

(36) 360キロ級の軽量コンクリートを用いたSRC柱のせん断破壊性状

SHEAR BEHAVIOR OF STEEL REINFORCED CONCRETE COLUMNS
USING LIGHT WEIGHT CONCRETE WITH COMPRESSIVE STRENGTH OF 360kgf/cm²

畠 史子* 南 宏一**
Fumiko HATA , Koichi MINAMI

There has been few experimental studies on the shear behavior of the Steel Reinforced (SRC) members using light-weight concrete. However, the application of such members using light-weight concrete was provided by the Standard for Structural Calculation of Steel-Reinforced Concrete Structures (SRC Standard), if their concrete strengths are not exceeded 240kgf/cm².

This paper reports the result of shear tests on SRC columns with concrete strength of 360kgf/cm². Variables chosen for this test are concrete strength, and, amount and shape of shear reinforcement. From the test results, it was evidence that the ultimate shear strength of SRC columns using high strength light-weight concrete can be estimated using the design equations in the SRC Standard, as ordinary weight concrete.

1. 序

現在、SRC規準では人工軽量コンクリートを用いた場合については、そのRC部分についてはRC規準を準用する形でその適用が可能になっている。しかし、その適用が合理的であるかどうか、特にSRC部材の特色のせん断破壊形式であるせん断付着破壊に対するせん断耐力について、既往のSRC部材に対する実験結果をそのまま適用できるかどうかについては、十分に検証できていない状況にある。更に、本研究の主題である高強度の人工軽量コンクリートを用いた場合のSRC部材のせん断耐力および、その変形状状については実験例がほとんどないのが現状である。そこで、本研究では、SRC柱を対象として、普通強度の人工軽量コンクリート($F_c = 240\text{kgf/cm}^2$)の基本的性質の把握、及び高強度の人工軽量コンクリート($F_c = 360\text{kgf/cm}^2$)と、普通強度の人工軽量コンクリート($F_c = 240\text{kgf/cm}^2$)の比較に重点をおいて、そのせん断破壊性状の基本的な特性を把握することを目的とする。

2. 実験計画

実験変数は、コンクリート強度、帯筋形状、帯筋比の3種類で、各々の実験変数を組合せ、表-1に示す作用軸力比0.2の6体の試験体を計画し、高強度の人工軽量コンクリート($F_c=360\text{kgf/cm}^2$)と、普通強度の人工軽量コンクリート($F_c=240\text{kgf/cm}^2$)の比較、また帯筋形状および帯筋比の影響を検討することを主目的とした。

* 大阪工業大学 建築学科 大学院 ** 工博 大阪工業大学 建築学科 助教授

3. 試験体および使用材料

図-1、2に試験体の断面構成および形状寸法の一部をそれぞれ示す。柱断面は、30cm×30cm、柱長さは、90cm、鉄骨断面は、十字形で、強軸方向・弱軸方向ともH-200×50×6×12のものを配した。主筋は、12-D16(SD35)である。帯筋には、D6(SD30)を使用し、帯筋間隔は10cm($P_w=0.2\%$)、2.5cm($P_w=0.8\%$)とした。また、破壊の集中を避けるために帯筋のフック部分は、ピッチ毎に交互に配置した。コンクリートは第一種軽量コンクリートを用い、粗骨材にのみ人工軽量骨材(アサノライト)を用いた。ヤング係数は、 $F_c=360\text{ kgf/cm}^2$ で $1.44\times 10^5\text{ kgf/cm}^2$ 、 $F_c=240\text{ kgf/cm}^2$ で $1.59\times 10^5\text{ kgf/cm}^2$ であった。

4. ひび割れおよび破壊状況

最大耐力時のひび割れ状況および実験終了時の破壊状況の例をを図-3に示す。各試験体ともまず曲げひびわれが発生し、その後斜張力(せん断)ひび割れが発生し、最大強度振幅(1.000%rad)で主筋に沿って付着割裂ひび割れが発生した。最初のうちひび割れは骨材の間を縫って生じたが、付着割裂ひび割れ発生時には、骨材自身も割れて直線的にひび割れが生じた。ひび割れは、斜張力ひび割れが卓越しているが、最大強度時以降の履歴過程では斜張力ひび割れはほとんど成長せず、付着割裂ひび割れが主筋全体に著しく成長し、強軸方向の鉄骨フランジとウェブの境界位置、および弱軸方向の直交フランジの外縁位置にも付着割裂ひび割れが生じた。又、かぶりコンクリートの一部が剥離、剥落し、せん断付着割裂破壊の様相を呈した。コンクリートの剥落は、隅角部にまず生じ、その際には人工軽量骨材自身が割れ、コンクリートが塊で一挙に崩れ落ちた。表-2に実験結果

