

# 論文 鋼管または鋼板で耐震補強した RC 柱の弾塑性挙動に関する 実験的研究

仲 鵬\*1・山川哲雄\*2

要旨：鋼管で横補強した主筋比0.91%，帯筋比0.51%，せん断スパン比1.5の柱を4体と，鋼板で横補強し，閉鎖形に溶接した上で柱表面と鋼板の隙間（約6mm）に膨張剤を含有させたセメントペーストでグラウトした主筋比2.44%，帯筋比0.17%，せん断スパン比2.0の柱を4体の合計8体のRC柱を用いて一定軸圧縮応力（ $0.35f_c'$ ）下の正負繰り返し水平加力実験を行った。曲げせん断破壊系のRC柱である前者は局部横補強することによって耐震性能を飛躍的に増大させることができたが，せん断破壊系のRC柱である後者は耐震性能を確保するためには，鋼板による全面横補強が必要であることがほぼ明らかになった。

キーワード：局部補強，鋼板，せん断破壊，曲げ破壊，じん性，脆性，耐震補強

## 1. 序

建築物に関しては耐震性と耐久性を兼ね備えた，すなわち地震に強く長持ちする建物を建設する必要があることは論をまたない。沖縄県では設計用地震荷重が1981年以前は本土の50%であり，新耐震設計法が1981年6月1日施行された後も，設計用地震荷重を求めるための地域係数が東京都や大阪府に比較して沖縄県は30%も小さい。また，この値は全国で最低の値であり，しかも広大な沖縄県全域に一樣に適用された値である[1, 2]。そのなかでも沖縄に比較的多く見られるピロティ形式，すなわち地震に弱いソフトストーリータイプのRC造建物の耐震補強が沖縄県にお

表-1 試験体一覧

Specimen	CR95L-S0	CR95L-S1	CR95L-S2	CR95L-DS	CR96L-S0	CR96L-S2	CR96L-S3	CR96L-DS
Elevation								
Section								
$f_c'$ (MPa)	30.1	29.4	31.7	32.4	25.8	26.9	26.5	26.2
Total length of tube or plate	0	125x2	250x2	750	0	250x2	375x2	1000
Thickness of tube or plate	0	3.2 ( $f_y=290.5\text{MPa}$ )			0	3.2 ( $f_y=287.9\text{MPa}$ )		
Common characteristics	Longitudinal bars = 8-D10 ( $f_y=389\text{MPa}$ ), ratio of total longitudinal bars = 0.91%, lateral steel = D6-@50 ( $f_y=388.2\text{MPa}$ ), shear reinforcement ratio $P_w = 0.51\%$ (volumetric ratio of hoops $\rho_s = 1.20\%$ )				Longitudinal bars = 12-D13 ( $f_y=360.6\text{MPa}$ ), ratio of total longitudinal bars = 2.44%, lateral steel = D6-@150 ( $f_y=388.2\text{MPa}$ ), shear reinforcement ratio $P_w = 0.17\%$ (volumetric ratio of hoops $\rho_s = 0.33\%$ )			

\*1 琉球大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

\*2 琉球大学 教授 工学部環境建設工学科，工博（正会員）

る緊急な社会的課題であり、亜熱帯の腐食しやすい地域環境にある沖縄県では、RC造建築物の耐震性と耐久性に特に一段と配慮をする必要がある。このことをふまえ、本研究の目的は特にピロティ形式の建物の耐震補強を目標に、沖縄県の腐食しやすい亜熱帯地域環境に適合した耐震補強法を近い将来具体的に提案することにある。

## 2. 実験計画

本研究では補強長さの異なる鋼管また鋼板で横補強したRC柱試験体を8体用いて実験を行った。試験体の詳細と材料の主な力学特性は表-1に示す。鋼管または鋼板には軸圧縮力が直接伝達しないように、柱頭、柱脚部に約5~10mm程度のクリアランスを設ける。

