

2. 2 使用材料

表-2に使用材料の力学的性質を示す。コンクリートは粗骨材にのみ人工軽量骨材（アサノライト）を用いた第一種軽量コンクリートとし、ヤング係数は、十字形鋼を用いた試験体では $1.44 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、強軸H形鋼を用いた試験体では $1.57 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であり、また比重はそれぞれ1.81、1.79であった。

2. 3 載荷および測定方法

載荷は、建研式載荷装置を用いて行い、軸力を所定の値まで負荷し、その軸力を一定に保持した状態で柱中央部（反曲点位置）に正負の繰り返しせん断力を負荷して行うものとした。また、変位の制御は、荷重点の横たわみ δ から求められる相対部材角 R （ $= \delta / h$ h :柱長）による漸増変位制御法に従った。

3 実験結果

3. 1 ひび割れおよび破壊状況

試験体の最大強度時におけるひび割れ状況、および実験終了時の破壊状況の例を図-3に示す。

各試験体とも、ひび割れおよび破壊の進行過程は類似しており、まず曲げひび割れが柱側面に、次いで、斜張力ひび割れが柱正面に発生し、その後、主筋に沿って付着割裂ひび割れが生じた。最初のうち、ひび割れは骨材の間を縫って生じたが、付着割裂ひび割れの様な大きなひび割れ発生時には、骨材自身を貫通してひび割れが生じた。ひび割れは、最大耐力時までは斜張力ひび割れが卓越していたが、それ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。また、かぶりコンクリートの一部が剥離および剥落し、せん断付着割裂破壊の様相を呈した。以上のように、人工軽量骨材を用いた場合、柱材としての破壊性状は非常に脆性的なものであったがこれは骨材自身の性質が脆性的であることもその一因となっていると考えられる。

帯筋比の影響についてみると、 $P_w=0.2\%$ の試験体ではかぶりコンクリートの一部が剥離および剥落しただけではなく、コアコンクリートにまで破壊が及んでおり、最終状態において内蔵された鉄骨の露出も認められた。特に、強軸H形鋼を内蔵する軸力比0.2の試験体(L322)では、帯筋のフックの抜け出しにより横拘束が低下し、主筋の座屈が著しく、鉄骨フランジに局部座屈が生じ、最終的に軸力が保持できなくなり破壊に至った。これに対して、 $P_w=0.6\%$ および 0.8% の試験体では、かぶりコンクリートの剥離が顕著で試験体のほぼ全面に及んでいたが、帯筋による横拘束が大きいためコアコンクリートの損傷は認められなかった。帯筋形状の影響についてみると、L字形帯筋の試験体では、 90° フック部分の抜け出しによるひび割れが著しく成長し、かぶりコンクリートの剥離および剥落を促進し、破壊が大きなものとなったと考えられる。しかし、ひび割れの発生荷重に関しては、帯筋形状の違いによる影響はほとんど認められなかった。鉄骨形状については、十字形鉄骨を内蔵する試験体の方がひび割れ発生荷重は低く付着割裂ひび割れも顕著に認められたが、最終破壊は強軸H形鋼を内蔵する試験体の方がより大きなものとなった。また、軸力比の影響

表-1 試験体一覧

試験体名	鉄骨形状	帯筋比 (%)	帯筋形状	軸力比
36C22	十字形	0.2	閉鎖形	0.2
36C82	十字形	0.8	閉鎖形	0.2
36L22	十字形	0.2	L字形	0.2
36L82	十字形	0.8	L字形	0.2
L322	強軸H形	0.2	閉鎖形	0.2
L320	強軸H形	0.2	閉鎖形	0
L362	強軸H形	0.6	閉鎖形	0.2
L360	強軸H形	0.6	閉鎖形	0

表-2 使用材料の力学的性質

鋼材種類	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	降伏ひずみ (%)
RP6 (SS41)	2421	3188	0.134 ($\gamma_y=0.1725$)
RP12 (SS41)	2508	3381	0.141
RP5.5 (SS41)	3032	4753	0.143 ($\gamma_y=0.2161$)
RP8 (SS41)	3162	4476	0.155
D6 (SD30)	3276	4188	0.176
D13 (SD40)	4338	6018	—
D16 (SD35)	3948	4595	0.202

