

[51] 多数の小開口を持つ耐震壁の強度

正会員 ○吉崎征二 (大成建設技術研究所)
 江崎哲朗 (大成建設技術研究所)
 正会員 是永健好 (大成建設技術研究所)
 外村憲太郎 (大成建設原子力部)

1. まえがき

原子炉建屋の耐震壁には機器配管のための小開口が多数あり、特に同一レベルに小開口が並ぶ場合も多い。このような多数の小開口を持つ耐震壁のせん断性状に関するデータは不足しており、合理的な設計手法も確立していない。そこで、多数の小開口のある耐震壁を対象に36体の試験体について水平加力実験を行ない、別報で報告した。本報ではその結果を用い多数の小開口を持つ耐震壁の終局せん断強度について検討した結果を報告する。

2. 原子炉建屋耐震壁の終局せん断強度

開口耐震壁の終局せん断強度を検討する前に、無開口壁の終局せん断強度算定法の妥当性を調べておく必要がある。原子炉建屋耐震壁は、壁筋比が多く、ボックス壁、円筒壁、複雑な形状をした壁体等の組合せからなり、壁厚が厚く付帯ラーメンを持たない壁が多い。また、プレストレスを導入した壁や、内圧を考慮しなければならないものもある。RC耐震壁の強度算定法は種々提案されているが、原子炉建屋関係では以下の諸式が多く用いられている。

$$\tau_u^{(6)} = \frac{0.0679 P_V^{0.28} (F_c + 180)}{\sqrt{M/QD + 0.115}} + 2.7 \sqrt{P_H \cdot \sigma_y + 0.1 \sigma_V} \quad \dots 1)$$

$$\tau_u^{(7)} = \frac{0.0679 P_V^{0.28} (F_c + 180)}{M/QD + 0.115} + \frac{P_H \cdot \sigma_y + 2.7 \sqrt{P_H \cdot \sigma_y}}{2} + 0.1 \sigma_V \quad \dots 2)$$

$$\tau_u = \frac{P_V + P_H}{2} \sigma_y + \frac{\sigma_V + \sigma_H}{2} \quad (\text{全補強式}) \quad \dots 3)$$

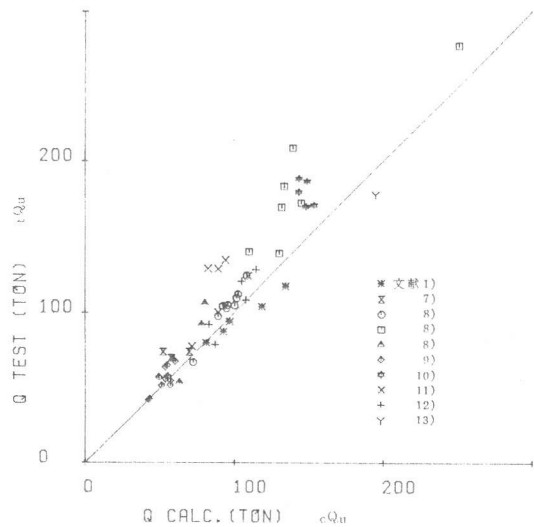


図-1 実験値と計算値の比較 (1式)

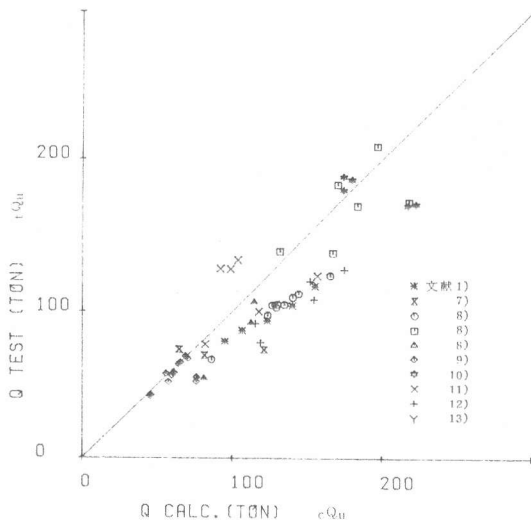


図-2 実験値と計算値の比較 (2式)

