

論文

[2092] FEM解析による鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に関する検討

正会員○植松卓二 (明治大学大学院)
 正会員 高木仁之 (明治大学建築学科)
 正会員 狩野芳一 (明治大学建築学科)

1. はじめに

現在提案されている耐震壁のせん断耐力算定式は、耐震壁の形状の影響を荒川式のようにせん断スパン比により考慮しているものと、日本建築学会の終局強度型耐震設計指針(以下、指針式)のように耐震壁高さと柱スパンの比(幅高さ比)により考慮しているものに大別できる。これらの式の裏付けとなる実験は、従来、大部分が片持ち形加力によって行われており、パラメータとしてせん断スパン比と幅高さ比のいずれが真に重要であるかは現在必ずしも明らかではない。

そこで、本研究では、頂部に集中水平力を加える場合を対象として、せん断破壊を生じる(柱主筋の降伏をともなわない)普通強度RC耐震壁のせん断耐力に、曲げモーメント分布形(せん断スパン比)と壁の形状(幅高さ比)がどのように影響を及ぼしているのかをFEM数値実験により検討をするものである。なお、本論の解析使用プログラムは文献1)において解析精度の検証を行っており十分な精度が得られている。

2. 解析手法

FEM数値実験には、文献1)に示す解析プログラムを用い、計算機は明治大学情報科学センター所有のFACOM、M-380を用いた。以下に解析プログラムの概要を示す。

要素：四角形アイソパラメトリック要素

コンクリート応力-歪関係：Saenzeの提案式

コンクリート破壊条件：Kupferらの破壊条件

コンクリートひび割れモデル：分布ひび割れモデル、最大2方向までひび割れが発生

ひび割れコンクリートの圧縮強度低減係数：Collinsの提案式

鉄筋：線要素、バイリニア

型モデル

鉄筋とコンクリートの引張

剛性効果：白井等の提案モ

デルを簡略化

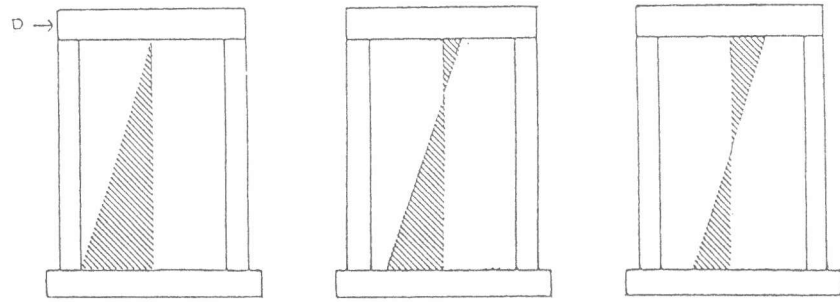
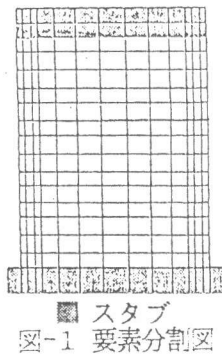
表-1 試験体一覧表

	B-0.73				B-1.10				B-1.46															
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4												
寸法	h/2 (cm)				95.0 * 65.0																			
	柱(幅*せい) (cm)				8.0 * 8.0																			
	壁厚 (cm)				2.5																			
配筋	壁補強筋比(%)				0.26	0.26	0.68	1.19	0.26	0.26	0.68	1.19	0.26	0.26	0.68	1.19								
	柱主筋比(%)				4.0																			
	柱帯筋比(%)				0.5																			
コンクリート	圧縮強度(kg/cm ²)				280.0																			
	引張強度(kg/cm ²)				20.1																			
	初期剛性(kg/cm ²)				2.1*10 ⁸																			
	圧縮強度時歪(≒10 ⁻⁶)				3000.0																			
鉄筋	柱主筋 降伏強度(kg/cm ²)				8600.0																			
	柱主筋 剛性(kg/cm ²)				2.1*10 ⁸																			
	柱帯筋 降伏強度(kg/cm ²)				3500.0																			
	柱帯筋 剛性(kg/cm ²)				2.1*10 ⁸																			
	壁筋 降伏強度(kg/cm ²)				3500.0																			
	壁筋 剛性(kg/cm ²)				2.1*10 ⁸																			
せん断スパン比													0.73	0.73	0.73	0.73	1.10	1.10	1.10	1.10	1.46	1.46	1.46	1.46
軸力(ton)													0.00	5.41	5.41	5.41	0.00	5.41	5.41	5.41	0.00	5.41	5.41	5.41