コンクリート種類	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
十字形鋼を用いた試験体	356.0	31.8
強軸H形鋼	372.2	31.8

響に関しても、軸力比 0 の試験体の方がひび割れ発生荷重は低いが、最終破壊は軸力比 0.2 の試験体の方がより大きなものとなった。

3. 2 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 $Q(tf)$ 、横軸は相対部材角 $R(\times 10^{-2}rad.)$ を表す。また、破線は $P-\Delta$ 効果を表し、一点鎖線および二点鎖線は、それぞれSRC規準および拡張累加強度理論³⁾による終局せん断耐力 (Q_u, Q_{su}) を表す。

各試験体の履歴形状はともに最大耐力時のサイクルまでは極めて安定した紡錘形を示し、それ以後、僅かながら逆S字形に移行する傾向にあるが、ほぼ紡錘形状を保ち、全体としてはエネルギー吸収能力の高いSRC柱の特性が認められる履歴となっている。作用軸力比 0.2 の試験体で最大耐力後に大きく耐力が低下するのは、その時点で付着割裂ひび割れによるコンクリートの損傷が顕著であったためと思われる。

しかし、その後は付着割裂ひび割れやかぶりコンクリートの剥離および剥落は促進されるが、耐力の低下は緩慢である。帯筋比の影響についてみると $P_w=0.2\%$ の試験体と、 $P_w=0.6\%$ および 0.8% の試験体とを比べると後者の方が耐力が高く、最大耐力後の耐力劣化も緩慢なものとなっている。帯筋形状の履歴特性に与える影響は認められず、また、軸力比については、最大耐力時まではその耐力は軸力比0.2の試験体が軸力比0の試験体を上回っているが、その後耐力の逆転がみられ、軸力比 0 の試験体の方が靱性に富んでいた。鉄骨形状については、十字形鉄骨を内蔵する試験体に最大耐力後の著しい耐力劣化が認められたが、これは付着割裂ひび割れの発生に起因するものと考えられる。軸力比0以外の試験体では 0.03rad.以降の履歴は、鉄骨形状ごとに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、軸力比0の試験体ではコンクリートの破壊が小さかったためRC部分の耐力が幾分か残っていたと考えられる。

3. 3 ひずみの推移状況

図-5に帯筋および鉄骨のウェブ、フランジのひずみ推移状況を示す。縦軸は各構成要素のひずみ度 ϵ 、あるいは γ を、横軸は相対部材角 R をそれぞれ表す。なお、破線は各構成要素の降伏ひずみ度を表す。

帯筋については、特に帯筋比による影響が顕著に認められ、 $P_w=0.2\%$ および 0.6% の試験体は最大耐力時にほぼ降伏しており、その後、ひずみは減少する傾向が認められるが、これは変位振幅の増大に伴い、帯筋の横拘束力が最大耐力後コンクリートの損傷および帯筋フックの抜け出し等によって低下したためと思われる。 $P_w=0.2\%$ でL字形帯筋を用いた試験体(36L22)では、最大耐力時にひずみは急激に増加しその後大きく低下するが、これは 90° フック部分の抜け出しによるものである。また、 $P_w=0.8\%$ の試験体では帯筋はほとんど降伏していなかった。十字形鋼を用いた試験体では最大耐力時において鉄骨ウェブは降伏せん断ひずみには達していないが、その後、帯筋の降伏に伴う横拘束力の低下、コアコンクリートの損傷によって負担せん断力が増加するため、ひずみは増加する。一方、鉄骨フランジについて、柱材で曲げ応力が最大となる材端部のひずみをみ

