

論 文

[2095] マクロモデルによる有開口連層耐震壁の最大強度の解析

正会員○望月 淳 (工学院大学工学部)

竹原 雅夫 (工学院大学工学部)

正会員 小野里憲一 (工学院大学工学部)

■ 1 はじめに

有開口耐震壁の最大強度の評価の方法として、建築学会RC規準では、無開口耐震壁の最大強度に開口低減率を乗じる方法を採用している。また、徳広・小野[1]は、開口低減率の代わりに、壁板面積に対する開口をよぎらない圧縮ストラットの面積の比の根： $\gamma = \sqrt{\Delta A_e / A_w}$ を提案している。一方、解析的研究として、瀬谷ら[2]および野口ら[3]の有限要素法による研究、そして無開口連層耐震壁に有効であるマクロモデルによる解析方法を、有開口連層耐震壁に適用した壁谷沢ら[4]の研究がある。しかし、有開口連層耐震壁の解析は、現時点では十分でない状況といえる。

筆者らは文献[5]で、せん断破壊モードで終る有開口連層耐震壁の最大強度が、両側柱のせん断力と開口をよぎらない圧縮ストラットのスリップ破壊強度の和で捉えられることを示した。この方法は、開口低減率などの係数を乗じる方法と異なり、無開口連層耐震壁から全く壁板のない柱・梁フレームの最大強度の評価に、連続的に矛盾なく適用できるものである。また、筆者らは文献[6]、[7]で、側柱のせん断抵抗と壁板のスリップ破壊強度を導入したマクロモデルによる無開口連層耐震壁の最大強度の解析法と解析結果を示した。その解析結果は、他のモデルに比べて十分遜色ない精度で、せん断破壊モードから曲げ破壊モードで終る無開口連層耐震壁の最大強度を捉えている。本研究は、筆者らのマクロモデルを一部変更して、有開口連層耐震壁の最大強度の解析を試みたものである。

■ 2 マクロモデルと解析法

本研究では、曲げモーメント、せん断力、および軸力をうける有開口連層耐震壁を、剛強な上・下梁をもつ有開口単独耐震壁（以下、有開口壁という）に置換して扱う。図-1は、この置換された有開口壁のマクロモデルである。マクロモデルは、無開口壁の場合と同様に、剛強な上・下梁、せん断破壊をしないように補強された側柱、傾斜角 θ をもつコンクリートの圧縮ストラット④、⑤、⑥（この特性については後述される）、および縦・横に配置された引張補強筋で構成される。ここで、開口補強筋は上・下梁または両側柱に定着されないため、考慮しない。本研究では、解析例として開口が壁板中央に位置した長方形開口の場合のみを扱っているが、解析法は偏在開口の場合にも適用が可能である。

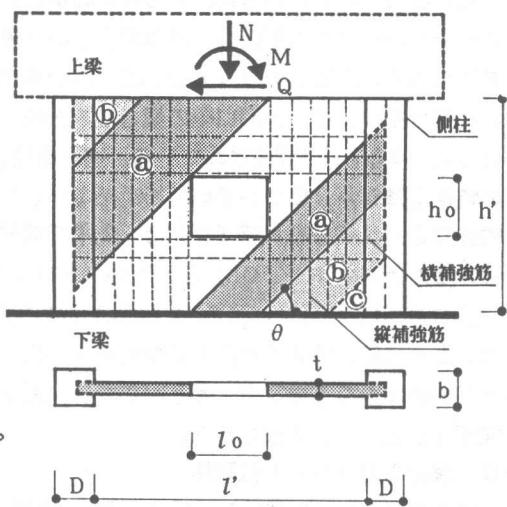


図-1 マクロモデル

有開口壁であることによるマクロモデルの変更は次のようにある。

- 1) 開口をよぎる圧縮ストラットは圧縮抵抗をもたないとして除去される。
- 2) 縦・横補強筋のうち、開口をよぎる補強筋は1)と同様の理由で除去される。
- 3) 1)で除去された圧縮ストラットと側柱が交差する領域に結合する横補強筋は除去される。

