

論文

[2072] 連層鉄筋コンクリート耐震壁のせん断強度に及ぼす  
中間はりの効果に関する実験的研究

正会員 ○ 高木仁之 (明治大学工学部)

光井滋也 (明治大学大学院)

正会員 狩野芳一 (明治大学工学部)

1. はじめに

連層RC耐震壁の中間はりがせん断耐力に及ぼす効果は、付帯フレームが壁板の斜めひびわれ発生後の拘束要素としていかなる効果を有するかという点にある。ここで、連層RC耐震壁のはりの効果としては、次の3つが考えられる。1) 壁板に生じる圧力場をはり主筋が水平方向に拘束してせん断耐力を高める(はり、柱等におけるせん断補強筋の働き)。2) 耐震壁の主として上下端において、壁板に生じる圧力場を鉛直方向に拘束してせん断耐力を高める。3) 純ラーメン構造のように水平力に対し柱の曲げ変形を拘束し、フレームの壁板圧力場に対する拘束効果を高める。しかし耐震壁の既往のせん断耐力式は、はりを持つものに対してはりを無視した状態で導いているため、はりの効果を評価するためには十分ではない。また中間はりの設計を可能にしたものに富井、江崎の研究がある。これは、最大せん断耐力時における中間はり軸方向力を計算し、必要な中間はり軸方向筋を算定したもので、破壊を各層にとどめるという立場に立脚した考えに基づき提案した式で、耐震壁のせん断耐力は各層ごとに評価される。

$$\text{中間はり軸方向引張力算定式 (文献1)} \quad N_{bD} = -\eta \sum 1/2th(Q_r/tl - p_w \cdot f_t) \quad (1)$$

$$Q_r = 1.25(2.9 \sqrt{F_c} + 3400 \cdot p_w) \cdot tl$$

$p_w \cdot f_t = 30 \text{ kg/cm}^2$ をこえるときは、 $p_w \cdot f_t = 0.4 p_w \cdot f_t + 18$ とする。

$$\text{富井、江崎スリップ破壊耐力式} \quad Q_u = (2.4 \sqrt{F_c + 3400 p_w}) \cdot tl \quad (2)$$

$$\text{修正荒川式} \quad Q_u = (0.0679 p_t^{0.23} (F_c + 180) / \sqrt{M/QD + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{uw} + 0.1 \sigma_o}) \cdot b_o \cdot j \quad (3)$$

この提案式から言えることは、必要中間はり軸方向筋を確保すれば、せん断耐力は各層のスリップ破壊耐力(2)式により決定され、補強筋による耐力上昇は壁筋比のみの効果として表現される。しかしながら筆者らの研究<sup>(文献2)</sup>によれば、はり主筋を壁横筋と同様のせん断補強筋として考慮した有効横筋比という概念に基づき、修正荒川式(3)式に適用した結果非常によく耐力の傾向をとらえたという結果がある。しかしこれは(1)式を満たしていない場合であり、はりが十分剛でスリップ破壊を起こす場合には、その効果は明らかなものとはなっていない。また、せん断補強筋による耐力上昇は、(2)式では全補強耐力と考えられるが、(3)式では平方根耐力で両者いずれの考え方をとるべきかについても確かめられていない。

本論は、はり筋が耐震壁の破壊機構に及ぼす挙動をとらえ、既往のせん断耐力式を使用する場合のはり筋の効果を実験的に明らかにしようとしたものである。

2. 実験計画

2.1 試験体概要: 試験体は、3層1スパン1/10縮小モデルで、シアスパン比を加力装置の可能な範囲でできるだけ大きくとりM/QD=1.3とし、せん断破壊先行型の破壊モードとして計画した