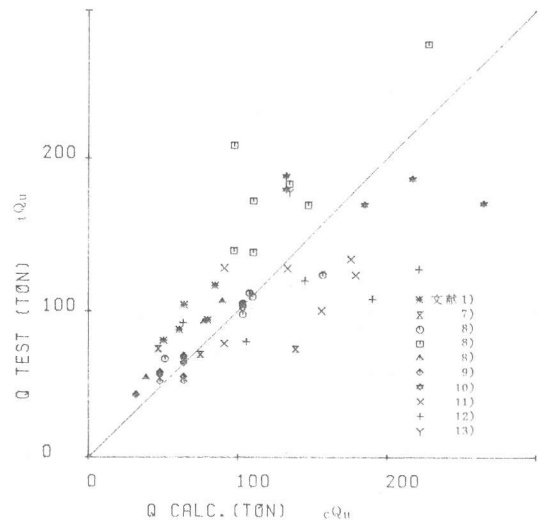


図-3 実験値と計算値の比較 (3式)

ここに、 τ_u ：終局せん断応力度、 P_V 、 P_H ：縦、横筋比、 σ_y ：鉄筋の降伏点、 F_c ：コンクリート圧縮強度、 M/QD ：シャースパン比、 σ_v 、 σ_H ：縦、横方向軸圧縮応力度

原子炉建屋耐震壁の既往の実験結果とこれ等の諸式による計算値の関係を図-1～3に示す。いずれも曲げせん断加力方式の試験体で、最終的にせん断破壊をしたものである。試験体の形状は正方形、円形、八角形の筒体と単独壁で、軸力、プレストレス力、内圧を加えたものもある。文献1)の試験体は曲げ補強筋のダボ効果が大きいと考えられたので、青山、細川と同じ方法²⁾によりダボ効果 Q_D を求め、計算値に加えた。

$$Q_D = 0.425 d \cdot a_s \cdot \sigma_y / \ell_0 \quad \dots\dots 4)$$

ここに、 d ：鉄筋径、 a_s ：鉄筋断面積、 ℓ_0 ：フープ間距離
なお、ウェブ面積は立体耐震壁では全断面積/2を用い、文献1)の単独壁では全断面積を用い、せん断力の算定を行なった。

1)式による計算値は全体として実験値よりも小さく、2)式による計算値は逆に実験値に比べて大きい。3)式による計算値は、コンクリート負担分、 M/QD の影響を考慮しておらず、大きくばらつく。

1)、2)式では、終局せん断強度をコンクリートの負担分と鉄筋負担分の累加で表わしており、いずれもコンクリートの負担分を一定としている。南が指摘しているように⁵⁾、鉄筋量の増加に伴ってコンクリート負担分が減少する方が、実際の現象に近いと思われるので、鉄筋負担分を全補強式で表わし、コンクリート負担分を図-4のように仮定し、以下の終局せん断強度式を提案する。

$$\tau_s < 4.5\sqrt{F_c}$$

$$\tau_u = (1 - \tau_s / 4.5\sqrt{F_c}) \tau_0 + \tau_s \quad \dots\dots 5)$$

$$\tau_0 = (3 - 1.8M/QD)\sqrt{F_c} \quad \dots\dots 6)$$

$$\tau_s = \frac{P_H + P_V}{2} \sigma_y + \frac{\sigma_H + \sigma_V}{2} \quad \dots\dots 7)$$

$$\tau_s > 4.5\sqrt{F_c}$$

$$\tau_u = 4.5\sqrt{F_c} \quad \dots\dots 8)$$

軸力、プレストレス力、内圧による影響は鉄筋と同様に扱い7)式で表わす。終局せん断応力度の上限は $4.5\sqrt{F_c}$ とする。この上限値は、コンクリートの圧縮負担力によって決まると考えるならば F_c の関数とすべきであり、Collins理論⁹⁾による解析では図-5に示すように約 $0.3F_c$ となるが、実験結果との適合性を考え、 $4.5\sqrt{F_c}$ とした。コンクリートの負担分には M/QD の影響を考慮した。これに関する資料は現状では不足しているため、 $M/QD=1$ の時の τ_0 を $1.2\sqrt{F_c}$ とし、 M/QD が減少した時の強度比にRawdon de Paiva等のディーブビームに関する実験式 $0.8(1-0.6X/D)$ (X :クリヤシャースパン、 D :梁せい)を利用して τ_0 の算定を行なった⁴⁾。なお、 $M/QD > 1$ の場合には $M/QD=1$ とする。耐震壁の周辺にラーメンがある場合には、その拘束効果が強度に影響を与える。提

