

II-4 SRC構造におけるせん断破壊について

京都大学防災研究所 ○若林 実
大阪工業大学 南 宏一

1. 緒言

建築雑誌臨時増刊号 468 号に掲載された「鉄骨構造の震害調査」の論文中で、内藤多伸は関東大震災で「鉄骨鉄筋コンクリート造は、数層の大きな建屋においても良く耐震し被害程の乏し」と述べ、かつ「巨匠程度の鉄骨建築物にありては、元々耐震的性質上もこの比較的容易なるべし」として「鉄骨を以てその架構とし、なほ骨筋造と施し、鉄筋コンクリートで以て被覆し、剛接合の外壁及間仕切と適当に接合し、均等に一体化し、剛性の建物を為せば、相当大の今後以上の地震に対しても良く安全なりと云うを得べし」と鉄骨鉄筋コンクリート(SRCと称す)構造がその耐震性能に有する構造であることを指摘している。その後、我国の高层建築(地上5階建以上)は、SRC構造によるものが多く、SRC構造の計算法は、基本となる計算規準^{*}、なほ、成文化されたもの^{*}に、いろいろの計算法、設計者自身の責任において考案され行われていた。1950年に、日本建築学会SRC構造分科会において制定、発表されたSRC構造理論の一応の体系化が行われた。SRC規準^{*}制定された以後、今日まで、幸いにも、大きな震害をうけることはなかったが、1968年の十勝沖地震において、鉄筋コンクリート(SRCと称す)構造の耐震設計法の確立以後、最も多くの建物で試験が行われ、かつ、数多くの低層RC建築物、材料のせん断破壊による崩壊するといった貴重な経験により、SRC構造の材料においても、せん断破壊が生ずることは十分に予想された。このせん断破壊に対処するための、部材のせん断力に対する算定、の条件の全面的改定を中心として、1975年11月にSRC規準の第2次改定^{*}が発表された。

SRC構造部材のせん断破壊の問題は、はり部材、および柱部材の両方に、柱はり接合部にも、考へられる。これらの構造要素のせん断破壊性状は、構造物に対する耐震性能に極度の深い関連をもち、我国で行なわれた既述の研究成果^{*}にもとづいて、これらのせん断破壊性状について述べ、かつ、今回の改定において示された、関連設計式について、その概要を述べることにする。

2. 1960年までの研究(旧規準の背景)

SRC部材のせん断破壊性状に関する研究の端緒は、浜田稔の1929年の「鋼コンクリート応曲材に関する研究」の第2編の「剪力に対する鋼コンクリート応曲材の研究」による開かれたが、1960年代までの、柱、および柱はり接合部に関する実験的研究は、実験材器および設備の関係もあり単調載荷にのみ行われたものが多く、ほかにある。

2.1 はり材のせん断破壊について

1929年、および1932年に、浜田稔は、格子形の鉄骨コンクリート(SRCと称す)はりの試験体を用いて、格子材の間隔、板厚、および筋率と実験変数として、2分点載荷の単相はり形式によるせん断実験^{*}

^{*}鉄筋コンクリート構造計算規準は、1933年、また、鉄骨構造計算規準は、1944年に、それぞれ日本建築学会において制定、発表された。

^{*}SRC構造部材のせん断破壊に関する研究は、我国以外には、見受けられないうちである。

行い、 α が変化するにともなう、そのうち、単筋の鉄骨橋子は、節点剛度の低い剛
節矩形架構の特性を示す。この鉄骨橋子には、スリットを併用する、斜張力の割合が発
生時では、RCはりと同様の挙動を示し、かつ、せん断の割合は荷重は、せん断材の多少によ
り、 $Z = 0.1 / F_c$ ($b \leq L$, $Z = a/b$) により定められることを示している。さらに、荷重を
増大すると、降伏現象があらわれ、この降伏荷重に対する現象は、RCはりとは著しく趣き
を異にし、斜張材の機能はスリットと引張材との接合部で破壊することになり、その
原因であり、降伏現象以後は、単筋の橋子には見られる矩形状架構の特性を示す。スリット間にお
けるスリットは、不完全ながらも筋連れとして機能しているから、やはりおぼろげに性質
を示す。しかし、橋子材の量を増加しても、降伏荷重を増大させることはできない。これは筋
を併用しても、あるいは、斜張材を用いても、逆掌の橋子材の断面も、降伏荷重は
増大することを示している。このように、単純荷重を受ける橋子形のSRCはりの基本的な性能につ
いて、精細に考察し、実験を行って試験体の数は、さほど多くない。1950年代の研究の大きな
礎となり、

その後、SRC部材のせん断破壊に関する研究は、一時低迷をみた。1951年に、SRC構造計算規準が制定されたのに、日本建築学会にSRC構造分科会が、発足して以来、中蔵領、高田周二を中心とする研究グループ、坪井善勝、若林実を中心とする研究グループにおいて、および片立腰形
のSRCはり部材のせん断破壊に関して、一定の実験変数にわたる組織的・実験的研究が、開始さ
れた。