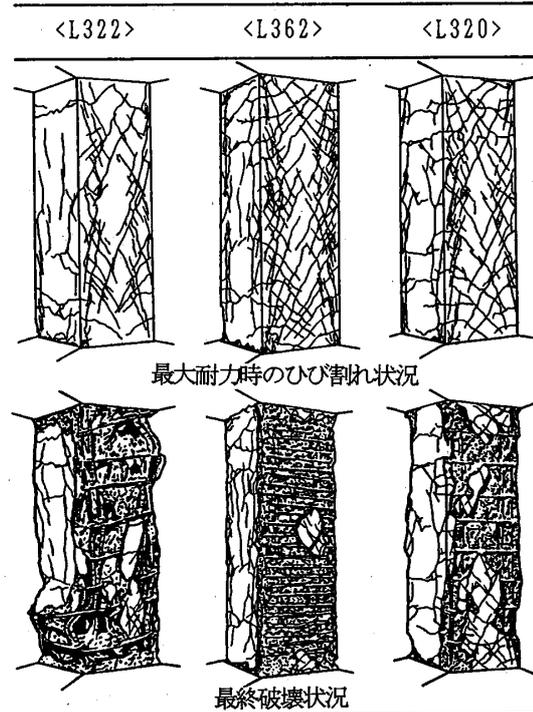


図-3 ひび割れおよび最終破壊状況

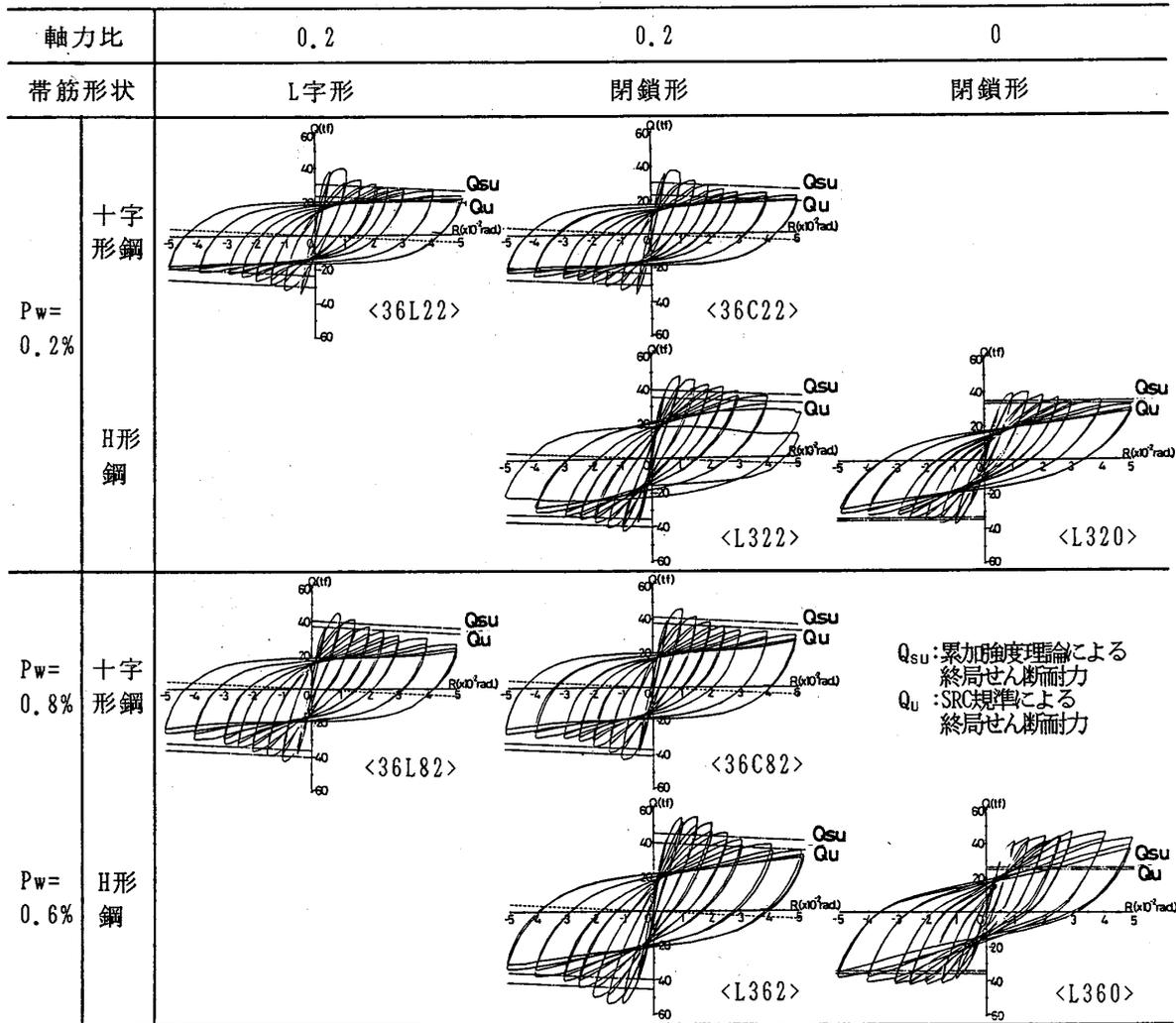


図-4 履歴曲線

ると、各試験体とも最大耐力時にはほぼ降伏ひずみに達している。このことより、最大耐力時には鉄骨要素は全塑性モーメントに達し、曲げ耐力を發揮していると思われる。

3. 4 鉄骨および鉄筋コンクリート部分の負担せん断力

図-6に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 ($= srcQ - sQ$) と部材角の関係の一例を示す。縦軸は負担せん断力の無次元化量: $Q/bDFc$ を、横軸は相対部材角 R 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 rcQ_u を、点線は鉄骨部分の理論せん断耐力 sQ_u をそれぞれ表す。なお、 $srcQ$ は全せん断力を表し、 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算出される曲げモーメントにより求めた鉄骨部分の負担せん断力を表す。

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に最大となり、その後はほぼ一定の値を示している。また、その値は sQ_u にほぼ一致していることから鉄骨部分の負担せん断力はSRC規準による理論せん断耐力 sQ_u によってほぼ評価できるものと考えられる。鉄筋コンクリート部分の負担せん断力は、各試験体とも rcQ_u をかなり上回っており、帯筋比が小さくなるほどその耐力差が大きなものとなっている。軸力比の与える影響をみると軸力比が 0.2 の試験体ではSRC柱としての最大耐力前後に一気にRC部分の耐力が劣化し始めるが、これに対して軸力比 0 の試験体では大きな劣化は認められなかった。鉄骨形状に関しては、十字形鉄骨を用いた試験体の

