	61.2	2.82	2.36	SBPD 1275/142	0.0	0.0	3.10	0.18	51.2	0.21	
0.6						1.1	2.64	0.22	54.0	0.27	0.16	
0.8						1.4	2.83	0.16	59.3	0.34	0.26	
1.2						2.1	2.54	0.24	81.8	1.52	1.1	
LAC - 60 - 0.0	LAC	56.3	2.09	1.58	SBPD 1275/142	0.0	0.0	2.27	0.22	45.4	0.24	
0.6						1.1	2.64	0.21	45.4	0.21	0.20	
0.8						1.4	2.21	0.22	47.3	0.27	0.11	
1.2						2.1	2.20	0.19	49.5	0.29	0.09	
FRA - 60 - 0.0	FRA	60.1	2.18	1.56	SBPD 1275/142	0.0	0.0	2.17	0.22	46.3	0.25	
0.6						1.1	2.24	0.27	47.7	0.26	0.12	
0.8						1.4	2.15	0.21	49.0	0.30	0.13	
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，試験体の初期剛性およびポアソン比は最大耐力の 1/3 耐力時の値

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

Tab.1 に試験体一覧，Tab.2 および Tab.3 にコンクリートの調合表，Fig.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 6.4mm 丸鋼 PC 鋼棒で円形スパイラル筋（降伏強度 1275N/mm<sup>2</sup> 級）を使用した。また，ビニロン短繊維は 0.4×30mm 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，かぶりコンクリートはなしとした。

変動要因はNC ( $F_c = 24, 36, 60\text{N/mm}^2$ ), LAC ( $F_c = 36, 60\text{N/mm}^2$ ), FRA ( $F_c = 24, 60\text{N/mm}^2$ ) 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

Fig.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。

Tab.2 Mixing of LAC and FRA concrete

骨材種類	水セメント比 (%)	W	HC	S			NG		短繊維 (kg/m <sup>3</sup> )	混入率 (%)	AE減水剤 (kg/m <sup>3</sup> )	表面活性剤 (kg/m <sup>3</sup> )
				SS	NLS	SMS	W	L				
				単位量(kg/m <sup>3</sup> )								
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

Tab.3 Mixing of NC concrete

骨材種類	水セメント比 (%)	W	C	SS	G	AE減水剤
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

