

論文 鋼板およびCFRPを用いて補強されたSRC柱の耐力と変形性能

宮内 靖昌*1・東端 泰夫*1・毛井 崇博*1・椿 英顯*2

要旨：鋼板巻きあるいは炭素繊維（CF）シート巻きにより補修・補強された十字形，H形および帯板形式の鉄骨を内蔵する SRC 柱の曲げ破壊性状，せん断破壊性状を実験により把握し，耐力および変形性能などについて検討した。SRC 柱の最大耐力は，鋼板およびCF シート巻きにより増大し，提案した計算式を用いて算定できることが明らかとなった。

キーワード：SRC柱，補修・補強，鋼板巻き，炭素繊維シート巻き，最大耐力

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート（以下，SRC と略す）造柱に鋼板巻きまたは炭素繊維（CF）シート巻きを行い，地震被害を受けた建物の補修，あるいは既存建物の耐震性能を増大させるための補強が行われている。本研究では，表-1 に示す3つのシリーズの実験を行い，鋼板巻きあるいはCF シート巻きされたSRC柱の最大耐力および変形性能などを検討した。

2. 実験シリーズI

2.1 実験方法

表-2 に試験体の一覧を示す。試験体は3体であり，柱頭柱脚1D（D：柱せい）の範囲を鋼板巻きされたSRC柱が，45°方向にせん断力を受けた場合の耐力および変形性能を検討することを目的として行ったものである。また，あらかじめせん断力を加えてひび割れを生じさせ，残留変形を残したまま柱頭柱脚に鋼板を巻き付けたSRC柱の補修効果もあわせて検討した。

表-1 実験計画

シリーズ	M/QD	柱断面	鉄骨形式	加力方向	補強方法
I	2.2	35 cm	十字形	45°	鋼板巻き
II	1.3	x 35 cm	十字形，H形	0°，45°	鋼板巻き
III	1.3		帯板，H形	0°	CFシート巻き

M/QD：せん断スパン比

表-2 試験体一覧（シリーズI）

試験体名	補強方法
MC45-C	補強なし，最終破壊後鋼板巻き
MC45-S	あらかじめ鋼板巻き補強
MC45-R	補強なし，R=1/100 rad. の残留変形を与えた後，鋼板巻き

- ・断面 BxD=35x35 cm，柱長さ h=155 cm
- ・鉄骨断面 H-230x75x4.5x9，鋼板 PL-2.3
- ・柱主筋 12-D10（引張鉄筋比 Pt=0.35%）
- ・帯筋 2-D6@35（帯筋比 Pw=0.52%）

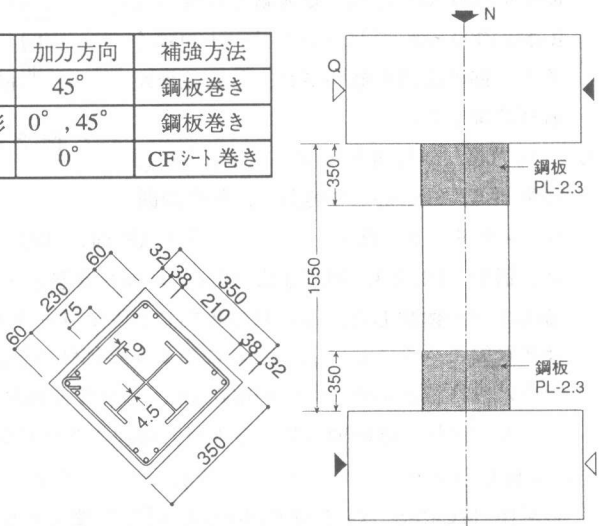


図-1 試験体の断面・形状（シリーズI）

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 生産研究開発部 (正会員)

*2 (株)竹中工務店 設計部 構造課

表-3 使用材料強度 (シリーズ I)

コンクリート		鋼材	
	圧縮強度 (N/mm ²)	板厚 (mm)	降伏応力度 (N/mm ²)
柱コンクリート	29.0	PL-9	8.65
補修コンクリート	32.3 *	PL-4.5	4.25
充填モルタル	55.0 *	PL-2.3	2.09
* : 試験体 MC45-C, MC45-R		D10	—
		D6	—

図-1 に試験体の断面・形状を示す。試験体は曲げ破壊が先行するように計画した。表-3 に試験体に用いた材料の強度試験結果を示す。加力は、柱軸力を一定にして、逆対称の正負繰返しせん断力を加力した。