これらの変更のうち3)は、圧縮ストラット②の領域が進展して開口をよぎるとき、後述のIV)にもとづく横補強筋の除去によって生じる解析の不連続を避けるための簡略化の扱いである。

マクロモデルの構成部材は、最大強度時において次の状態にあると仮定される。

- I) 上・下梁は、剛体でどのような破壊もしない。
- II) 側柱の上・下端は、建築学会RC規準[8]の終局強度式付20.19-20.34で表される降伏曲線上にあり、上・下端の中間域は、降伏曲線上またはその内部にある。ただし、側柱はせん断破壊しない。
- III) 圧縮ストラット②は降伏状態にあり、その降伏強度は筆者らの提案している壁板コンクリートのスリップ破壊強度 $0.63F_c$ とする。圧縮ストラット③は、これと交差する側柱の領域が曲げ降伏しているため、その応力の水平成分は横補強筋とつりあう状態にある。ただし、圧縮ストラット②の応力の水平成分の値を超えない。圧縮ストラット④は、これと交差する側柱の領域が引張軸降伏しているため除去される。
- IV) 縦・横補強筋はすべて降伏している。ただし、圧縮ストラット②と交差する横補強筋は除去される。

これらの仮定は文献[6]で設定した無開口壁の場合と全く変わらないが、マクロモデルの変更3)によって、仮定II)の側柱上・下端の中間域が降伏曲線上またはその内部にあるとする条件は、必ずしも満されない。圧縮ストラット③の応力の水平成分につりあう横補強筋が存在しないため、側柱の曲げモーメントが降伏曲線の外部にある場合が生じる。しかし、横補強筋はもともと自己つりあいにあるためこの影響は小さい。

このマクロモデルの解析は、極限解析法の下界定理にもとづいて行われる。圧縮ストラット②、③、④の決定、およびの解析に必要な条件式は、無開口壁の場合と、大要、同様である。これらは、文献[6]に詳述されている。図-2は、圧縮ストラットの特定な傾斜角 θ についての解析手順を示している。ここで、静的許容応力状態を満す解(Q)は、上梁下端位置における両側柱のせん断力の和(ΣQ_c)と、圧縮ストラットのせん断力の和(ΣQ_w)の合計($Q = \Sigma Q_c + \Sigma Q_w$)として評価される。解析は、さらに傾斜角 θ を離散的に変化させ、得られた解(Q)のうちの最大値を下界定理にもとづきマクロモデルの最大せん断強度(Q_{cal})として決定する。

