

論文

[2091] 鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断強度に及ぼす壁筋と軸力の影響について

正会員○牧田敏郎（間組技術研究所）

正会員 芳村 学（東京都立大学建築学科）

1. はじめに

耐震壁のせん断強度の推定式は一般に、コンクリートの負担分、壁筋の負担分、軸応力による強度上昇分の累加の形式になっており、壁筋の効果と軸応力による効果はそれぞれの増分と線形関係としているものが多い。しかし、広沢式で表わされているように、壁筋比が大きくなると壁筋比の増大に対してせん断強度の上昇の割合は小さくなる[1]。また、最近行われた黒正らによる、柱のせん断実験の結果では、帯筋量が増えると軸応力がせん断強度に寄与する割合が減少する傾向が示されている[2]。

本研究では、実験結果およびマクロモデルによる解析結果から壁筋比および軸応力とせん断強度の関係について検討し、さらに、せん断力の耐荷機構からも検討を行い、壁筋比および軸応力が大きくなるとせん断強度の上昇の割合が小さくなる現象について考察した。なお、対象とした耐震壁は、通常の側柱付き耐震壁ではなく、ウェブ壁とフランジ壁で構成される直交壁付き耐震壁（以降I型耐震壁と呼ぶ）とした。これは、せん断強度に影響を与える因子をできるだけ壁筋比と軸応力に絞るため、側柱が負担するせん断力や側柱が壁板を拘束することによる壁板の強度上昇を無視できるような形状の耐震壁とするためである。

2. 実験結果の検討

既往のI型耐震壁の実験結果から、せん断強度と補強量  $P_s \cdot s \cdot \sigma_y$ （壁筋比×壁筋降伏強度）の関係を図-1に示す[3]～[8]。縦軸は広沢式の第1項をコンクリートによる負担分  $\tau_c$  と考え、実験で得られたせん断強度  $\tau_u$  から差し引いた値とした。I型耐震壁の実験データが少ないこともあり、この図からは、補強量とせん断強度の関係についての傾向を見出すのは難しい。

そこで図-2,3には、通常の耐震壁で、壁筋比・軸応力等をパラメータとして行われた一連の実験シリーズの結果を示した[9]。両図とも縦軸は図-1の場合と同様に実験で得られたせん断強度から広沢式第1項を引いた値とした。図-2では補強量の増加に伴いせん断強度がほぼ直線的に増大する結果が得られている。ただし、補強量が多くなると補強効果が頭打ちとなり、補強量が増

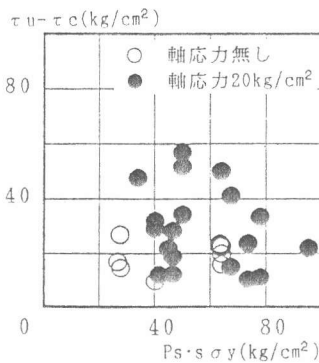


図-1 せん断強度と壁補強量

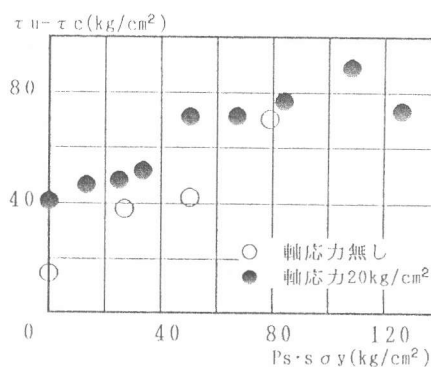


図-2 せん断強度と壁補強量

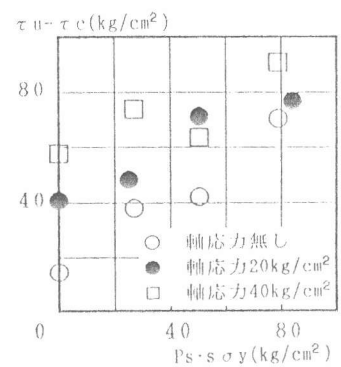


図-3 せん断強度と軸応力

してもせん断強度は増加しない。また、図-3から補強量が多くなると軸力増加分のせん断強度への寄与は小さくなっているとも考えられるが、データのばらつきが大きくこれだけのデータからは判断が難しい。