表-1 試験体一覧

試験体名	コンクリート強度(kgf/cm ²)		帯筋形状	帯筋比(%)
	設計強度	実強度		
36C22	360	356	閉鎖形	0.2
36C82	360	356	閉鎖形	0.8
24C22	240	198	閉鎖形	0.2
24C82	240	198	閉鎖形	0.8
36L22	360	356	L字形	0.2
36L82	360	356	L字形	0.8

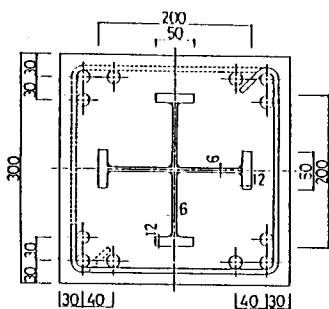


図-1 断面構成
(L字形帯筋の場合)

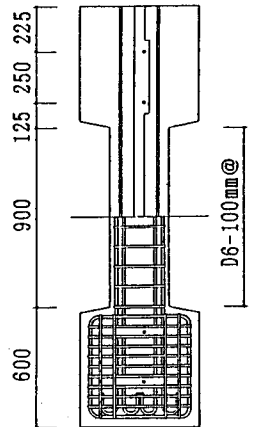
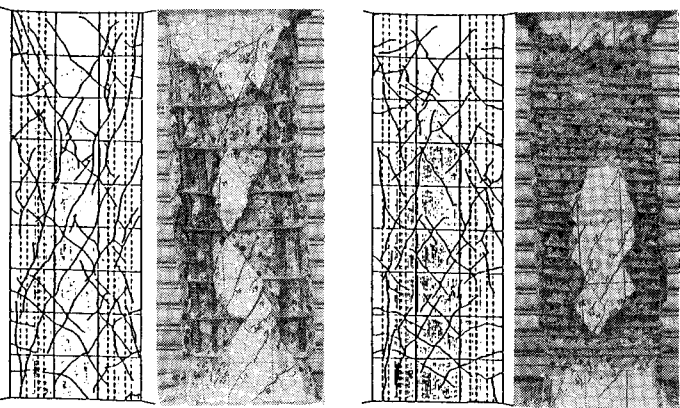


図-2 形状寸法
($P_w=0.2\%$ の場合)



(a)試験体36C22 (b)試験体36C82

図-3 ひび割れおよび破壊状況

表-2 ひび割れ発生荷重に対する理論値と実験値の比較

試験体名	せん断ひび割れ発生荷重(tf)		付着ひび割れ発生荷重(tf)	
	理論値	実験値	理論値	実験値
36C22	12.94	28.45	21.04	36.65
36C82	12.84	38.05	21.05	46.55
24C22	7.01	27.20	11.53	24.35
24C82	7.00	30.20	11.52	45.55
36L22	12.78	33.30	21.04	39.80
36L82	12.83	36.75	21.05	43.75

によるひび割れ荷重とSRC規準による理論ひび割れ荷重との比較を示す。斜張力ひび割れについては各試験体とも実験値が理論値を上回っており、特に帯筋比0.8%の試験体については大幅に上回っていた。また、せん断付着ひび割れに関しても、同様に実験値が理論値を上回っていた。従って、鉄骨の存在によるひび割れ荷重の上昇を考慮した係数を多少大きくすることが可能である。