7体である。試験体の寸法を図1に、並びに試験体の配筋の概要を表1に示した。

試験体の寸法は、柱が8×8cmの正方形断面、はり幅5cm、はりせい7cm、壁厚が、2.5cm、柱間距離が65cmである。試験体の変動因子は、はり筋比、壁筋比で、それらは以下のように計画した。はり筋比は壁筋比を $p_w=0.7\%$ と固定とし、(1)式において式中の $Q_r$ 値の代わりにスリップ破壊耐力式値( $Q_a$ )を使用したときに得られる $N_{bd}$ とほぼ等しいはり主筋比 $p_{t(c)}=1.6\%$ (B4シリーズのB4W07基準試験体)、 $Q_a$ 値に安全率を乗じた $Q_r$ 値を使用したときに得られる $N_{bd}$

値とほぼ等しいはり主筋比 $p_{t(c)}=2.4\%$ (B6W07試験体)、 $Q_r$ 値による必要な $N_{bd}$ に対して十分余裕のある $p_{t(c)}=3.2\%$ (B8シリーズのB8W07基準試験体)、3段階とした。壁筋比は、B4シリーズ、B8シリーズ共に $p_w=0.7\%$ を基準とし、それから増減させ $p_w=0.3\%, 0.7\%, 1.2\%$ の3段階に変動した。また、B4W12, B6W07, B8W02試験体では、はり筋を壁横筋と同様のせん断補強筋と考えた有効横筋比 $p_{wh}$ は、ほぼ等しく $p_{wh}=2\%$ となっている。

2.2 使用材料の性質： 使用鉄筋は、柱主筋にはSD80相当の高強度鉄筋D6を使用し、はり主筋には、4φ、壁筋には、2.6φ、帯筋、中間はりのあばら筋には、2φのSR30相当の鉄線を使用した。尚これらの使用鉄筋は、明瞭な降伏点を持つように焼鈍している。使用鉄筋の性質を表2に示した。また、使用モルタルの性質を表3に示した。圧縮強度は、10φcm×20cmのシリンダーで製作し、試験体と同一条件で養生したそれぞれの試験体の実験当日の強度である。また、引張強度は割裂試験より求めた。

2.3 加力方法： 水平力は、試験体を反力フレームに取り付け、頂部1点加力の片持ばり形式により正負繰返し加力した。また、鉛直荷重は、全軸方向力5.41ton(N(全軸力)/ $A_w$ (全断面面積))= $\sigma_o=20\text{kg/cm}^2$ )を両側の2本の柱に2等分し、実験中この値を一定に保持した。

荷重履歴は、試験体頂部の水平変位計の値を壁脚面から加力心までの高さで除した値を頂部部材角Rと定義し、頂部部材角Rを基準とし、 $R=1/1000, 1/400, 1/200, 1/100(\text{rad})$ でそれぞれ正負1