2.2 実験結果

各試験体の部材角 $R=40/1000$ rad. 時における破壊状況および荷重-変位曲線を図-2 に示す。

(1) 鋼板巻きのない試験体 MC45-C は、柱頭柱脚に曲げ、曲げせん断ひび割れが発生し、柱全長にわたってフランジのかぶりコンクリート部にせん断ひび割れが発生した。部材角 $R=10/1000$ rad. 時には柱頭柱脚にコンクリートの圧壊がみられ、 $R=15/1000$ rad. 付近で最大耐力に達した。 $R=50/1000$ rad. ではコンクリートのはく落や主筋の破断も観察され、柱頭柱脚が曲げ破壊した。

(2) 加力後、部材角をほぼ0に戻し、柱頭柱脚 1 D (35cm) の範囲で、鉄骨周囲

のコンクリートを除去し、フレア溶接 (片面, 10d) により破断した主筋および帯筋の修復を行い、鋼板 (PL-2.3, 内法寸法 39 x 39 cm) を巻き付けた。鋼板はコの字形に加工したものを現場溶接で一体化した。さらに鋼板内にコンクリートを打設し、既存コンクリートとの継ぎ目には無収縮モルタルを注入した。このような補修の後、正負繰返しせん断力を再加力した。図中に包絡線を示す。 $R=50/1000$ rad. の変位を経験したにもかかわらず、補修後の剛性は補修前の初期剛性とほぼ同等に、最大耐力は約 1.2 倍になり、変形性能も大きく改善された。

(3) 鋼板を型枠としてコンクリートを打設し、あらかじめ柱頭柱脚 1 D の範囲に鋼板を巻き付けた試験体 MC45-S は、 $R=17/1000$ rad. 付近で最大耐力に達した。その後変位の増大に伴い、柱端部で鋼板に座屈が生じ、鋼板巻き部分に曲げ降伏ヒンジが形成された。最大耐力は、無補強の試験体 MC45-C (補修前) の約 1.15 倍に増大した。

(4) 鋼板巻きなしの状態 で $R=22/1000, -4/1000$ rad. まで正負漸増繰返しにせん断力を加えた試

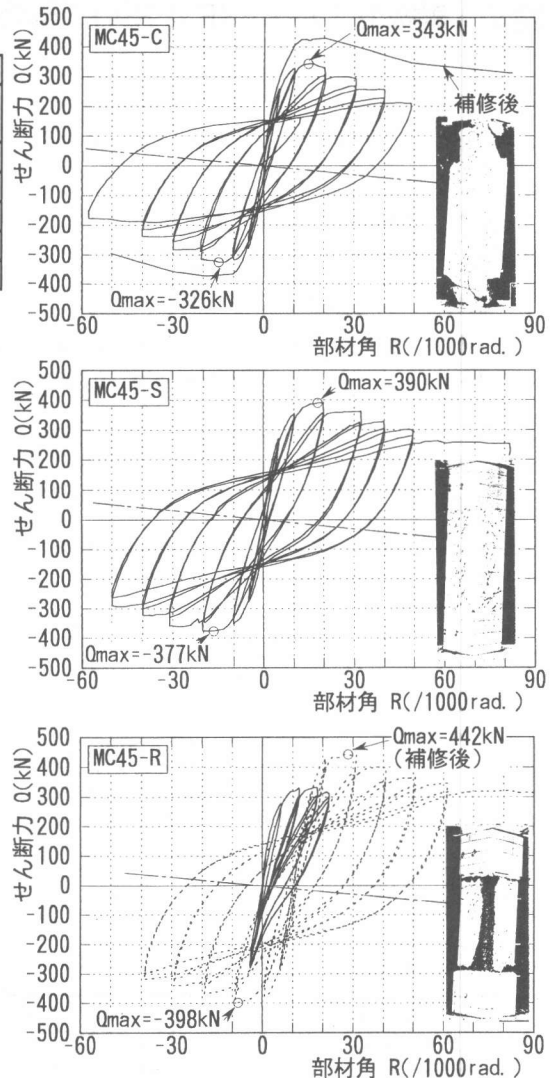


図-2 破壊状況および荷重-変位曲線 (シリーズ I)

表-4 試験体一覧 (シリーズII)

試験体名	鉄骨形状	帯筋	加力方向	補強方法
SC45-C	十字形	2-D6@150	45°	補強なし
SC45-S	十字形	なし	45°	鋼板巻き
SH00-S	H形	なし	0°	鋼板巻き

