

# 論文 複合応力下における RC 耐震壁の面外せん断挙動に関する 実験的検討

荻原みき \*1、菅原良次 \*2、新田康男 \*3、甲斐芳郎 \*3

要旨：複合応力下における RC 耐震壁の面外せん断挙動を把握することを目的に、トロント大学（カナダ）のシェル要素試験機を用いて、RC 耐震壁の面外せん断試験を実施した。その結果、軸方向応力と同様に直交方向の面内軸力の変化が、せん断ひび割れ強度や終局耐力、剛性などに大きな影響を及ぼすことが確認された。

キーワード：複合応力、面外せん断耐力、せん断ひび割れ強度

## 1. はじめに

RC 構造物が巨大化、多機能化するに従い、RC 部材に加わる応力も複雑なものとなってきている。従来、RC 耐震壁に加わる面内応力と面外応力を同時に考慮する必要性は少なかったが、存在応力が複雑になってくるにつれ、これらを同時に考慮した取扱いが必要となってきた。本研究では、このような認識に基づき、トロント大学（カナダ）のシェル要素試験機を用いて、複合応力下における RC 耐震壁の面外せん断試験を実施した。複合応力としては、面外せん断力によるモーメント勾配のある軸方向の応力（ここでは鉛直軸力）およびそれと直交方向に作用する軸応力（水平軸力）を考慮し、これらの応力の下での面外せん断挙動を実験的に明らかにした。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験装置

図 1 に試験装置の正面、立面図を示す。鋼製主フレームの構面内に面内力および面外曲げモーメント加力用として 100tf 油圧ジャッキが 40 台、構面外に面外せん断力加力用として 50tf 油圧ジャッキが 20 台それぞれ設置されている。加力方法は、水平方向に一定軸力を加えた状態でそれと直交する鉛直方向に面外曲げと面外せん断力および軸力を加えた。面外曲げは逆対称とし、試験体中央部では面外せん断力のみが作用するようにした。

### 2.2 測定方法

試験体の面外、面内の絶対変位は試験体の表面に取付けた変位計およびパイゲージを用いて測定してい

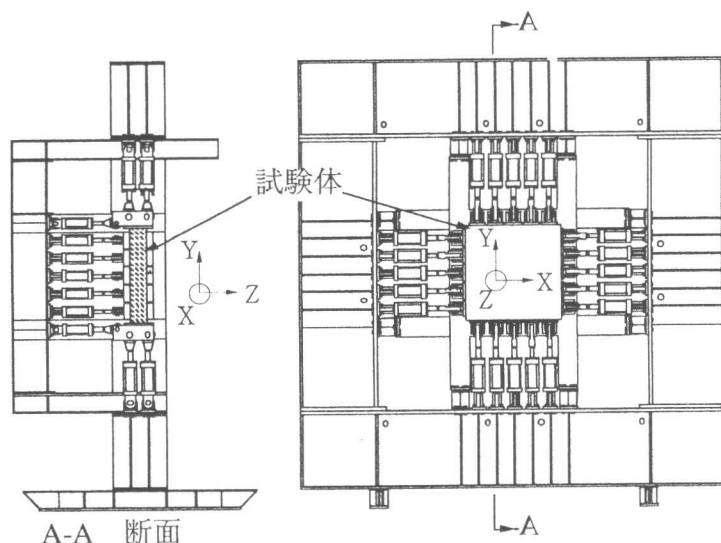


図 1 シェル要素試験体（トロント大学）

- \* 1 東京電力（株）技術開発本部（正会員）
- \* 2 東京電力（株）技術開発本部
- \* 3 清水建設（株）電力エネルギー本部（正会員）

る。今回の試験方法では不動点が存在しないために、これらの変位測定結果から図2に示したように解析的に試験体の面外変形を求めた。すなわち、試験体の中央部(H=1200mm)を変形の評価区間とし、その下端中央点より立ち上げた垂線と上端中央点との距離を求める。同様に、上端より変形を算定し、それらの平均を全体変形(eδT)とする。また、曲げ変形(eδB)を式(1)によって求め、これを全体変形より差し引くことによって、せん断変形(eδS)を求めた。(式(2))

