

[190] 実験データに基づく原子炉建屋のエネルギー吸収能, せん断強度に関する検討

正会員 稲田泰夫 (清水建設技術研究所)
正会員 ○小川幸雄 (清水建設原子力設計I部)
猿田正明 (清水建設技術研究所)

1. はじめに

原子炉建屋の主耐震要素であるボックス壁、円筒壁等の立体縮小模型を用いた実験が近年行われるようになってきたが、その数は十分であるとはいえず、実験データからだけでは復元力特性を一般化することはむづかしいと思われる。筆者らは、ボックス壁の数値実験によるパラメトリックスタディーを行い、復元力特性の折れ点に影響を与える要因の影響度を定量的に把握するとともに、せん断強度に関する既往の提案式と本数値実験結果を比較検討する。また、さらに既往の実験データも加え、エネルギー吸収能に関する検討を行う。

2. 実験内容

本報告で扱う数値実験は、既発表のもの¹⁾にさらに軸力ゼロの試験体9体を加え、計18体である。ここでとり上げたパラメータ、鉄筋比 P_s 、せん断スパン比 M/QD 、軸方向応力度 σ_0 がせん断応力度 τ ~ せん断部材角 γ 関係の各折れ点にどの程度影響を与えるかを定量的に把握するために分散分析を行い、それらパラメータの主効果ならびに交互作用の効果を明らかにする。また、せん断強度に関する既往の提案式と、数値実験結果を比較し、各パラメータの効き方に対するかたよりの検討を分散分析により行う。エネルギー吸収能に関しては、これら数値実験結果の他に既往の実験データも加えて検討を行う。このエネルギー吸収能はスケルトンカーブから求め2次設計の D_s 値に相当する値として整理を行う。

3. 数値実験 (弾塑性FEM解析) 結果

任意形状の鉄筋コンクリートシェル弾塑性解析プログラム^{1) 2)} (通称: NACS) を用いた弾塑性解析モデルならびに解析結果等を以下に示す。

3.1 解析手法

本解析で用いた要素は、隅節点の変位3自由度、および各辺の中点の法線方向の回転1自由度を有した要素内一定曲率の16自由度の四角形要素であり、これを積層して用いている。コンクリートの応力~歪関係には、Darwin・Pecknold型の負勾配も考慮されており、変形制御により最大耐力点を評価することができる。また、ひびわれ面におけるせん断伝達機構は、佐藤・白井らの方法³⁾によっており、今回の解析では要素長さ間の付着がなくなるときのコンクリートの歪を3000 μ とする。

3.2 解析モデル

解析モデルを図-1に示す。モデルはボックス壁を半割りとしたもので、フランジ、ウェブの芯長さはそれぞれ75cm、150cm、壁厚は8cmである。加力

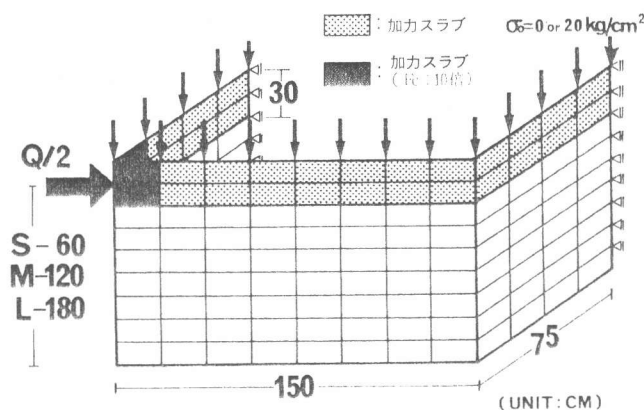


図-1 解析モデル

表-1 材料定数一覧

コンクリート	$F_c = 240 \text{ kg/cm}^2$, $cE = 2.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ $c\sigma_t = 18.6 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 1/6$
鉄筋	$s\sigma_y = 3500 \text{ kg/cm}^2$ $sE = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

表-2 数値実験試験体一覧

σ_0 P_s (%) kg/cm^2	M/QD	0.8	1.2	1.6	要素数
0.4	0	S-0.8-0	S-1.2-0	S-1.6-0	1 1 2
	20	S-0.8-20	S-1.2-20	S-1.6-20	
0.8	0	M-0.8-0	M-1.2-0	M-1.6-0	1 4 4
	20	M-0.8-20	M-1.2-20	M-1.6-20	
1.2	0	L-0.8-0	L-1.2-0	L-1.6-0	1 9 2
	20	L-0.8-20	L-1.2-20	L-1.6-20	

