

論文 RC 有孔梁の剪断耐力に及ぼす補強方法と剪断スパン比の影響

池田秀樹^{*1}・佐藤立美^{*2}

要旨：施工段階で開口が設けられた鉄筋コンクリート有孔梁の設計施工の現状とRC梁構造特性調査から、RC梁の形状や配筋量によっては、開口部剪断補強に関する安全性の確保が困難となる場合があることを指摘した。次に、現在広く採用されている各種形状の開口部簡易補強金物を使用した有孔梁の剪断耐力に関する既往の274体の実験データを収集し解析を行った。その結果、開口部両側の縦筋量に比べて斜め筋量の多い補強方法の場合、および剪断スパン比の小さい場合には、剪断耐力実験値と修正広沢式との適合性が悪くなることを指摘し、新たに適合性の良い剪断耐力下限式を提案した。

キーワード：鉄筋コンクリート有孔梁、剪断耐力、補強方法、剪断スパン比

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の無開口梁に比べてRC有孔梁は、開口部の応力集中による剪断亀裂の早期発生、断面欠損による剪断耐力の低下と剪断破壊の先行等の著しい構造特性の差異があるため、構造設計段階で有孔梁としての耐力と変形性能について検討すべきである。しかし、実際には無孔梁として設計されたRC梁に、施工段階で貫通孔の位置・数・大きさが決定され、補強金物メーカー各社の技術資料により開口補強方法が検討され施工されている。この場合の補強設計法は、いづれも基本的には修正広沢式で計算した有孔梁の剪断耐力が無孔梁の設計剪断耐力以上となるように必要な開口部補強量を決定する母材耐力保証設計法が採用されている。

本論は、これらRC有孔梁の設計施工の現状と、現在広く採用されている各種の簡易開口補強金物の補強効果を確認するために行われた有孔梁の剪断実験データを解析し、現行の貫通孔補強設計施工に関する適切な適用範囲を明らかにするとともに、RC有孔梁の剪断耐力式（修正広沢式）の適用妥当性について検証するものである。

2. RC有孔梁の施工の現状調査

2. 1 調査方法と有孔梁の施工現状

実際に建築現場施工段階で開口が設けられたRC梁に関する補強設計データシートを補強金物メーカー2社から入手し、これらのRC梁の構造特性を調査した。収集した資料はA社では1994年7月、B社では1993年10月の各一ヶ月間に、施工現場からの要請により補強設計された梁である。収集データの合計建物棟数は535棟であり、建物の用途別分類は、マンション・住宅・ホテルなどの民間住居施設が41.5%、学校・役所・病院等の公共施設が32.8%、事務所・工場・サービス施設等の比較的設備配管の多いと思われる建物が25.7%となっている。収集したRC梁の総本数は7278本で、内訳は基礎梁2851本、一般階の大梁3540本、小梁887本となっている。但し、同一の建物の梁で大きさ・形状・配筋等の全てが等しいものは1本と数えている。[2]

RC梁の使用コンクリート強度は、Fc210が55.0%、Fc240が37.1%、Fc300以上は1.7%で最大

*1広島工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2広島工業大学教授 工学部土木工学科，工博（正会員）

値はFc360であった。主筋はSD345が96.8%であり、SD295とSD390がそれぞれ1.6%使用されている。

あばら筋は99.8%がSD295であり一部SD345の使用がみられた。梁幅は $b=15\text{cm}\sim 220\text{cm}$ 、梁背は $D=45\text{cm}\sim 640\text{cm}$ 、スパンは $L=80\text{cm}\sim 18\text{m}$ まで多岐にわたっている。

調査した梁のあばら筋比(P_w)と剪断スパン比(M/Qd)の分類を図-1に示す。

これらの梁の57.4%は剪断スパン比が3.0以上であり、曲げモーメントが支配的な長い梁が多い。しかし、 $M/Qd < 1.0$ の非常に短い梁の存在も7.2%みられた。

あばら筋比 P_w は0.3%~0.4%の場合が最も多いが、これは剪断スパン比 M/Qd の大きい梁が多いことにも起因している。

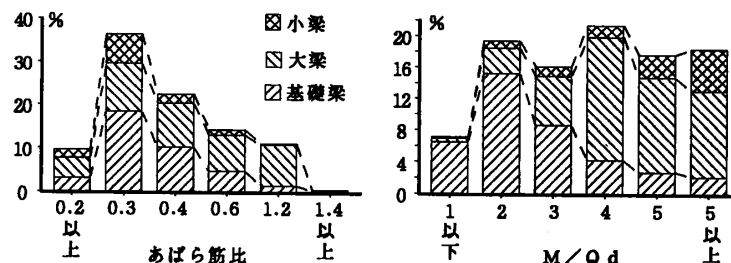


図-1 あばら筋比と剪断スパン比の分類

データシートには、開口可能な開口径(H)の全てについて補強計算がされており、実際に施工された開口径比(H/D)や貫通孔の位置は不明である。しかし、この間の補強金物の納入実績によると、開口径は $H=15\text{cm}$ 以下のものが82.9%を占めており、30cm以上のものは1.2%に過ぎない。この納入実績とデータシートに記載されている最大開口径より、有孔梁の実際の開口径比を推定すると、図-2に示す割合となった。実際の有孔梁の場合、 $H/D \geq 1/4$ のものは20%程度であり、 $H/D \leq 1/5$ の比較的小開口径比の割合が多い。