■3 解析の対象とした試験体

解析の対象とした試験体は、筆者ら[5]の有開口壁12体、および精木ら[9]の有開口壁18体および無開口壁2体の合計32

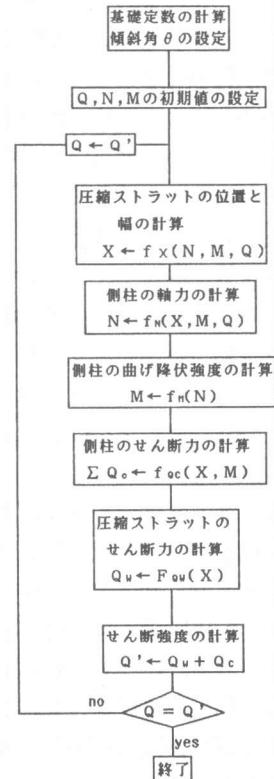


図-2 解析手順

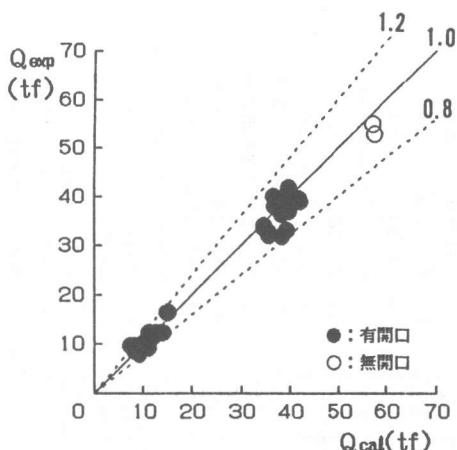


図-3 Q_{exp} と Q_{cal} の関係

体で、解析に必要な試験体の諸性質は、文献から引用して表-1に示してある。筆者らの試験体No.1～12は、いずれも壁板の破壊時に側柱のせん断破壊が生じないよう補強されたもので、No.1～9は定軸力と1方向対角圧縮力を、No.10～12は定軸力と壁板中央に反曲点をもつ曲げ・せん断力をうけている。採用されたパラメータは、開口周比、開口形状、および開口補強の方法である。いずれの試験体も、開口両側の壁板のスリップ破壊の後、側柱上・下端の曲げ降伏で終るせん断破壊モードの破壊性状を示した。

一方、精木らの試験体は、すべて定軸力と上梁位置に水平外力をうける片持柱形式のもので、その形状は、筆者らの試験体に比べて、壁板の辺長比(h'/l')の大きい背高な耐震壁である。採用されたパラメータは、開口周比、壁筋比、および開口補強筋量である。いずれの試験体も、開口両側の壁板の破壊と両側柱の破壊で終るせん断破壊モード、または曲げ・せん断破壊モードに近い性状を示しているが、筆者らの試験体に比べて、両側柱の曲げ亀裂、せん断

亀裂による損傷が激しい。このNo.13～32の最大強度については、精木らは詳細に論じていない。また、瀬谷らおよび野口らは、これらの試験体のうちの数体について、それぞれ文献[2]および[3]で有限要素法による解析を試みているが、最大強度については詳細に論じていない。

■4 解析結果

表-1に解析による最大せん断強度 Q_{cal} 、最大せん断強度の解析値に対する実験値の比 Q_{exp}/Q_{cal} 、および解析による最大強度時の右側柱下端の軸力 N_{rb} と側柱の引張軸降伏強度 N_{min} の比 N_{rb}/N_{min} を示してある。比 N_{rb}/N_{min} は側柱の引張軸降伏の有無と関係し、破壊モードの指標

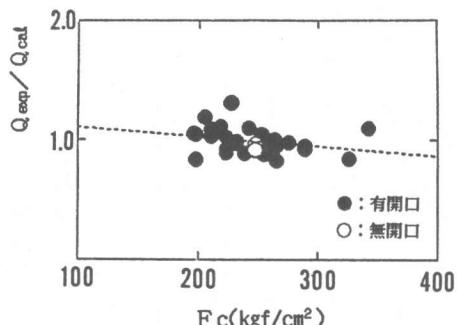


図-4 $\frac{Q_{exp}}{Q_{cal}}$ と F_c の関係

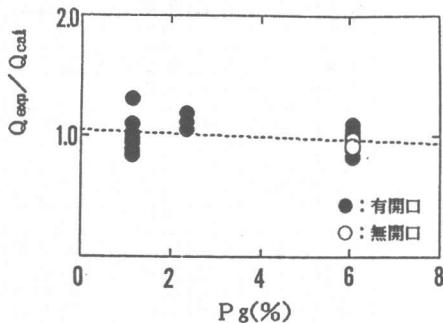


図-5 $\frac{Q_{exp}}{Q_{cal}}$ と P_g の関係

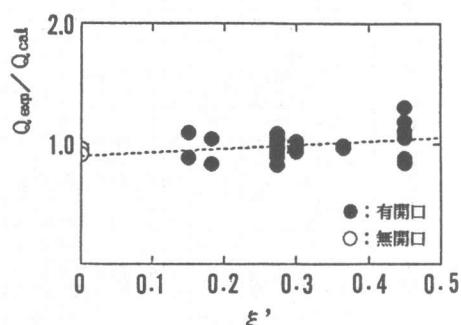
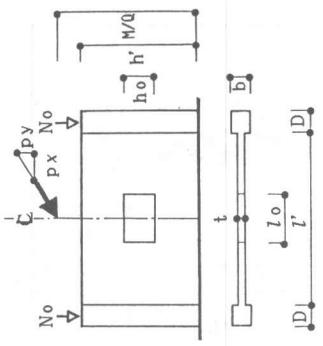