$$e\delta B = \sum (\phi_i \cdot x_i \cdot h_i) \quad (1)$$

ここに、

- φ<sub>i</sub> : 要素 i の曲率 (i = 1~6)
- = ((NY<sub>i</sub> - NY<sub>i+1</sub>) - (SY<sub>i</sub> - SY<sub>i+1</sub>)) / (d · x<sub>i</sub>)
- x<sub>i</sub> : 要素 i の高さ
- h<sub>i</sub> : 要素 i の変形算定位置からの距離
- d : 壁厚

$$e\delta S = e\delta T - e\delta B \quad (2)$$

荷重は油圧ジャッキの油圧およびリジッドリンクに取付けたロードセルで測定し、その結果から求めた。

### 2.3 試験体

試験体形状を図3、図4に示す。試験体は一辺1625mm厚さ318mmのRC平板で、面内方向にはD19が鉄筋比で3%程度配筋されている。また、面外のせん断補強筋は配していない。加力治具を接続するための雌ねじを切った2"角鋼材(コネクタブロック)が端部に

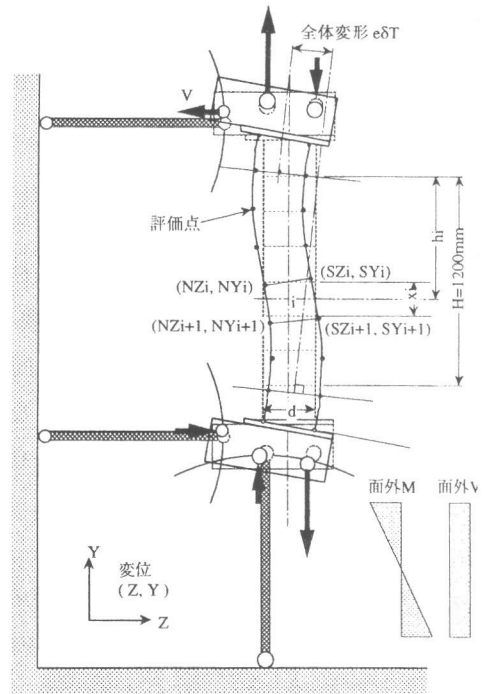


図2 面外変形の求め方

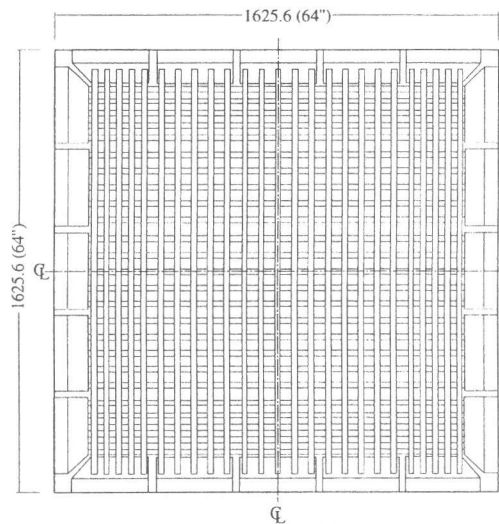


図3 試験体

表1 材料定数

試験体	コンクリート			鉄筋		
	圧縮強度 f <sub>c</sub> (Mpa)	圧縮強度 時ひずみ ε <sub>0</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	骨材 最大径 a (mm)	降伏強度 (MPa)	配筋	
ST4-C	37.4	2.07	10	541	両側、 X,Y方向 D19@61 (a=287mm <sup>2</sup> ) ρ <sub>x</sub> =ρ <sub>y</sub> =3.0%	
ST4	27.0	1.90	10	639		
ST4-T	33.1	2.00	10	541		
SN0	37.4	2.07	10	541		
SC4-C	34.7	2.24	10	639		
SC4	36.2	1.85	10	541		
SC4-T	36.2	1.85	10	541		
SC8-C	33.5	2.22	10	639		面外補強筋 無し
SC8	27.0	2.44	10	639		
SC8-T	27.0	2.44	10	639		