仲威雄、市田周三、斎藤光弘の研究から、 $\gamma = 70^\circ$ として、 γ の研究結果は、RC部材の相似性：
 注目し、SRC部材の力学特性について検討する。SRC構造の特性、等価なものは、
 「何故、鉄骨と使っているか、必要であるか」の疑問に対する解答を求め、その目的は、
 2. 実験計画と試料。断面形 $b \times D = 220 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ の j は実寸に近い大形のSCはりに対して、
 せん断スリット比 $\alpha/D = 600/350$ の固定スリット集中載荷、単綱はり形式の単綱載荷実験と30体、断
 面形 $b \times D = 90 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 、せん断スリット比 $\alpha/D = 100/130$ の大野式の載荷の連続はり形
 式と主体に1体、繰返し載荷実験と18体、 γ の検討を行う。SRC構造の力学特性は、せん断破壊
 に対して顕著にあらわれることを指摘した。SRC構造とRC構造の本質的な差は、破壊時のせん断
 吸収エネルギー量にあり、同じ鋼材量を用いても、鉄骨量 A_s 、多い場合は、鉄骨量 A_s 、多い
 ほど、 α/D があり、SRC部材において、鉄骨とすべり鉄筋に置換してその耐力を Q_0 、せん断変形
 角 θ 、 $0.03 \sim 0.04 \text{ rad}$ 、における支持力を Q とし、 $Q < Q_0$ あるいは、 $Q > Q_0$ に対する一般化的破壊機
 相を説明している。すなわち、鉄骨 A_s 、増大の場合は、 $Q > Q_0$ で、せん断変形角 $0.03 \sim 0.04 \text{ rad}$ 、最大荷
 重に対し、鉄骨 A_s 、減少の場合は、 $Q < Q_0$ で、最大荷重は、 P_0 で決定され、この時のせん断変形角
 は、 0.04 rad 、を越えて小さくなることを述べた。また、SRCはりのせん断力の簡単な表現として、

$$Q_u = Q_s + Q_c \quad (1)$$

の果相式と示していい。こゝで、 Q_5 は、軸受荷はりとして耐力2、格子形の場合は

$$Q_s = \left[\sum_{n=1}^D M_{Fn} + 2(i-1)\bar{M} \right]^{1/2} \quad (2)$$

② 12 和 13 号。Qc 18、20、21-1 部分有剪力及轴力。Qc = Tc · b · j，C 为 C 值，Tc 18、21

あばら筋がある場合は、 $\tau_c = 17 \text{ kg/cm}^2$ 、あばら筋がある場合は、 $\tau_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ 、 $r_{pw} \cdot r_{wsy} \in L$ 、SRC はり、最大耐力に達する変形時では、エンフリートは、大きな損傷を受け、 L は、エンフリートの存在のみ、重要で、その品質は耐力に影響しないといえる。さらに、大変形時における SRC はりの支持力と、エンフリートのエンフリート、大変形時において、45°の斜圧縮材としての抵抗機構を示すものも考え、その抵抗機構に対する鉄骨部分およびエンフリート部分の支持力を詳細に検討している。

一方、その当時、国内および国外においても、RC はりのせん断破壊性状、完全に解明できず、せん断破壊に対する終局強度式も確立できていない。このため、坪井善勝、若林実、木永保美の研究グループは、まず RC はりのせん断耐力、 t_c とは

$$Q_{bj} = f_1(F_c) + f_2(r_{pw} \cdot r_{wsy}) + f_3(\alpha/D) + f_4(P_r) + f_5(r_{pc}) \quad (3)$$

の様な和の形で近似的に表現できるものとして、全試験体の数個の組に分け、エンフリート強度あばら筋量、せん断スパン比、引張鉄筋比、圧縮鉄筋比、材令、主筋の付着および定着性状と、各個独立に変化させて、その実験結果より、RC はりのせん断耐力に関する実験式を確立し、その実験式の基礎として、非充膜形の SRC はりのせん断耐力に関する実験式を確立することを目指した。一連の実験的研究を企図した。試験体の形状は、小形 ($b \times D = 45 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$)、中形 ($b \times D = 90 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$) および大形 ($b \times D = 180 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$) の3種類で、全試験体にも2点荷重の単純はり形式で、単調荷重を施して、総数95体の試験体について実験を行った。初期せん断を割れ時のせん断応力度は、小形試験体を除き、 $\tau_c = 0.1 F_c$ 程度であること、初期せん断を割れ発生以前は、せん断補強材の多寡にかかわらず、同一の変形性状を示す。せん断を割れ発生後は、同様に差異を生ずることも、総ての試験結果を定量的に表す。さらに、RC はりのせん断強度に対する、やや簡略化した、実験式とした。

$$\tau = (S + 0.15 F_c) \cdot \frac{P}{A} + 3 \sqrt{r_{pw} \cdot r_{wsy}} \quad (4)$$

と示している。ここで S は、試験体の寸法効果を含んだ定数で、小形で 40 kg/cm^2 、中形で 24 kg/cm^2 および大形で 9 kg/cm^2 の値を示す。寸法効果はあらわに同一とした。エンフリートの脆度係数、考えらるべきを指摘している。(4)式にも見えて、実大の非充膜形の SRC はりのせん断耐力に関する実験式とした。

$$\tau = (9 + 0.15 F_c) \cdot \frac{P}{A} + 3 \sqrt{r_{pw} \cdot r_{wsy}} + \frac{1}{2} (\sin \theta + \cos \theta) \frac{B \sqrt{f_c}}{B_x \cdot b} \quad (5)$$

を提案し、橋子材とあばら筋に置換する場合、その効果は、あばら筋の1/2に示すといえる。なお、橋子形の SRC はりでは、ある特定のせん断補強材の場合には、(4)式の値と(1)式の Q_c に代入して、累加強度による2本の耐力を、ほぼ一致する。せん断補強材(あばら筋、橋子材を含む)が、著しく増加する。累加式は、成立しないことも述べた。

以上の研究成果にも見えて、1958年および1968年の SRC 規準におけるはり部材のせん断設計の基本的な考え方は、充膜形およびララス形の部材に対しては、(1)式に示すように、累加式による2等分し、橋子形の部材に対しては、橋子材の効果と、あばら筋の1/2を考慮し、RC はりとして等分し、 α 、RC 部分のせん断耐力は、その当時の、RC 規準に準じて等分するといっている。また、充膜形およびララス形に採用された累加式において、鉄骨部分と鉄筋エンフリート部分