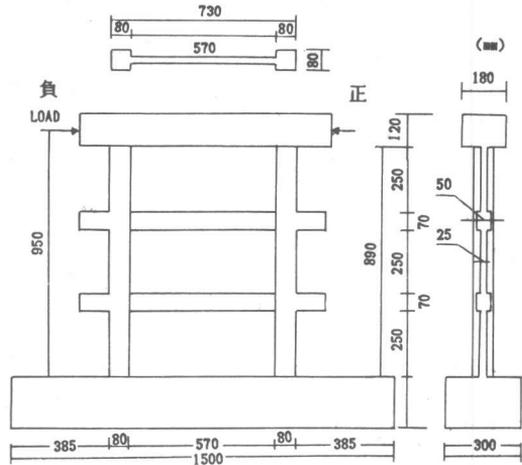


図1 試験体の寸法

表1 試験体の配筋概要

試験体名	柱		梁			壁		
	寸法 BxD	主筋 帯筋	寸法 BxD	主筋	帯筋	寸法 h', l', t	縦筋 横筋	
B4-W02	8x8 (cm)  P <sub>w</sub> =4 (%)	4-2φ @ 30	5x7 (cm)	4-4φ P <sub>t</sub> =1.6 (%)	4-2φ @ 50	壁内法高 h'=25 (cm)	2.6φ085 0.28(X) 2.6φ031 0.67(X) (1.12%)	2.6φ085 0.25(X) 2.6φ031 0.67(X) (1.43%)
B4-W07						壁内法高 h'=25 (cm)	2.6φ031 0.67(X) (1.43%)	2.6φ031 0.67(X) (1.43%)
B4-W12						壁内法高 h'=25 (cm)	2.6φ018 1.18(X) (1.19%)	2.6φ018 1.19(X) (1.90%)
B6-W07						壁内法長 l'=57 (cm)	2.6φ031 0.67(X) (1.85%)	2.6φ031 0.68(X) (1.85%)
B6-W02						壁 t=2.5 (cm)	2.6φ085 0.28(X) (2.02%)	2.6φ085 0.25(X) (2.02%)
B6-W07						壁 t=2.5 (cm)	2.6φ031 0.67(X) (2.38%)	2.6φ031 0.68(X) (2.38%)
B6-W07						壁 t=2.5 (cm)	2.6φ018 1.18(X) (2.81%)	2.6φ018 1.19(X) (2.81%)
B8-W02						壁 t=2.5 (cm)	2.6φ031 0.67(X) (2.38%)	2.6φ031 0.68(X) (2.38%)
B8-W07						壁 t=2.5 (cm)	2.6φ018 1.18(X) (2.81%)	2.6φ018 1.19(X) (2.81%)

☆ 壁横筋 () 内は、有効横筋比

表2 鉄筋の性質

	降伏強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
2 φ	3740	4540
2.6 φ	3490	4350
4 φ	2980	3810
D 6	8630	8680

表3 モルタルの性質

試験体名	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
B4-W02	271.8	24.2
B4-W07	285.8	22.9
B4-W12	282.8	27.7
B6-W07	282.2	28.1
B8-W02	272.1	22.9
B8-W07	282.0	24.8
B8-W12	291.1	27.3

回、その後正加力で $R=1/50(\text{rad})$ まで変形制御で加力し終了した。

### 3. 実験結果

実験結果として、諸現象発生荷重と頂部部材角を表4に、荷重-変形曲線の包絡線を図2に示し、また破壊状況(部材角 $1/50$ )を図3に示した。

各試験体の破壊経過は、B4W02試験体では、部材角 $1/400$ において3層壁板から1層壁板にかけてせん断きれつがはりを貫通し、以後主せん断きれつとなり、きれつ幅を増した。その後、1層圧縮側壁板に圧壊が始まり、壁板の主せん断きれつが両側の柱に抜け大きくずれ全層破壊に至った。B4W07試験体では、正、負加力で破壊状況は異なった。正加力では、B4W02と同様に3層壁板から1層壁板にかけて主せん断きれつが発生し、全層破壊の兆しが観察されたが、負加力では、主せん断きれつが現れず、3層引張側の壁板に圧壊の兆候が現れ、その後、3層部の壁板圧壊及び3層部両側柱のせん断破壊が同時に生じ3層部の単層破壊に至った。

次に、上記以外の試験体では、各層に生じたせん断きれつは特に際だったきれつ幅のものではなく、壁板全体にわたり発生した。また、はりに生じたきれつは壁板から直接つながったのではなく独立して発生する傾向を示した。その後、1層圧縮側柱脚部にせん断きれつが発生し、圧縮側1層壁板で圧壊が進行し、1層壁板の広域圧壊となり同時に1層両側柱が顕著なせん断破壊となり大きく水平にずれ1層部の単層破壊に至った。また、軸力の保持は困難なものとなった。

### 4. 実験結果の検討

#### 4.1 柱の挙動

1) 柱の伸縮歪度による検討: 全試験体、ほぼ最大耐力に至った $1/100\text{rad}$ 時において、引張側柱の内、外側主筋に貼付した歪ゲージより求めた軸方向の伸縮分布を図4に示した。B4シリーズでは、2層はりの上下位置での歪度に注目すると、上部での歪度が大幅に減少している。しかし、それは1層はり位置では見られない。これは2層はりと同様に引張側柱の交点から圧縮柱脚部に向けて壁板の圧縮斜材が構成され、また引張柱は引張弦材となりトラス化したためと推測される。しかし、壁筋が増すにつれて引張側柱の歪度が全体的に傾斜を持ってくることから、上記のようなトラス化が不明瞭となり歪分