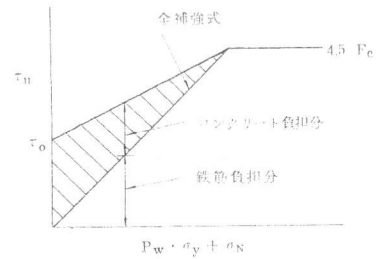


図-4 終局強度式の仮定

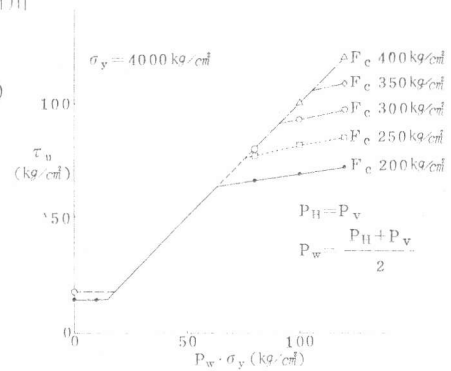


図-5 Collins理論による解析結果

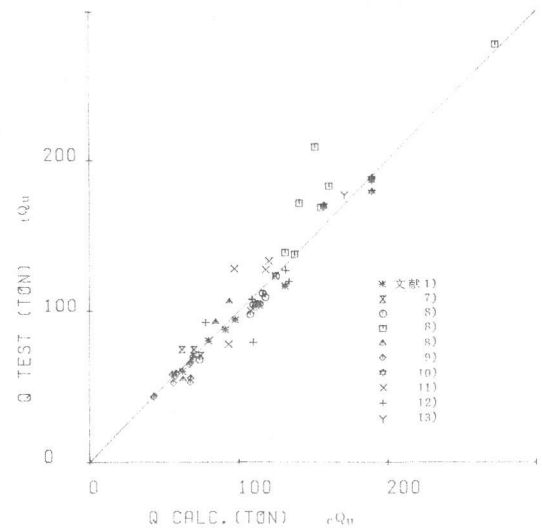


図-6 実験値と計算値の比較(提案式)

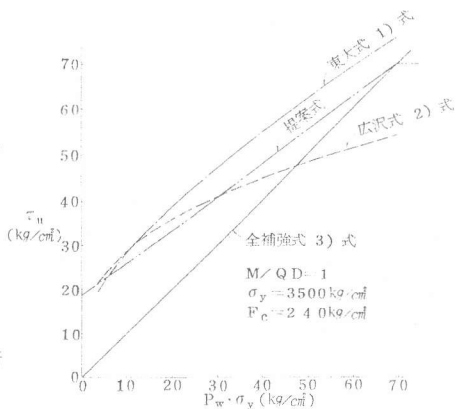


図-7 提案式と諸式の関係

案式はこれを考慮していないため、軽微なものを除いて付帯ラーメンのある耐震壁は適用外とする。提案式と他の諸式の関係を図-7に示す。

図-6に提案式による計算値と前に用いた実験値の関係を示す。表-1は各式について実験値/計算値の平均値とその標準偏差を示したものである。提案式の実験値/計算値の平均値は1.00と中央値を示し、その標準偏差は0.12と他式より小さい。提案式は、原子炉建屋の耐震壁の終局せん断強度を、その形状の差、軸力、プレストレス力、内圧の有無にかかわらず精度よく評価できるものと思われる。図-8、9、10は、式中に用いられたパラメーターの τ_s 、 M/QD 、 F_c の影響を調べたものであるが、これ等の評価にかたよりはみられない。