せん断スパン比1.5のCR95Lシリーズ試験体では、コンクリート打設前に製作の便宜上鋼管を配置したことから、既存の建物を前提にした耐震補強法とは異なる。しかし、この便宜的方法是鋼板で閉鎖形に囲い、その隙間を無収縮材でグラウト（充填）する現実の耐震補強法と実験上ほぼ類似していると著者らは考えている[3]。曲げ破壊にともなうせん断強度（以後、曲げ強度と呼称する）を計算するために、帯筋や鋼管または鋼板による横拘束効果を考慮したコンファインドコンクリートの構成則をそれぞれのシリーズに関して求めた[4, 5]。図-1に示すように、CR95LシリーズがCR96Lシリーズより帯筋量が多いので横拘束効果が大きく、コンファインドコンクリートの強度上昇が大きい。なお、図-1では参考までに基準RC柱試験体のシリンドラ強度をそれぞれ採用した。これに基づいて計算した曲げ強度と、他方横拘束効果を考慮せず、コンクリートのシリンドラ強度をそのまま用いて計算したせん断破壊にともなうせん断強度（以後、せん断強度と呼称する）を図-2に示す。曲げ強度に基づくV-R曲線は図-1に示した帯筋による横拘束効果を考慮した上で、平面保持を仮定したファイバーモデルを用い、かつ材軸方向に曲率分布を仮定して求めた。一方、せん断強度は日本建築学会式[6]及び修正荒川式[7, 8]による計算結果である。基準試験体CR95L-S0の計算結果は図-2に示すように曲げ強度と、修正荒川式によるせん断強度がほぼ同程度の試験体である。

せん断スパン比2.0のCR96Lシリーズ試験体は、新耐震設計法が1981年施行される以前に建設された沖縄の某RC造事務所ビルにおける一階柱をモデルに、コ

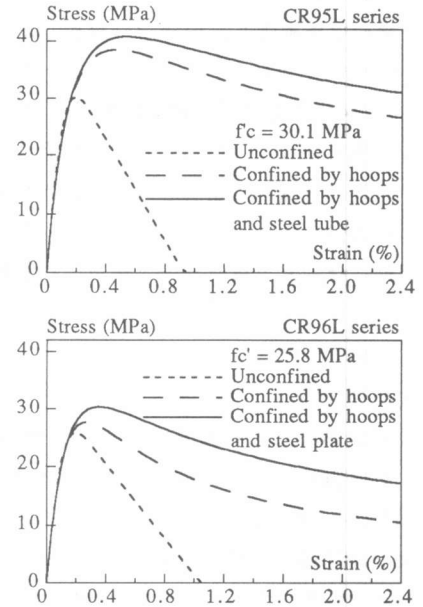


図-1 コンクリートの $\sigma$ - $\epsilon$ 関係

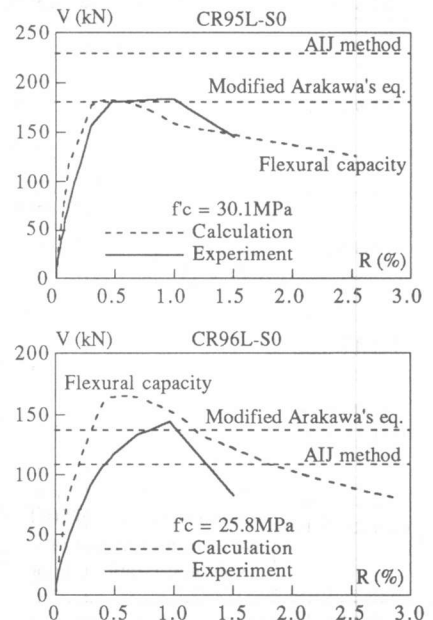


図-2 基準RC柱試験体のせん断耐力

ンクリート打設後4週間を経て、その試験体を局部的または全面的に鋼板（ $t=3.2\text{mm}$ の鋼板を工場です前にL型に加工）で、閉鎖形に囲い、その後コーナー部を現場溶接し、RC柱表面と鋼板の約6mmの隙間に、膨脹材を添加したセメントペーストでグラウトする実際的な方法を採用した。この柱の帯筋比0.17%は日本建築学会の最低せん断補強筋比である0.2%を満足していないので、横拘束効果あまり期待できないどころかせん断破壊の恐れがある。基準試験体CR96L-S0は図-2に示すように、計算上は曲げ強度がいずれのせん断強度式より求めた値より大きいので、曲げ破壊よりせん断破壊が先行し、きわめて耐震性能が低い柱と言わざるをえない。なお、試験体CR95L-DSとCR96L-DSは帯筋と正方形鋼管による二重に横補強したRC柱と見なすこともできる[9]。