### 3. マクロモデルを用いた解析

上記のように耐震壁のせん断強度に対する各パラメータの影響を実験データのみから検討することは難しい。そこで、マクロモデルによる解析を行い、壁筋比と軸応力がせん断強度に与える影響について検討した。解析モデルはI型耐震壁で図-4に試験体の形状を示す。解析に用いたマクロモデルは、称原氏により提案されているものであり、解析プログラムは文献[10]に示されたものを用いた。パラメータの範囲は、シアスパン比が0.4~1.0、壁筋比が0~2%、軸応力が0~20kg/cm<sup>2</sup>である。この三つのパラメータに加えフランジ壁の縦筋比も0.4~2%の範囲で変化させて計算を行った。コンクリート強度および柱主筋、壁筋の降伏強度は一定とした(それぞれ240kg/cm<sup>2</sup>、4000kg/cm<sup>2</sup>)。解析結果の一部としてシアスパン比0.6の場合の結果を図-5、6に示す。図-5は壁筋比の増加とせん断強度の増分の関係を示したものである。壁筋比が大きくなると壁筋比の増分に対するせん断強度の上昇の割合は小さくなっている。図-6には軸応力の増分がせん断強度に寄与する割合を示した。壁筋比が大きくなると軸応力の増加がせん断強度の上昇に寄与する割合が小さくなっている。

以上のように、解析結果からは壁筋比が大きくなると補強量の増分、軸応力増分ともにせん断強度の上昇に寄与する割合は減少しているといえる。

## 4. 耐震壁のせん断耐荷機構

### 4.1 アーチ機構とトラス機構

一般にマクロモデルでは耐震壁のせん断力の耐荷機構を図-7に示すトラス機構とアーチ機構に分けて考えており、ふたつの機構の負担するせん断力の和が最大となる場合の組合せをもとめそのときのせん断力を耐震壁のせん断耐力としている。

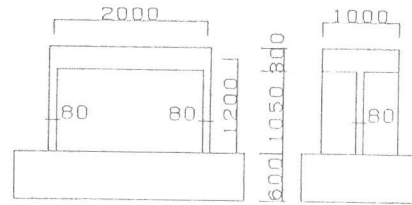


図-4 解析モデル

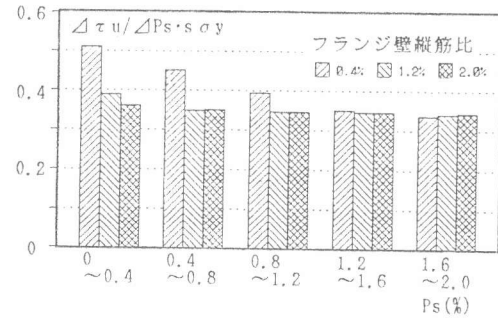


図-5 壁筋比Psの増加のせん断強度 $\tau u$ への寄与の割合

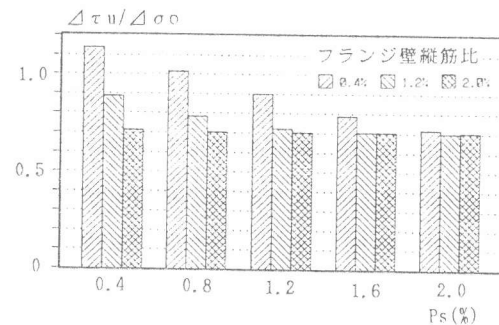
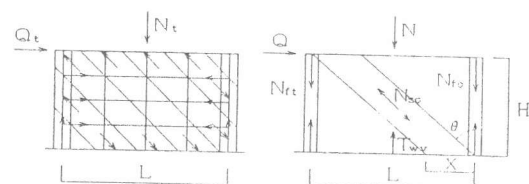


図-6 軸応力 $\sigma o$ のせん断強度 $\tau u$ への寄与の割合



(a)トラス機構 (b)アーチ機構

図-7 耐震壁の耐荷機構のモデル

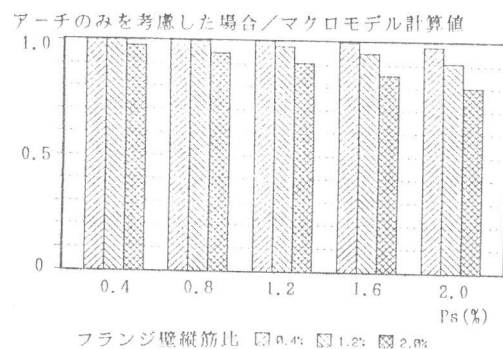


図-8 アーチ機構によるせん断力とマクロモデル計算値

マクロモデルによる解析結果では、壁筋比が大きくなるとトラス機構の負担割合が徐々に大きくなる傾向がみられるが、全般的にアーチ機構の負担割合が大きい。マクロモデルによるせん断強度とアーチ機構のみから求めたせん断強度とを比較したものを図-8に示した。アーチ機構のみでせん断強度を計算しても、トラス機構も考慮して計算したマクロモデルの場合とほとんど差がない。一般にマクロモデルではシアスパン比が小さくなるとトラス機構の負担せん断力の絶対値が小さくなる傾向があり今回の解析モデルのような比較的シアスパン比の小さい耐震壁のせん断強度はアーチ機構のみを考慮すれば十分評価可能と考えられる。