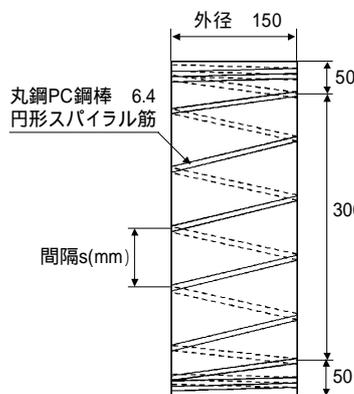


Fig.3 Specimens

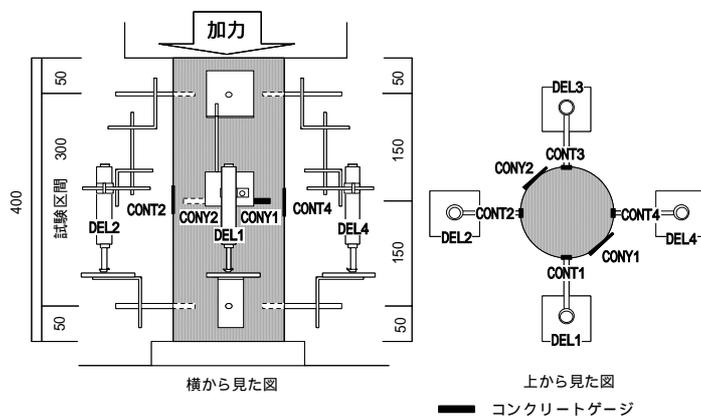


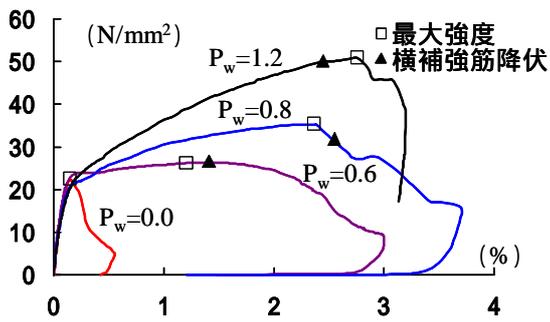
Fig.4 Loading Arrangement

## 3. 実験結果および検討

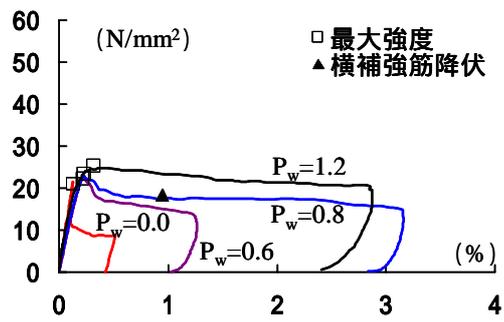
### 3.1 破壊性状および - 関係

Fig.5 に圧縮応力度 ( ) - 軸方向ひずみ度 ( ) 関係, および最終破壊状況を示す。

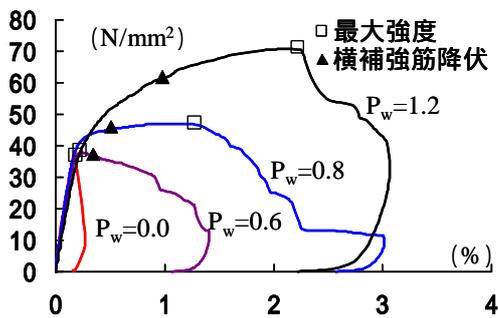
横補強筋が無い ( $p_w = 0.0\%$ ) 試験体の - 関係は、コンクリート種類、コンクリート強度に関係なく、最大耐力付近まで直線的な挙動を示し、最大耐力に達すると同時に縦方向のひび割れが生じ、直後に脆性的に耐力低下した。最終破壊状況は、コンクリート強



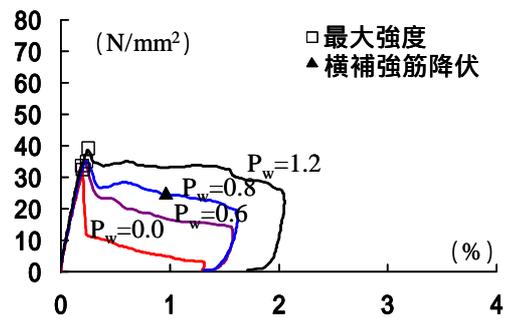
a) NC ( $F_c=24\text{N/mm}^2$ )



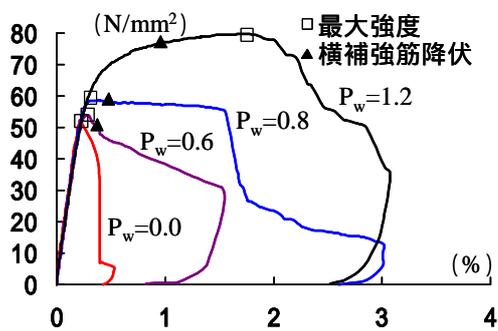
b) FRA ( $F_c=24\text{N/mm}^2$ )



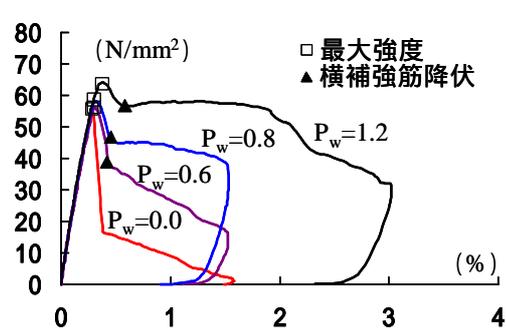
c) NC ( $F_c=36\text{N/mm}^2$ )