3. 試験体概要

試験体形状、柱主筋比、コンクリート強度は全試験体で同一とし、パラメータは、曲げモーメント分布、軸力、壁筋比とした。曲げモーメント分布は、試験体頂部に偶力を作用させ、せ

せん断スパンが試験体高さの1/2、3/4、1/1となるような3種類とした。表1に試験体一覧表を、図1に要素分割図を、図2にモーメント分布図を示す。



4. 数値実験結果

全試験体で、柱主筋の降伏をともなわないせん断破壊となった。

(1) 最大耐力

図3に各試験体の最大耐力を示す。

曲げモーメント分布形と壁筋比が同一であれば、軸力の有るものはないものよりも、最大耐力が上昇し、最大耐力時変形が減少した。最大耐力の上昇する割合は、せん断スパンの短いものほど高く、せん断スパン比 $a/D=0.73$ で約15%、 $a/D=1.10$ で約9%、 $a/D=1.46$ で約6%であった。

軸力の大きさ、曲げモーメント分布形が同一であれば、図4に示すように壁筋比の多いものほど最大耐力が上昇している。

軸力の大きさ、壁筋比が同一であれば、せん断スパンの短いものほど最大耐力が上昇している。軸力が有

り、壁筋比の小さい $P_w=0.26\%$ の場合が最も耐力差が大きく、 $a/D=0.73$ と $a/D=1.46$ のもので約11%の差がある。軸力が有る場合、壁筋比の増加にともないせん断スパンの違いによる耐力差は小さくなる。軸力が無い場合には、 $a/D=0.73$ と $a/D=1.46$ のもので約2%と耐力差が小さい。