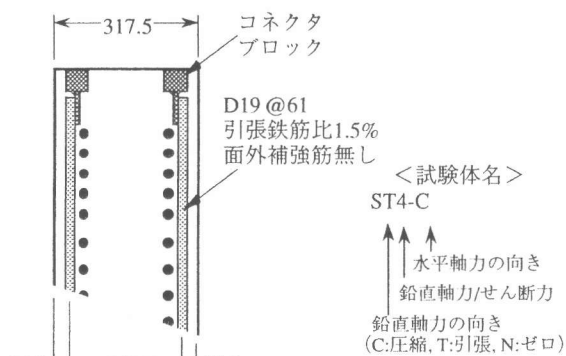


図4 試験体断面図 (単位: mm)

配置され、これに溶接した1/2"プレートに、面内鉄筋が溶接されている。試験体製作に用いる鉄筋、コンクリート材料は全て日本より現地に輸送した。材料試験結果を表1に示す。

試験では面外せん断挙動に着目し、同時に作用させる面内応力の組合わせを図5に示すようにパラメータとした。

### 3. 試験結果

実験結果の一覧を表2に示す。各試験体の実験終了後観察されたひび割れを図6に示す。実験終了後、試験体を中央部分でカットしたものについては切断面のひび割れ図を、カットしなかったものについては側面のひび割れ図を示す。試験体に発生する曲げひび割れ発生荷重 ( $V_{cr0}$ ) は、試験体表面に鉛直方向に設置したパイゲージにより求められる表面ひずみの急激な変化により確認した。せん断ひび割れは図6のひび割れ図に見られるように、試験体の高さ方向に何カ所か発生して終局に至っている。そこで、最初に発生したせん断ひび割れの発生荷重を  $V_{cr1}$ 、試験体の厚さ方向ひずみをモニターしている全評価点 (図2中の●---●7カ所) でひび割れの発生を示した荷重を  $V_{cr2}$  とした。せん断ひび割れの発生荷重 ( $V_{cr1}$ 、 $V_{cr2}$ ) は、試験体の両面に設置した変位計および試験体の厚さ方向にセットしたアルミロッドに貼付したひずみゲージにより、試験体の厚さ方向ひずみの変化をモニターすることによって確認した。

#### 3.1 ひび割れ発生進展状況

ひび割れの発生進展状況は鉛直軸力の加わり方によって異なっている。引張軸力を受ける3試験体 (ST4-C、ST4、ST4-T) には、まず試験体両面の引張部に曲げひび割れが発生し、その後試験体の上部または下部にせん断ひび割れが発生する。更に荷重を上げていくと、終局時に新たにやや角度の急な (主筋との角度が小さい) せん断ひび割れが中央部に発生して終局に至る。