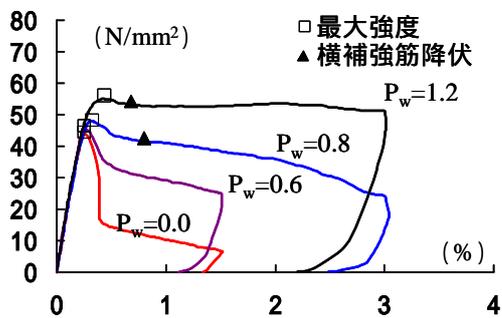
d) LAC ( $F_c=36\text{N/mm}^2$ )



e) NC ( $F_c=60\text{N/mm}^2$ )



f) LAC ( $F_c=60\text{N/mm}^2$ )



g) FRA ( $F_c=60\text{N/mm}^2$ )



$p_w=0.0\%$     $p_w=1.2\%$     $p_w=0.0\%$     $p_w=1.2\%$

h) FRA ( $F_c=24\text{N/mm}^2$ )   LAC ( $F_c=36\text{N/mm}^2$ )

Fig.5 - curves and Failure mode

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, 縦方向のひび割れ発生による剛性低下後においても, 圧縮応力度および軸方向ひずみ度が増加しながら最大耐力に至った。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, 縦方向のひび割れ発生による剛性低下直後に最大耐力に達し, 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。特に, FRA は耐力を維持し続け, コンクリートの剥落は抑制され, ひび割れは細かく分散した。

LAC, FRA では,  $p_w$  の増加による耐力上昇率が NC に比べて小さかった。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。

### 3.2 $c / c_{max}$ - 関係

Fig.6 に  $p_w = 0.6\%, 1.2\%$  の  $c / c_{max}$  - 関係をそれぞれ示す。ここでの  $c_{max}$  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。 $F_c$  が  $24 \text{ N/mm}^2$  の試験体では, 剛性低下後も耐力は上昇した。 $F_c$  が  $36 \text{ N/mm}^2$  と  $60 \text{ N/mm}^2$  の試験体では, 最大耐力後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。 $F_c$  が  $24 \text{ N/mm}^2$  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) $F_c$ が $24 \text{ N/mm}^2$ での NC, FRA の違い

$p_w$  が 0.6% の試験体の NC では剛性低下後も耐力は上昇し続けたが, FRA では剛性低下後に最大耐力に達し, 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, 剛性低下後に最大耐力に達し, その後耐力を維持する傾向がみられるが緩やかに耐力低下した。

#### (3) $F_c$ が $36 \text{ N/mm}^2$ での NC, LAC の違い

$p_w$  が 0.6% の試験体では, NC, LAC ともに剛性低下後に最大耐力に達し, NC は緩やかに耐力低下していったのに対して, LAC は急激に耐力低下した。

$p_w$  が 1.2% の試験体の NC は, 剛性低下後も耐力が上昇していったのに対して, LAC は剛性低下後に最大耐力を向かえ, その後耐力低下していった。 $p_w$  が 0.6% の試験体と比べると, NC, LAC ともに耐力を維持する傾向がみられた。

#### (4) $F_c$ が $60 \text{ N/mm}^2$ での違い

$p_w$  が 0.6% の試験体では, 3 種類のコンクリートともに剛性低下後に最大耐力に達し, 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, 特に LAC では, 急激に耐力低下した。

