

[2069] 鉄筋コンクリート壁の耐震機構に関する研究

正会員 井上範夫(鹿島建設技研)

正会員 ○小鹿紀英(鹿島建設小堀研)

正会員 鈴木紀雄(鹿島建設小堀研)

1. はじめに

鉄筋コンクリート耐震壁の最大せん断耐力に関する研究は古くから数多く行われてきているが、特に近年、従来の実験的研究に加えて解析的研究が盛んに行われるようになってきた。なかでも、南¹⁾、加藤・称原²⁾、狩野・白石ら³⁾、塩原⁴⁾は終局強度理論に基づいて、最大耐力算定用のマクロモデルを提案しており注目される。

本論文では、筆者らが開発したコリンズ理論に基づくFEMプログラムにより求めた鉄筋コンクリート耐震壁の終局耐力状態に、加藤・称原の圧力場理論を適用することによって、終局時の応力状態を論じることを試みる。

2. FEMプログラムの検証

FEMプログラムの詳細は、既報⁵⁾に述べた通りであるのでここでは変更点のみを述べる。

- 1) コンクリートがひび割れた後の圧縮側の応力-ひずみ関係はCollinsの最新の研究⁶⁾に基づいて次式とする。

$$\sigma_d = \beta F_c \cdot \left\{ 2 \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{0.8 - 0.34 \varepsilon_{dt} / \varepsilon_0} \quad (2)$$

σ_d, σ_{dt} : 圧縮及び引張り主応力

$\varepsilon_d, \varepsilon_{dt}$: 圧縮及び引張り主ひずみ

F_c, f_{cr} : 1軸圧縮強度及び引張強度

$\varepsilon_0, \varepsilon_{cr}$: F_c 時, f_{cr} 時のひずみ

- 2) コンクリートのひび割れ後の主引張応力-主ひずみ関係は平板加力実験の結果を参考にして以下の3次曲線で表現する。

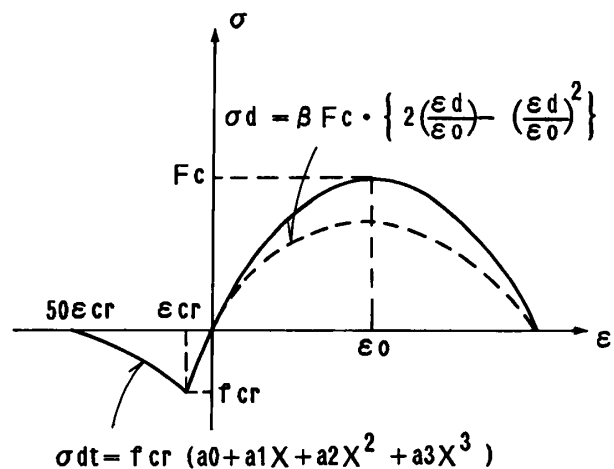


図-1 ひび割れ後の主応力-主ひずみ関係

$$\sigma_{dt} = f_{cr} (a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3) \quad \text{ただし } X = \varepsilon_{dt} / \varepsilon_{cr} \quad (3)$$

$$a_0 = 1.06 \quad a_1 = -6.18 \times 10^{-2} \quad a_2 = 1.54 \times 10^{-3} \quad a_3 = -1.45 \times 10^{-5}$$

このプログラムによる解析結果を用いて壁の抵抗機構を論じる場合には、終局耐力時の壁内部のひずみ分布が正しく表現されていることが前提条件となるため、まず過去に行われた実験の結果と解析結果を比較して解析法の検証を行う。対象とした実験は、青山・塩原ら⁷⁾によって実施されたI型耐震壁の実験のうちのP2015試験体である。試験体の概要と配筋、材料定数を図-2、表-1に示す。この実験では、図-2に示すように壁版内部の相対変位が3方向にわたって計測