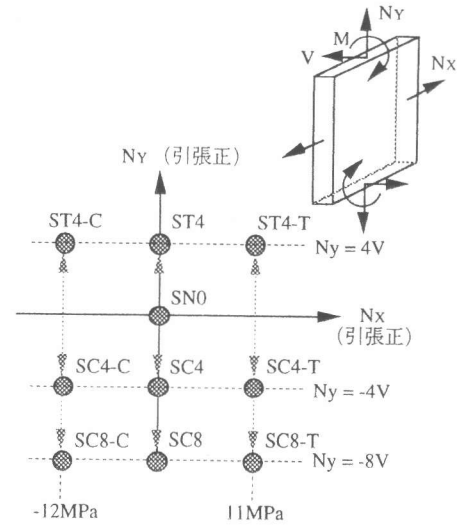


図5 実験パラメータ

表2 実験結果のまとめ

試験体	fc' (Mpa)	荷重条件		曲げひび割れ発生時 Vcr0 (kN/m)	せん断ひび割れ発生時 Vcr1 (kN/m)	試験体全域に広がる Vcr2 (kN/m)	終局時 Vu (kN/m)	修正荒川式 Vark (kN/m)	Vu/Vark
		水平軸力 Nx (kN/m)	鉛直軸力 比 Ny/V						
ST4-C	37.4	-3810	4	73	244 (0.141)	→	358 (0.207)	319	1.12
ST4	27.0	0	4	58	130 (0.088)	241	330 (0.224)	258	1.28
ST4-T	33.1	3450	4	31	105 (0.064)	159	301 (0.185)	294	1.03
SN0	37.4	0	0	134	261 (0.151)	371	415 (0.261)	418	0.99
SC4-C	34.7	-3810	-4	520	604 (0.362)	→	691 (0.399)	577	1.20
SC4	36.2	0	-4	—	524 (0.308)	581	717 (0.421)	594	1.21
SC4-T	36.2	3450	-4	—	334 (0.196)	375	420 (0.247)	523	0.80
SC8-C	33.5	-3810	-8	—	329 (0.201)	329	459 (0.280)	1030	0.45
SC8	27.0	0	-8	—	319 (0.217)	→	358 (0.243)	899	0.40
SC8-T	27.0	3450	-8	—	263 (0.179)	→	348 (0.237)	899	0.39

[注1] 軸力は引張を正、圧縮を負としている。[注2] ( ) 内はせん断力  $V$  を  $bd\sqrt{f_c'}$  で除した値を示す。[注3]  $V_{cr0}$  は曲げひび割れが最初に発生した時、 $V_{cr1}$  はせん断ひび割れが最初に発生した時、 $V_{cr2}$  はせん断ひび割れが何本か発生し、試験体の評価部分全域にひび割れが広がった時を指す。[注4] 修正荒川式は次式による。

$$V_{ark} = \left\{ \frac{0.115 k_u \times 0.82 p_t (\%)^{0.23} (f_c' + 17.6)}{M/VD + 0.12} + 0.845 \sqrt{p_w \sigma_y} + 0.1 \sigma_0 \right\} b j \quad \text{MPa, mm} \quad (3)$$

ここで、 $k_u$  は部材せいによる係数 (0.797)、 $p_t$  は引張鉄筋比 (%)、 $p_w$  はせん断補強筋比 (0)、 $\sigma_0$  は鉛直軸応力 ( $V$  に比例) を示す。

鉛直軸力を受けない試験体SN0のひび割れ発生状況もこれらの試験体とほぼ同様に進展するが、曲げひび割れ荷重、せん断ひび割れ荷重とも増加する。

4 倍の圧縮軸力を受ける試験体では、試験体SC4-C (水平圧縮) に曲げひび割れが見られたが、他の試験体SC4、SC4-Tにはせん断ひび割れが生じるまで試験体表面にひび割れが生じなかった。また、試験体上端、下端、及び終局時に発生するせん断ひび割れとも、引張軸力を受ける試験体、軸力無しの試験体に比べ角度が急になっている。ひび割れ角度 (鉛直軸に対する) に対する水平軸力の影響は小さい。

8 倍の圧縮軸力を受ける試験体では、まず試験体下部にせん断ひび割れが発生し、その後、上部より角度の急なせん断ひび割れが発生して終局に至る。終局のせん断ひび割れの角度は、軸力の小さな試験体に比べ更に鋭角になる。ひび割れ角度に対する水平軸力の影響は小さい。ここで、水平圧縮を受ける試験体SC8-Cのひび割れについて補足する。2 軸の圧縮を受けるこの試験体は終局耐力が大きく試験機の最大容量を超える可能性があったため、試験体の幅を通常の約3/5とし、水平軸力を8本のPC鋼棒のプレストレス力によって与えることにした。試験体中央の穴はPC鋼棒を通すための穴である。この穴は厚さ0.8mmの鋼管にて補強されているが、ひび割れ図をみると下部に発生したせん断ひび割れが穴を縫うように上方に連なっている。しかしながら、終局時のひび割れは他の試験体と同じように上部から中央にかかる非常に角度の急なひび割れとなっている。