### 3. 載荷方法

加力実験では一定軸力比( $N/(bdf_c')$ )0.35を適用し、水平加力装置に建研式加力装置を用いた。水平加力はまず初期剛性を得るために、初期ひび割れが発生するまで荷重制御によって行い、続いて部材角 $R$ を0.5%ずつ同一振幅で3サイクルずつ正負繰り返しの変形制御で3%まで行った。

### 4. 実験結果と考察

実験から得られたV-R曲線を図-3に示す。基準試験体CR95L-S0は曲げせん断破壊したが、もう一方の基準試験体CR96L-S0は柱中央部の帯筋の破断による主筋の座屈と共にせん断破壊した。CR95Lシリーズで試験体CR95L-S2は柱頭、柱脚部を柱せいと同じ長さの鋼管で局部横補強すると、鋼管で全面横補強した試験体CR95L-DSと同じように耐震性能が大幅に改善され、主筋もその持てる能力を完全に発揮し、ねばりに富んだ曲げ破壊に破壊形式の変化が生じた。しかし、CR96Lシリーズでは鋼板で柱せいの1.5倍も局部横補強した試験体CR96L-S3でもせん断破壊を防ぐことができず、全面横補強した試験体CR96L-DSでない限り耐震性能の飛躍的な向上は見られなかった。これは基準RC柱試験体CR95L-S0が曲げせん断破壊タイプに対して、基準RC試験体CR96L-S0が完全なせん断破壊先行タイプであることに起因するものと思われる。

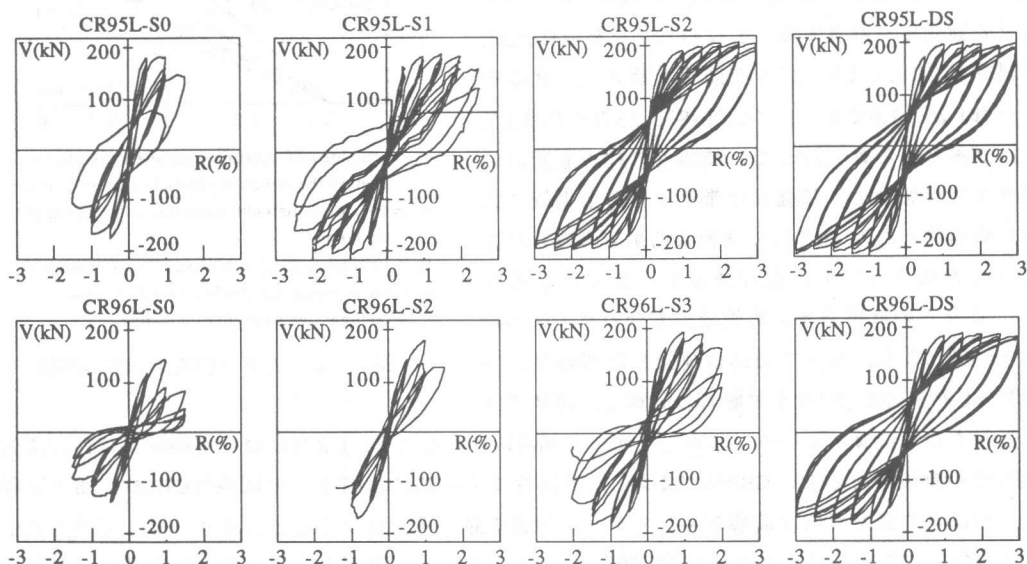


図-3 各試験体のせん断力-部材角履歴曲線

次に、図-1に示したコンクリートの構成則を用いてRC柱試験体のN-M相関曲線を描き、その上に実験結果をプロットする。図-4から基準RC柱試験体CR95L-S0は曲げせん断破壊をし、CR96L-S0はせん断破壊している傾向が十分読みとれる。それは、これらの基準RC柱試験体の実験値が計算で求めた曲げ強度レベルに前者はほぼ到達しているが、後者は全く到達していないからである。また、それはPaulayらが示したじん性指標の図-5を見ても明らかである[10]。CR96LシリーズのRC柱基準試験体CR96L-S0のじん性率 $\mu_\phi$ が1以下であるから、せん断補強材、すなわち横補強材をさらに配筋することが必要である。このことが、せん断強度を増大させ、結果的にじん性を増大させることになるからである。そのためには局部補強では間に合わず、鋼板による全面補強を必要としたと思われる。