表-5 使用材料強度

コンクリート	鋼材 (PL-12)
圧縮強度 (N/mm ²)	降伏応力度 (N/mm ²)
31.0	260

- (共通事項)
- ・ 柱断面 BxD=35x35 cm
 - ・ 柱長さ h=90 cm
 - ・ 鉄骨断面 H-230x75x4.5x12
 - ・ 主筋 12-D10

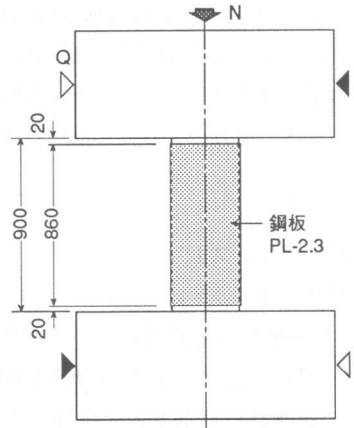


図-3 試験体の形状 (シリーズII)

験体 MC45-R は、この時点までのひび割れ経過は MC45-C とほぼ同様であった。(5) 加力後、MC45-C と同様な手順で鋼板巻き補修した。なお主筋、帯筋に損傷はなかったためそのままとした。その後再加力したが、変位の増大に伴い、主筋のかぶりコンクリートのはく落、鋼板の座屈、鋼板巻きとの境界部でのコンクリート圧壊が生じた。荷重-変位曲線を図中の破線で示す。R=10/1000 rad. の残留変形を残したまま補修したのにもかかわらず、剛性は補修前の初期剛性とほぼ同等になり、最大耐力は 1.34 倍に増大した。

3. 実験シリーズII

3.1 実験方法

表-4 に試験体の一覧を示す。シリーズII は、柱全長にわたり鋼板巻き補強された SRC 柱のせん断耐力および破壊性状を検討することを目的として行ったものである。

図-3 に試験体の形状を示す。柱断面、鉄骨断面、主筋などはシリーズ I と同じである。試験体はせん断破壊が先行するように計画した。表-5 にシリーズ I と異なる材料のみの強度を示す。なお、鋼板巻きの試験体は、鋼板を型枠としてコンクリートを打設した。

3.2 実験結果

図-4 に各試験体の荷重-変位曲線を示す。

(1) 鋼板巻き補強した試験体 SC45-S (45°)

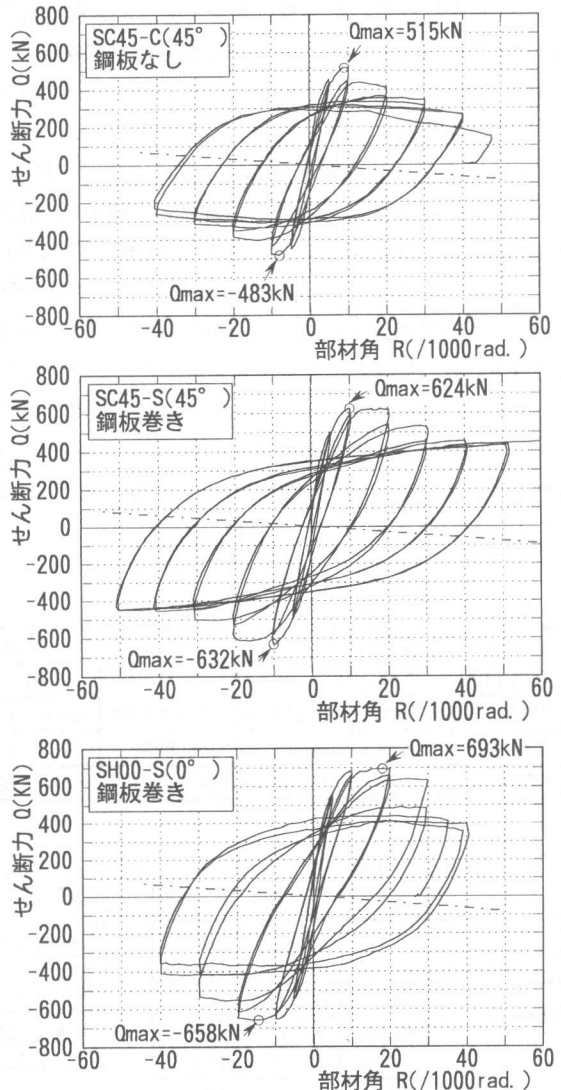


図-4 荷重-変位曲線 (シリーズII)