### 3.2 せん断ひび割れ荷重および終局耐力

せん断ひび割れ荷重および終局耐力を各試験体で比較したものを図7に示す。この縦軸は、コンクリートの圧縮強度の影響を補正するため、せん断荷重を  $bd\sqrt{f_c}$  で除した値で比較している。この図より、引張軸力を受ける試験体がせん断ひび割れ発生荷重、終局耐力とも小さくなること、圧縮軸力 ( $N_y = -4V$ ) を受ける試験体はせん断ひび割れ発生荷重、終局耐力とも増加するが、更に圧縮軸力が大きくなると ( $N_y = -8V$ ) 耐力は減少することがわかる。せん断ひび割れ発生後、終局に至るまでの荷重の伸びは、引張軸力を受ける試験体のほうが圧縮軸力を受ける

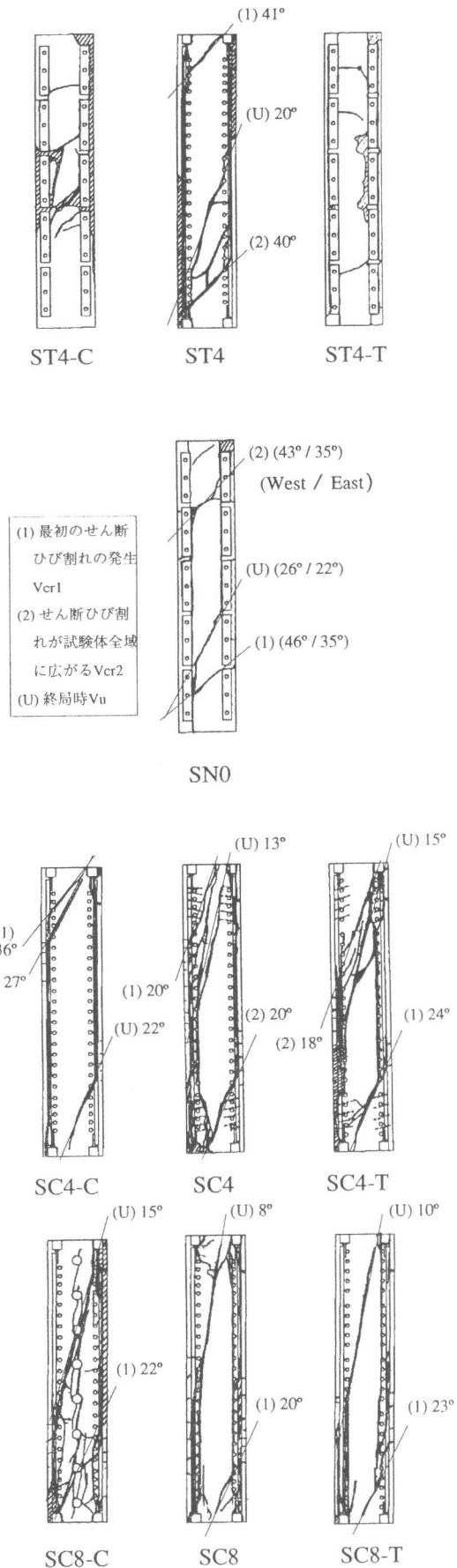


図6 終局時ひび割れ図

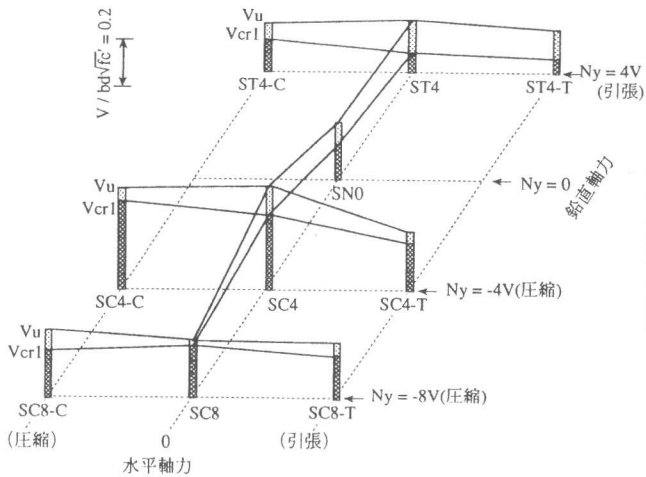


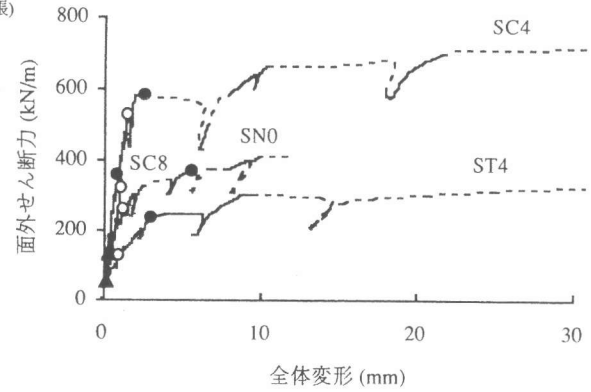
図7 せん断ひび割れ荷重、終局耐力の比較

試験体よりも大きくなっている。水平軸力の影響を見ると、水平圧縮を受ける場合、耐力が若干増加し、水平引張を受ける場合に耐力が減少するのが分かる。

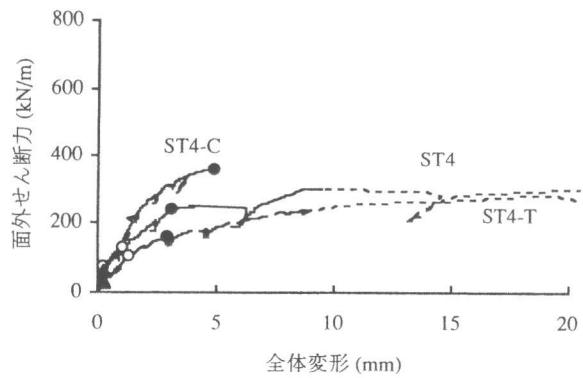