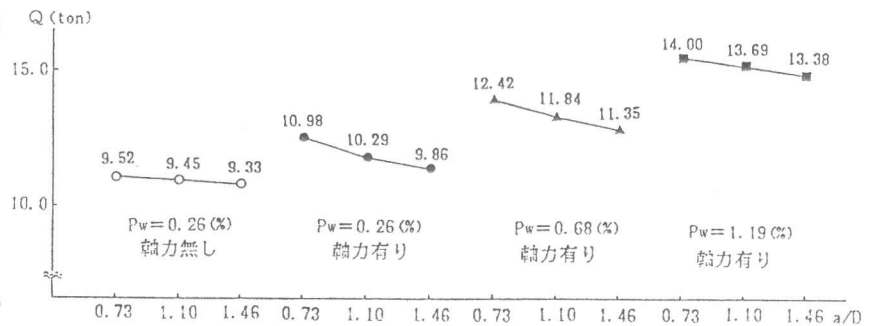


図-3 各試験体の最大耐力

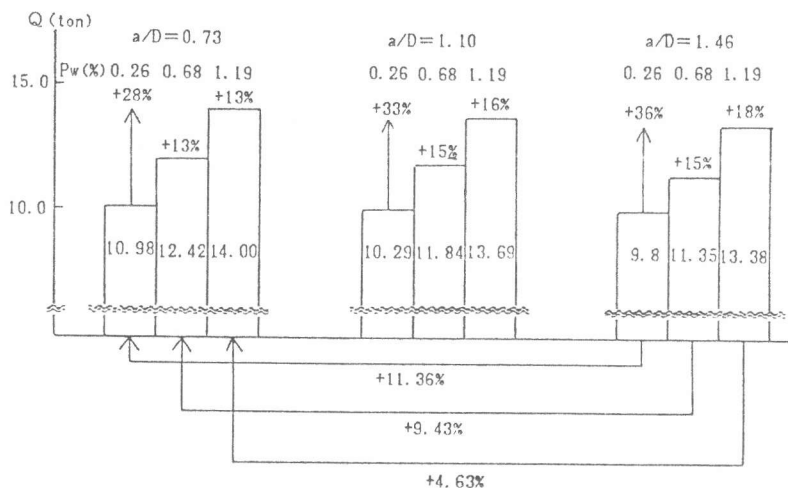


図-4 壁筋比と耐力の関係

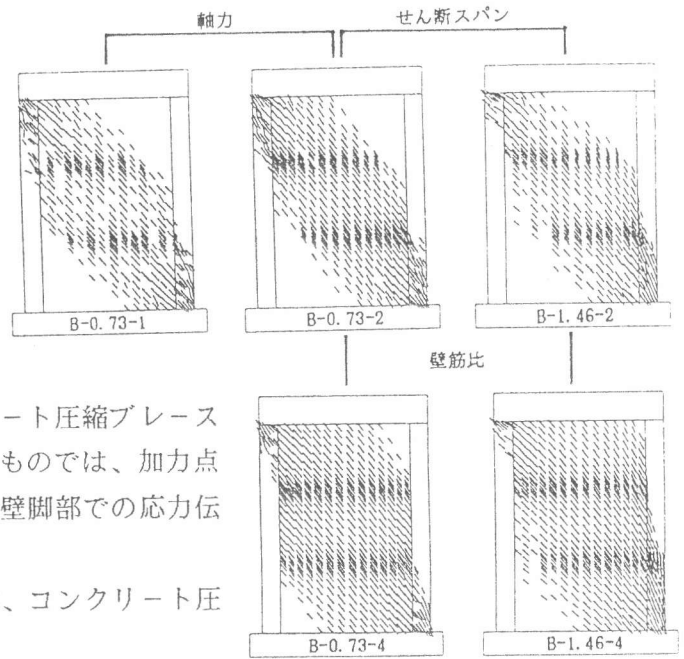
(2) 耐震壁内の力の流れ

図5は、100kg/cm²以上の圧縮主応力度を示したものである。同図から分かるように、軸力の有無、せん断スパン、壁筋比の違いにより壁板内の力の流れ方に違いがみられる。

軸力が無いものは有るものに比べ、各要素での主応力度の角度にばらつきがみられる。

せん断スパンの短いものではコンクリート圧縮ブレースが直線的であるが、せん断スパンの長いものでは、加力点から支点脚部へ向いやや湾曲しており、壁脚部での応力伝達範囲が小さい。

壁筋比の多いものは少ないものに比べ、コンクリート圧縮ブレースの幅が増大している。



5. せん断スパン比と壁の幅高さ比の影響について

壁の幅高さ比が同一で曲げモーメント分布が異なる場合については既に結果を示したが、ここでは、せん断スパン及びせん断スパン比が同一で、壁の幅高さ比が異なる場合について追加計算を行い、耐震壁のせん断スパン比と幅高さ比の影響について検討を加える。

(1) 試験体形状

解析対象とした試験体は、B-0.73-3とB-0.73-5である。図6に示すように、B-0.73-5はB-0.73-3の壁高さを1/2にし、せん断スパンと壁高さを同一にした。なお、壁高さ、加力点高さ以外の諸因子はすべて同一である。

(2) 実験結果及び検討

表2にB-0.73-3とB-0.73-5の最大耐力、最大耐力時変形角を示す。壁高さの低いB-0.73-5は、最大耐力が上昇し最大耐力時変形角が減少していることが分かる。

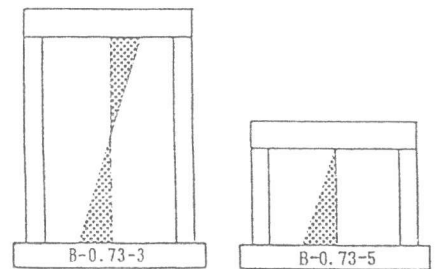


図-6 試験体形状

表-2 最大耐力、最大耐力時変形

	最大耐力 (ton)	最大耐力時変形角 (*10 ³)
B-0.73-3	12.42	6.53
B-0.73-5	16.92	3.04

図7はB-0.73-3とB-0.73-5の100kg/cm²以上の圧縮主応力度を示したものである。同図から分かるように、両試験体で壁板内に形成されているコンクリート圧縮ブレースの形状が明らかに異なっている。

また、幅高さ比が同一でせん断スパンが異なる場合 (B-0.73-3とB-1.46-3) と、せん断スパンが同一で幅高さ比が異なる場合 (B-0.73-3とB-0.73-5) について、最大耐力及び最大耐力時変形を比較すると、最大耐力、最大耐力時変形とも幅高さ比が同一でせん断スパンが異なる場合には、約10%の差であるのに対し、せん断スパンが同一で幅高さ比が異なる場合には、約50%の差となっている。