(計18体)

位置は高さ30cmの加力スラブ中央であり、加力高さはSシリーズで60cm, Mで120cm, Lで180cmで加力スラブの壁厚は40cmである。コンクリートと鉄筋の要素は、面外方向に各々に2層、2段とした。加力節点を含む加力スラブ4要素のコンクリート強度は壁部の10倍とする。本数値実験で用いた材料定数一覧を表-1に、試験体一覧を表-2に示す。鉄筋比(Ps)、せん断スパン比(M/QD)を3水準、軸方向応力度(σ_0)を2水準とする。また、解析にあたっては変形の小さいところでは荷重制御とし、それ以降変形制御としている。なお、参考文献1)では、今回検討を行う範囲内で本解析は試験結果⁴⁾⁵⁾と比較的よく一致していることを確認している。

3.3 解析結果

解析より得られたせん断力Q~変形 δ 関係の例(軸力なし)を図-2に示す。L-0.8-0, L-1.2-0試験体2体を除いて圧縮側脚部の圧壊を引金としたせん断り破壊をしたと思われる。最大耐力におけるせん断力ならびに変形に関しては、せん断スパンの小さいものほど強度は大きく、変形は小さくなっている。また、鉄筋比が大きいものほど最大せん断力は大きくなっていた。

せん断応力度 τ ~せん断変形角 γ 関係を図-3に示す。変形分離にあたっては、せん断変形量を対角方向相対変形より求めると、曲げ変形成分が多い試験体程せん断変形を過大評価することになる⁶⁾ために、今回は、曲率をウェブ層ごとに節点の鉛直変位を最小二乗することにより求め、これより曲げ変形量を計算し、全体変形との差をせん断変形とした。最大せん断応力度 τ_{max} は、せん断スパン比が小さいほど大きくなる傾向があった。

これら τ ~ γ 関係を回帰分析⁷⁾を用いて3本の直線に置き替えた。L-0.8-0, L-1.2-0試験体に関しては、曲げ破壊したと考えられ、欠測値として扱い、他の結果から逐次近似法によって推定した値を用いている。図-4, 5に各折れ点の計算結果を示す。これより、 τ_2 , τ_{max} に関してはM/QD, Psによる影響が、 γ_{max} に関してはM/QDによる影響が大きいことがわかる。軸力の有無による影響まで含め、これらの傾向を定量的に把握するために分散分析を行う。

4. 数値実験結果の検討

4.1 各折れ点に関する分散分析結果

τ ~ γ 関係を3本の折れ線に近似したときの各折れ点に関して、三つの要因Ps, M/QD, σ_0 に対して繰返しなしの三元配置法により分散分析した。分散分析結果を表-3に示す。表中 τ , γ の添字1, 2

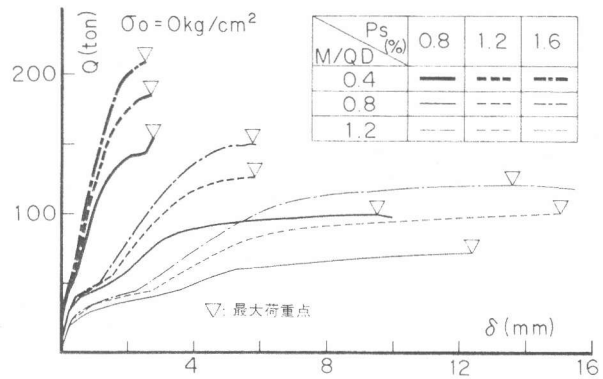


図-2 解析結果 Q~ δ 関係 (軸力なし)

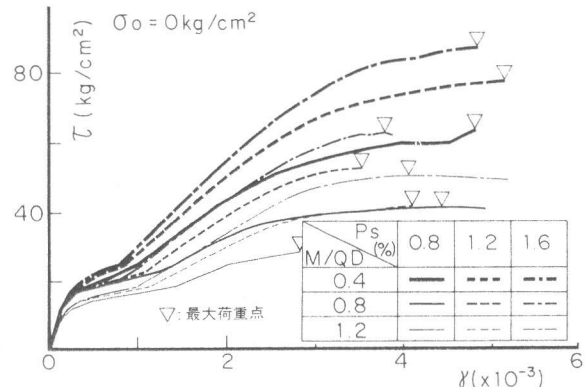


図-3 解析結果 τ ~ γ 関係 (軸力なし)