されているため各ゾーン毎の平均的なひずみ円が描ける。終局耐力時近傍のひずみ円を実験と解析とを比較して図-3に示す。これを見ると、軸方向ひずみはやや引張側に移動しており繰返し載荷の影響が現われているものの、円の直径であるせん断ひずみは良い対応がみられる。

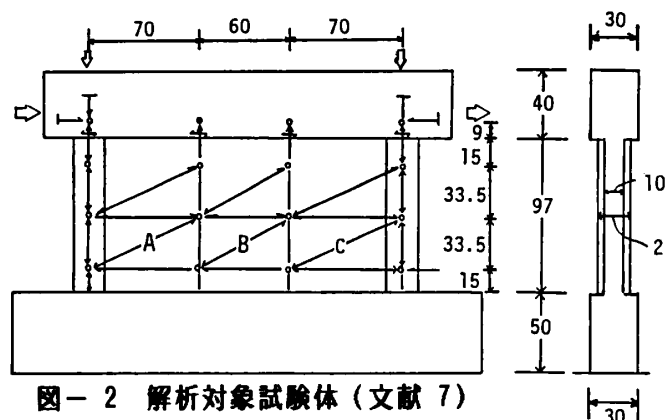


図-2 解析対象試験体（文献7）

表-1 材料特性

コンクリート	圧縮強度 $F_c(\text{kg/cm}^2)$	引張強度 $f_t(\text{kg/cm}^2)$	ヤング係数 $E_c(\text{t/cm}^2)$
	394	20.9*	263
* $0.33 \sqrt{F_c(\text{Mpa})}$ として求めた			
鉄筋	鉄筋比 $P(\%)$	降伏強度 $f_y(\text{kg/cm}^2)$	ヤング係数 $E_s(\text{t/cm}^2)$
	0.85	3770	1730
	3.8	3710	1950

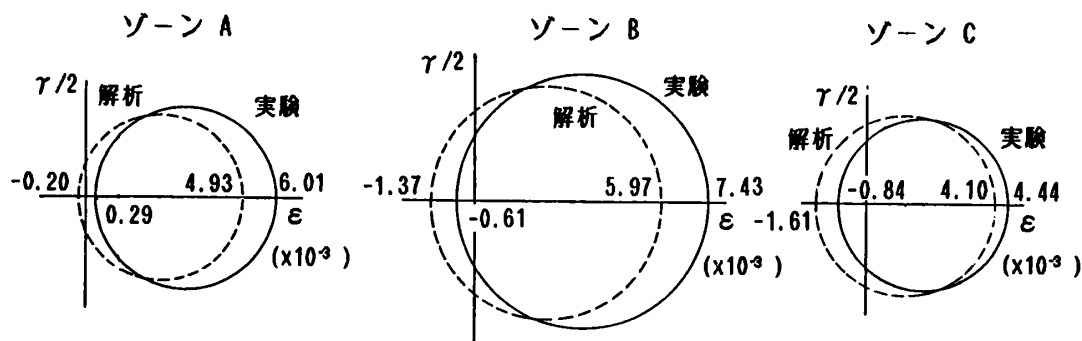


図-3 終局耐力時の壁版内部のひずみ分布（解析の耐力 164 tonの時）

3. 解析法

(1) 基本の考え方

圧力場理論の考え方をFEMの解析結果に応用して、鉄筋コンクリート耐震壁の終局耐力時の各要素毎の応力をはり的な機構（せん断補強筋のシステム）とアーチ的な機構（コンクリート圧力場のシステム）に分けることを試みる。この時両機構における壁のコンクリートの主応力方向は解析結果の主応力方向を用いる。

まず、壁版を構成するRC要素をコリンズの考え方にに基づき鉄筋負担分とその残りのコンクリート分の応力に分ける。さらに、ここでの新しい試みとしてコンクリートの負担応力を、図-4の[]内に示すようにせん断補強筋のシステムと圧力場のシステムに分離して考える。