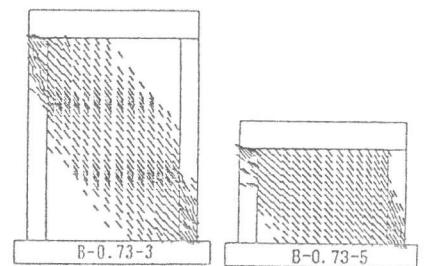


図-7 耐震壁内の力の流れ

以上のことから、次のようにまとめることができる。せん断スパン比が同一でも壁の幅高さ比が異なる場合は、壁板内のコンクリート圧縮ブレースの形状は明かに異なり、最大耐力、最大耐力時変形も大きく異なる。一方、幅高さ比が同一で曲げモーメント分布の相異によりせん断スパン比が異なる場合には、壁板内のコンクリート圧縮ブレースの形状は多少異なっているものの、その傾向は概ね同じであり、最大耐力、最大耐力時変形もそれほど大きく相異しない。つまり、今回対象とした頂部点加力の耐震壁のせん断耐力は、せん断スパン比の影響よりも壁の幅高さ比の影響を強く受けるものである。

6. 既往のせん断耐力算定式との比較

ここでは、現在提案されている耐震壁のせん断耐力算定式のなかで代表的と思われる広沢式、指針式、称原・加藤モデルについて、今回行ったFEM数値実験との比較を行う。

なお、称原・加藤モデルの算定には、文献2)のプログラムを用いた。

(1) 広沢式との比較

図8にFEM数値実験と広沢式との比較を示す。広沢式は全試験体に対し耐力を安全側に評価している。特にB-0.73-5に対して大幅に安全側の値となっており、他の試験体に比べ適合性が悪くなっている。広沢式は、耐震壁の耐力をせん断スパン比をパラメータとして与えている。そのため、B-0.73-2とB-0.73-5に対して同じ計算値を与えることになる。今回の数値実験では、耐震壁の最大耐力はせん断スパンの影響よりも形状の影響が大きい結果となっている。

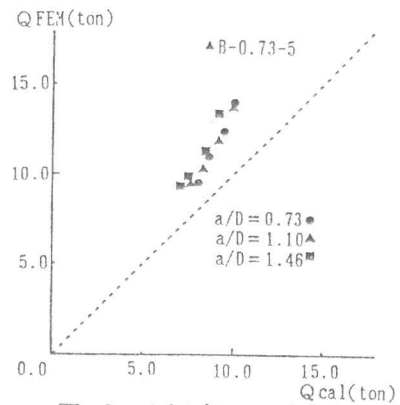


図-8 広沢式との適合性

図9は同一形状、同一壁筋比でのせん断スパン比と耐力の関係を示したものである。同図より広沢式は、その傾向は良く捉えていることが分かる。

(2) 指針式との比較

図10にFEM数値実験と指針式の比較を示す。指針式は全試験体に対し耐力を安全側に評価している。B-0.73-5は他の試験体に比べ適合性が悪い。

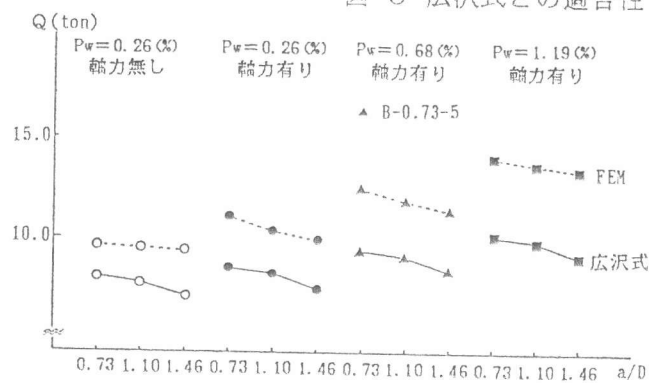


図-9 せん断スパン比と耐力の関係

図11は同一形状、同一壁筋比でのせん断スパン比と耐力の関係を示したものである。指針式では耐震壁の耐力を形状のみにより考慮しているため、同一の形状、壁筋比であれば同一の耐力を与える。そのため、FEM数値実験とはやや異なった傾向となっている。

指針式は、アーチ機構耐力とトラス機構耐力の和により耐力を与える理論式である。そこで、FEM数値実験結果を井上ら³⁾の考えに基づいてアーチ機構耐力とトラス機構耐力に分け比較を行う。なお、指針式におけるアーチ機構、トラス機構と、FEM数値実験結果より分離を行ったアーチ機構、トラス機構の定義には