5. 履歴特性

各試験体の履歴曲線を図-4に示す。縦軸は作用せん断力 Q (tf) を、横軸は柱材の相対部材角 R ($\times 10^{-2}$ rad.) を表す。又、破線は $P-\Delta$ 効果を表す。各試験体の履歴曲線はともに最大強度時のサイクル ($\pm 1.0\%$ rad.) までは極めて安定した紡錘形を示し、それ以後は保有耐力が著しく低下し、履歴曲線は僅かながら逆S字形に移行する傾向にあるが、ほぼ紡錘形の形を示し、せん断破壊するSRC柱の特性が認められるものとなっている。最大耐力後、一挙に耐力が著しく低下するのは、その時点でコンクリートに大きく付着割裂ひび割れが発生したためである。しかし、その後は付着ひび割れ、かぶりコンクリートの剥離、剥落は促進されるが、耐力低下は緩慢である。コンクリート強度 $F_c = 360 \text{ kgf/cm}^2$ と $F_c = 240 \text{ kgf/cm}^2$ とを比較すると、最大耐力は前者の方が高く、また最大耐力後の耐力の低下もなだらかなものとなっている。帯筋比 $P_w = 0.2\%$ と $P_w = 0.8\%$ とを比較すると後者の方が耐力が高く、また、最大耐力後の耐力劣化も緩慢なものとなっている。各試験体の 3.000% rad. 以降の履歴は、ほぼ同じ形状を示しているが、これは鉄骨自身の履歴性状に収束したものであると考えられる。

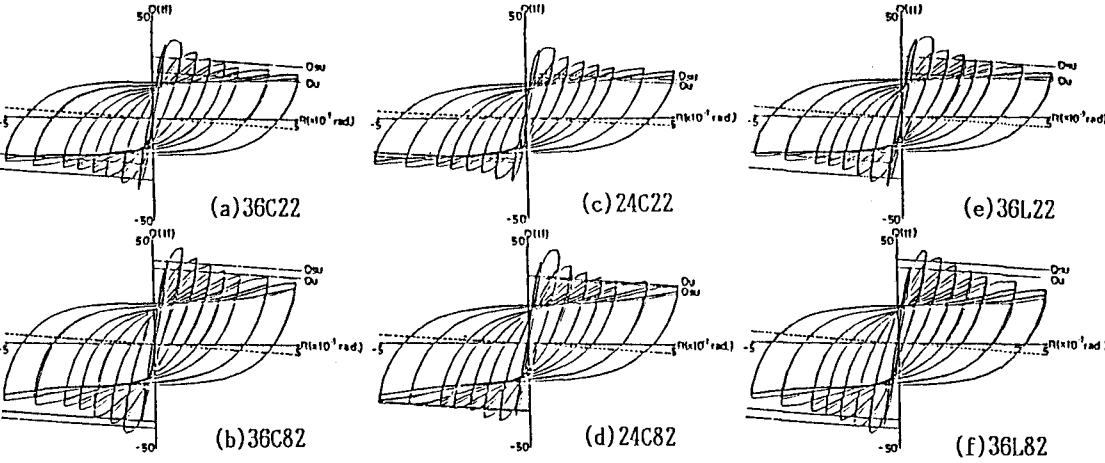


図-4 履歴曲線

6. 鉄骨および鉄筋コンクリート部分の負担せん断力

図-5に各試験体の鉄骨部分の負担せん断力 sQ および鉄筋コンクリート部分の負担せん断力 $rcQ (= srcQ - sQ)$ と部材角の関係を示す。縦軸は負担せん断力の無次元化量 Q/bdF_c を、横軸は相対部材角をそれぞれ表す。また、一点鎖線は後述のSRC規準より求めた鉄筋コンクリート部分の理論せん断耐力 $rcQu$ を、点線は鉄骨部分の理論せん断耐力 sQu をそれぞれ表す。なお、 $srcQ$ は全せん断力を、 sQ は鉄骨部分が完全弾塑性の挙動を示すと仮定し、鉄骨フランジ部分のひずみ度から曲げモーメントを求め、そのモーメントから求めた鉄骨部分の負担せん断力をそれぞれ表す。鉄筋コンクリート部分の負担せん断力は、帯筋比 $P_w = 0.2\%$ では部材角 0.05 rad. において最大となり、SRC柱材としての最大耐力時直後に急激に低下するが、 $P_w = 0.8\%$ ではSRC柱材としての最大耐力時に最大となり、その後、一挙に低下する。すなわち、鉄筋コンクリート部分の負担