の負担せん断力 Q 割合に対し、鉄骨部分 Q_{sb} 、全せん断力 Q に対し求めらるる Q_{sb}/Q と超
過した場合、超過した部分と無視することにあり、その割合を α とし、その程度、曲げモーメント
とせん断力 Q の相関性を考慮した設計式 $Q_{sb} = Q \cdot \alpha$ といふ。すなわち、鉄骨部分に対し、せん断力 Q
大きく負担せざるためには、そのせん断力に対する曲げモーメントに見合う Q_{sb} の鉄骨断面を必要と
するものがある。しかし、 $Q_{sb} = Q \cdot \alpha$ より小さい場合には、 $\Delta Q = (Q \cdot \alpha - Q_{sb})$ のせん断力と
鉄骨部分の法線の付着作用を媒介にして、鉄筋エンフート部分に移行せしめようとし、鉄骨部分に
純鉄骨として機能し、鉄筋エンフートの鋼材として機能 Q_{st} を併存せしめようといふ。

2.2 柱材のせん断破壊状に ついて

軸方向力、曲げモーメントおよびせん断力を受ける柱材の破壊性状に関しては、SRC柱材ばかり
でなく、RC柱についても、1950年代の初めより、国内・国外においてほぼ同様の実験的研究が行
われていた。過去の震害例で、RCおよびSRC柱に顕著なせん断破壊と発生し、例へば、地震を受け
たばかりに、柱材のせん断破壊性状の解明が重要性と、その当時の構造研究者に、感ぜさせら
れたことが知られる。1954年に、坪井善勝、若林実、木村保美は、RCばかりおよびSRCばかり
の一連のせん断実験に引続き「地震による、柱に大きなせん断力を生じ、柱のせん断力
による破壊するものは少なくないから、その方面の研究は、重要且急を要する」と考え、SRC
柱およびSRC柱材のせん断破壊実験を開始した。柱の断面は、半分の長さ 500×500 mm²の
T字形試験体に、軸力、曲げおよびせん断と、ある値のもとで比例載荷せしめること、実験方法と採用し
た、断面形状、 $b \times D = 600 \times 600$ mm²のRC柱と2体、断面形状、 $b \times D = 1200 \times 1200$ mm²のRC、SC
およびSRC柱
と38体、単調載荷に対して実験を行い、その実験と同様に、柱材のせん断耐力を決定する要素を独
立変数 x と y とする数個のグループを計画した。この研究では、RC柱およびSRC柱のせん断
耐力に関する実験式を提案するまでに至った。RC柱およびSRC柱のせん断破壊性状に関
する重要な知見を得たといえる。すなわち、SRC柱のせん断破壊形式としては、斜度力破壊、せん
断圧縮破壊のほか、片側の鋼材からエンフートに伝達された付着応力 τ 、せん断耐力 Q_{st} の、2
対側に伝達する場合、鉄骨 T とコンクリート面に滑り生ずると同時に、鉄骨の側面のエンフート、せん断
力の破壊機構が存在することと示した。鉄骨の付着破壊、エンフートの直接せん断破壊
と併発するもの、この論文では、ポテンシャル破壊（後述では、せん断付着破壊と示す）と
肩掛け、さらに、このポテンシャル破壊に対して耐力と、常用の付着応力 τ 式から計算し、 T
とコンクリートのエンフートの直接せん断耐力は、ほぼ Q_{st} 程度であることと示した。さらに、
RC柱では、帯筋の少ないものは、せん断 τ の割れ発生と同時に、せん断耐力 Q_{st} 急激的に低下あり、ある
程度の τ の確保を必要とするためには、帯筋比 ρ_s として $\alpha\%$ 以上必要であることと指摘し、かつ、SRC
柱について、楕円形よりも、正方形のものが、 τ の確保において優れていることと述べた。

しかし、SRCの設計における柱部材のせん断設計法としては、上述の研究が、一例のみであり、
柱材 Q_{st} の設計式を作成するためには、実験資料が不足しているために、便宜的に、はり材の設計式

*1) 国外において、RC柱のせん断破壊性状に関する実験的研究の論文を発表したもの

J. MORROW and I. M. VIEST "Shear Strength of Reinforced Concrete Frame Members without web Reinforcement"
Journ. of ACI, March 1957 のものが、最初である。

と採用することにしている。観準本文「柱」の解説に、柱材のせん断力の校定も、け、せん断税
できないことを記述している。

2.3 柱はり接合部のスウェーデン新破壊について

SRC構造の柱はり接合部の応力伝達機構に関する実験的研究としては、内藤多伸、嶋田明の1952
年の研究が、最初のものである。接合部においても、果敢強さへ、成立することに指摘するが、当
時は知見が乏しいから、地震力などの逆対称荷重、作用した場合の柱はり接合部のスウェーデン
新破壊性状に着目して実験的研究、行われたように、これは、1960年代の初めから、比較的最近
になつてからである。1961年に高田国三は、接合部のスウェーデン初期せん断の割合、発生すべきの
せん断能力は、 $T=(0.15\sim0.20)F_c$ 程度であると、接合部のスウェーデン終局耐力は、柱の2大さく、この実験
においては、柱はり部材の曲げ降伏が先行して報告し、定性的に、接合部のスウェーデン耐力は、
柱の2大さくことを述べている。また、同様に、仲威雄、斎藤光らの実験結果も「今回の実験では、
鉄骨のエンゲリートの協力により、鉄骨のエンゲリートの厚さは、かなり薄い設計でも、構造上失陥、な
いものと思われる」ことは、定性的な結果と一致しているが、柱はり接合部のスウェーデン耐力、および
その破壊機構について、不明な点も多く、これからSRCの観準においては、設計式を示すにはそ
つたいは、ない。

3. 最近の研究(新観準の背景)

1960年の後半より、SRC部材のせん断破壊に関する研究は、はり材から柱材に移行し、さらに
繰返し曲げせん断力と作用せん断力の場合の履歴特性は、おおくにその重点が、おかれたい。また、柱は
り接合部の繰返し荷重下におけるせん断破壊性状についても活発な研究、現在行われている。