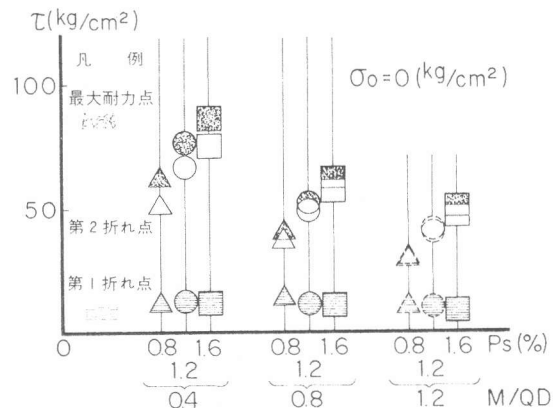


図-4 構造要因による τ の比較 (軸力なし)

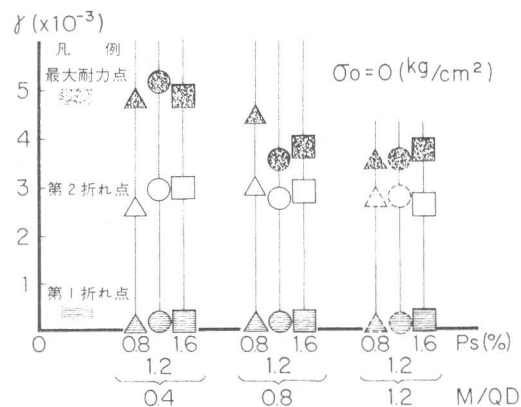


図-5 構造要因による γ の比較 (軸力なし)

は第1折れ点, 第2折れ点を, max は最大耐力点を示す。これらより以下の知見を得た。(1) τ_1 , τ_2 に関しては σ_0 の寄与率 ρ すなわち σ_0 の変動の全変動に占める割合が80%以上であり, 今回考慮した要因の中では最も支配的であった。(2) τ_{max} に関しては, M/QDの寄与率が最も大きくPs, σ_0 の寄与率のほぼ4倍であった。Ps, σ_0 の寄与率はほぼ同程度であった。また, τ_2 に対する各要因の効き方は, τ_{max} とほぼ同様の傾向があった。(3) τ_{max} については, M/QDの影響が支配的であった。回帰式のM/QDに関する符号が負であり, M/QDが大きくなる程 τ_{max} は小さくなるのがわかる。これはウェブに圧縮斜材を仮定し, それが終局歪に達した時の τ_{max} がM/QDに反比例することを考えると, 定性的に妥当な結果と思われる。(4) τ_2 については, 誤差項の寄与率が40%以上で最も大きく, τ_2 に顕著な影響を与える要因は, 今回の検討の範囲ではなかった。

4.2 セン断強度に関する検討

既往のせん断終局耐力評価式と τ_{max} の値とを比較し図-6に示す。なお, 対象とした評価式の概要を下に示す。以下に得られた知見を示す。(1) いずれの評価式においても軸力の効きに関してかたよりがあった。 τ_{max} の回帰式では今回の検討の軸力0~20kg/cm²の範囲で軸力項は約0.7 σ_0 となっており, いずれの評価式においても軸力による τ_{max} の増加を過少評価していた。(2) 荒川式以外の評価式では, τ_{max} における寄与率が最も大きいM/QDに関してかたよりがあった。