図-6 $\frac{Q_{exp}}{Q_{cal}}$ と ξ' の関係

表-1 試験体の諸性状と解析結果



【記号】

No	試験体名	b	D	l'	h'	t	P_g	σ_y	M/Q	α	No	F_c	L_o	h_o	ξ'	Q_{exp}	Q_{cal}	$\frac{N_{rb}}{N_{min}}$	Q_{cal}			
1	VAR45L-1	10	10	30	2.3	1.4	4390	0.76	1780	25	0.625	5.1	256	36.0	22.0	0.44	8.06	9.17	0.879	-0.21	9.26	
2	VAR45L-2	10	10	30	2.3	1.4	4390	0.76	1780	25	0.625	6.5	326	36.0	22.0	0.44	9.26	11.03	0.840	-0.30	11.28	
3	VAR45S-1	10	10	80	50	1.8	1.4	4390	0.76	1780	25	0.625	4.6	228	36.0	22.0	0.44	9.64	7.38	1.306	-0.34	7.35
4	VAR45S-2	10	10	80	50	2.2	1.4	4390	0.76	1780	25	0.625	6.9	343	36.0	22.0	0.44	12.27	11.21	1.095	-0.35	11.45
5	VAR30L-2	10	10	80	50	2.3	1.4	4390	0.76	1780	25	0.625	5.5	276	24.0	15.0	0.30	12.41	12.72	0.976	-0.27	13.16
6	VAR30S-1	10	10	80	50	2.2	1.4	4390	0.76	1780	25	0.625	4.5	223	24.0	15.0	0.30	10.74	10.49	1.024	-0.25	10.66
7	VAR30S-2	10	10	80	50	2.3	1.4	4390	0.76	1780	25	0.625	5.1	253	24.0	15.0	0.30	11.21	11.89	0.943	-0.26	12.22
8	VAR15L-1	10	10	80	50	2.4	1.4	4390	0.76	1780	25	0.625	4.9	243	12.0	7.0	0.14	16.38	14.96	1.095	-0.26	15.53
9	VAR15L-2	10	10	80	50	2.2	1.4	4390	0.76	1780	25	0.625	4.8	239	12.0	7.0	0.14	12.32	13.92	0.885	-0.32	14.32
10	WBR45L-1	10	10	80	50	2.4	2.34	3443	0.76	1780	25	0	3.9	196	36.0	22.0	0.44	8.63	8.18	1.055	0.21	8.16
11	WBR45L-2	10	10	80	50	2.4	2.34	3443	0.76	1780	25	0	4.4	219	36.0	22.0	0.44	9.74	8.78	1.109	0.22	8.79
12	WBR45S	10	10	80	50	2.2	2.34	3443	0.76	1780	25	0	4.1	205	36.0	22.0	0.44	9.57	8.06	1.187	0.16	8.03
13	M-I-10-20-0	25	15	60	100	8.2	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	198	10.0	20.0	0.18	41.77	39.87	1.048	0.70	42.53
14	M-I-10-20-0	25	15	60	100	8.0	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	198	10.0	20.0	0.18	32.97	39.42	0.836	0.69	42.01
15	M-I-15-30-0	25	15	60	100	8.1	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	255	15.0	30.0	0.27	37.03	39.89	0.928	0.81	43.54
16	M-I-15-30-0	25	15	60	100	8.1	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	255	15.0	30.0	0.27	39.00	39.94	0.976	0.81	43.60