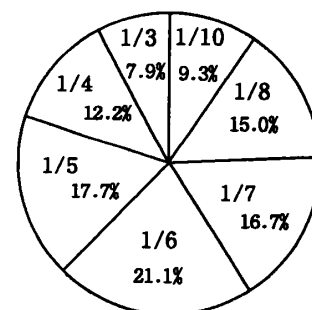


図-2 開口径比率(H/D)

2. 2 調査した梁の剪断耐力

2.1の資料のすべての梁について日本建築学会RC規準式により各種耐力を再計算した。図-3は、一般階の大梁について終局剪断耐力(荒川式下限値) Q_u と、RC規準式の許容剪断耐力 Q_{as} との比 Q_u/Q_{as} と剪断スパン比 M/Qd の関係を、 $M/Qd < 6.0$ の範囲について示したものである。当然、基礎梁、小梁でもほぼ同様な関係が得られている。

図-3によると、 Q_{as} が Q_u を上回る梁が全体の11.12%あり、これらのほとんどが M/Qd が1.0~4.0の範囲に集中している。しかし、 $M/Qd < 1.0$ では Q_u/Q_{as} が1.0を下回るものは無い。また剪断スパン比が1.0から3.0の範囲では、 M/Qd が大きくなると共に Q_u/Q_{as} は増大し、剪断スパン比が3.0以上では Q_u/Q_{as} はほぼ一定の値に収束している。これは、RC規準式の Q_{as} に導入されている、剪断スパン比の影響が大きいと考えられる。

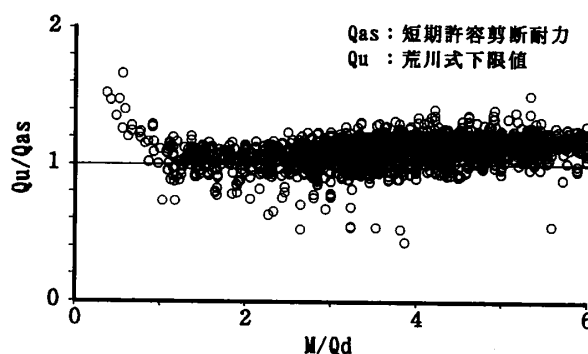


図-3 Q_u/Q_{as} と M/Qd の関係

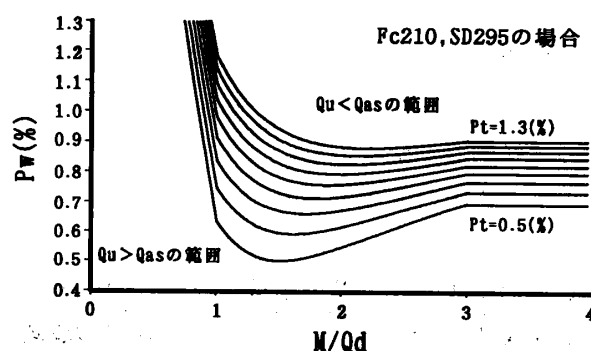


図-4 RC規準式による Q_u と Q_{as} の関係

日本建築学会RC規準式による Q_{as} と Q_u の関係をみると、例えばコンクリートの設計強度 F_c210 、あばら筋SD295の場合には図-4の関係がある。図-4に示すように、RC梁の設計条件によっては短期許容剪断耐力が終局剪断耐力を上回る計算となる場合があるため、梁の剪断補強はもとより開口補強設計において、主筋量 P_t が小さい場合には、母材の剪断耐力を保証するだけでなく、許容剪断耐力に対する検討を行わなければ必ずしも安全性が確保されない場合があると言える。

次に、梁の曲げ降伏先行型設計を前提とし、かつ梁の両端降伏時剪断力の1.30倍以上の終局剪断耐力を確保することを条件に、それぞれの梁に開口可能な最大開口径 H_c を修正広沢式により逆算した。この時、開口部の剪断補強筋比(ΣP_{w0})をRC梁のあばら筋比(P_w)と等しいとしている。

逆算結果によると計7420本の梁の約80%は、上記の条件で、 $H_c/D=1/3$ 迄の開口を設けることが可能であるが、逆算結果が $H_c/D < 0$ となり、したがって過大な開口補強筋量となるか、開口を設けることが設計上不可能となる梁が398本(5.5%)存在していることが判明した。