せん断力は帯筋量の増加に伴って増加している。しかし、負担せん断力の劣化状況に対しては、帯筋量の影響は、顕著には認められない。なお、全試験体とも最大負担せん断力は理論値を上回っているが、特に帯筋比0.2%の試験体では非常に大きく上回っている。一方、コンクリート強度の影響についてみると、負担せん断力が最大となるまではあまり影響を受けないが、その後の劣化状況は $f_c = 240 \text{ kgf/cm}^2$ の方が $f_c = 360 \text{ kgf/cm}^2$ に比して著しい。また、帯筋形状の影響についてみると、L字形の試験体での負担せん断力の劣化は非常に著しいものであるが、これはL字形フックの抜け出しによるコンクリートの破壊が原因であると考えられる。一方、鉄骨部分の負担せん断力は、各試験体ともSRC柱材としての最大耐力時直後に最大となり、その後はほぼ一定の値を示している。また、全試験体について、最大耐力時に鉄骨の終局曲げ耐力から求められる終局せん断耐力にほぼ一致している。

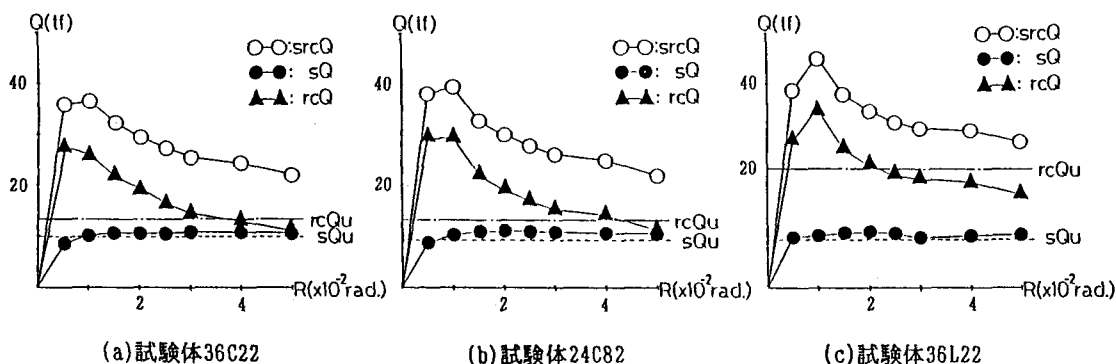


図-5 鉄骨および鉄筋コンクリート部分の負担せん断力

7. 終局耐力の評価

前述の実験で得られた終局耐力の考察をするために次の3つの終局耐力の解析を行う。すなわち、

- (a) 拡張累加強度理論による終局曲げ耐力
- (b) 拡張累加強度理論による終局せん断耐力
- (c) SRC規準による終局せん断耐力

である。以下にその概要を示す。

- (a) 拡張累加強度理論による終局曲げ耐力

この解析はSRC断面を鉄筋コンクリート部分と鉄骨部分に分けて、それぞれの部分の軸力と曲げに関する相関関係を求め、

$$M = \sum M_i, \quad N = \sum N_i \quad \text{----- (1)}$$

として、拡張累加強度理論を適用するものである。

- (b) 拡張累加強度理論による終局せん断耐力

この解析は、一般の鉄筋コンクリート部材の終局せん断耐力に関する極限解析の方法を応用するもので、せん断抵抗機構としてトラス機構と、アーチ機構の2つの基本的な特性を考察するものである。十字形鉄骨を内蔵するSRC柱材では、鉄骨とコンクリートとの付着力はほとんど期待できないので、鉄骨内部のコンクリート部分では、強軸に直交する鉄骨ウェブにより2つに分割され、それぞれのコンクリート要素が独立にアーチ機構を形成すると仮定するものであり、a)鉄筋コンクリート部分のトラス機構、b)鉄筋コンクリート部分のアーチ機構、c)フランジ外部の鉄筋コンクリート部分のアーチ機構、d)フランジ内部の鉄筋コンクリート部分のアーチ機構、e)鉄骨部分のはり機構の5つの抵抗要素から構成されるとするものである。上述の各抵抗要素に対する静的許容応力場を満足する耐力(M_i, N_i, Q_i)が求められれば、SRC部材の耐力(M ,

N, Q は、拡張累加強度理論を適用して

$$M = \sum M_i, \quad N = \sum N_i, \quad Q = \sum Q_i$$

------(2)