17	M-I-20-40-0	25	15	60	100	8.1	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	233	20.0	40.0	0.37	34.00	34.64	0.982	0.65	36.60
18	M-I-20-40-0	25	15	60	100	8.1	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	233	20.0	40.0	0.37	33.48	34.53	0.967	0.65	36.59
19	M-II-15-30-9	25	15	60	100	8.0	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	264	15.0	30.0	0.27	39.38	40.47	0.980	0.83	44.04
20	M-II-15-30-9	25	15	60	100	8.1	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	264	15.0	30.0	0.27	40.27	40.40	0.997	0.84	44.30
21	M-II-15-30-15	25	15	60	100	8.0	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	211	15.0	30.0	0.27	40.10	36.72	1.092	0.66	38.99
22	M-II-15-30-15	25	15	60	100	8.1	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	211	15.0	30.0	0.27	38.00	36.88	1.030	0.66	39.17
23	M-II-15-30-2-13	25	15	60	100	8.0	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	254	15.0	30.0	0.27	40.92	39.64	1.032	0.80	43.12
24	M-II-15-30-2-13	25	15	60	100	8.1	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	254	15.0	30.0	0.27	41.87	39.93	1.049	0.81	43.48
25	M-II-15-30-2-2PL	25	15	60	100	8.0	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	289	15.0	30.0	0.27	39.58	41.82	0.946	0.92	46.63
26	M-II-15-30-2-2PL	25	15	60	100	8.1	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	289	15.0	30.0	0.27	39.08	42.12	0.928	0.93	47.01
27	M-III-15-30-9	25	15	60	100	8.0	6.05	3334	0.70	3108	110	0	12.3	223	15.0	30.0	0.27	32.92	35.49	0.928	0.68	39.66
28	M-III-15-30-9	25	15	60	100	8.2	6.05	3334	0.70	3108	110	0	12.3	223	15.0	30.0	0.27	32.00	35.79	0.894	0.70	40.16
29	M-III-15-30-2-13	25	15	60	100	8.1	6.05	3334	0.70	3108	110	0	12.3	266	15.0	30.0	0.27	36.42	38.41	0.948	0.80	44.28
30	M-III-15-30-2-13	25	15	60	100	8.2	6.05	3334	0.70	3108	110	0	12.3	266	15.0	30.0	0.27	31.83	38.47	0.827	0.80	44.39
31	M-I-0-0-0	25	15	60	100	8.0	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	248	-	-	-	55.00	57.19	0.962	1.00	60.05
32	M-I-0-0-0	25	15	60	100	8.1	6.05	3334	1.40	3108	110	0	12.3	248	-	-	-	53.00	57.62	0.920	1.00	60.58