表2の最右欄に、修正荒川 Mean 式を用いて計算した終局耐力で実験値を除いた値を示した。修正荒川式は鉛直軸力の影響を考慮しているが、圧縮軸力が非常に大きい場合 ( $N_y = -8V$ ) には、軸力の影響を大きく見すぎていることがわかる。また、実験値には水平軸力の影響がかなり大きいことがわかる。

### 3.3 荷重変形曲線

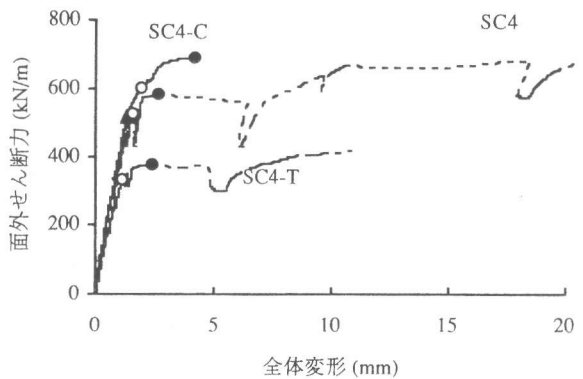
図8 (a) は、面外せん断力-全体変形関係を水平軸力を受けない試験体同士で重ね書いたものである。図中の▲は曲げひび割れの発生を、○は最初のせん断ひび割れ発生を、●はせん断ひび割れが試験体全域に広がった時点を示している。なお、点線で示されている部分は、試験体の主筋位置でひび割れが発生した後の部分を示している。面外変形量は試験体表面の測定データより算出しているので、この部分の変形量は実際の変形よりも大きく評価している可能性がある。この図8 (a) より、試験体に曲げひび割れが発生すると剛性が低下すること、せん断ひび割れの発生進展に伴い剛性が低下していくことがわかる。したがって、ひび割れ発生荷重の低い引張軸力を受ける試験体ほど剛性の低下が早く、圧縮軸力を受ける試験体はかなりの荷重まで初期剛性を保つ。