(2) せん断補強筋のシステムの負担力

図-4(d)に示すシステムでは、横筋に生じる応力とコンクリートの応力の一部、及び縦筋の応力の一部及びせん断応力で釣り合い状態を形成していると考えられる。このとき釣り合いに必要なコンクリートの圧縮力を主応力 σ_1 、 σ_2 をもとに $\kappa\sigma_1$ 、 $\kappa\sigma_2$ で表現する。またこのシステムに用いられる縦筋の応力も存在応力 f_{sy} をもとに αf_{sy} で表現する。これらから、 α 、 κ 、及びはり機構に用いられるせん断力 τ_s は以下のようにもとめられる。

$$\alpha = \frac{-\kappa(\sigma_1 - \sigma_2) - f_{sx}}{f_{sy}} \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{-f_{sx}}{\sigma_1 \cos^2 \theta - \sigma_2 \sin^2 \theta} \quad (5)$$

$$\tau_s = \frac{\kappa(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \sin 2\theta \quad (6)$$

(3) 圧力場のシステムの負担力

この要素に残る負担力としては、縦筋の残りの応力、コンクリートの残りの応力でこれらの釣り合い状態は図-4(e)に示す通りである。この機構に用いられるせん断応力度 τf は以下のように表せる。

$$\tau f = \tau - \tau s \quad (7)$$

(4) 本解析法の特徴

本解析法の特徴は以下の通りである。

- 解析結果の応力を用いているためせん断補強筋の応力が適切に評価されている。
- 主応力と主ひずみの方向が一致するという Collins理論に基づいているため、主軸の角度が一義的に決まり扱いやすい。
- ひびわれたコンクリートの圧縮強度低下を適切に評価できる。