(対象としたせん断終局耐力評価式)

$$\text{荒川式: } \tau_u = 0.0679P_s^{0.23} \cdot (F_c + 180) / (M/QD + 0.115) + 2.7\sqrt{P_w \cdot w \sigma_y} + 0.1\sigma_0$$

$$\text{広沢式: } \tau_u = 0.0679P_s^{0.23} \cdot (F_c + 180) / \sqrt{M/QD + 0.115} + 2.7\sqrt{P_w \cdot w \sigma_y} + 0.1\sigma_0$$

$$\text{東大式: } \tau_u = 0.0679P_s^{0.23} \cdot (F_c + 180) / (M/QD + 0.115) + 0.5(P_w \cdot w \sigma_y + 2.7\sqrt{P_w \cdot w \sigma_y}) + 0.1\sigma_0$$

$$\text{大成式: } \tau_s < 4.5\sqrt{F_c} \text{ のとき}$$

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

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

$$\tau_s = \frac{P_H + P_V}{2} \sigma_y + \frac{\sigma_H + \sigma_V}{2}$$

$$\tau_s \geq 4.5\sqrt{F_c} \text{ のとき}$$

$$\tau_u = 4.5\sqrt{F_c} \quad (M/QD \leq 1)$$

(記号説明省略)

表-3 $\tau \sim \gamma$ の各折れ点に関する分散分析表

τ_1				$F_{\alpha}(0.05) = 4.96, F_{\alpha}(0.01) = 10.04$			
要因		F _a	寄与率ρ(%)	直交多項式を用いた回帰式			
Ps	1次	24.9**	3.2	Ps 1次, σ_0 , M/QD 1次	$\tau_1 = 3.267Ps + 0.5306\sigma_0 + 5.564M/QD + 20.21$		
	2次	0.1					
σ_0	1次	615.3**	82.0	σ_0 , M/QD 1次	$\tau_1 = 0.5306\sigma_0 + 5.564M/QD + 16.29$		
	2次	72.2**	9.5				
M/QD	1次	1.4	1.6	σ_0 , M/QD 1次	$\tau_1 = 0.5306\sigma_0 + 5.564M/QD + 16.29$		
	2次	13.1**	1.5				
誤差 e	1次	12.0**	1.5	σ_0	$\tau_1 = 0.5306\sigma_0 + 11.83$		
	2次		2.3				
τ_2				$F_{\alpha}(0.05) = 4.75, F_{\alpha}(0.01) = 9.33$			
要因		F _a	寄与率ρ(%)	直交多項式を用いた回帰式			
Ps	1次	114.6**	20.5	Ps 1次, σ_0 , M/QD 1次, 2次	$\tau_2 = 19.55Ps + 0.6053\sigma_0 + 32.28 M/QD + 24.15 (M/QD)^2 - 50.785$		
	2次	2.3					
σ_0	1次	103.0**	18.4	Ps 1次, σ_0 , M/QD 1次	$\tau_2 = 19.55Ps + 0.6053\sigma_0 + 32.28 M/QD + 53.36$		
	2次	312.5**	56.3				
M/QD	1次	9.3**	1.5	σ_0 , M/QD 1次	$\tau_2 = 19.55Ps + 0.6053\sigma_0 + 32.28 M/QD + 53.36$		
	2次		3.1				
誤差 e	1次		10.4				
	2次						
τ_{max}				$F_{\alpha}(0.05) = 4.75, F_{\alpha}(0.01) = 9.33$			
要因		F _a	寄与率ρ(%)	直交多項式を用いた回帰式			
Ps	1次	266.6**	16.2	Ps 1次, σ_0 , M/QD 1次			
	2次	1.8	0.05				
σ_0	1次	254.5**	15.5	Ps 1次, σ_0 , M/QD 1次	$\tau_{max} = 23.47Ps + 0.7489\sigma_0 + 46.74M/QD + 65.36$		
	2次	1057.4**	64.6				
M/QD	1次	0.4	0.3				
	2次		10.4				
誤差 e	1次						
	2次						
τ_1				$F_{\alpha}(0.05) = 4.60, F_{\alpha}(0.01) = 8.66$			
要因		F _a	寄与率ρ(%)	直交多項式を用いた回帰式			
σ_0	1次	168.7**	83.5	σ_0 , M/QD 1次	$\tau_1 = 0.005609\sigma_0 + 0.05388M/QD + 0.1786$		
	2次	16.6**	7.8				
M/QD	1次	1.6	0.3		$\tau_1 = 0.005609\sigma_0 + 0.1355$		
	2次		8.5				
誤差 e	1次						
	2次						
τ_2				$F_{\alpha}(0.05) = 4.96, F_{\alpha}(0.01) = 10.04$			
要因		F _a	寄与率ρ(%)	直交多項式を用いた回帰式			
σ_0	1次	5.6*	11.9	$F_{\alpha}(0.05) = 4.96$			
	2次	3.5*	25.6				
Ps × M/QD	1次	4.7*	18.8	$F_{\alpha}(0.05) = 3.48$			
	2次		43.7				
誤差 e	1次			$F_{\alpha}(0.05) = 4.10$			
	2次						
τ_{max}				$F_{\alpha}(0.05) = 4.54, F_{\alpha}(0.01) = 8.66$			
要因		F _a	寄与率ρ(%)	直交多項式を用いた回帰式			
M/QD	1次	82.2**	73.4	M/QD 1次, 2次	$\tau_{max} = 7.942 M/QD + 3.659 (M/QD)^2 - 7.803$		
	2次	13.5**	11.1				
誤差 e	1次		15.4	M/QD 1次	$\tau_{max} = 2.088 M/QD + 5.851$		
	2次						