加力)は、補強のない試験体 SC45-C に比べて、せん断耐力および変形性能が増大した。

- (2) 鋼板巻きした SRC 柱の最大耐力は、0° 方向に加力した試験体 SH00-S が、45° 加力した試験体より若干大きくなった。これに対して、変形性能は 45° 加力の試験体の方が大きくなった。これは 45° 加力の試験体の鉄骨は十字形であり、軸力保持性能が H 形の場合より優れていたためと考えられる。

4. 実験シリーズ III

4.1 実験方法

表-6 に試験体の一覧を示す。本実験は、帯板形式および H 形鋼を内蔵する SRC 柱を対象とし、CF シート巻きによるせん断補強効果を検討することを目的として行ったものである。

図-5 に試験体の断面および帯板形式の鉄骨を内蔵する試験体の形状・配筋を示す。試験体は補強後もせん断破壊が先行するようにした。断面の隅角部は CF シート巻きのため、半径 $r=30\text{ mm}$ の面取りを行った。鉄骨は所定のプレートを用いて溶接組立して製作した。CF シートは 20 タイプ（炭素繊維重量 200 g/m^2 ）のものを使用し、層数を多く巻き付けた。CF シートは繊維が帯筋方向になるように巻き付け、繊維方向の重ね長さは 10 cm とした。表-7 に材料強度を示す。

4.2 実験結果

図-6 に各試験体の荷重-変位曲線および試験体 C21-OF0 の部材角 $R=20/1000\text{ rad}$ 時のひび割れ状況を、図-7 に帯板鉄骨の試験体の包絡線を比較して示す。

- (1) CF シート巻きのない試験体 C21-OF0（帯板形式）は、曲げひび割れの発生後、対角線方向のせん断ひび割れ、柱主筋の 2 段筋に沿った付着ひび割れが発生、進展した。部材角 $R=5/1000\text{ rad}$ 時に最大耐力に達し、最終的にはせん断付着破壊した。
- (2) CF シート巻きによる補強を行った試験体（帯板形式）は、補強量が多くなるに従い、最大耐力および最大耐力時の部材角が大きくなり、変形性能は増大した。 $R=20/1000\text{ rad}$ 付近から CF シートの繊維方向に割れが発生し、最終的には柱断面の隅角部で CF シートが破断した。
- (3) CF シートを巻き付けてもせん断破壊が先行する H 形鋼内蔵 SRC 柱は、部材角 $R=80/1000\text{ rad}$ まで紡錘形の安定した履歴性状を示した。

表-6 試験体一覧 (シリーズ III)

試験体名	鉄骨形式	フランジ	ウェブ	補強方法
C21-OF0	帯板	PL-12 x 80	PL-4.5 x 50 @80	補強なし
C22-OF2	帯板			CFシート 20 タイプ 2層
C23-OF4	帯板			CFシート 20 タイプ 4層
C24-HF4	H 形	H-230 x 80 x 4.5 x 12		CFシート 20 タイプ 4層

表-7 使用材料強度 (シリーズ III)

コンクリート	鋼材		
		板厚 (mm)	降伏応力度 (N/mm ²)
19.8	PL-12	11.57	361
	PL-4.5	4.48	314
	D16	—	453
	D6	—	329

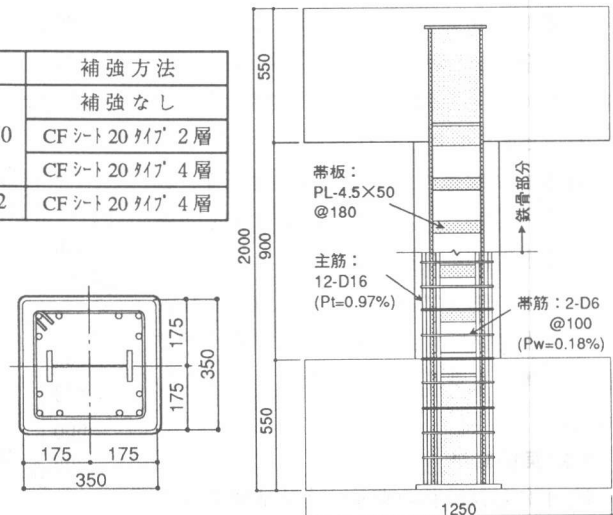


図-5 試験体の断面・形状 (シリーズ III)