として求めることができる。なお、図-6にせん断抵抗機構の模式図を示す。

(c) SRC規準による終局せん断耐力

前節の(b)で述べた拡張累加強度理論による終局せん断耐力の評価法は、極めて厳密な方法であるが、しかし、解の形が複雑になるために実用設計式として直接適用するのは適当ではない。そこで、SRC規準第33条による終局せん断耐力式である

$$Q_u = rQ_u + sQ_u \quad \text{------(3)}$$

として与えられ、以下にその概要を示す。

①鉄筋コンクリート部分の終局せん断耐力

$$rQ_u = \min.(rQ_{su}, rQ_{bu}) \quad \text{------(4)}$$

ここで、

$$rQ_{su} = \min(rQ_{su1}, rQ_{su2}) \quad \text{------(5)}$$

で与えられ、 rQ_{su1} はせん断破壊によるせん断耐力で、

$$rQ_{su1} = b \cdot r_j (0.5 \cdot F_s \cdot r\alpha + 0.5 \cdot w_p \cdot w\sigma y) \quad \text{-----(6)}$$

また、 rQ_{su2} はせん断付着破壊によるせん断耐力で、

$$rQ_{su2} = b \cdot r_j (F_s \cdot b'/b + w_p \cdot w\sigma y) \quad \text{------(7)}$$

とするものである。ここに、

$$r\alpha = 7/(h/D + 7/4) \quad \text{------(8)}$$

$$F_s = \min.(0.15F_c, 22.5 + 4.5F_c/100) \quad \text{------(9)}$$

b' ：鉄骨フランジ位置でのコンクリートの有効幅である。

次に、 rQ_{bu} は、曲げ破壊から決まる耐力で、

$$rQ_{bu} = \sum rM_u/L \quad \text{-----(10)}$$

で与えられる。

②鉄骨部分の終局せん断耐力

$$sQ_u = \min.(sQ_{su}, sQ_{bu}) \quad \text{-----(11)}$$

sQ_{su} は、鉄骨ウェブの降伏せん断耐力で、

$$sQ_{su} = t_w \cdot d_w \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \quad \text{-----(12)}$$

として求められ、 sQ_{bu} は曲げ破壊から決まる耐力で、

$$sQ_{bu} = \sum sM_u/L \quad \text{-----(13)}$$

として求められる。

上述の解析方法(a)~(c)によって求められた結果から終局せん断耐力に対する理論値と実験値の比較を表-3および図-7に、また図-8に終局曲げ耐力および終局せん断耐力に関する相関曲線および実験値との関係の一例を示す。図中の l_m , r_{lm} , s_{lm} はSRC、RC、およびS部分のそれぞれの終局曲げ耐力に関する相関曲線を表し、 l_s は拡張累加強度理論による終局せん断耐力を、 l_{ss} はSRC規準による終局せん断耐力をそれぞれ表す。また、図中の●印は実験値である。表に示すように全試験体の実験値