$Q_{exp}/Q_{cal}(A)$: 簡略式(1)の解析値

$Q_{exp}/Q_{cal}(D)$ の平均値=0.992, 標準偏差=0.104, 変動係数=0.105

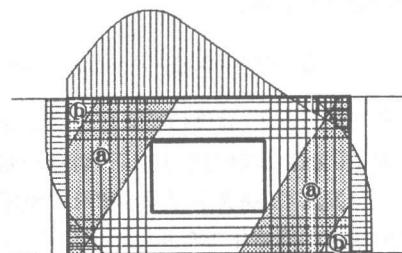
といえる。筆者らは、 $N_{rb}/N_{min} < 1.0$ の場合をせん断破壊モード、そして $N_{rb}/N_{min} = 1.0$ の場合を曲げ・せん断破壊モードまたは曲げ破壊モードと規定している。

解析の結果は、無開口壁2体を除くすべての試験体が、 $N_{rb}/N_{min} < 1.0$ であるから、せん断破壊モードで破壊したと判定されるが、1.0に極めて近いものは曲げ・せん断破壊モードの性状を示すものと考えられる。これは実験の結果とも相応する。図-3は Q_{exp} と Q_{cal} の関係を、図-4、5、および6は有開口壁の最大強度に大きく関係するパラメータ F_c (コンクリート強度)、 P_g (側柱の主筋比)、および λ' (開口周比)と Q_{exp}/Q_{cal} の関係を示す。図-4の回帰直線は少し傾斜しているが、これらの図は、マクロモデルによる解析が開口壁の最大強度をよく捉えていることを示している。無開口壁を除く全試験体についての Q_{exp}/Q_{cal} の平均値、標準偏差値、および相関係数は、それぞれ0.992、0.104、および0.105で、無開口壁について報告されているマクロモデルによる解析精度に比べても遜色ないものである。

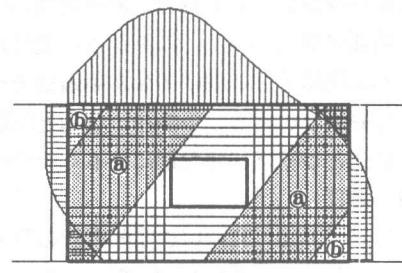
図-7および8は、筆者らおよび精木らの試験体の開口周比の異なるものについて、解析による応力状態を示す。他の試験体も、大要、同じ応力状態を示している。精木らの試験体は、背高な耐震壁のため、側柱の引張域での曲げ降伏が進行している。

特に、M I、IIシリーズの場合、全体的に圧縮ストラット④より⑤の領域が大きい。しかし、これらのシリーズの壁筋比はM IIIシリーズの2倍の高配筋比であるため、圧縮ストラット⑤の応力は圧縮ストラット④の0.63 F_c に近い値になっている。筆者らの試験体は、導入された定軸力が大きいため、側柱の引張軸降伏が生じていない。また、曲げ降伏も側柱上・下端とその近傍に限定されている。この状態は、筆者らが文献[5]で提案した最大強度式の基礎としている応力状態にほぼ相応している。

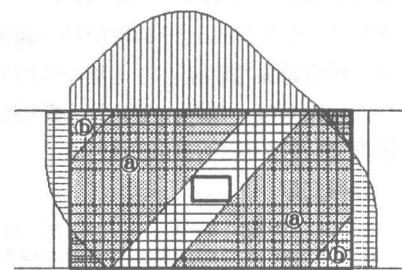
この最大強度式は、仮定III) の圧縮ストラット④の降伏強度を考慮すれば、



No.4 WAR45S-2

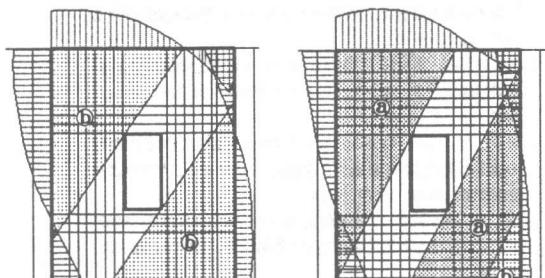


No.7 WAR30S-2



No.9 WAR15L-2

図-7 解析の応力状態



No.22 M-II-15-30-15 No.28 M-III-15-30-9

図-8 解析の応力状態

【注】図-7、8の応力図は次の状態を表す。

■■■：圧縮ストラット④の領域

■■■：圧縮ストラット⑤の領域

＝＝＝：上梁と側柱の曲げ応力状態

ただし、側柱上・下端部は曲げ降伏強度

次のようになる。

$$Q_{cal}(A) = 0.63 \cdot F_c \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot t \cdot \Sigma \Delta l' + \Sigma c Q_y \quad (1)$$

ここで、 $\Sigma \Delta l'$ は開口をよぎるストラットを除いた圧縮ストラットの上梁下端位置の水平な幅の和で、 $c Q_y$ は側柱の上・下端だけが曲げ降伏しているとしたときの側柱のせん断力である。