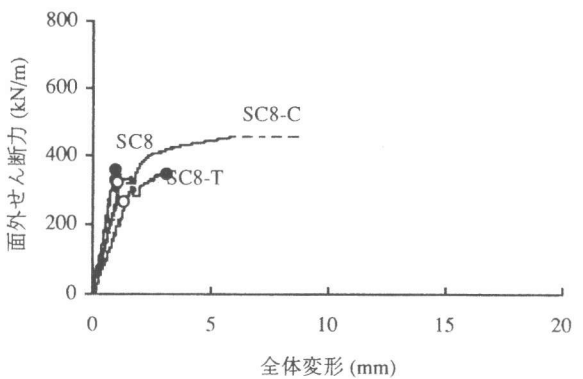
(a) 水平軸力無し ( $N_x = 0$ )



(b) 鉛直引張軸力 ( $N_y = 4V$ )



(c) 鉛直圧縮軸力 ( $N_y = -4V$ )



(d) 鉛直圧縮軸力 ( $N_y = -8V$ )

図8 荷重変形曲線

図8 (b)、(c)、(d) はそれぞれ、引張軸力を受ける試験体 (ST4-C、ST4、ST4-T)、4 倍の圧縮軸力を受ける試験体 (SC4-C、SC4、SC4-T)、8 倍の圧縮軸力を受ける試験体 (ST4-C、ST4、ST4-T) を重ね書いたものである。水平引張を受ける試験体はひび割れの発生荷重が小さく剛性の低下が早く起こるのに対し、水平圧縮を受ける試験体ではその逆の傾向があることがわかる。

### 3.3 $\tau$ - $\gamma$ 曲線

図9 (a) ~ (d) は、2.2節で示した方法で求めた $\tau$ - $\gamma$ 曲線を図8と同じ組合せで、それぞれ重ね書いたものである。引張軸力を受ける試験体ではせん断ひび割れがせん断ひずみ400 $\mu$ 前後で発生し、1500~2500 $\mu$ で試験体全域に広がっている。4 倍の圧縮軸力を受ける試験体では300 $\mu$ 前後で発生し、500~1500 $\mu$ で全域に広がる。8 倍の圧縮軸力を受ける試験体では500 $\mu$ 前後ではば全域にひび割れが発生し終局に至っている。

### 4. まとめ

面外せん断力を受けるRC耐震壁について、面内応力の影響を実験的に調べた。面内応力としては、面外せん断力によるモーメント勾配のある方向の「軸力」(鉛直軸力)と、それに直交する「直交軸力」(水平軸力)を考慮した。その結果、軸力の影響により、せん断ひび割れの角度は変化するが、直交軸力のひび割れ角度に対する影響は小さい。せん断ひび割れ発生荷重および終局面外せん断耐力は、引張軸力を受ける試験体で小さくなり、4 倍の圧縮軸力を受けると大きくなるが、8 倍の圧縮軸力では逆に小さくなる。直交軸力に対してもひび割れ荷重は影響され、直交圧縮で増大、直交引張で減少することが明らかとなった。また、これらのひび割れ発生荷重の増減は、荷重変形曲線、 $\tau$ - $\gamma$ 曲線上での剛性の変化として表れることが明らかとなった。