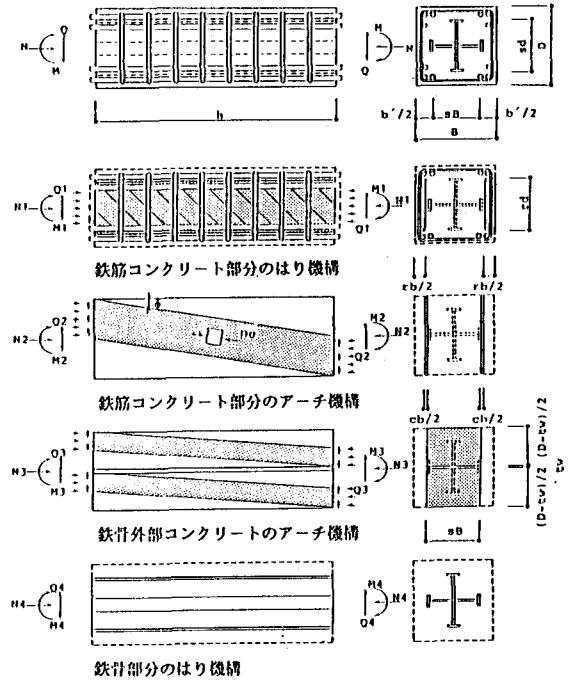


図-6 せん断抵抗機構の模式図

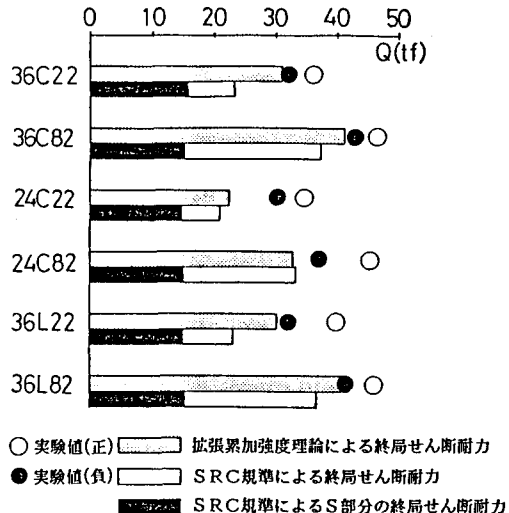


図-7 実験値と理論値の比較

表-3 終局せん断耐力に対する理論値と実験値の比較

試験体名	作用軸力 N(tf)	累加強度理論式 Qsu(tf)	SRC標準式 Qu(tf) [RC + S]	実験値 Qexp(tf)		実験値/理論値			
				pos.	neg.	Qexp/Qsu	pos.	neg.	Qexp/Qu
36C22	103.3	30.5	23.3[13.4+9.9]	36.7	-32.8	1.20	1.08	1.57	1.41
36C82	103.3	40.7	37.2[27.5+9.7]	46.5	-43.1	1.14	1.06	1.25	1.19
24C22	74.2	22.5	20.9[11.3+9.6]	34.6	-30.5	1.54	1.36	1.65	1.46
24C82	74.2	32.8	33.3[23.7+9.6]	45.5	-37.3	1.38	1.14	1.36	1.12
36L22	103.3	30.3	23.1[13.5+9.6]	40.0	-32.1	1.32	1.06	1.73	1.39
36L82	103.3	40.2	36.8[27.6+9.2]	43.8	-41.5	1.09	1.03	1.19	1.13

に対して安全側となっているが、SRC標準によるQuは安全率は大きく、正荷重に対して最大値1.73、最小値1.19、平均値1.46である。しかし、拡張累加強度理論によるQsuは、最大値1.54、最小値1.09、平均値1.28であり、Quによって終局せん断耐力を推定できることが示される。

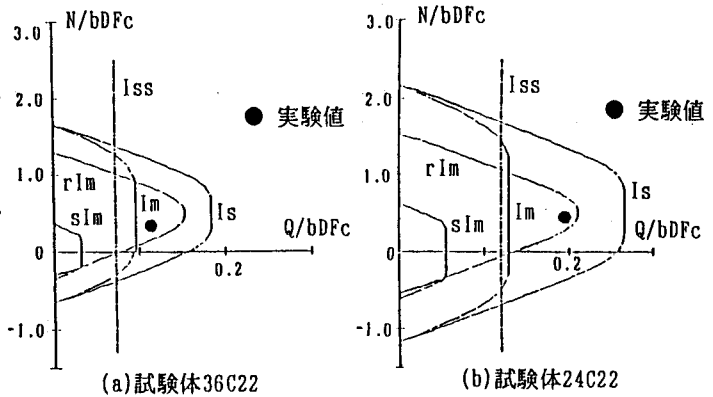


図-8 終局耐力の評価

8. 結語

コンクリート強度、帯筋形状、帯筋比を変数とした6体の試験体による実験によって、以下の結論を得た。

- (1) 人工軽量コンクリートを用いたSRC柱において、斜張力ひび割れの成長の過程は、帯筋量によって影響を受けないが、付着割裂ひび割れの成長の過程は影響を受け、帯筋量が増加するほど、その成長度は緩慢になる。
- (2) 人工軽量コンクリートを用いたSRC柱の終局せん断耐力は、閉鎖形およびL字形の帯筋形状によって、ほとんど影響を受けない。
- (3) 360kgf/cm²級の高強度人工軽量コンクリートを用いたSRC柱の終局せん断耐力は、普通コンクリートと同様に、SRC標準式（なお、ここではSRC標準による軽量コンクリートに対する低減係数K=0.9による低減は行っていない。）および拡張累加強度理論式によって評価できる。

謝辞

本研究は、人工軽量骨材協会、HCL委員会（委員長 筑波大学教授 園部泰寿）に於ける実験研究の一部として行われたものである。

参考文献

- 1) 日本建築学会：「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算標準・同解説」，1987年度版
- 2) 日本建築学会：「鉄筋コンクリート構造計算標準・同解説」，1987年度版
- 3) 津田和征，南宏一：「種々の鉄骨形状を持つSRC柱の終局せん断耐力に関する理論解」，第2回合成構造の活用に関するシンポジウム 1989年9月投稿中