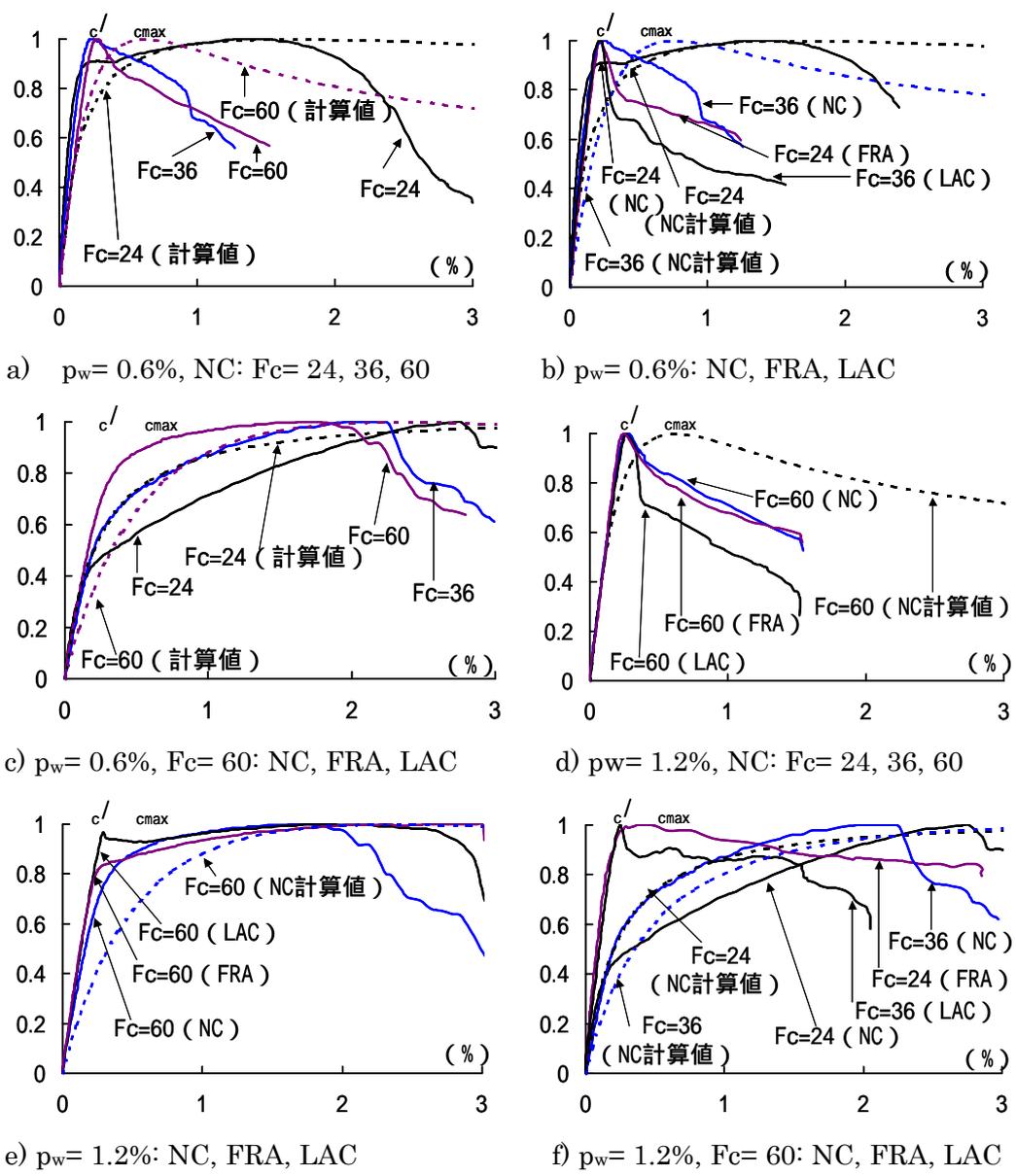


Fig.6  $c / c_{max}$  - curves

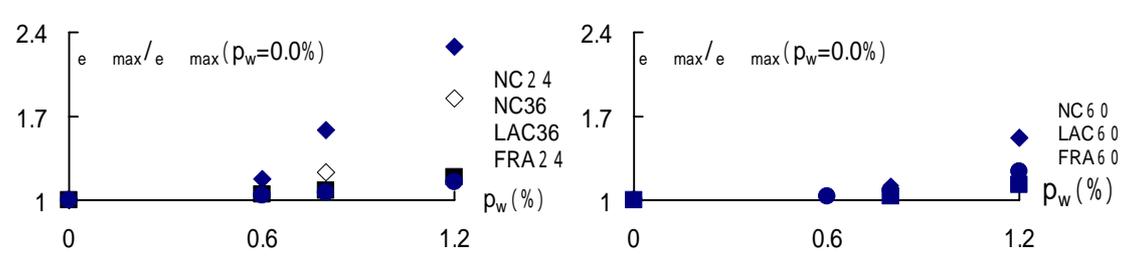


Fig.7 Strength rise ratio

$p_w$  が 1.2% の試験体では、3 種類のコンクリートともに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、最大耐力後の耐力が計算値に比べて急激に低下する傾向が見られた。