表4 実験結果

試験体名	正負	柱せん断初亀裂		最大耐力		*壁板圧壊の兆候	
		荷重	部材角	荷重	部材角	荷重	部材角
1 B4-W02	+	11.57	7.595	12.87	10.012	12.87	10.012
	-	12.06	7.572	-	-	(12.53)	8.408
2 B4-W07	+	11.85	8.727	13.07	9.908	(12.67)	8.388
	-	12.02	8.022	-	-	(12.02)	8.022
3 B4-W12	+	13.57	8.545	14.42	10.148	14.42	10.148
	-	13.63	9.293	-	-	13.63	9.293
4 B8-W07	+	12.04	7.777	14.12	13.726	13.29	9.491
	-	12.31	8.428	-	-	(13.47)	10.028
5 B8-W02	+	13.43	9.386	-	-	13.65	10.077
	-	12.98	8.497	14.05	10.121	(12.99)	8.497
6 B8-W07	+	12.19	7.678	14.58	12.118	(12.98)	8.531
	-	12.44	7.605	-	-	13.11	8.434
7 B8-W12	+	13.84	8.486	14.35	10.081	14.12	9.315
	-	-	-	-	-	-	-

単位  
 ・荷重 : ton  
 ・部材角 :  $\times 10^{-3}$  rad  
 \*( )内は引張側で生じたもの

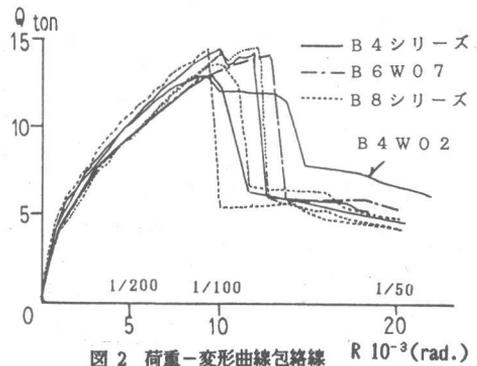


図2 荷重-変形曲線包絡線  $R: 10^{-3}(\text{rad.})$

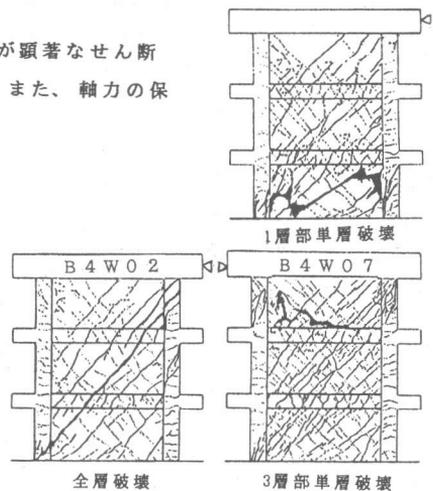


図3 破壊状況 (1/50時)

布は、はり曲げ理論に見られるような曲げモーメント分布に相似した傾向（はり機構）を示した。B 6, B 8シリーズでは、1,2層ともはりの上部で歪度が減少しており、各層毎に壁板の圧縮斜材が構成され、柱の歪度を変化させたと推察される。しかし、壁筋比が増すにつれて1層はり上下位置で柱の歪度に差がなくなり、B 4シリーズ同様、はり機構へと変化する。

2) 柱の曲率による検討:  $1/100\text{rad}$

時において、柱主筋の歪度より高さ方向の曲率分布を求め図5に示した。全試験体共に圧縮柱脚部は、壁板の圧縮プレースの力を曲げ抵抗によって受け止め、大きな曲率となっている。また、はり位置では引張側柱の曲率が変化しており、はりによる拘束が認められる。梁筋比による比較では、破壊モードの異なるB4W02