*危険率5%未満で有意
**危険率1%未満で有意
単位: σ_0 (kg/cm²), Ps (%)
 τ (kg/cm²), γ ($\times 10^{-2}$)

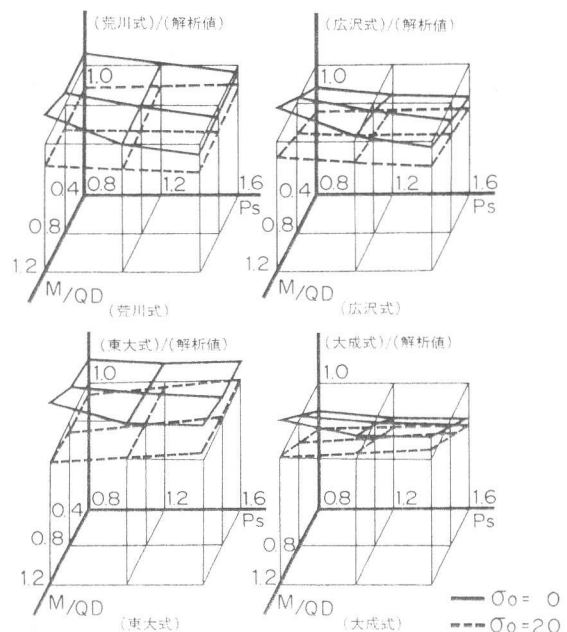


図-6 既往の復元力特性式との比較

5. エネルギー吸収能に関する検討

5. 1 検討内容

スケルトンカーブ上での全吸収エネルギー量を求め、これを2次設計で使われているDs'値に相当する値(以下Ds'値とする)として整理を行う。その求め方を、図-7に示す。

数値実験から、Ds'値に影響を与える各要因の影響度を示すとともに、既往のボックス壁、円筒壁の試験結果⁵⁾⁹⁾¹⁰⁾も加え合わせて検討を行う。なお、対象とした試験体は最大耐力点の明確な試験体とし、ボックス壁11体、円筒壁11体である。

5. 2 検討結果

数値実験結果より求めたDs'値に関して、三元配置法により分散分析した結果を表-4に示す。 σ_0 ならびにPsの寄与率がM/QDの寄与率の2倍以上であった。

これら数値実験の結果に既往の試験体22体の試験結果を加え、Ds'値 \sim Qsu/Qbu(Qsu:せん断強度計算値; Qbu:全塑性曲げ終局強度)関係に整理し図-8に示す。ここで、Qsu計算式は、4.2で検討した荒川式で軸方向応力度の項を $0.7\sigma_0$ に修正して用いた。荒川式はM/QDのかたよりがなく、 $0.7\sigma_0$ と軸力項を修正することによって軸力によるかたよりもなくなり、試験結果との整合性もよかった。エネルギー吸収能から計算されるDs'値はせん断破壊領域で0.45、曲げ破壊領域ではDs'=0.783-0.33Qsu/Qbuなる直線以下であった。

6. まとめ

本検討の範囲内で明らかになった事項を以下にまとめて示す。

- 1) $\tau \sim \gamma$ 関係の第1折れ点は、鉄筋比、せん断スパン比の影響よりも軸力による影響が支配的である。
- 2) τu に関する既往の復元力特性式は、軸力による強度上昇を低く評価している傾向がある。また、せん断スパンに関してもかたよりがあり、今回の検討の範囲では荒川式のみM/QDのかたよりがなかった。
- 3) スケルトンカーブでのエネルギー吸収量をDs'値に相当する値(Ds'値)として整理を行った結果、今回の検討の範囲内ではDs'値は0.45以下になっていた。