3. 多数の小開口を持つ耐震壁の終局せん断強度

多数の小開口を持つ耐震壁の終局せん断強度を推定する方法としてもっとも簡便な方法は、日本建築学会RC規準の開口低減率の利用であろう。

$$r_1 = 1 - l_0/l \quad \text{又は} \quad r_2 = 1 - \sqrt{h_0 \cdot l_0 / hl} \quad \dots 9)$$

別報「多数の小開口を持つ耐震壁の水平加力実験」で報告した36本の試験体のうち、無開口の試験体6体を除いた30体の実験結果を、提案式と開口低減率を利用した計算値 cQ_u と比較して図-12に示す。

$$cQ_u = cQ_w + Q_D + Q_X \quad \dots 10)$$

$$cQ_w = \tau_u \cdot r \cdot A \quad \dots 11)$$

$$Q_X = \sqrt{2} \cdot a_X \cdot \sigma_y \quad \dots 12)$$

ここに、 τ_u : 5)~8)式の結果、 r : 9)式のいずれか小さい方、 A : 全断面積、 Q_D : 4)式の結果、 Q_X : 開口間のX補強筋の負担せん断力。X補強筋の負担せん断力は、X補強筋が圧縮、引張共に有効なトラスを形成するとして求めた。

なお、X筋にPC鋼材を用いたR-7~9は、実験結果から終局時のひずみを 1800×10^{-6} として負担せん断力を算定した。計算値は全体として実験値を上廻っており、実験値/計算値の平均値は0.89、その標準偏差は0.09であった。

これ等の試験体は、最終的に開口と開口の間の部分でせん断破壊を生じている。そこで、水平断面に図-11に示すような破壊線を仮定して、各開口間部材と開口外部材の終局せん断強度を累加し、終局強度を求めてみた。開口間部材の形状は、円形の開口を円に外接する正方形に置換して定めた。開口外部材の終局強度は現状ではどのように評価すべきか不明であり、ここではひびわれがほぼ45度方向に発達することを考え、便宜的に $M/QD = 1$ とおき、壁筋比は他の部分と同一にした。

$$cQ_u = iQ_w + oQ_w + Q_D + Q_X \quad \dots 13)$$

$$iQ_w = \sum_i \tau_u \cdot iA \quad \dots 14)$$

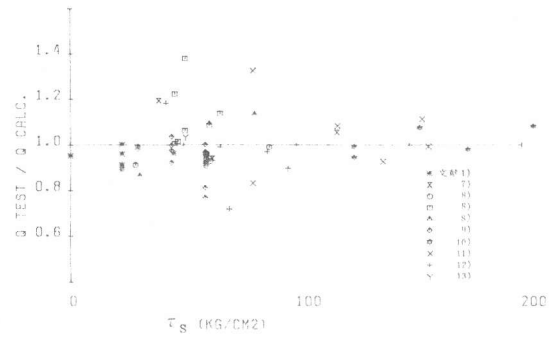


図-8 τ_s の影響

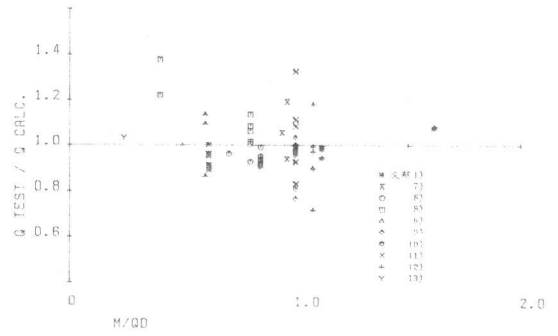


図-9 M/QD の影響

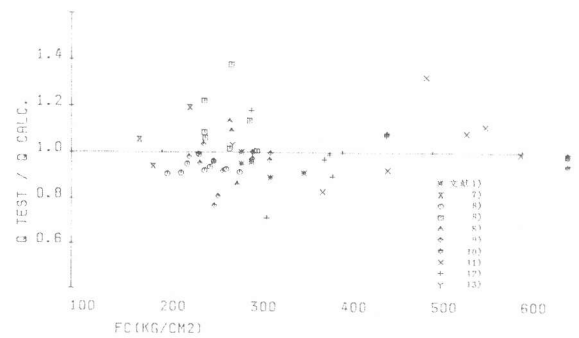


図-10 F_c の影響

表-1 実験値/計算値の平均値と標準偏差

	提案式	1)式	2)式	3)式
データ数	57	56	56	56
平均値	1.00	1.12	0.88	1.11
標準偏差	0.12	0.16	0.16	0.30