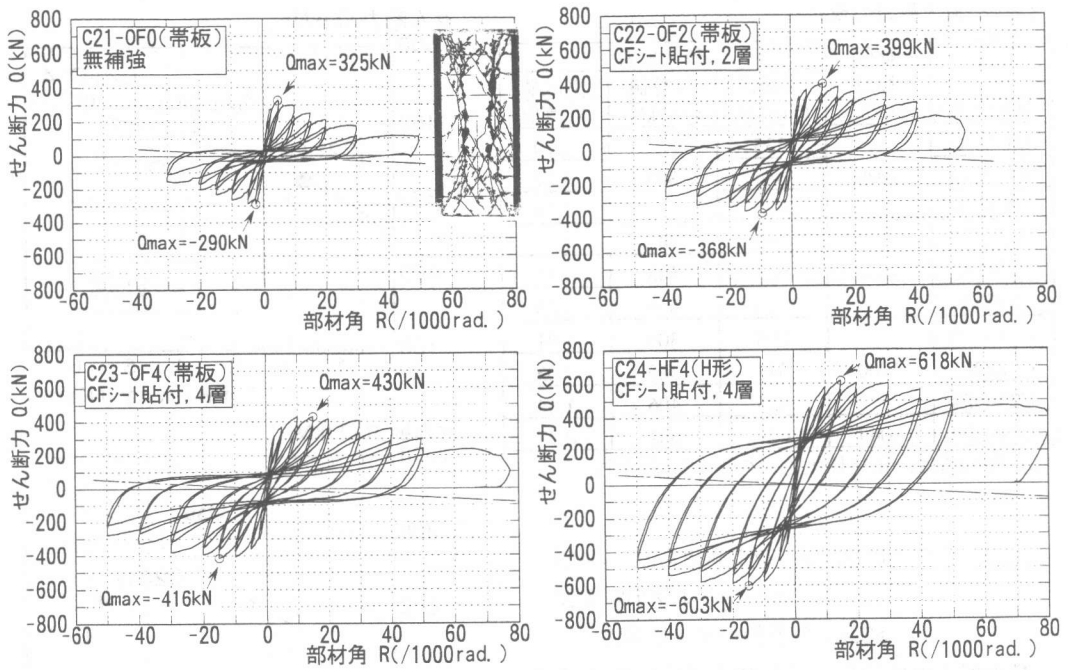


図-6 荷重-変位曲線 (シリーズ III)

5. 終局耐力の検討

鋼板巻きあるいは CF シート巻きした SRC 柱の最大耐力について検討する。本研究では、鋼板および CF シートはせん断耐力の増大のみに寄与し、曲げ耐力には寄与しないものとした。せん断耐力の算定式を以下に示す [1]。算定式は鉄骨形式により異なる。なお、曲げ耐力の算定には、帯板の場合フランジを鉄筋に換算し、H 形の場合は一般化累加強度式を用いた。

(i) 帯板形式 (式の単位は kg, cm 系)

$$Q_{su1} = \left\{ \frac{0.053 \cdot P_t^{0.23} (180 + F_c)}{M / (Q \cdot d) + 0.12} + 2.7 \sqrt{rP_w \cdot r\sigma_{wy} + 0.5 \cdot sP_w \cdot s\sigma_{wy} + P_{cf} \cdot \sigma_{cfy} + 0.1 \sigma_o} \right\} \cdot b \cdot j$$

ここに、 sP_w , $s\sigma_{wy}$: 帯板の帯板比および降伏応力度

P_{cf} , σ_{cfy} : CF シートの比および設計用引張強度 ($\sigma_{cfy} = 1618 \text{ N/mm}^2$: 一定)

その他の記号は、文献 [1] 参照

(ii) H 形鋼 (式の単位は kg, cm 系)

H 形鋼内蔵 SRC 柱のせん断耐力は、以下の Q_{su2} , Q_{su3} のいずれか小さい値とする。

$$Q_{su2} = \{0.075 \cdot F_c \cdot \alpha + 0.5 \cdot (rP_w \cdot r\sigma_{wy} + P_w 2 \cdot \sigma_{w2y})\} \cdot b \cdot r_j + sQ_{su}$$

$$Q_{su3} = (0.15 \cdot F_c \cdot b' / b + rP_w \cdot r\sigma_{wy} + P_w 2 \cdot \sigma_{w2y}) \cdot b \cdot r_j + sQ_{su}$$