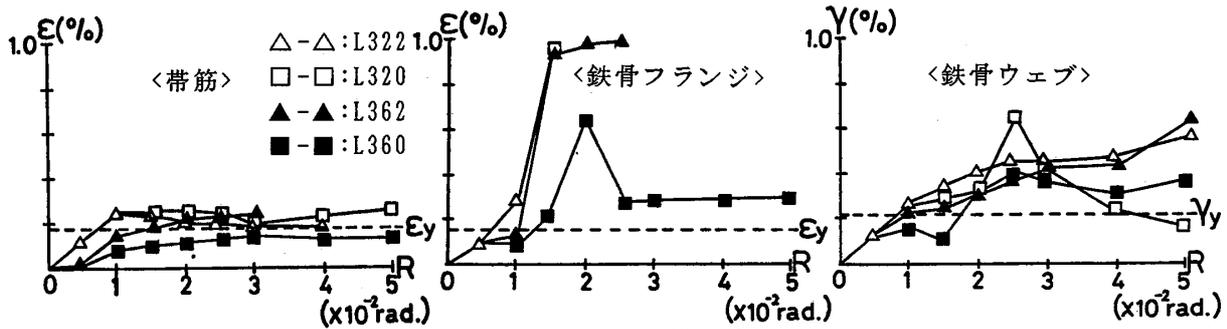


図-5 ひずみの推移状況

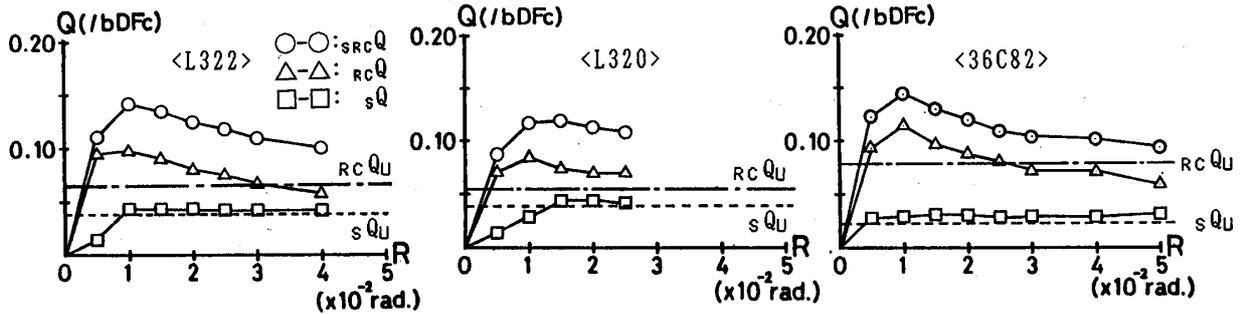


図-6 鉄骨および鉄筋コンクリート部分の負担せん断力

方が、強軸H形鋼を用いた場合と比して理論耐力(rcQ_U)との耐力差は大きい。

4 せん断応力度係数 α_{max} の検討

文献2)に従って、軽量コンクリートを用いた SRC柱のせん断付着破壊耐力に対するコンクリートの直接せん断応力度係数 α_{max} を

$$\alpha_{max} = (Q_{exp} - sQ_U - rQ_0) / b' \cdot rd \cdot F_c \dots ①$$

によって検討する。ここで、sQ_Uは鉄骨部分のせん断耐力で、前述した様に本実験では曲げ耐力から決まるせん断耐力である。rcQ_Uは帯筋によるせん断耐力で、最大耐力時には帯筋はほぼ降伏しているので、

$$rQ_0 = rP_w \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot rd \dots ②$$

である。最大耐力時の実験値Q_{exp}より α_{max}とコンクリートの関係を検討した結果を図-7に示す。縦軸は α_{max}、横軸はコンクリートの圧縮強度F_c(kgf/cm²)を表し、●および■印はそれぞれ本実験における十字形鋼および強軸H形鋼を用いた軽量コンクリート試験体を、□印は文献2)における普通コンクリート試験体をそれぞれ示す。また、図中の実線はSRC規準式でせん断付着破壊で決まる場合のコンクリート部分のせん断応力度係数 α_sを表し、

$$\alpha_s = \min(0.15, 22.5/F_c + 0.045) \dots ③$$

であり、点線はSRC規準に準じて軽量コンクリートを用いた場合の低減係数K=0.9を考慮した0.9 α_sをそれぞれ表す。図より強軸H形鋼を用いた軽量コンクリート試験体の場合は普通コンクリートを用いた場合とほぼ同じ値を示しているが、十字形鋼を用いた場合はより高い値を示している。しかし、何れの場合においても軽量コンクリートによる実験値は α_sより高い値を示している。