3.1 はり材のせん断破壊について

H形鋼の生産と機会にして、充満形のH形鋼を主体にしてSRC部材、あるいは、SC部材の研究
が、1960年代の初めより開始された。そのうちの一例として、1967年に、横屋義典、若
林実、木沢美夫により、H形鋼を用いたSCはりの単調載荷の曲げせん断実験、断面形 $b \times D =$
 160×260 の11体の試験体に対して行われた。従来、非充満形のSC、あるいは、SRCはりに、
おいて、初期せん断の割合の発生は、せん断材法材の多寡によるのではないかと、非充満形の場合
には、鉄骨のエンゲリートの初期せん断の割合の荷重に関連することに認め、さらに、エンゲリート
の鉄骨のエンゲリートのせん断剛性比に、そのせん断力、分担さるべき決定して計算結果も、実験結果
とよく一致することを述べている。また、変形性状については、非充満形のSCはりよりも、著し
くじん性、増大することに指摘し、実大寸法に近いSCはりの終局せん断耐力式として

$$Q_u = Q_s + Q_c = Q_s + \{ (9 + 0.15 F_c) \cdot D/a \} b_j \quad (6)$$

の累加式とされている。

3.2 柱材のせん断破壊について

SRC柱材のせん断破壊に関する研究は、前述した、1954~1957年の研究の後、1970年の初めま
で一時、おこなわれていた。1968年の十勝沖地震により、RC柱のせん断破壊性状の解明の必要性が
広く建築学会、建築業などの間に認識され、RC柱のせん断設計法に対する再検討が、おこなわれ
るよう状況に対して、以前よりSRC柱材においてもせん断破壊するおそれがあることが、十

分に予測は出来ない。繰返し曲げせん断力を受けたせん断破壊が卓越するSRC柱のせん断耐力、最大耐力以後の変形性状、履歴特性、エネルギー吸収能力等を説明するため、1972年より著林安而宛一、中村武に、2. 一連の実験的研究を開始した。試験体の断面はL型充膜形SRC、格子形SRC、およびSRCと比較検討するためのRC柱と種類、せん断 $\lambda/\lambda_0 \leq R/D = 3$ および $R/D = 2$ (2.0a)の、軸力比 $N/\lambda_0 = 0.03$ および 0.6 (Nは累加強さ)に、1. 求めた中心圧縮耐力 P_c の種別、およびその実験変数と連なり、計18体の試験体について、変位振幅と柱部材内に対して 0.005 rad まで漸増させ、同一変位振幅で2回の繰返しを行い、 0.005 rad までの塑性変位振幅まで、計10回の繰返し載荷実験を行、L型せん断破壊を生ずる充膜形SRC部材の履歴曲線は、作用軸力 $P/N/\lambda_0 = 0.3$ 程度であるが、安定した触れ形を示し、変位振幅の増大にもならず、その保身せん断耐力は、鉄骨部材のせん断耐力に収束する。L型格子形SRC部材の履歴曲線は、RC部材の履歴特性、極め2種類と、作用軸力 $P/N/\lambda_0 = 0.3$ 程度であるが、顕著な逆S字形的、かつ、最大耐力以後のせん断耐力の劣化が著しい、吸収エネルギー能力の小さい履歴曲線を示すこと、明かにされた。また、繰返しせん断力により、せん断破壊を生ずるSRC部材の破壊様相として、せん断付着破壊があらわなことが、この実験において再確認された。また、鉄骨コンクリートに付着作用は、繰返し載荷に対して、変位振幅の小さい領域で、失われる可能性のあることを指摘し、さらに、曲げ破壊、せん断破壊の破壊形式、および充膜形、非充膜形の断面構成からも、中心圧縮耐力 P_c の60%の作用圧縮力を受けた場合には、軸め2材材の変形能力は小さく、柱部材内 0.005 rad 程度の変位振幅で崩壊することが示された。この研究により、得られた知見は、日本建築学会SRC構造分科会SRC柱のせん断破壊研究小委員会が行った4体の実大SRC柱のせん断実験の協同研究の基礎資料とされ、この実験と開発された載荷原理は、以後のせん断実験の実験法として発展した。

前述したように、1958年および1963年、SRC規準における部材のせん断設計法の再検討が必要となり、1970年よりSRC構造分科会2種2のせん断設計法を提案、検討された。前述したせん断力を受けるSRC部材のせん断破壊性状を定量的に評価できる実験資料が極めて少なく、せん断設計法の成案を得るには至らなかった。このため、同分科会では、1972年に、SRCのせん断破壊研究小委員会と組織し、一連の実験変数はもたない、充満形、うす形および楕円形の断面形 $a \times b \times D = 300 \times 300 \times 300$ の長大SRC試験体を用いて、一定耐力で確定的な繰返し曲げせん断力を受ける部材の、せん断耐力、破壊機構、変形性状、履歴曲線等について、画期的な協同研究を行うことにした。この時期に、建設省建築研究所を中心として、繰返し曲げせん断力を受ける長大RC柱のせん断破壊に関する実験的研究を開始された。