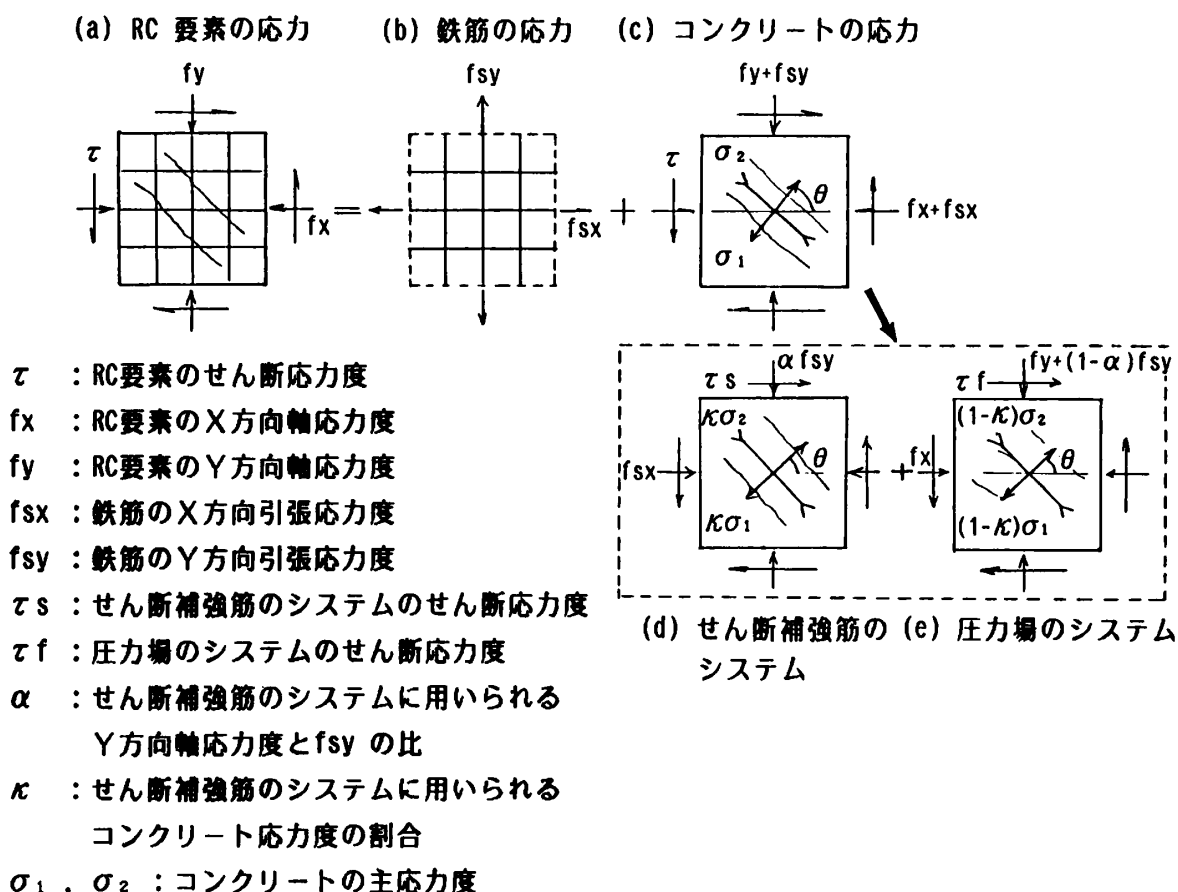


図-4 鉄筋コンクリート要素の応力状態

4. 耐震壁への適用

4.1 解析ケース

耐震壁の最大耐力時のはり機構、アーチ機構の負担せん断力を本論で述べた方法で評価検討するために、FEMプログラムの検証用に用いたP2015 耐震壁を基本として、シアスパン比及び壁の横筋比を変化させた耐震壁を設定して数値実験を行った。設定した耐震壁は、図-5 に示すようにシアスパン比が約0.5 と 1.2 の2種類、また壁の横筋比 ρ_{wx} が 0.4%、0.85%、1.3% の

3種類であり、それ以外のコンクリート強度、壁縦筋等の諸元は P2015試験体と同じである。ただしシアスパン比1.2 の場合には曲げ破壊が先行しないように柱の主筋比を 16%にしている。解析ケースの一覧表を表-2 に示す。

表-2 解析ケースの一覧表

シアスパン比	0.5	1.2
柱主筋比(%)	3.8	16.0
壁横筋比(%)		
0.4	W-05-04	W-12-04
0.85	W-05-085*	W-12-085
1.3	W-05-13	W-12-13

* P2015に対応している

4.2 解析結果

本論で述べた方法によって終局時の耐力をせん断補強筋のシステム（以後はり機構と呼ぶ）と圧力場のシステム（以後アーチ機構と呼ぶ）及び柱の負担力に分けて壁の高さ方向の分布を示したのが図-6,7 である。この図では、横軸に終局耐力を取り、有限要素モデルの各要素毎のはり機構のもつせん断力、アーチ機構のもつせん断力、柱のもつせん断力を水平方向の各層について足し合せて表示したもので各機構の負担割合の高さ方向への変化が分る。柱のもつせん断力はFEM解析結果の柱要素のせん断力をそのまま用いた。

(1) シアスパン比 0.5の場合

耐力については、 $p_w x$ を増加させてもあまり変化しない結果となっている。しかし、図-6

の各機構の負担割合をみると、 $p_w x$ が大きくなるにつれてはり機構はそれに応じて増大するものの、アーチ機構は逆に減少していること、また柱の負担はほとんど変化がないことが分る。また、負担量そのものについては、アーチ機構の値が大きく、横筋があまり有効となっていないといえる。一方、上下方向分布については、はり機構は中央部が大きく、端部では極端に小さくなっていること、引張柱は上端部、圧縮柱は下端部で大きくなっていること、アーチ機構はそれ程大きな変動はないことが分り、壁の各機構の負担割合を一つの値で定義することは困難なものと思われる。

(2) シアスパン比 1.2の場合

耐力については、 $p_w x$ の増加により上昇している。これを図-7 のように各機構に分けて見ると $p_w x$ が大きくなるにつれてはり機構はそれに応じてかなり増大しているが、アーチ機構がやや減少するために耐力ははり機構の増加分ほどは増えていない。