5 終局せん断耐力の検討

SRC規準式および拡張累加強度理論式³⁾により終局せん断耐力を検討した結果を図-8および9に

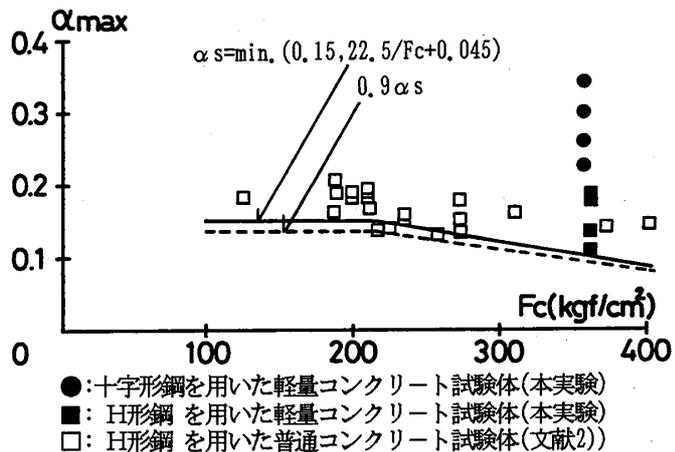


図-7 せん断応力度係数 α_{max}

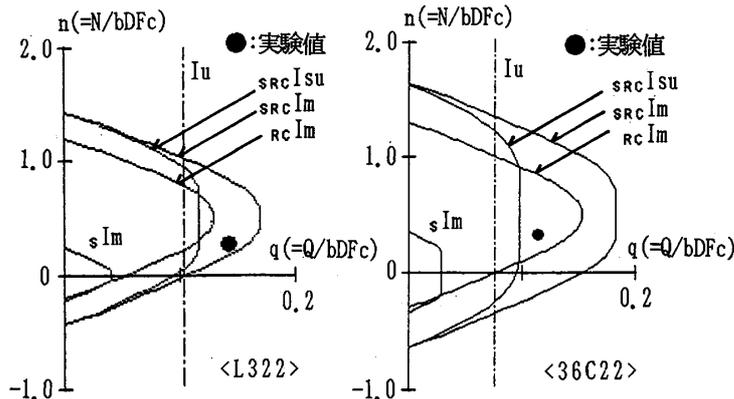


図-8 n-q相関曲線

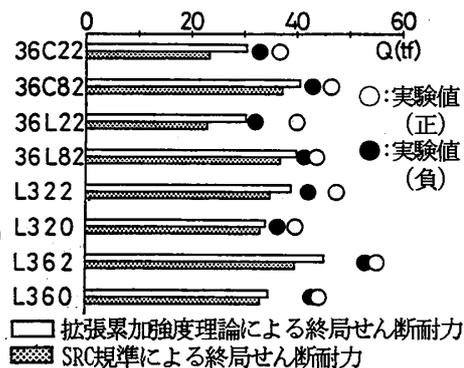


図-9 理論値と実験値の比較

示す。図-8は最大せん断耐力(正載荷時)と理論値との比較を無次元化軸力 n と無次元化せん断力 q に関する相関曲線で表したもので、図中の $s_{RC}Im$ および $s_{RC}Isu$ はSRC部材の終局曲げ耐力から求められるせん断耐力および拡張累加強度理論による終局せん断耐力をそれぞれ表す。 $r_{c}Im$ および s_{Im} は鉄筋コンクリート部分の終局曲げ耐力から求められる終局せん断耐力および鉄骨部分の終局曲げ耐力から求められる終局せん断耐力を表し、 I_u はSRC規準式による理論値を示している。なお、図中の●印は実験値である。図-9はSRC規準および拡張累加強度理論による理論値と実験値の比較を示したもので、 Q_{su} は拡張累加強度理論による終局せん断耐力を、また Q_u はSRC規準による終局せん断耐力をそれぞれ表す。なお、図-8および図-9の何れにおいても前述の理由からSRC規準を用いた場合には軽量コンクリートに対する低減を考慮していない。全試験体について、理論値と実験値の比は1.0以上を示しているが、その安全率はSRC規準式による値の方が拡張累加強度理論による値より高い。拡張累加強度理論による計算値は、実験変数によるばらつきも小さいので、360kg級の人工軽量コンクリートを用いたSRC柱のせん断耐力は拡張累加強度理論によってより適確に評価できるものと考えられる。一方、SRC規準による計算値は、安全率のばらつきが大きく、また実験変数の与える影響をみると、帯筋比が小さい方が安全率は高く、鉄骨形状では十字形鋼を用いた試験体の方が安全率は高い。従って、SRC規準式において、帯筋比および鉄骨形状の与える影響については、今後更に検討する必要があると考えられる。

6 結論

360kg級の人工軽量コンクリートを用いたSRC柱の破壊性状は、その特徴として骨材自身のひび割れを伴う付着割裂破壊があげられ、ひび割れ発生後の剛性の低下は大きく、また、最大耐力後の耐力劣化も顕著に認められた。また、その終局せん断耐力は、累加強度理論およびSRC規準式によって、普通コンクリートと同様に評価できるが、特にSRC規準式では軽量コンクリートに対する低減係数を考慮しなくてもその安全率は1.2以上確保できる。

<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規準・同解説、1987年度版、332pp
- 2) 若林実、南宏一：一定軸力と確定的な繰返し曲げせん断力を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱のせん断強度に関する実験的研究、コンクリート工学、Vol.13 No.3 1975年3月、pp.1-17
- 3) 津田和征、南宏一：種々の鉄骨形状をもつSRC柱の終局せん断耐力に関する理論解、土木学会第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、1989年9月、pp.89-94

<謝辞>

本研究は、人工軽量骨材協会、HLC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。