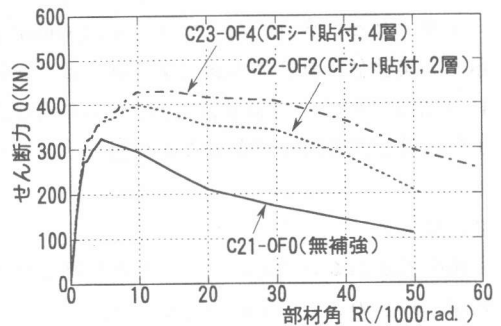


図-7 包絡線の比較 (シリーズ III)

表-8 最大耐力の検討

試験体名	荷重軸力 N(kN)	最大耐力		
		実験値 Q _{ue} (kN)	計算値 Q _{uc} (kN)	実験値 計算値
MC45-C	1020	335	303	1.10
MC45-S		384		1.27
MC45-R		420		1.39
SC45-C	1589	499	347	1.44
SC45-S		628	548	1.15
SH00-S		676	548	1.23
C21-OF0	1000	308	305	1.01
C22-OF2		384	365	1.05
C23-OF4		423	406	1.04
C24-HF4		611	631	0.97

注) 実験値は、正負最大耐力の平均値を示す。

ここに、 P_w2 , σ_w2y : 鋼板あるいは CF シートの比および引張強度
 sQ_{su} : H形鋼のせん断耐力

最大耐力の実験値と計算値を比較して表-8 および図-8 に示す。図の横軸は帯筋、帯板、CF シートをそれぞれ合計した $P_w \cdot \sigma_w y$ (N/mm²) を示す。実験値と計算値の比 (実/計) は 0.97~1.44 とよく対応しており、SRC 柱の最大耐力は、上記の算定式で計算できることが明らかとなった。

6. まとめ

鋼板巻きあるいは CF シート巻きを行った SRC 柱の耐力および破壊性状を実験により検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 柱頭柱脚 1 D (D: 柱せい) の範囲を鋼板巻きすることにより、曲げ破壊が先行する SRC 柱の耐力および変形性能は増大した。
- (2) 部材角 $R=50/1000$ rad. までの漸増繰返し変位を受け柱頭柱脚が曲げ破壊した SRC 柱、あるいは $R=10/1000$ rad. の残留変形が生じた SRC 柱を、同様な鋼板巻きによりそのまま補修した結果、剛性は初期剛性とほぼ同等に回復し、最大耐力は増大することが明らかとなった。
- (3) せん断破壊が先行する SRC 柱に鋼板巻きあるいは CF シート巻きによりせん断補強すれば、補強量に応じてせん断耐力は増大した。せん断耐力は本論に示した算定式で対応よく計算できることが明らかとなった。

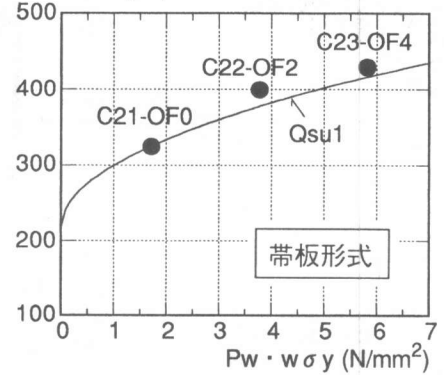
謝辞

実験 I の遂行に際し、福山大学工学部建築学科 南宏一教授、創建築構造研究所 谷口考生氏の御指導をいただきました。CF シートに関しましては三菱化学(株)の御協力をいただきました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東京都都市計画局編：建築物の耐震診断システムマニュアル (鉄骨鉄筋コンクリート造), pp.49-50, 平成 2

せん断力 Q (kN)



せん断力 Q (kN)

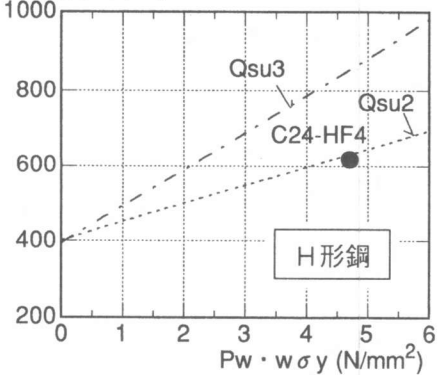


図-8 最大耐力の検討 (シリーズ III)