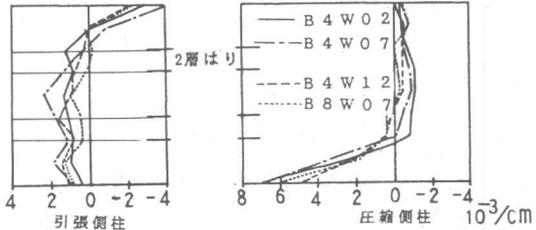


図5 柱の曲率分布

試験体を除いて、引張側柱の曲率は、はり主筋の多い方が小さく抑えられている。B4W02試験体は、壁筋が少ない上に、はり筋による水平拘束が弱いため圧縮柱を押し広げ、圧縮側柱の曲率を大きくしている。また、引張側柱の曲率は、全体的にゆるやかに曲げられている。壁筋による比較では、B 4シリーズは、B4W07試験体に比べB4W12試験体の方が、壁筋による拘束が強いために、圧縮側、引張側柱ともに曲率を小さく抑えている。またB 8シリーズは、はりの拘束が十分強いために、壁筋を増しても曲率はあまり変化していなかった。

4. 2 はりの挙動

1) はりの伸縮歪度による検討:  $1/100\text{rad}$ 時において、はりの上端、下端主筋に貼付した歪ゲージより伸縮歪を求め図6に示した。全体的な傾向として壁筋が増すにしたがって、はり主筋の伸びが一様に均されてくる傾向がある。また、同じ壁筋量で見ると、B 4シリーズよりもB 8シリーズの方が、伸びが小さく抑えられている。また、B 4シリーズでは、全試験体、降伏歪度を越えており、はり主筋は降伏に達しているが、B 6, B 8シリーズでは、降伏歪度以下であり降伏には達していない。

2) はりの曲率による検討:  $1/100\text{rad}$ 時において、はりの上端、下端主筋に貼付した歪ゲージより曲率分布を求め図7に示した。B 6, B 8シリーズでは、1,2層のはり両端で曲率が反転しており水平力を受けるラーメン構造のはり部材としての挙動を示している。

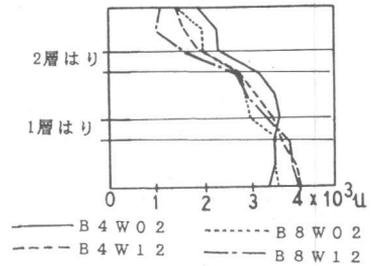


図4 引張側柱の伸縮歪度分布

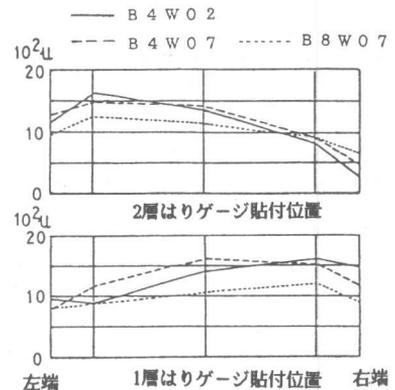


図6 はりの伸縮分布

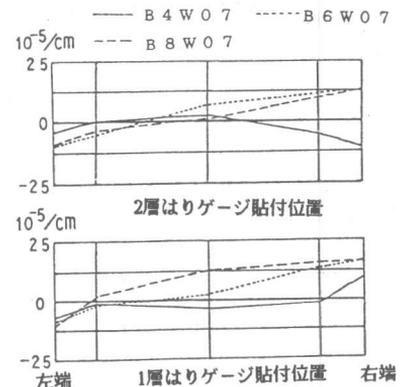


図7 はりの曲率分布

B4シリーズでは、破壊モードの異なったB4W02試験体を除いて、1層はりは上記と同様にラーメン的挙動をしているが、2層はりでは認められない。また、B4W02試験体は、1,2層ともその挙動は認められない。全体的な傾向としてラーメン的挙動は認められるが、はりの上端、下端主筋ともに引張歪度分布をしており引張材としての作用が強い。