### 3.3 横補強筋の拘束効果

ここでは最大圧縮応力度 ( $e_{max}$ ) に対する拘束効果について述べる。Fig.7 に強度上昇比 ( $p_w = 0.0\%$  の  $e_{max}$  に対する比) と  $p_w$  の関係、Fig.8 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 Fig.8 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。このことは、LAC、FRA の骨材強度が NC と比べて弱いため、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と考えられる。

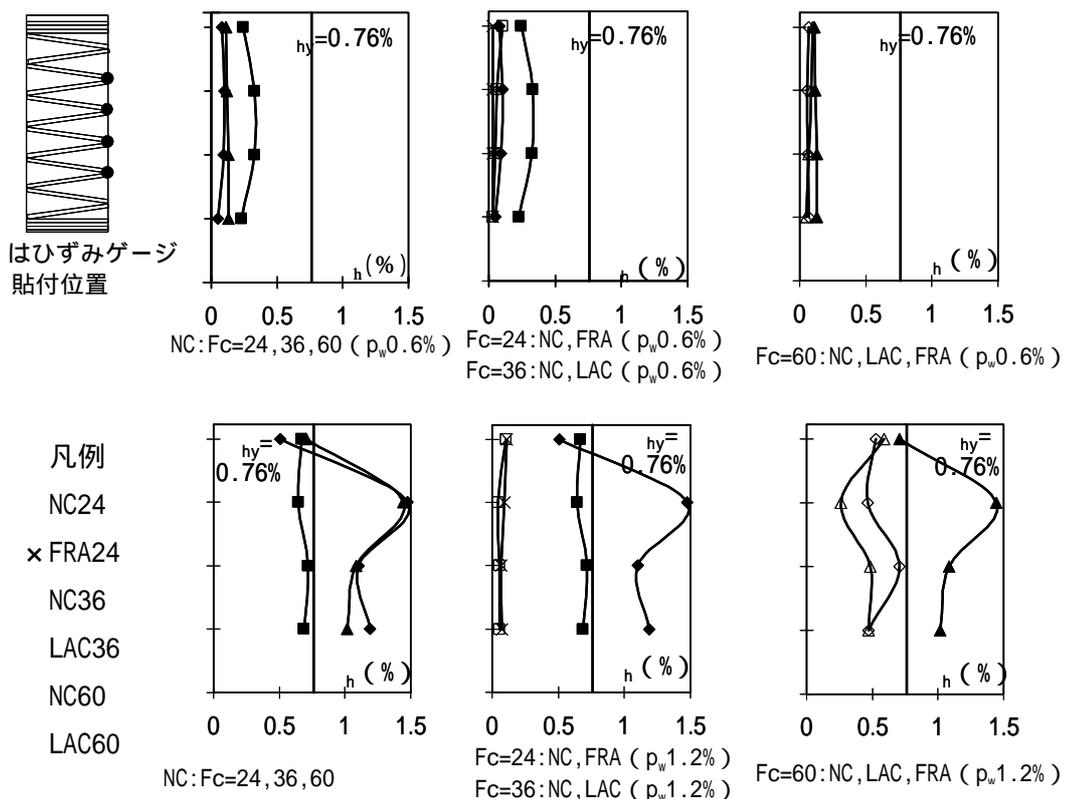


Fig.8 Distortion Distribution

### 3.4 既往の評価式との適合性

Fig.9 に最大圧縮応力度 ( $\sigma_{max}$ ) に関する実験値 ( $e_{max}$ ) - 計算値 ( $c_{cB}$ ) 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<sup>[4]</sup>を使用した。

最大圧縮応力度の算出式を以下に示す。

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

$$\sigma_p = 0.8 \cdot c_{\sigma_{cB}} \quad (2)$$

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

$c_{cB}$ : コンファインドコンクリートの強度

$\sigma_p$ : プレーンコンクリートの強度

$\rho_h$ : 横補強筋の体積比

$\sigma_{hy}$ : 横補強筋の降伏点応力

( 11300kgf/cm<sup>2</sup> )