実験計画は、一方印に鈎骨木材を配置し、せん断スパン比 $R/D=3$ (せん断スパン比の影響を調べ、
 ために3体だけ $R/D=5$ とした) の L 、 α 、軸力比 $\gamma_0=0.2$ (軸力比の影響を調べ、ために、代表的
 な試験体について、 0.1 および 0.3 について2実験を行う) とし、桁腹形では、フレンチ厚さ、ウエグ厚
 さ、主鈎筋量、せん断補筋筋量、エンゲリート強度と、リヤス形では、リヤス材の角度、リヤス材の板
 厚、せん断補筋筋量と、格子形では、格子材の間隔、格子材の板厚、せん断補筋筋量とを、それぞれ
 実験変数に選んで、以下に示す。実験は、柱材の部材角を制御して行われ、柱部材角に与えた 0.03rad 、
 0.05rad 、 0.07rad 、 0.1rad 、 0.15rad 、 0.2rad 、 0.25rad 、 0.3rad 、 0.35rad 、 0.4rad 、 0.45rad 、 0.5rad 、 0.55rad 、 0.6rad 、 0.65rad 、 0.7rad 、 0.75rad 、 0.8rad 、 0.85rad 、 0.9rad 、 0.95rad 、 1.0rad 、 1.05rad 、 1.1rad 、 1.15rad 、 1.2rad 、 1.25rad 、 1.3rad 、 1.35rad 、 1.4rad 、 1.45rad 、 1.5rad 、 1.55rad 、 1.6rad 、 1.65rad 、 1.7rad 、 1.75rad 、 1.8rad 、 1.85rad 、 1.9rad 、 1.95rad 、 2.0rad 、 2.05rad 、 2.1rad 、 2.15rad 、 2.2rad 、 2.25rad 、 2.3rad 、 2.35rad 、 2.4rad 、 2.45rad 、 2.5rad 、 2.55rad 、 2.6rad 、 2.65rad 、 2.7rad 、 2.75rad 、 2.8rad 、 2.85rad 、 2.9rad 、 2.95rad 、 3.0rad 、 3.05rad 、 3.1rad 、 3.15rad 、 3.2rad 、 3.25rad 、 3.3rad 、 3.35rad 、 3.4rad 、 3.45rad 、 3.5rad 、 3.55rad 、 3.6rad 、 3.65rad 、 3.7rad 、 3.75rad 、 3.8rad 、 3.85rad 、 3.9rad 、 3.95rad 、 4.0rad 、 4.05rad 、 4.1rad 、 4.15rad 、 4.2rad 、 4.25rad 、 4.3rad 、 4.35rad 、 4.4rad 、 4.45rad 、 4.5rad 、 4.55rad 、 4.6rad 、 4.65rad 、 4.7rad 、 4.75rad 、 4.8rad 、 4.85rad 、 4.9rad 、 4.95rad 、 5.0rad 、 5.05rad 、 5.1rad 、 5.15rad 、 5.2rad 、 5.25rad 、 5.3rad 、 5.35rad 、 5.4rad 、 5.45rad 、 5.5rad 、 5.55rad 、 5.6rad 、 5.65rad 、 5.7rad 、 5.75rad 、 5.8rad 、 5.85rad 、 5.9rad 、 5.95rad 、 6.0rad 、 6.05rad 、 6.1rad 、 6.15rad 、 6.2rad 、 6.25rad 、 6.3rad 、 6.35rad 、 6.4rad 、 6.45rad 、 6.5rad 、 6.55rad 、 6.6rad 、 6.65rad 、 6.7rad 、 6.75rad 、 6.8rad 、 6.85rad 、 6.9rad 、 6.95rad 、 7.0rad 、 7.05rad 、 7.1rad 、 7.15rad 、 7.2rad 、 7.25rad 、 7.3rad 、 7.35rad 、 7.4rad 、 7.45rad 、 7.5rad 、 7.55rad 、 7.6rad 、 7.65rad 、 7.7rad 、 7.75rad 、 7.8rad 、 7.85rad 、 7.9rad 、 7.95rad 、 8.0rad 、 8.05rad 、 8.1rad 、 8.15rad 、 8.2rad 、 8.25rad 、 8.3rad 、 8.35rad 、 8.4rad 、 8.45rad 、 8.5rad 、 8.55rad 、 8.6rad 、 8.65rad 、 8.7rad 、 8.75rad 、 8.8rad 、 8.85rad 、 8.9rad 、 8.95rad 、 9.0rad 、 9.05rad 、 9.1rad 、 9.15rad 、 9.2rad 、 9.25rad 、 9.3rad 、 9.35rad 、 9.4rad 、 9.45rad 、 9.5rad 、 9.55rad 、 9.6rad 、 9.65rad 、 9.7rad 、 9.75rad 、 9.8rad 、 9.85rad 、 9.9rad 、 9.95rad 、 10.0rad 、 10.05rad 、 10.1rad 、 10.15rad 、 10.2rad 、 10.25rad 、 10.3rad 、 10.35rad 、 10.4rad 、 10.45rad 、 10.5rad 、 10.55rad 、 10.6rad 、 10.65rad 、 10.7rad 、 10.75rad 、 10.8rad 、 10.85rad 、 10.9rad 、 10.95rad 、 11.0rad 、 11.05rad 、 11.1rad 、 11.15rad 、 11.2rad 、 11.25rad 、 11.3rad 、 11.35rad 、 11.4rad 、 11.45rad 、 11.5rad 、 11.55rad 、 11.6rad 、 11.65rad 、 11.7rad 、 11.75rad 、 11.8rad 、 11.85rad 、 11.9rad 、 11.95rad 、 12.0rad 、 12.05rad 、 12.1rad 、 12.15rad 、 12.2rad 、 12.25rad 、 12.3rad 、 12.35rad 、 12.4rad 、 12.45rad 、 12.5rad 、 12.55rad 、 12.6rad 、 12.65rad 、 12.7rad 、 12.75rad 、 12.8rad 、 $12.85\text$