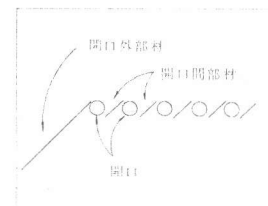
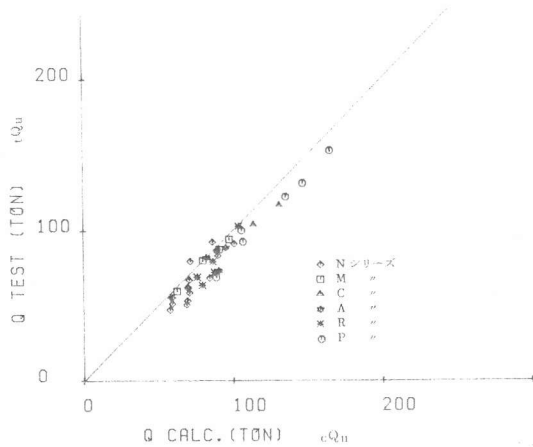
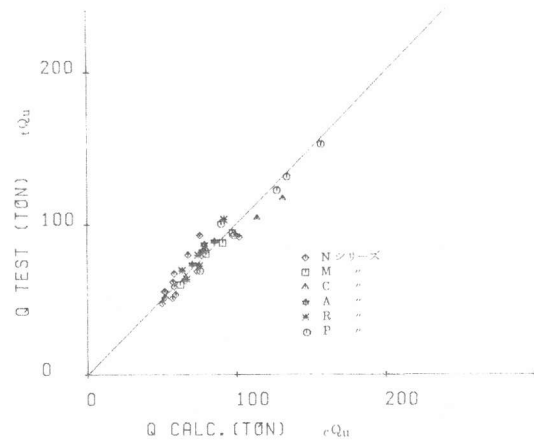


図-11 破壊線の仮定



図一 1 2 実験値と計算値の比較 (開口低減率)



図一 1 3 実験値と計算値の比較 (提案式)

表一 2 計算結果一覧

$$oQ_w = \sum o\tau_u \cdot oA \quad \dots\dots\dots 15)$$

ここに、 $i\tau_u, o\tau_u$: 5) ~ 8) 式による開口間および開口外部材の終局せん断応力度。 iA, oA : 開口間, 開口外部材の断面積

計算の結果を表一 2 に示す。計算値と実験値の比較を図一 1 3 に示す。計算にあたって、開口間部材では横筋がなく、縦筋はせん断補強筋よりもむしろこの部分での曲げ補強筋になっていると判断し、壁筋の負担分である $(P_H + P_V) \sigma_y / 2$ は 0 とした。計算の結果、実験値/計算値の平均値は 1.02、その標準偏差は 0.09 であり、この方法で多数の小開口を持つ耐震壁の終局せん断強度を精度よく推定できることが判った。

4. 結論

原子炉建屋を対象とした場合、無開口耐震壁の終局せん断強度は 5) ~ 8) 式で精度よく求めることができる。多数の小開口がある場合には、破壊線を仮定して、その間の個々の部材、X 補強筋等の終局強度を累加すれば、その終局せん断強度を推定できる。細部に関しては今後の検討が必要であろう。