鋼管または鋼板でRC柱の柱頭、柱脚を局部横補強した場合は、せん断スパン比の減少によりアーチ効果によるせん断強度の増大が期待される。しかし、実際には局部補強の板厚、長さ、グラウトによる断面の増大面積などが関与し、有効せん断スパン比などの概念を必要とするものと思われる。本論ではとりあえず上下端部の局部補強長さの半分を付加した純RC柱部分にその有効せん断スパン比を適用して、既存の日本建築学会式[6]と修正荒川式[7, 8]に基づくせん断強度を計算する。すなわち、局部横補強RC柱試験体CR95L-S1, S2の有効せん断スパン比はそれぞれ1.25, 1.0であり、CR96L-S2, S3のそれは1.5, 1.25である。これに対して、補強前の柱の原断面に関する曲げ強度と、補強後は帯筋と正方形鋼管で二重に横補強したRC柱として横拘束効果も考慮した著者らの方法を用いて、曲げ強度をそれぞれ求める[4]。これらの計算結果に実験結果も合わせて図-6に示す。図-6より、鋼管で局部横補強した1995年度の試験体CR95L-S1, S2は水平耐力の計算上、曲げ破壊が先行する形になっている。しかしながら、図-3に示したようにCR95L-S1の実験結果は曲げ降伏後のせん断破壊を示し、CR95L-S2は正方形鋼管で全面的に横補強した試験体CR95L-DSと同様に、ねばりに富んだ曲げ破壊を示している。鋼管で局部横補強することにより、せん断強度の上昇と塑性ヒンジ部の回転能力の増大が期待できる。しかし、重要なことは曲げ破壊時のせん断力に耐えられるせん断強度が保証されることが先決であり、その上で塑性ヒンジ部の十分な回転能

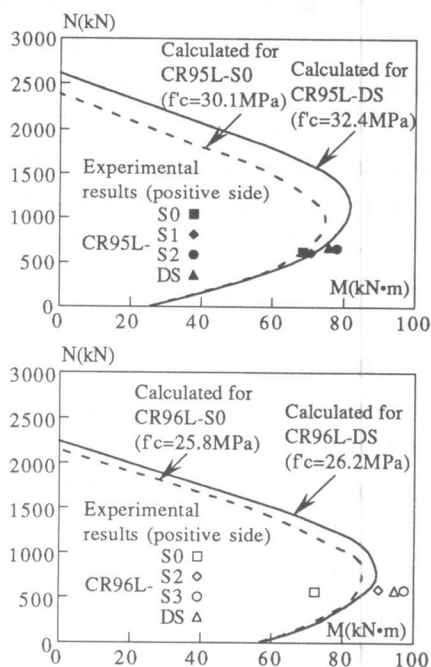
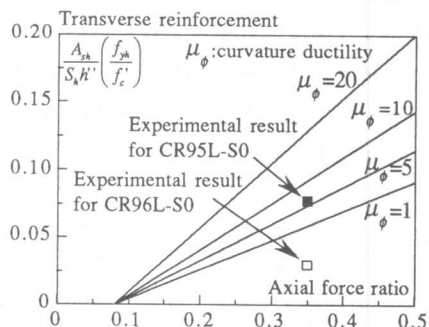


図-4 計算で求めたN-M相関曲線と実験結果の比較



$A_{sh}$  = total area of confining transverse reinforcement in the direction parallel to lateral force  
 $h''$  = concrete core width measured to the center of the hoops  
 $S_n$  = vertical spacing of transverse reinforcement  
 $f_{yh}$  = yield strength of the hoop reinforcement  
 $f'_c$  = compressive strength of concrete

図-5 じん性率と横拘束効果の関係

力を必要とする。その意味では図-8に示すように、CR95L-S1はせん断余裕度が十分確保されていない。

一方、鋼板で局部横補強した1996年度の試験体CR96L-S2, S3は曲げ強度とせん断強度がほぼ同じレベルか、曲げ強度が計算上はやや高い(図-6参照)。実験結果は図-3に示すように、いずれの試験体も曲げ降伏後のせん断破壊である。しかし、鋼板で全面横補強した試験体CR96L-DSはじん性に富んだ曲げ破壊をしている(図-3参照)。