4.3 中間はり軸方向力に関する検討：富井、江崎による中間はり必要軸方向力、及び各試験体の中間はり軸方向耐力、実際に中間はりに作用した軸方向力を表5に示した。

試験体の中間はり軸方向耐力 表5 中間はりの軸方向力 (kg)

	(1)式における中間梁必要軸力 $N_{0d}$	各試験体の中間梁軸方向耐力	良否	実際に中間梁に作用した軸方向力	良否
B4W02	3910	2990	否	2990	—
B4W07	4110	2990	否	2990	—
B4W12	4790	2990	否	2990	—
B6W07	4110	4485	良	4145	否
B8W02	3910	5980	良	4770	否
B8W07	4110	5980	良	5020	否
B8W12	4790	5980	良	4020	良

このことから、破壊モードをB4シリーズでは全層、B6、B8シリーズでは、単層破壊に制御していると言えるが、実際に中間はりに作用した軸方向力を見ると、富井、江崎式による中間はり必要軸方向力を上回っているものがある。

#### 4.4 最大耐力に関する検討

各試験体の実験時最大耐力、並びに富井、江崎式(スリップ破壊耐力式)及び修正荒川式による計算値を表6に示した。また、その結果を壁筋比及び有効横筋比に対応して図8、図9に示した。

1) 実験値に関する検討：図8より壁筋比が同じであっても、はり筋比の高い試験体でせん断耐力は高くなっており、したがってはり主筋が壁のせん断補強筋として有効なことは明かであるが、しかし壁筋比が高い試験体(B4W12, B8W12)では、その差はほとんどない。また図9より実験値は、有効横筋比 $p_{wh}=1.8\%$ ( $p_{wh} \cdot \sigma_{wh}=62\text{kg/cm}^2$ )まではせん断補強筋による耐力上昇が見られるが、それ以上では耐力は頭打ちとなり耐力上昇は見られず、せん断補強限界が認められる。有効横筋比が同じ試験体(B4W12, B6W07, B8W02)では、ほぼ等しい耐力となっている。

2) 富井、江崎式に関する検討：図8より計算値によるせん断耐力は、壁筋比の増加に伴い直線勾配で一樣に増加している。B4シリーズの実験値は、壁筋比の増加に伴い計算値より緩やかな勾配で高い値を示し、壁筋比の高い( $p_w=1.2\%$ )ところで計算値は実験値にほぼ一致している。また破壊モードは、B4W02試験体では、せん断きれつが中間はりを貫通し全層破壊に至っており理論通りスリップ破壊とはなっていない。B8シリーズは、スリップ破壊耐力に安全率を乗じた必要はり軸方向筋より十分剛なものとして設計した試験体で各層のスリップ破壊を狙ったものであるが、実験値のグラフの傾向は、壁筋比によるせん断耐力の差がほとんどなく耐力に頭打ちが現れている。次に、壁筋比が同一ではり主筋比の異なる試験体(B4W07, B6W07, B8W07)について見ると、計算値では同一となるはずのせん断耐力に差が生じている。すなわちはり主筋比が多くなるに従って耐力の上昇が見られる。また有効横筋比が同一で配筋が異なる試験体(B4W12, B6W07, B8W02)について見ると、計算値は壁筋比が大きく異なるため、せん断耐力に差が生じるはずであるが、実験値はほぼ等しい耐力となっている。

以上より計算値は実験値に対して安全側にとらえられているが、実験値のせん断補強筋による耐力の傾向を明確にとらえていない。

3) 修正荒川式に関する検討： 図8よりせん断補強筋にはり筋を考慮していない計算値（原式）によるせん断耐力は、実験値に対して低い値となっており、はり筋比の高いものでその差はより大きなものとなっている。しかし図9より有効横筋比を用いた計算値と実験値を比較すると、計算値は実験値よりも低いが、実耐力値に近くなっている。壁筋比が同一ではり主筋比の異なる試験体について見ると、それらの実験値の耐力差は、有効横筋比を用いた計算値で適合性が認められる。また、有効横筋比が同一の試験体においても、それらの実験値はほぼ等しく適合性が認められる。