荷を行、載荷法則を採用してゐる。鉄骨部材の形式、およびせん断破壊の多寡にかかわらず、斜張力にともなう斜めひび割れは、部材角で、 0.003 rad 程度発生し、主鉄筋あるいは鉄骨フランジに沿つたせん断付着ひび割れは $(0.005 \sim 0.01) \text{ rad}$ 程度生じる。しかし、最大せん断耐力以後の変形過程では、斜張力のひび割れ成長は、見らる。せん断付着ひび割れは、材長にわたって著しく成長する、せん断付着破壊形式は、作用軸力、せん断スパンにかかわらず、全試験体に観察されたことを報告し、このせん断付着破壊に対するせん断耐力を詳細に検討してゐる。履歴曲線については、充膜形では極めて安定な吸収エネルギー量の大きい紡錘形を示し、種々の実験変数のいかにかわらず、部材角で、 $(0.01 \sim 0.015) \text{ rad}$ で最大耐力に達し、その以後の耐力低下は緩慢である。ララス形、椅子形では、部材角で $(0.005 \sim 0.01) \text{ rad}$ で最大耐力に達し、その以後の変位振幅の漸増にともなう、急激な耐力低下をともない、スリッパ形の履歴曲線を示し、特に椅子形では、吸収エネルギー量の極めて小さい曲線となることを述べてゐる。また、全試験体について、各同一変位振幅における繰返しによる耐力低下率は、サイクル毎に大きい値を示し、サイクル毎に繰返し回数が増加にともなう、その耐力低下率は、漸減し、ほぼ4回程度繰返し回数で、耐力低下率の収束値を推測できると考え、概略的に、充膜形を80%、ララス形を70%、および椅子形を60%の値と得てゐる。また、各々の変位振幅のサイクル毎の最大せん断耐力を結んで求めた除荷点連続曲線は、最大耐力以後、ほぼ、魚勾配をもつ直線に近似的であることを示してゐる。せん断耐力と実験変数との関係については、エンフリート強度、鉄骨部材のせん断耐力、せん断補強筋量、および軸力について詳細に検討してゐる。充膜形および非充膜形のいかにかわらず、SRC部材に内蔵される鉄骨部材は、エンフリートに付着効果は、繰返しせん断力を受けの場合には、ほぼ期待できず、したがって、鉄骨部材のせん断耐力 sQ_0 は、曲げ耐力から決定されるせん断耐力 sQ_{mo} もせん断耐力から決定されるせん断耐力 sQ_{so} に対して

$$sQ_0 = \min(sQ_{so}, sQ_{mo}) \quad (7)$$

で評価されることを示し、また、RC部分に対しては、そのせん断耐力 rcQ_0 は、曲げ耐力から決定されるせん断耐力 rcQ_{mo} もせん断耐力から決定されるせん断耐力 rcQ_{so} に対して

$$rcQ_0 = \min(rcQ_{so}, rcQ_{mo}) \quad (8)$$

を満足しなければならぬとし、RC部分のせん断耐力 rcQ_{so} は、前述したせん断付着破壊形式について、半理論的に求めよう。すなわち、鉄骨にエンフリートに付着作用は、期待できないものとし、鉄骨フランジ側面のエンフリートとせん断面における材軸方向に作用する平均抵抗せん断応力度 τ と、フランジ側面のエンフリートせん断面の有効巾を b' とし

$$\tau = \frac{b'}{b} \cdot \alpha_{\max} \cdot F_c + \beta_{\max} \cdot \rho_{ps} \cdot \sigma_s^* \quad (9)$$

を表現し、(9)式における未知量 $\beta_{\max}$ と、せん断補強筋量のみを変数として実験結果より

$$\beta_{\max} = 1 \quad (10)$$

とし、その値を用いて $\alpha_{\max}$ を

$$\left. \begin{aligned} F_c &\leq 321 \text{ kg/cm}^2 & \alpha_{\max} &= 0.289 - 0.00045 F_c \\ F_c &\geq 321 \text{ kg/cm}^2 & \alpha_{\max} &= 46.5 / F_c \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

*) (9)式は、せん断マックス理論によるものも解釈するにてもできる。

と α_{max} の値は、コンクリート強度の関数 c_{ti} に示してある。しかし、充膜形および非充膜形における α_{max} の相対平均を調べることも必要。

充膜形で $\alpha_{max} = 0.15$

非充膜形で $\alpha_{max} = 0.20$

(12)

したがって、充膜形と非充膜形との明確な相違を示すことは報告してある。しかし、充膜形、および非充膜形にそれぞれから、せん断耐力は、作用軸力の影響を受けないことを指摘し、その理由の一つとしてせん断付着破壊は、せん断面の直接せん断強度に関連するから、その直接せん断強度は、作用軸力の影響を受けないことをあげてある。しかし、SRC柱材のせん断耐力 Q_u は、(7)、(8)式より

$$Q_u = sQ_o + rcQ_o$$

(13)

結果式により、2表現され、(10)、(12)式の β_{max} 、 α_{max} を用いて、各試験体のせん断耐力を計算した結果は、充膜形、および非充膜形のいずれにおいても、実験値と極めてよく一致することも述べられている。また、柱部材角 α 、 0.03 rad の塑性変位振幅におけるSRC柱の保有せん断耐力の計算法を示し、この場合に対しても、実験結果とは一致することも述べられている。

このSRC柱のせん断破壊研究小委員会では、実験的研究により得られたいくつかの貴重な知見にも基づいて、SRC新規準の、せん断設計法の骨子として、作製されることになった。

一方、仲威雄、海野三蔵、森田耕次、立花正彦は、高張力鋼、充膜形式の斜角断面、高張力異形鉄筋および鋼管コンクリートと使用したSRC柱の単調、および繰返し曲げせん断力に対する耐力および履歴特性を求めた実験的研究を1974年に発表している。試験体断面は、 $b \times D = 240 \times 300 \text{ mm}$ で、一定集中荷重、単純はり形式で実験を行い、SRC柱の降伏および最大せん断耐力は、柱軸力の増加により、2上昇する傾向が認められ、その降伏せん断耐力 Q_y は、

$$Q_y = sQ_y + rcQ_m$$

(14)

により、2求められ、 sQ_y は、斜角断面において、作用曲げモーメントの影響を考慮に入れた鉄骨部分の降伏せん断耐力で、 rcQ_m は、大野・荒川式によるRC部分の最大せん断耐力としている。

また、山田裕、河村康、谷田雅彦は、1972年より一定軸力を単調曲げせん断力を受ける格子形のSRC柱のせん断変形性状に関する実験的研究に着手している。一方には斜角断面と配し、 $b \times D = 200 \times 400 \text{ mm}$ の試験体、および一方には斜角断面を配し、 $b \times D = 160 \times 160 \text{ mm}$ の試験体に対して $R/D = 2$ として実験を行い、最大耐力は、せん断補強材(せん断補強筋および格子材を含む)の増加により、2増大するが、最大耐力以後の変形過程では、コンクリートの崩壊により急激に耐力が低下し、脆性破壊期待ではあるが、直交方向の角鋼材により、2変形性能が著しく増大することも報告されている。