このことを検証するために、全面横補強した鋼管または鋼板がせん断強度に寄与する分をトラス効果に相当する分として、せん断補強筋比に付加する。これは横補強する鋼管または鋼板の板厚を直径及び帯筋間隔と見なし、 $p_w f_y$ を計算する益尾の方法に従う[11]。さらにアーチ機構に二重横拘束効果を考慮したコンファインドコンクリートの圧縮強度を用いる。図-7に示すように、鋼管または鋼板で全面横補強するとせん断強度がトラス効果などにより著しく上昇するが、曲げ強度はあまり上昇せず、じん性がやや改善されていることがわかる。さらに、図-6, 7で検討したことをふまえ、せん断余裕度 $V_s/V_f$ という概念[11]を用いて実験値と計算結果の比較を図-8にまとめて示す。ここに、 $V_{exp}$ :最大水平耐力実験値、 $V_f$ :曲げ強度計算値(局部または全面横補強した試験体に対して二重横拘束効果を考慮したコンファインドコンクリートの強度を用いる)、 $V_s$ :せん断強度計算値(局部横補強した試験体には有効せん断スパン比を、全面横補強した試験体にはコンファインドコンクリートの強度と横補強材によるトラス効果を、日本建築学会式と修正荒川式にそれぞれ適用して計算した値の最小値を採用する)である。補強効果を見るため、同一シリーズにおける試験体の間を直線で結んで図-8に示している。これらによると、CR95Lシリーズの試験体CR95L-S0とCR95L-S1のせん断余裕度 $V_s/V_f$ が0.99と1.05であってかなり厳しい状況であり、CR96Lシリーズの試験体CR96L-S0, CR96L-S2, CR96L-S3が0.66~0.79の余裕度を示し、せん断破壊または曲げせん

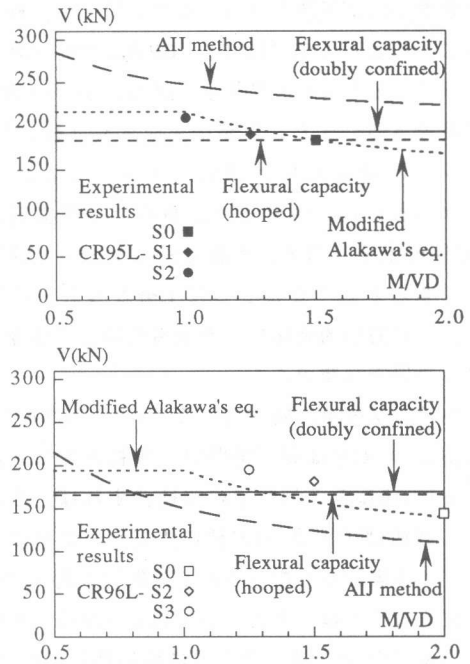


図-6 せん断強度とせん断スパン比の関係 (基準RC柱と局部横補強RC柱試験体)

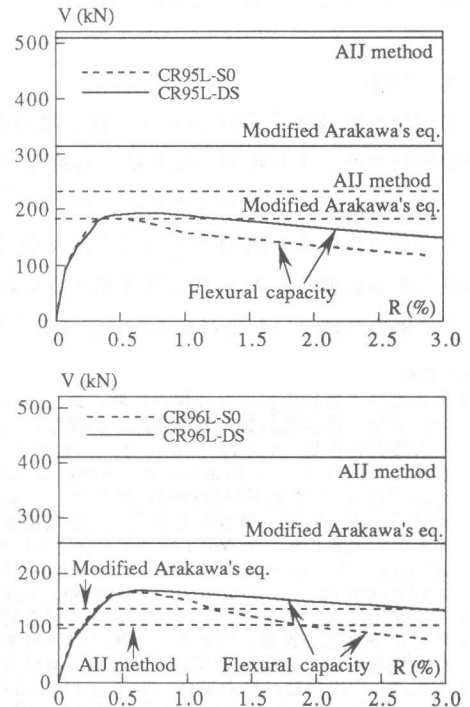


図-7 鋼管または鋼板によるトラス効果を考慮したせん断強度の計算結果 (基準RC柱と全面横補強RC柱試験体)