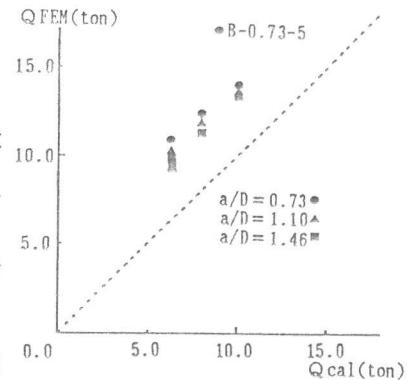


図-10 指針式との適合性

多少の相異点があり、必ずしも直接の比較とはならない。図12

は各機構の負担耐力を示したものである。指針式では、壁筋比の増加にともないアーチ機構耐力が減少し、トラス機構耐力が増加している。しかし、FEM数値実験結果では、壁筋比の増加に関わらずアーチ機構耐力はほぼ一定であり、トラス機構耐力の増加は指針式によるよりも少なく、異なった傾向となっている。

(3) 称原・加藤モデルとの比較

図13にFEM数値実験結果と称原・加藤モデルの比較を示す。他のモデルに比べ適合性が最も良い。B-0.73-5に対しては適合性がやや悪くなっているが、前二式と比べれば適合性の低下はわずかである。

図14は同一形状、同一壁筋比でのせん断スパン比と耐力の関係を示したものである。称原・加藤モデルでは、耐震壁のモーメント分布の影響を耐震壁の上端と下端のモーメント比により考慮している。そのため、耐震壁の形状とモーメント分布を同時に考慮している。しかし、今回計画した試験体のようにせん断破壊（柱主筋の降伏をともなわない）を生じる場合には、耐震壁上下端のモーメント比に関わらず、同一壁筋比であれば同一の耐力を与える。その結果、指針式と同様に、FEM数値実験とはやや異なった傾向となっている。しかし、称原・加藤モデルは、 $a/D=1.46$ のものに対しても、適合性がかなり良い。これは、今回のFEM数値実験では壁筋比が同一でせん断スパンが異なる場合、最も耐力差があるもので約11%であったことによるものである。

称原・加藤モデルも指針式と同様に、耐力をアーチ機構耐力とトラス機構耐力の和として与える。図15は称原・加藤モデルの各機構の負担耐力を示したものである。称原・加藤モデルも指針式と同様に、せん断スパンが同一であれば、壁筋比の増加にともないアーチ

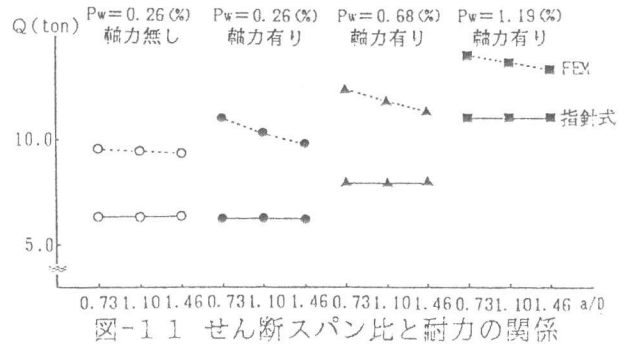


図-1 1 せん断スパン比と耐力の関係

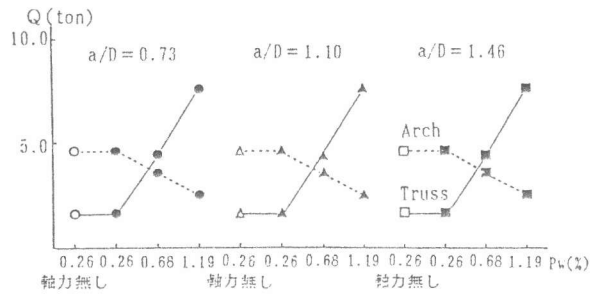


図-1 2 (a) 各機構の負担耐力 (指針式)

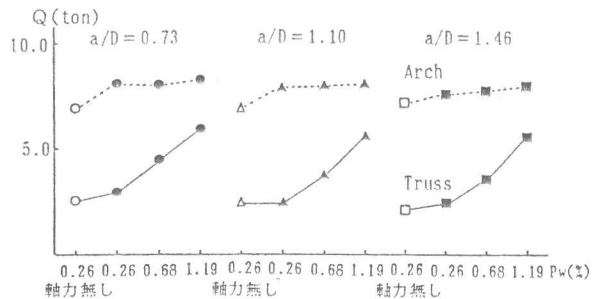


図-1 2 (b) 各機構の負担耐力 (FEM)