以上より有効横筋比を用いた計算値は、はり筋を考慮しない（原式）より実耐力に近い値となり、せん断補強筋による耐力上昇傾向もよくとらえている。

5. まとめ

本実験での破壊性状及びせん断耐力に関する結論を下記に示す。

(1) 破壊性状について： 中間はり筋の効果は、ラーメン材的挙動も示しているものの引張材としての働きが強い。また引張側柱軸方向歪分布より、壁筋及びはり筋が多くなると、壁は全体としてはり機構としての挙動に近くなり、少ない場合は対角線にブレースを有する、ブレース構造としての挙動に近づき、はり筋が壁筋同様のせん断補強効果として表われている。

(2) せん断耐力について： 連層耐震壁において富井、江崎によるスリップ耐力計算式は、せん断補強筋による効果を適切に評価していない。修正荒川式（原式）による計算値は、実験値に対し低く評価するが、有効横筋比を用いて拡張して適用すると原式より実耐力に近づき適合性が認められた。

- 文献(1)：壁板周辺の柱およびはりのせん断破壊を防止または抑制した耐震壁の構造計算法  
日本建築学会 建築雑誌 1987.7 pp117-119 RC構造委員会
- 文献(2)：せん断破壊先行型耐震壁のせん断強度に及ぼす中間梁の効果に関する実験的研究  
日本建築学会講演梗概集 昭和62年近畿大会 pp243-246 高木仁之 茂呂田雅幸 狩野芳一

表6 最大耐力

試験体名	壁筋比 $P_w$ (%)	有効横筋比 $P_{wh}$ (%)	せん断終局耐力			実耐力 (kg)
			修正荒川式 (kg)		富井式 (kg)	
			原式 ( $P_w$ 使用)	拡張適用 ( $P_{wh}$ 使用)		
B4-V02	0.25	1.12	7778	8241	7907	12870
B4-V07	0.88	1.48	8730	8741	10283	13070
B4-V12	1.19	1.90	9511	10248	13100	14420
B8-V07	0.88	1.93	8730	10198	10283	14120
B8-V02	0.25	2.02	7778	10216	7907	14050
B8-V07	0.88	2.38	8730	10803	10283	14580
B8-V12	1.19	2.81	9511	11024	13100	14350

(謝辞)

本研究に際し、終始ご協力頂きました、卒論生斉藤聖司君、田中浩一君、新田隆雄君に感謝の意を表します。

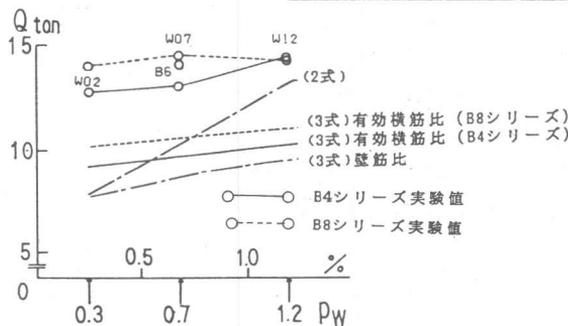


図8 最大耐力-壁筋比

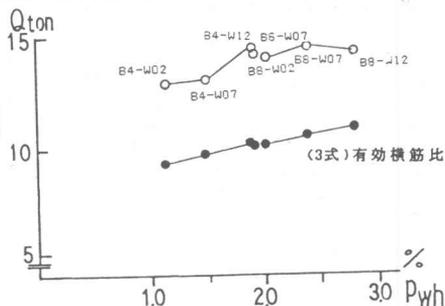


図9 最大耐力-有効横筋比