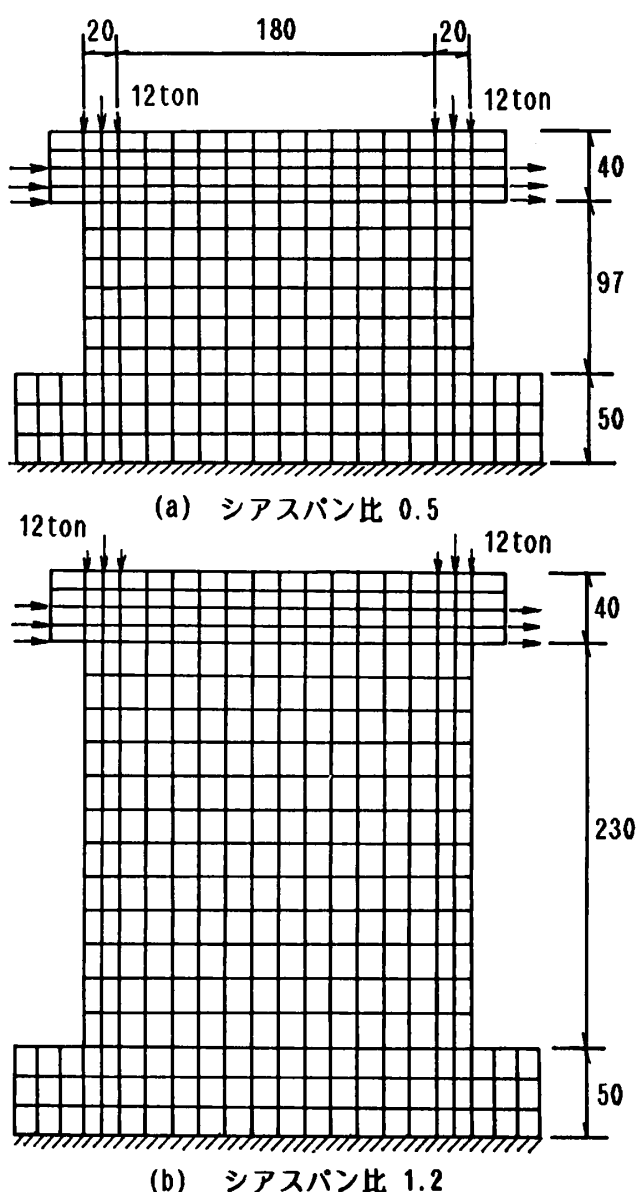


図-5 解析モデル (単位 cm)

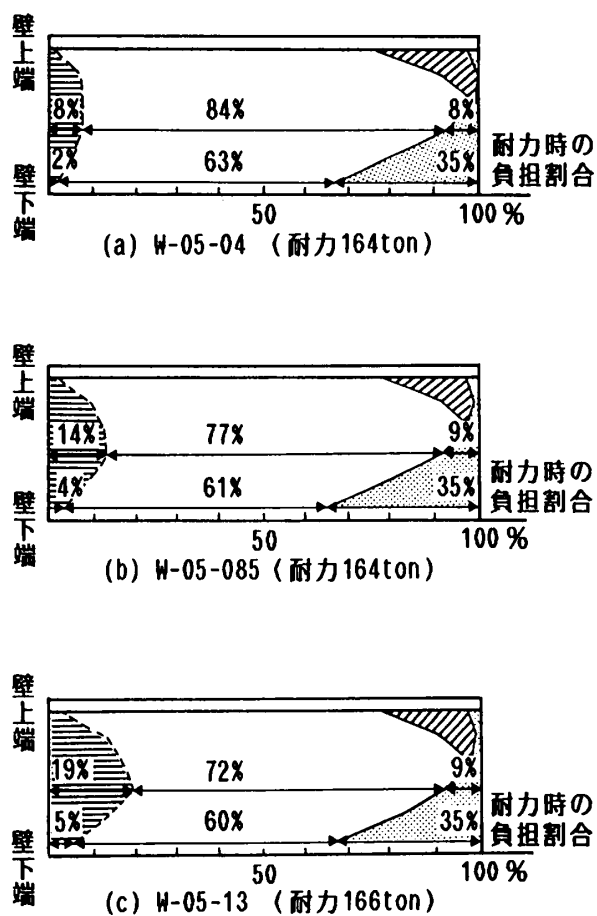


図-6 耐力時の負担せん断力の割合
(シアスパン比 0.5)