なお、加藤勉、秋山宏、榎原良一も $b \times D = 200 \times 250 \text{ mm}$ の断面の充膜形SRC柱の繰返し曲げせん断実験を1975年に行い、SRC柱のせん断耐力 Q_u は、(7)式の sQ_o と(14)式の rcQ_m により、2

$$Q_u = \text{MIN}(sQ_{so}, sQ_{mo}) + rcQ_m$$

(15)

と表現できると報告している。

繰返し曲げせん断力を受けるSRC柱のせん断破壊性状に関しては、最近の5年間の上記の諸研究により、2ある程度明らかにされ、その研究の旨は、一方には斜角主材を配置した試験体

トにより、2構成されるSRC柱はり接合部のせん断実験を行い、(16)式による計算値は、実験値に対して、かなり安全側の値とみられることを報告している。吉野次彦、狩野芳一、田中清は、1975年に、二方角の十字形鉄骨断面で構成されるSRC柱に、充満形のSRCはりで構成される柱はり接合部のせん断耐力について、精細に検討し、接合部10本V部分のコンクリートの抵抗力を、鉄骨7ヶ所Vで囲まれた部分で、帯筋で囲まれた部分に分離して評価する一方法を提案している。

なお、上述の柱はり接合部10本Vのせん断実験に用いた試験体形状は、ほぼL字十字形滑組であり、用図のはりおよび柱部材により、コンクリート10本Vに十分な圧縮傷の構成へ、期待できるものである。ト字形およびL字形滑組のように、十字形滑組に対して、コンクリート10本Vの拘束へ、あまり期待できない場合に対して、コンクリート10本Vのせん断抵抗力は、(17)、(18)式などにより評価できるものへ疑問があり、この点に着目して、1975年より、茂林実、南宏一、西村孝志は、一連の実験的研究を開始し、現在、その研究は、継続されている。実験へ、終了したL字形滑組の実験結果によれば、コンクリート10本Vの用図の拘束へ、十分な場合には、斜張力に比例した耐力以上のせん断抵抗力は、ほぼ見期待できない結果になっている。

4. 新規準における設計法

1975年11月に発表されたSRC構造設計規準17条の「部材のせん断力に対する算定」および19条の「柱はり接合部の算定」の解説に示された接合部10本Vの算定に関する、そのための設計式の考え方にについて述べることとする。

4.1 部材のせん断力に対する算定

せん断破壊を生ずる部材は、じん性にかけるので、曲げ破壊と先行させることにより、せん断破壊を起させないようにせん断設計式を変更した。また大変形振幅の繰返し載荷では、鉄骨にコンクリートが付着し、切欠けし、このため、せん断設計式は、鉄骨にコンクリートが付着を期待しないものにより、設計式に変更した。新規準の基本的考え方である。

せん断設計の方針は、長期荷重時の柱材では、せん断ひび割れを生じさせないようにする。長期、短期荷重時のはり材、および短期荷重時の柱材では、RC部分、鉄骨部分の、そのせん断耐力を上回るようにする。長期荷重時のはり材の鉄骨部分、RC部分の設計せん断力へ、鉄骨部分にRC部分の曲げ剛性に比例して分配されるものとせし、便宜的に、その断面係数に比例するものとした。同様の方針で、短期荷重時のはり材で中間荷重へ、ある場合は、せん断力 Q_0 へ、分配されるものとせし、さらに、短期荷重時のはり材、および柱材の設計せん断力は、RC部分については部材端へ、そのせん断力曲げモーメントに達する時のせん断力と、鉄骨部分では、部材端へ、短期許容曲げモーメントに達するべきせん断力と、そのせん断力を用いることと原則とした。ただし、場合により、(特に、柱材において)RC部材の部材端のせん断力曲げモーメントへ、短期許容曲げモーメントに対して、非常に大きくなる場合もあると、せん断破壊によるじん性の不足と耐力の引き延ばし、補強を必要とする設計としている。長期荷重時の柱材の許容せん断力は、SRC柱とRC柱とをRC柱のせん断ひび割れ荷重、あるいは、せん断付着ひび割れ荷重へ、鉄骨 σ_{ty} により、増加することと考慮して求めたといわれている。長期、短期荷重時のはり材、および柱材の鉄骨部分の許容せん断力は、純鉄骨のはりあるいは柱の算定耐力 N_{ty} へ、この計算法による、格子形の鉄骨部

材は、フイレンドール形式の部材として取り扱うことにある。通常の形状寸法、格子形鉄骨の許容せん断力は、柱の小さな断面と比べると比較的小さい。また、RC部分の許容せん断力は、せん断破壊（斜展力破壊、あるいは、せん断圧縮破壊などを含む）により、決定される許容せん断力

$$\left. \begin{array}{ll} \text{はり材では} & rQ_A = b \cdot r_j (\alpha f_s + 0.5 \omega f_t \cdot p_w) \\ \text{柱材では} & rQ_A = b \cdot r_j (f_s + 0.5 \omega f_t \cdot p_w) \end{array} \right\} (19)$$

と、せん断付着破壊により、決定される許容せん断力

$$\text{はり材、柱材とも} \quad rQ_A = b \cdot r_j \left(2 \cdot \frac{b'}{b} \cdot f_s + \omega f_t \cdot p_w \right) \quad (20)$$

のうち、いずれか小さい方の値を、RC部分の許容せん断力としていふ。なお、旧規準では、断面設計について累加強式が適用し、しかも、構造計算を簡単にするために、曲げせん断が相互関係をあまり考慮していなかった。新規規準では、鉄骨部分およびRC部分のそれぞれに対して、つり合い条件、および塑性条件がある程度考慮し、必要の場合には、曲げせん断の相互関係を考慮した設計式を採用している。