なお、今回の数値実験に要した計算時間は、1ステップ当り10秒程度(IBM3081K使用)であった。

(参考文献) 1) 稲田, 小川, 猿田; 「原子炉建屋ボックス型立体耐震壁の復元力特性に関する研究」(その1)~(その3) 建築学会大会 昭和58年9月P.1523~1528 2) 川股, 藤田他; 「有限要素法による鉄筋コンクリートシェル弾塑性解析」(その1)~(その2) 建築学会大会 昭和55年9月P.1019~1022 3) SATO, SHIRAI; Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Shear Wall Structures-Material Modelling of Reinforced Concrete-IABSE COLLOQ, DELFT 1981 4) 深田, 鈴木他; 「原子炉建屋模型の水平加力実験」(その1)~(その3) 建築学会大会 昭和57年10月/FUKADA, et. al; Experimental Study on One-Thirtieth Scale Model of Reinforced Concrete Reactor Building Under Cyclic Lateral Loading, 6th SMIRT 5) 財団法人原子力工学試験センター復元力特性分科会; 「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 昭和57年10月 6) 平石; 「耐震壁のせん断変形と曲げ変形の算定法」建築学会論文報告集 昭和58年11月P.55~62 7) 稲田, 小川, 猿田; 「原子炉建屋立体耐震壁の復元力特性に関する研究」建築学会大会 昭和57年10月P.955~956 8) 吉崎, 江崎他; 「多数の小開口を持つ耐震壁の強度」第5回コンクリート工学年次講演会1983 P.201~204 9) 東京大学梅村研究室; 「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」昭和50年9月 10) 瀬戸川他; 「円筒型RC耐震壁に関する水平加力実験報告」(その1)~(その2) 建築学会近畿支部研報告昭和54年度

$$E_{max} = 1/2 \cdot Q_e \cdot \delta'$$

$$= 1/2 \cdot Q_e^2 / K$$

$$D_s' = Q_u / Q_e = Q_u / \sqrt{2KE_{max}}$$

ただし、K:弾性剛性(設計値)

Qu:最大耐力

δ', E_{max}, Q_e :右図参照

図-7 Ds'値の求め方

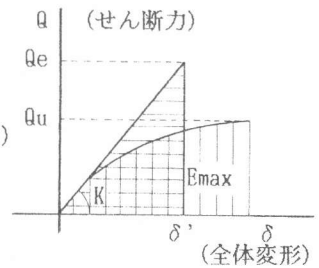


表-4 Ds'値に関する分散分析結果

要因	F0	寄与率 ρ (%)	重回帰式
Ps 1次	24.15**	28.4	$D_s = 0.09665P_s + 0.03568\sigma_0 - 0.06673M/QD + 0.2171$
2次	0.127		
σ_0	30.87**	36.6	Ps:鉄筋比(%) σ_0 :軸方向応力度(kg/cm ²)
M 1次	11.51**	12.9	
QD 2次	2.94		M/QD:せん断スパン比
誤差 e		20.8	

$$F_0(0.05) = 4.75, F_0(0.01) = 9.33$$

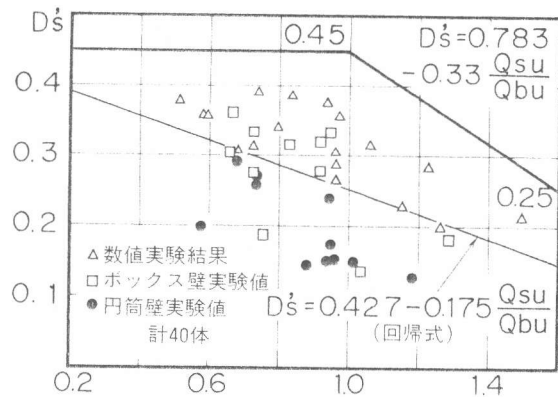


図-8 Ds'-Qsu/Qbu関係

Qsu:荒川式(0.7 σ_0 とする)
Qbu:全塑性曲げ終局強度