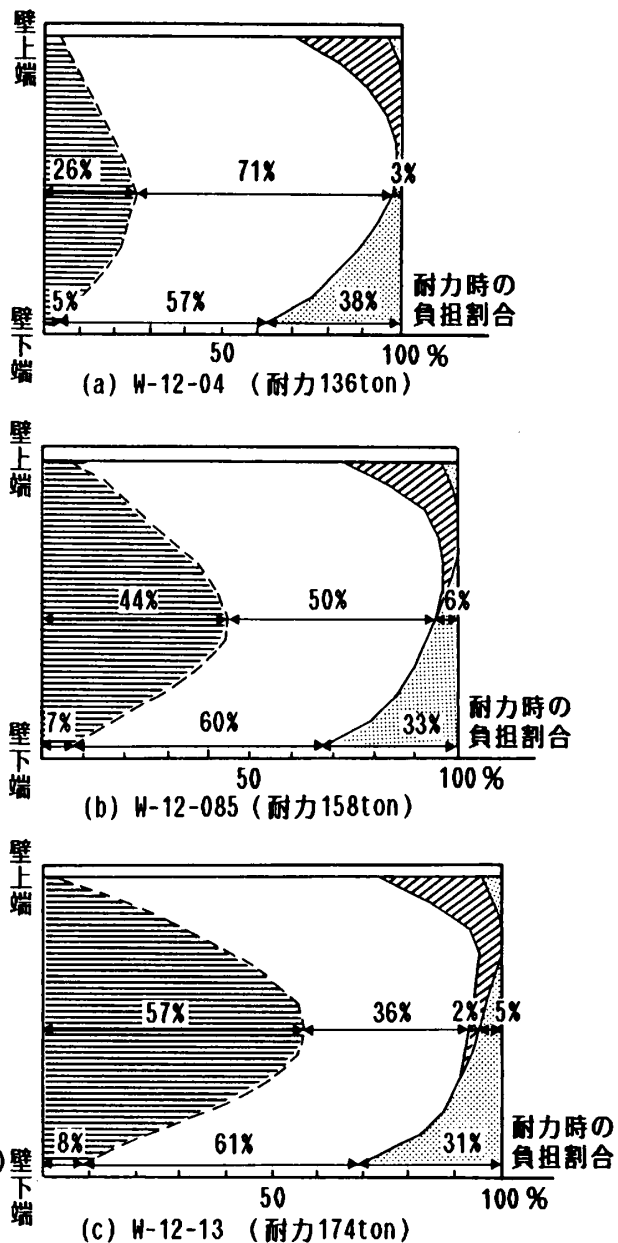
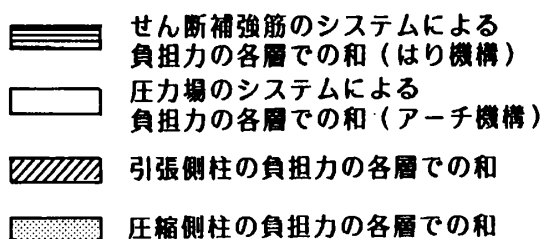


図-7 耐力時の負担せん断力の割合
(シアスパン比 1.2)