4.2 柱はり接合部におけるせん断の算定

柱はり接合部におけるせん断の設計式は、部材の曲げせん断の設計式から作成され、得られるが、この新規規準本文には、設計方針を述べたにすぎない。設計式としては、一試案を解説に示すにすぎない。柱はり接合部におけるせん断は、長期荷重時には、柱材のせん断設計と同様に、接合部におけるせん断の割合と発生はなすようにし、短期荷重時には、部材のせん断設計と同様に、接合部におけるせん断破壊する以前に、はり材および柱材の曲げ破壊が、先行することと設計方針とし、短期荷重時に対して、

$$eV_c (2 \cdot f_s \cdot \psi + p_w \cdot \omega f_t) + V_s \cdot f_s \geq \min \left(\frac{uM_{b1} + uM_{b2}}{1 + \xi}, \frac{uM_{c1} + uM_{c2}}{1 + \eta} \right) \quad (21)$$

の設計式を提案している。

5. 結語

SRC構造部材のせん断破壊に関し、1930年から現在までに、我が国で行われた諸研究の研究成果の要約を中心に、SRC構造の柱はり接合部、および柱はり接合部におけるせん断破壊性状、および、SRC構造計算規準に示された試験式の変遷について、その概要を述べた。SRC構造部材は、鉄骨部材とRC部材により構成され、力学的に極めて複雑な挙動を示すものがある。特にせん断破壊については、その力学的挙動と関連する諸因子の決定が、曲げ破壊に比べて、極めて困難で、現在の段階では、単純あるいは、繰返し載荷に対する、せん断耐力およびその破壊機構が、解明された状況にあり、履歴特性の定量的な把握については、今後の研究成果によることと、極めて大きい。また、今回の新規規準では、SRC構造としての力学的特性、特に「ねばり」を積極的に取り入れた設計法はない。今後、規準が、改定される際には、「ねばり」を考慮に入れた設計体系、形状からいってもあると思われる。そのためには、部材、接合部および骨組全体の変形性状と合理的にモデル化する方法、特に、最大耐力に達するまでの弾塑性領域におけるせん断変形および、最大耐力以後の塑性領域におけるせん断破壊ととも、変形性状のモデル化に関し、研究を行っていくこと、必要である。さらに変形性状を考慮する設計体系があることも、最終的に基づいて設計体系に漸次、移行していくと思われる。そのための基礎研究の蓄積が、必要と思われる。

参考文献

5. RC構造の柱はり接合部のせん断破壊性状に関する研究は、80編研究発表会、RC重点組に於て示すことである。
1. 浜田稔：鋼 $\times$ コンクリート応曲材に関する研究 建築雑誌 527号, 1929年5月 pp.1349~1410
2. 浜田稔 松村豊：鋼 $\times$ コンクリート梁の応力強度に就て 建築雑誌 557号, 1932年5月 pp.533~543
3. 市田周三：鉄骨鉄筋コンクリート構造に関する研究, 特に梁の剪断破壊について, 日本建築学会論文報告集 (491) 55号, 1957年2月, pp.22~31, (492) 56号, 1957年6月, pp.30~38
4. 坪井善勝 著林実 木永保美：鉄骨鉄筋コンクリートに関する実験的研究 (204) — 剪断力と変位・梁の実験 —, 日本建築学会論文報告集, 55号, 1957年2月, pp.32~39
5. 坪井善勝 著林実 木永保美：鉄骨鉄筋コンクリートに関する実験的研究 (205) — 軸方向力と剪断力と変位・柱の実験 —, 日本建築学会論文報告集, 56号, 1957年6月 pp.39~47
6. 樫尾義典 著林実 木永保美：H形鋼を用いた鉄骨コンクリートに関する研究 — No.2. 曲げモーメントとせん断力と変位に関する研究 —, 日本建築学会論文報告集, 133号, 1967年3月, pp.1~7
7. 著林実 南宏一 中村武：解屈したせん断力と変位・鉄骨鉄筋コンクリート柱の履歴特性に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報 15号B, 1972年3月, pp.69~97
8. 山田稔 河村康 谷田雅弘：軸圧と変位・鉄骨鉄筋コンクリート柱の剪断変形性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 1972年10月, pp.1115~1116
9. 仲威雄 池野三蔵 森田耕次 立花正彦：鉄骨鉄筋コンクリート柱の耐力・履歴特性に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集 232号, 1975年6月, pp.89~99
10. 著林実 南宏一：一定軸力と一定の解屈した曲げせん断力と変位・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.3, No.3, March, 1976, pp.1~17
11. 仲威雄 斎藤光 吉本昌一 阿部静雄 渡延市 梅沢保 小川三郎 尾崎昌記：鉄骨鉄筋コンクリート構造に関する実験的研究 (柱・はり接合部の実験), 日本建築学会論文報告集, 69号, 1961年10月 pp.613~616
12. 市田周三：鉄骨鉄筋コンクリート柱はり接合部に関する一実験, 日本建築学会論文報告集, 69号, 1961年10月, pp.617~620
13. 樫尾義典 著林実 木永保美：H形鋼を用いた鉄骨コンクリートに関する研究 — No.6 鉄骨コンクリート仕口部分の強さに関する研究 —, 日本建築学会論文報告集, 137号, 1967年7月, pp.1~8
14. 著林実 松井干秋 南宏一：解屈した荷重と変位・鉄骨コンクリート柱はり接合部の弾塑性性状に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報 12号A, 1969年3月 pp.351~365
15. 著林実 中村武 森野建輔：鉄骨鉄筋コンクリート十字形管組解屈した軸力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 1973年10月, pp.1537~1538
16. 吉野次彦 狩野芳一 田中清：鉄骨鉄筋コンクリート造柱はり接合部の実験的研究 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 1975年10月, (491) pp.1217~1218, (492) 1219~1220
17. 著林実 南宏一 西村泰志：鉄骨鉄筋コンクリート柱はり接合部のせん断破壊に関する実験的研究 (201, L字型管組), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 1975年10月, pp.1215~1216