そこで、ここではアーチ機構における軸応力と壁筋のせん断強度への寄与について検討する。

#### 4.2 アーチ機構における壁筋、軸応力の効果

図-7(b) のようなアーチ機構のモデルを考えると、力の釣合からせん断強度は以下ようになる。既往の提案モデルではアーチの形成される位置などに若干の差があるがここでは、モデルの簡略化と主要なパラメータであるシアスパン比との関係を考えて、図に示すように柱心間と加力高さ位置で形成されると仮定した。なお、柱の負担するせん断力は考慮していない。

$$N + Nf_t + Nf_c + Twv = Nsc \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$Q = Nsc \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$= x \cdot t \cdot \sigma_c \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (3)$$

$$\tau_a = 1/2 \cdot \sigma_c \cdot (1 - \lambda \tan \theta) \sin 2\theta \quad (4)$$

$$\tau_a = Q / (L \cdot t) \quad \lambda = H/L \quad x = L - H \cdot \tan \theta$$

t: 壁厚       $\sigma_c$ : コンクリートストラットの応力

すなわち、せん断強度はアーチを形成するコンクリートストラットの圧縮強度がきまれば、アーチの角度とシアスパン比の関数となる。柱主筋と壁縦筋が降伏したと仮定し、鉛直方向の力の釣合、壁脚部のモーメントの釣合から以下の式が得られる。

$$\tan^2 \theta = (B \sigma_c - \sigma vt) / (B \sigma_c \lambda^2 + \sigma vt) \quad (5)$$

$$\sigma vt = (2Tcy + Tvy + N) / (L \cdot t) \quad B \sigma_c: \text{コンクリートの圧縮強度}$$

Tcy: 柱主筋がすべて降伏した場合の柱主筋による鉛直方向力

Tvy: 壁縦筋がすべて降伏した場合の壁縦筋による鉛直方向力

式(4)、式(5)から  $\tau_a$  と  $\sigma vt$  の関係を図にすると図-9のようになる。 $\sigma vt$  の変化に対してせん断強度  $\tau_a$  の変化は線形関係ではなく  $\sigma vt$  が大きくなるとせん断強度の増加の割合が小さくなっていることがわかる。つまり、アーチ機構における壁縦筋と軸応力の効果は同様な意味を持っており、その値が大きくなるとアーチの角度が小さくなりせん断強度が上昇する。ただし、縦筋による補強量、軸応力とせん断強度の関係は線形ではなく、せん断強度が大きくなるほど上昇する割合は小さくなっていく。また、柱主筋による鉛直方向力がせん断強度の上昇に寄与する割合は、壁筋、軸応力による寄与の2倍となる。

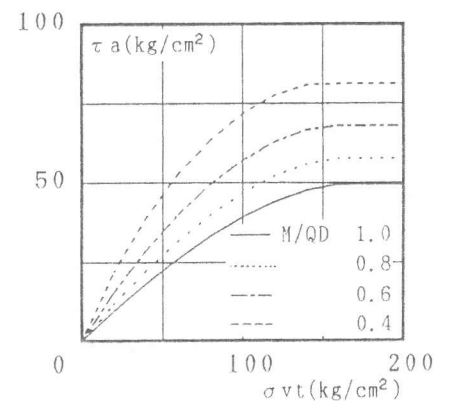


図-9 せん断強度  $\tau_a$  と  $\sigma vt$

## 5. 耐震壁の最大せん断強度

I型耐震壁のせん断強度について、式(4)による計算値と実験値との比較を図-10に示す。また、図-11,12にはマクロモデルによる解析結果、広沢式による計算値と実験値の比較も示した。三つの計算方法のなかではマクロモデルによる解析値が、実験値との適合性が最も良い。また、式(4)による計算値は全体的に実験値をやや下回る傾向はあるものの、ばらつきが小さく実験値と計算値は良く一致しているといえる。式(4)による計算値は、ほぼ同様の仮定に基づいているにもかかわらず、マクロモデルによる解析結果に対して約1割程度小さくなっている。これは、アーチ機構のモデルにおけるアーチの形成される位置の違いによると考えられる。図-9に示したようにアーチ機構ではシアスパン比つまりアーチが形成される部分のせいと高さによりせん断強度の最大値が決まるからである。