試験体	実験値 tQ _u (t)	壁			ダブ効果 Q _D (t)	X 補強 Q _X (t)	計算値 cQ _u (t)	tQ _u cQ _u	
		iQ _w (t)	oQ _w (t)	cQ _w (t)					
N-1	79.5	28.9	17.5	46.4	21.3		67.7	1.17	
	92.5	"	25.5	54.4	"		75.7	1.22	
	3	55.0	17.3	13.4	30.7	"	52.0	1.06	
	4	67.0	"	19.6	36.9	"	58.2	1.15	
	5	47.0	13.6	15.2	28.8	"	50.1	0.94	
	6	50.5	"	22.2	35.8	"	57.1	0.88	
	7	55.0	16.8	13.2	30.0	"	51.6	1.07	
	8	61.5	"	19.4	36.2	"	57.5	1.07	
	9	51.0	17.4	13.4	30.8	"	52.1	0.98	
	10	58.5	"	19.6	37.0	"	58.3	1.00	
	11	62.0	27.4	17.0	44.4	"	65.7	0.94	
	12	68.5	"	25.0	52.4	"	73.7	0.93	
	13	83.0	9.2	49.1	58.3	20.9	79.2	1.05	
	14	91.0	0	81.3	81.3	"	102.2	0.89	
	15	53.0	11.8	26.6	38.4	"	59.3	0.89	
R-3	79.5	19.3	19.7	39.0	"	14.6	74.5	1.07	
	4	103.0	"	"	"	32.0	91.9	1.12	
	7	63.5	16.2	19.3	35.5	22.2	9.2 *	66.9	0.95
	8	72.3	"	"	"	17.5 *	75.2	0.96	
9	69.1	"	"	"	5.9 *	63.6	1.09		
A-1	88.4	37.1	26.2	63.3	"		85.5	1.03	
	2	81.9	28.9	26.0	55.1	"	77.3	1.06	
	3	86.4	30.2	26.2	56.4	"	78.6	1.10	
	6	73.0	18.9	29.3	48.2	"	70.4	1.04	
P-1	68.9	21.3	21.5	42.8	33.0		75.8	0.91	
	2	131.2	"	"	"	58.2	134.0	0.98	
	3	100.0	32.5	27.6	60.1	"	93.1	1.07	
	4	92.4	32.0	31.6	63.6	"	96.6	0.96	
	5	122.4	"	"	"	28.7	125.3	0.98	
	6	152.7	"	"	"	58.2	154.8	0.99	

*最大ひずみを 1800×10⁻⁶ として計算

〔謝辞〕 データの解析にあたり、東京大学教授青山博之博士から御指導をいただいた。ここに謝意を表する。

〔参考文献〕 1) 吉崎他 "多数の小開口を持つ鉄筋コンクリート耐震壁の強度と変形その 3", 建築学会大会, 56 年 2) 細川他 "鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の開口補強に関する実験的研究 (その 11)", 建築学会大会, 57 年 3) Vecchio, F., and Collins, M.P., "The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses", Univ. of Toronto, No.2-03, 1982 4) Rawdon de Paiva, H.A., and Siess, C.P., "Strength and Behavior of Deep Beams in Shear", J.ST., ASCE, No.5, Oct., 1965 5) 南, "せん断を受ける鉄筋コンクリート部材の極限解析について", RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム, コンクリート工学協会, 57 年 6) 広沢, "既往の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料とその解析", 建研建築研究資料, No.6, 1975 7) 東大梅村研 "鉄筋コンクリート耐震壁の耐力と復元力特性に関する実験的研究", 1975 8) 秋野他, "原子炉建屋の復元力特性試験その 1~その 7", 建築学会大会, 57 年 9) 長崎他, "円筒 RC 耐震壁に関する水平加力実験報告その 1, その 2.", 建築学会近畿支部, 54 年 10) 小垣他, "プレストレストコンクリート円筒壁体のせん断耐力に関する研究 その 1~その 5", 建築学会大会, 54 年 11) 岡村他, "鉄筋コンクリート製原子炉格納容器モデルの水平加力実験 その 1~その 4", 建築学会大会, 54 年, 55 年 12) 内田他, "原子炉建屋用鉄筋コンクリート造格納容器の事故時内圧, 水平力同時加力機型実験 その 1~その 6.", 建築学会大会, 53 年, 55 年 13) 鈴木他, "原子炉建屋模型の水平加力実験 その 1, その 2.", 建築学会大会, 55 年