なお、本実験を実施するにあたり、トロント大学のコリンズ教授には貴重なご助言を頂いた。ここに厚く感謝の意を表します。

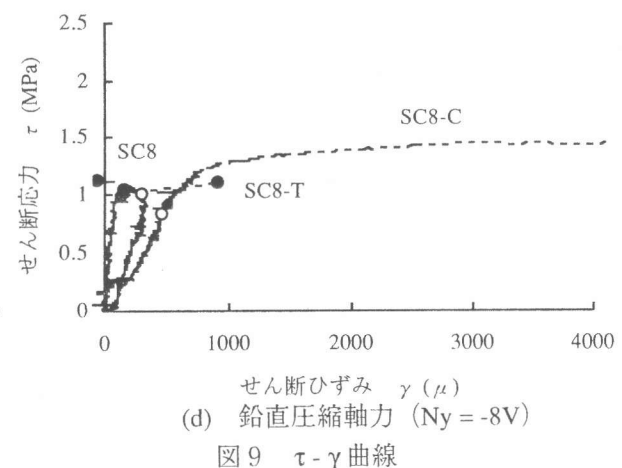
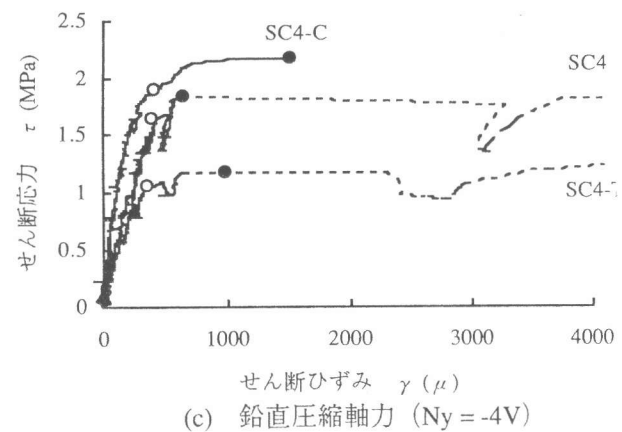
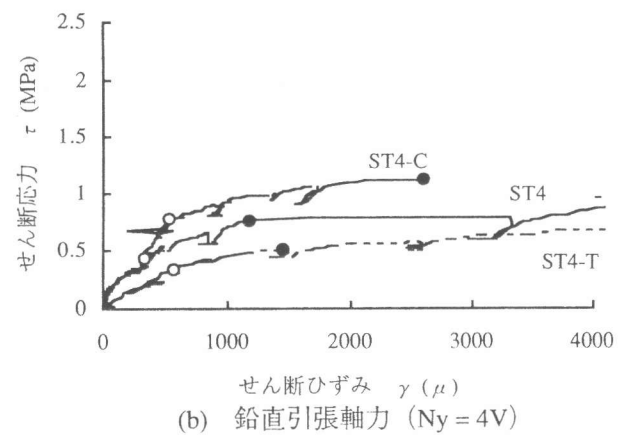
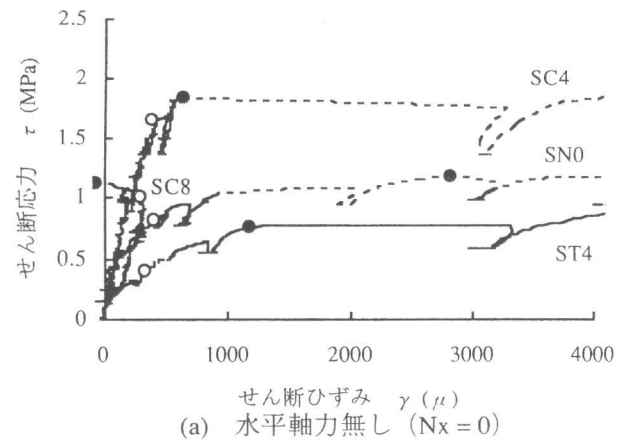


図9  $\tau$ - $\gamma$  曲線