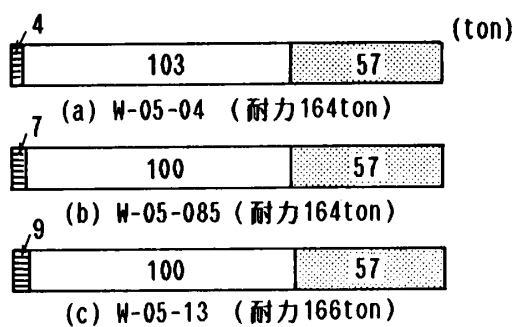


図-8 最下層での負担せん断力
(シアスパン比 0.5)

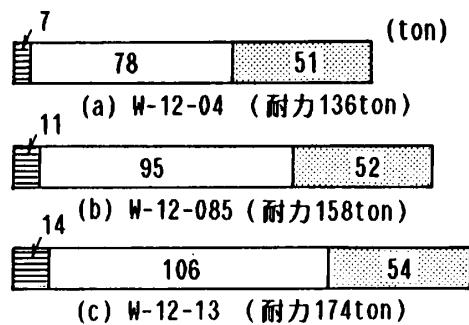


図-9 最下層での負担せん断力
(シアスパン比 1.2)

一方上下方向分布については、はり機構では中央部が大きく端部では極端に小さくなっていることが分り、シアスパン比 0.5 の場合と同様、負担割合を一つの値で定義することが難しい。

4.3 壁の抵抗機構

今回の場合、壁の耐力はいずれのケースも最下層の圧壊で決まっている。そこで、最下層についてのみ注目してみると図-8 に示すようにシアスパン比0.5 の場合には、各機構の負担割合が横筋比の増加によってはあまり変化しない。一方、シアスパン比1.2 の場合には、図-9 に示すようにはり機構、柱の負担は横筋比の増加によって量はそれ程ふえないのに対し、アーチ機構の負担力が増加しており、これが耐力増加につながっている。なおこの場合、有効強度は一軸圧縮強度の約0.7 倍とほぼ同一であるので、これはコンクリートの圧縮ストラットの幅が増加していることを意味している。

5. むすび

本研究では、シアスパン比の小さい場合と大きい場合を例として、FEMの結果のひずみ、応力状態をそのまま反映してはり機構、アーチ機構に負担力を分離する手法を試みた。従来のマクロモデルでは、これらの機構の和としての耐力が実験値と対応しているかどうかを主な観点として検証を行っているが、より良いマクロモデルを提案するには、各機構の分担割合等についても実状と合っているかどうかの検証も行うべきと考える。ここで提案した手法は、そのために有効な手段と考えられ、各種耐震壁に適用して検討を行う予定である。

<謝辞>

実験の詳細なデータを頂いた東京大学 青山博之教授、建設省 塩原 等博士（当時東大）に深謝致します。

<参考文献>

- 1) 村上利憲、福島孝之、南 宏一：水平集中荷重を受ける鉄筋コンクリート耐震壁のせん断強度、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、p.p.381～384、1985
- 2) 称原良一、加藤 勉：鉄筋コンクリート連層耐震壁の終局耐力、日本建築学会論文報告集、第343号、p.p.24～31、昭和59年9月
- 3) 白石一郎、狩野芳一、町田亘寛：鉄筋コンクリート造耐震壁の最大せん断耐力に関する一考察、日本建築学会論文報告集、第365号、p.p.144～155、昭和61年7月
- 4) 塩原 等：塑性理論による1層1スパン鉄筋コンクリート造耐震壁の終局強度、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、p.p.693～696、1986
- 5) 井上範夫、小鹿紀英、鈴木紀雄、速水由紀夫：コリンズ理論に基づくRC弾塑性解析法、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、p.p.405～408、1985
- 6) Frank J. Vecchio and Michael P. Collins : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear , ACI Journal , No.83-22, p.p.219～231 , 1986
- 7) 青山博之、細川洋治、塩原 等、他：既存鉄筋コンクリート建物の耐震補強工法に関する研究（その1.鉄筋コンクリート機打ち耐震壁の実験）、建築学会大会梗概集、昭和60年10月