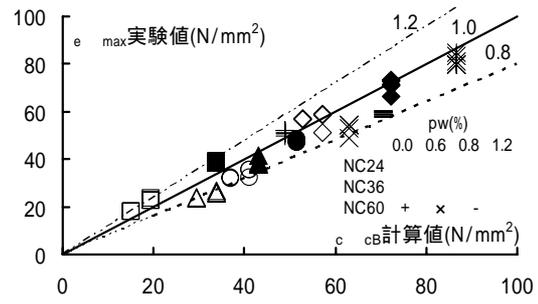
$c_B$ : コンクリートのシリンダー強度

$s$ : 横補強筋の間隔

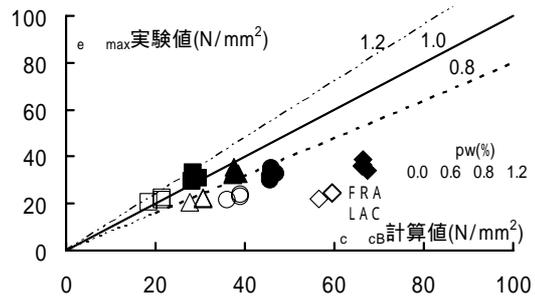
$D_c$ : 周辺横補強筋の断面内の中心間距離

Fig.9 a)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 Fig.9 b), 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。

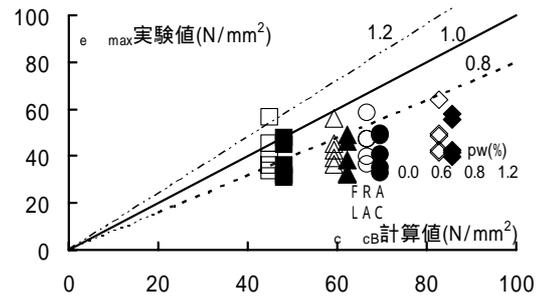
そこで,(1)式中の降伏点応力 ( $\sigma_{hy}$ ) を最大圧縮応力度時の横補強筋の実応力 ( $c_{\sigma_h}$ ) に置き換えて評価を行った所, Fig.10 a) のようになり,実験値と計算値が概ね適合しているといえる。LAC, FRA の拘束効果がNC に比べて小さいことから,計算値の値に(4)式で示す LAC, FRA のそれぞれの比重 (表 1 参照) をNC の比重で割った値を乗じた結果を示した図が Fig.10 b)である。Fig.10 a) と同様に,概ね適合しているといえる。



a) NC (24, 36, 60N/mm<sup>2</sup>)



b) FRA (24N/mm<sup>2</sup>), LAC (36N/mm<sup>2</sup>)



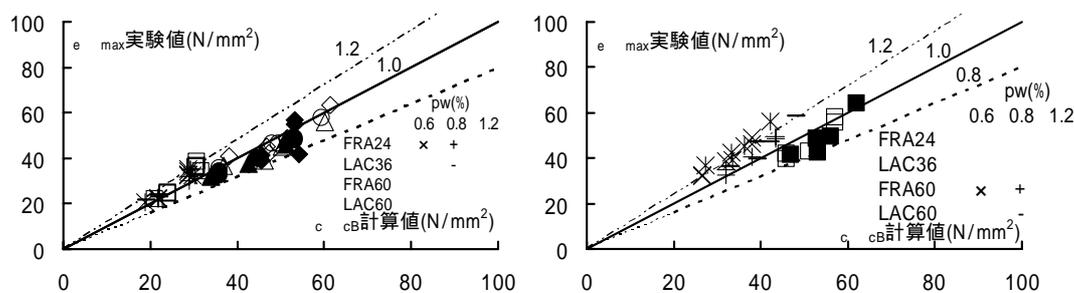
c) LAC, FRA (60N/mm<sup>2</sup>)

Fig.9 Experimental values and Calculated values

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

$\gamma'$  : LAC, FRA の比重

$\gamma_{NC}$  : NC の比重



a) Calculated values by Actual Stress

b) Modify using specific gravity

Fig.10 Evaluation of  $\sigma_{max}$

#### 4. まとめ

- 1) 横補強筋で拘束することにより圧縮靱性が向上した。
- 2) NC では  $p_w$  が増加するほど耐力が向上した。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( $\sigma_{cB}$ )について, NC に用いられている評価式で評価できる。

#### 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, pp. 337-342, 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)