式(1)は、圧縮ストラットすべてを圧縮ストラット②とした簡略式で、文献[7]で示した無開口壁の場合の簡略化モデルに相応する。図-9は、式(1)による解析値と実験値との関係を示している。一般に、式(1)による解析値 $Q_{cal}(A)$ は、 Q_{cal} に比べて大きい値になる。特に、側柱の曲げ降伏が進行している場合、解析精度が落ちるが、図-9は3体を除いて実験値を解析値の±20%の範囲に捉えている。これから、式(1)は、側柱が十分剛強であれば、せん断破壊モードまたはこれに極めて近い曲げ・せん断破壊モードで終る有開口壁の最大強度を評価するための簡略式として妥当といえる。しかし、 Q_{cal} と同様に $Q_{cal}(A)$ も、繰返し計算を必要とする強度式である。設計式としては、陽な形にするための一層の簡略化が必要である。

■ 結び

本研究では、有開口連層耐震壁の最大強度を評価するためのマクロモデルとその解析法を提案した。そして、これをせん断破壊モードまたは曲げ・せん断破壊モードで終った試験体に適用した結果、次のようなまとめを得た。

1) マクロモデルとその解析法は最大強度の評価の方法として十分妥当である。

2) 解析結果を基礎とした簡略式(1)もまた妥当である。

以上の結果は、現時点では、せん断破壊モードおよびせん断破壊モードに極めて近い曲げ・せん断破壊モードの場合に限定される。

■ 参考文献

- 1) 徳広育夫, 小野正行: 鉄筋コンクリート造耐震壁の開口の影響による低減率 γ , 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1983 .9, pp.2061~2062
- 2) 濑谷脾, 松井源吾: 開口のある耐震壁の応力と変形に関する研究(その2 鉄筋コンクリートの非線形解析), 建築学会論文報告集301号, 1981
- 3) 野口博, 鶴田正一: 地震力を受けるRC耐震壁の開口補強筋に関する解析的研究, 第8回コンクリート工学年次講演論文集, 1986, pp.697~700
- 4) 壁谷沢寿海, 木村匠: 鉄筋コンクリート耐震壁の開口による終局強度低減率, コンクリート工学年次論文報告集11-1, 1989, pp.585~590
- 5) 望月 淳, 竹原 雅夫: スリップ破壊する有開口連層耐震壁の強度と変形に関する研究, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986, pp.701~704
- 6) 望月淳, 小野里憲一: 連層耐震壁のマクロモデルとその解析法, コンクリート工学論文集第1巻第1号, 1990.1, pp.121~132
- 7) 望月淳, 小野里憲一: 連層耐震壁のせん断強度と抵抗機構に関する解析的研究, JC1コロキウム「RC構造のせん断設計法に関する解析的研究」論文集, 1989.10, pp.149~156
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1988, pp.600~615
- 9) 横木紀男, 藤本一郎, 小池孝平, 渡辺修二: 有開口鉄筋コンクリート耐震壁の変形と耐力について—壁板中央に壁板と相似な開口を有する壁体における開口の大小、斜め補強筋・壁筋量の影響に関する実験的研究-, 1980.7, pp.69~82

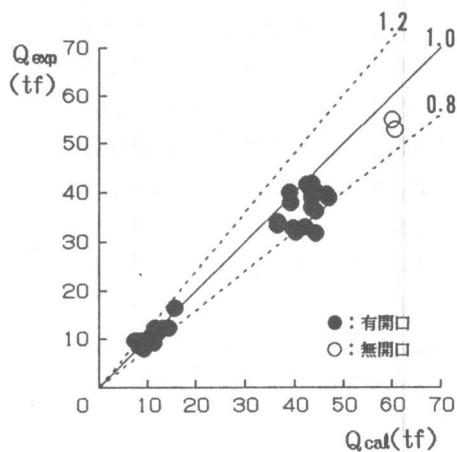


図-9 Q_{exp} と $Q_{cal}(A)$ の関係