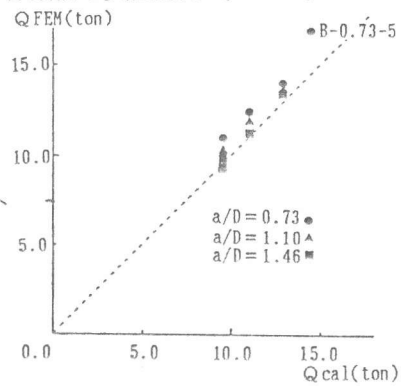


図-1 3 称原・加藤モデルとの適合性

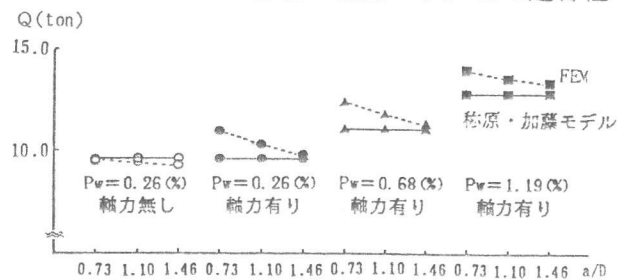


図-1 4 せん断スパン比と耐力の関係

機構耐力が減少し、トラス機構耐力が上昇しFEM数値実験結果とは異なった傾向となっている。指針式に比べ、アーチ機構の負担割合が多くなっている。

7. まとめ

FEM数値実験により、頂部水平力を受ける耐震壁の形状と曲げモーメント分布形がせん断耐力に与える影響について検討を行った。以下に得られた結果を記す。

- 1) 形状、軸力の値、壁筋比が同一で、曲げモーメント分布形（せん断スパン比）が異なる場合、せん断スパン比の影響は少なく、最も耐力差を生じたもので約10%であった。
- 2) 形状、軸力の値、壁筋比が同一で、曲げモーメント分布（せん断スパン）が異なる場合、耐震壁内の力の流れ（コンクリート圧縮ブレース）は、多少の違いはみられるものの概ね同じ傾向であった。
- 3) 軸力の値、壁筋比、せん断スパンが同一で、形状（壁高さ）が異なる場合、耐力差は著しく、本数値例では約50%に達した。
- 4) 軸力の値、壁筋比、せん断スパンが同一で、形状（壁高さ）が異なる場合、耐震壁内の力の流れ（コンクリート圧縮ブレース）は、明かに異なっていた。
- 5) 今回のFEM数値実験では、頂部水平力を受ける耐震壁の耐力は、曲げモーメント分布形（せん断スパン比）の影響よりも、形状（壁高さ）の影響が支配的であると結論できる。広沢式では、耐震壁の耐力をせん断スパン比をパラメータとしており、問題があると考えられる。
- 6) 指針式は、耐震壁の耐力を形状（幅高さ比）をパラメータとして考慮している。今回のFEM数値実験では曲げモーメント分布形（せん断スパン）よりも、形状の影響が大きかったこと、コンクリート圧縮ブレースの形状から、指針式のように耐震壁の耐力を、幅高さにより考慮することは妥当であると考えられる。

[謝辞]

本研究を行うにあたり、明治大学卒論生、中川崇、長野直子、両氏の御協力を得ました。ここに厚く御礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) 白石一郎・狩野芳一・町田亘寛：鉄筋コンクリート造耐震壁の最大せん断耐力に関する一考察、日本建築学会構造系論文報告集、No. 365、PP144-155、1986.7
- 2) RC耐震壁のマクロモデルとFEMマイクロモデルに関するパネルディスカッション、論文集、社団法人日本コンクリート工学協会、Jan.22.1988
- 3) 井上範夫・小鹿紀英・鈴木紀雄・丸田誠：鉄筋コンクリート壁の耐震機構に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、PP385-388、1987

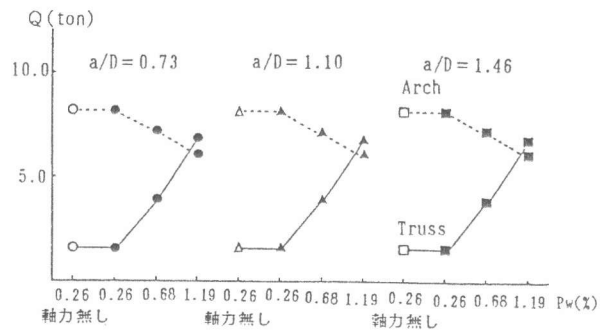


図-15 各機構の負担耐力（称原・加藤モデル）