また、マクロモデルの解析値は、コンクリートの強度低減係数を考慮していないため、実験値を上回ると予想されたが解析値/実験値の平均は1.06となった。側柱の負担せん断力を無視している影響も若干あるが、解析モデルの形状では側柱の負担せん断力は非常に小さいと考えられる。今回の解析値に関して値が小さくなる要因としてはコンクリートの強度低減係数、壁縦筋がすべて降伏するという仮定、大きくなる要因としてアーチの位置、角度、横筋の影響、小さいが側柱のせん断力などがある。アーチ機構のモデルからより厳密にせん断強度を評価するためには、これらの要因についての検討が必要と考えられる。

## 6. まとめ

シアスパン比の小さいせん断破壊型の耐震壁では、壁筋比および軸応力の増加とせん断強度の増加が線形にならないことが耐荷機構から説明できること、また、せん断強度は耐荷機構としてアーチ機構のみを考えても十分推定可能であることを示した。

## 参考文献

- 1) 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、1990
- 2) 黒正清治・松崎育弘・林静雄・小林克己・俣川哲光・熊谷仁志・武居泰・夫拓量：高強度せん断補強筋を用いたRC柱に関する実験的研究 その1・2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.483-486、1987.10
- 3) 建屋の復元力特性に関する研究委員会：建屋の復元力特性に関する研究（その11）、建築研究振興協会、1986.6
- 4) 岡田恒男・秋野金次・吉崎征二・稲田泰夫・菅野俊介：原子炉建屋の復元力特性試験 その6、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1089-1090、1986.8
- 5) 岡田恒男・神田順・秋野金次・吉崎征二・谷口裕：開口を有する原子炉建屋耐震壁の水平加力実験 その1・2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1211-1214、1988.10
- 6) 田辺公・小田島政廣・入野一男・田村明義：超高強度材料を用いた原子炉建屋構造に関する研究 その1～6、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1463-1474、1990.10
- 7) 矢野明義・松井四郎・笹川和郎・岡本公夫・兼近稔：高強度コンクリートを用いた耐震壁の実験的研究 その1～4、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.295-300、1986.8
- 8) Barda, F., Hanson, J. M. and Corley, W. G.: Shear Strength of Low-Rise Walls with Boundary Elements, ACI SP-53 pp.149-202 1978
- 9) 建屋の復元力特性に関する研究委員会：建屋の復元力特性に関する研究（その12）、建築研究振興協会、1986.6
- 10) 日本コンクリート工学協会：RC耐震壁のマクロモデルとFEMミクロモデルに関するパネルディスカッション 1988.1

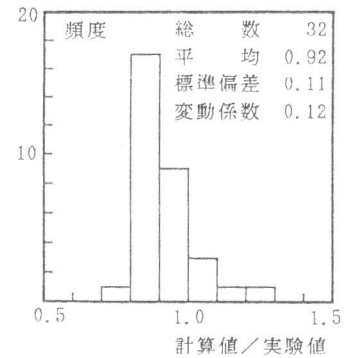


図-10 計算値と実験値の比較

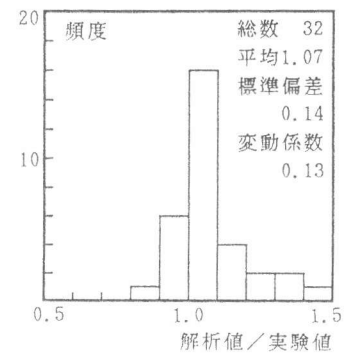


図-11 マクロモデルによる解析値と実験値の比較

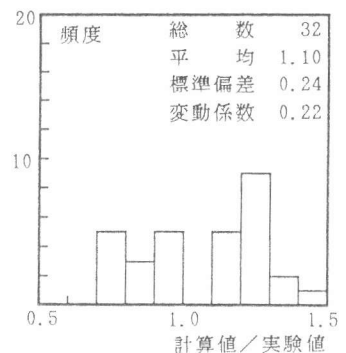


図-12 広沢式と実験値の比較