断破壊先行が予想される。これに対して、横補強することによってCR95L-DS, CR96L-DS, CR95L-S2の順に十分なせん断余裕度を持ち、曲げ破壊先行が期待できる。また、実験結果からもこれらの3体がじん性に富んだ曲げ降伏していることが分かる(図-3参照)。鋼管または鋼板で局部横補強したRC柱の水平耐力を、本論で示した方法で適切に評価できるかどうかはさらに十分な検証が必要であり、その力学的意味付けや改良に関しては今後の継続した研究課題である。

曲げ降伏後せん断破壊する、いわゆる曲げせん断破壊系のRC柱は局部補強で、最初からせん断破壊するRC柱は全面補強で耐震補強すれば、じん性に富んだ曲げ破壊系のRC柱に体質改善が可能であることが本実験から推定される。鋼管や鋼板で全面横補強することは、著者らが現在実験的研究を推進し

ている「鋼管と帯筋で二重に横補強したRC柱」に相当するものであり、そこでは主筋量、主筋径、コンクリート強度、帯筋量、せん断スパン比、軸力比などが関係し、付着すべりの問題も存在する[9]。したがって、鋼管や鋼板で全面横補強することが、即じん性に富んだ曲げ破壊をすべてのRC柱に対して保証するものではない。

### 5. 結論

曲げせん断破壊系のRC柱とせん断破壊系のRC柱の耐震補強に関して、実験と計算の両面から検討を行った。その結果、前者は局部補強でも可能であると思われるが、後者は全面補強でないとは不可能である程度明らかになった。しかしながら、これらの脆性的な曲げせん断破壊とせん断破壊系のRC柱をじん性に富んだ曲げ破壊系(主筋がその持てる能力を変形が進んでも維持できる状態)のRC柱に体質改善するために、局部補強と全面補強に関する耐震補強の目安をどこに求めればよいかなどをさらに定量的に究明することは、今後の継続した研究課題である。

#### 参考文献:

- [1] 山川哲雄: 阪神大震災と沖縄の建物, 琉球大学工学部紀要 第50号, pp. 71-88, 1995年9月
- [2] 山川哲雄, 伊良波繁雄, 知念秀起: 沖縄県の公営集合住宅の塩害による建物損傷調査, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17 No.1, pp. 895-900, 1995年6月
- [3] 仲鵬, 山川哲雄: An Experimental Study on Elastoplastic Behavior of R/C Columns Reinforced Partially in Steel Tubes, 日本建築学会1996年度大会(近畿) 学術講演梗概集, pp. 71-72, 1996年9月
- [4] 郝洪涛, 山川哲雄: 鋼管と帯筋で二重に横補強したRC柱の弾塑性性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17 No.2, pp. 387-392, 1995年
- [5] Mander, J. B. and Priestley, M. J. N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.144, No.8, pp.1804-1826, Aug. 1988
- [6] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, pp.104-121, 1990年11月
- [7] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp. 167-192, 1991年4月
- [8] 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, pp. 157-165, 1981年6月
- [9] 郝洪涛, 山川哲雄, 村中圭介: An Experimental Study on Seismic Behavior of RC Columns Doubly Confined by Steel Tube and Hoops, 日本建築学会1996年度大会(近畿) 学術講演梗概集, pp. 67-70, 1996年9月
- [10] Paulay, T. and Priestley, M. J. N.: Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, pp. 122-148, 1992
- [11] 益尾清: RC及びSRC柱の耐震補強実験と設計式の検証, コンクリート工学 Vol. 34, No. 10, pp. 21-30, 1996年10月

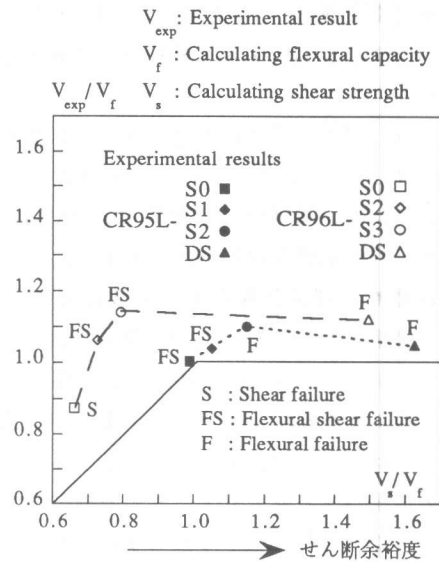


図-8 せん断余裕度と破壊形式