図-5に、大梁について開口可能な H_c/D と M/Q_d の関係を示したが、 M/Q_d が小さい梁ほど H_c/D が小さくなる傾向が明白である。

以上のRC梁の現状調査から、RC梁を有孔梁とする時の開口部剪断補強設計に関し、RC梁の形状や配筋設計によっては、必ずしも全ての梁について同等の安全性が確保できないこと、特に剪断スパン比 M/Q_d の小さい梁に開口を設ける場合については、剪断耐力式の妥当性について充分検討を行う必要があることが判明した。

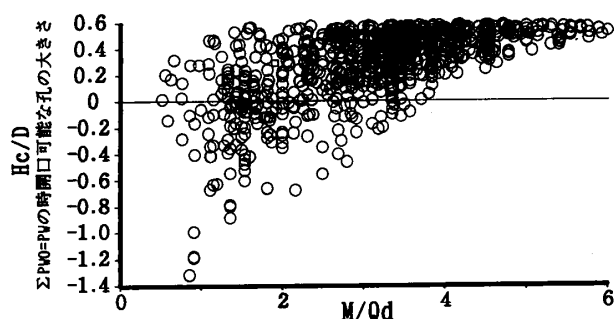


図-5 H_c/D と M/Q_d の関係(大梁3520本)

3. RC有孔梁の剪断耐力に関する既往の実験結果

3.1 既往の試験体概要

RC有孔梁の開口補強金物として、従来の斜め補強筋に代わる数多くの各種形状の簡易補強金物が提案され実用化されている。これらの各種形状の簡易補強金物はいずれもその補強効果について実験的に剪断耐力を確認した上で適用範囲・設計方法等が示されている。

ここでは、1985年以後に発表された簡易補強金物を使用した有孔梁の剪断耐力に関する実験資料を収集した。[3]~[10]

収集した資料に使用されている簡易補強金物の形状は、当研究室での4種類の補強金物を含め計10形状12種類であり、それらの補強金物の形状を図-6に示した。

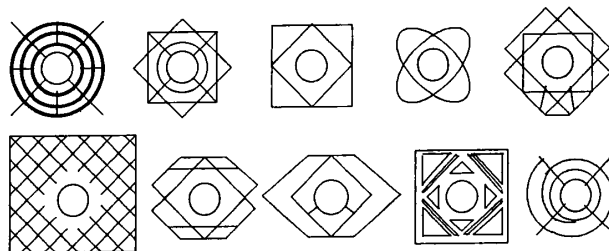


図-6 補強金物形状図

有孔梁の剪断実験の試験体数は、当研究室の127体を含め274体である。試験体のコンクリート強度は、 F_c240 以下が19.0%、 $F_c240 \sim F_c300$ が46.3%で、 F_c300 以上の高強度コンクリートが34.7%であり、最大強度は F_c520 であった。

既往の試験体の梁背は30cm~90cmであり、剪断スパン比 M/Q_d は全て $M/Q_d < 3.0$ となっているが、これは剪断破壊を

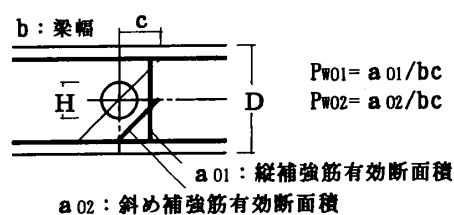


図-7 開口部補強

先行させることにより、有孔梁の剪断耐力実験値を確認するために必要な実験計画によるものと考えられる。試験体の剪断スパン比は $M/Qd=2.0$ と $M/Qd=1.5$ のものが最も多くそれぞれ61体、59体であるが、それ以外は $M/Qd<1.5$ のものが110体であり、残り44体が $M/Qd>1.5$ となっている。試験体の開口径比(H/D)は、 $H/D=1/3$ のものが75.9%、 $H/D=1/4$ が13.5%、 $H/D=1/5$ 以下が10.6%となっており、大開口の有孔梁試験体が多い。

274体のRC有孔梁試験体のあばら筋比(P_w)の分類を、図-8に示す。試験体に採用された P_w は0.4%程度のものが最も多く、図-1に示した実際施工されたRC梁のあばら筋比に比べ P_w の小さいものが多い。

開口補強方法は、各簡易補強金物の種類毎にその形状や使用鉄筋強度等は異なっているが、開口部補強の考え方は、いずれも開口部左右の補強有効範囲C内の縦筋と斜め筋の補強効果を同時に期待する設計となっている。

試験体の配筋計画による有効範囲内の縦筋比(P_{w01})と斜め筋比(P_{w02})の関係を図-9に示す。 P_{w01} の使用範囲は0%~1.4%、 P_{w02} は0%~2.5%であり、比較的斜め補強筋比 P_{w02} の多い補強方法となっている試験体が多い。また、開口部全補強筋比 ΣP_{w0} は、 $\Sigma P_{w0}<2.0\%$ の試験体が89.8%となっているが、最大補強筋比は $\Sigma P_{w0}=2.86\%$ であった。

3. 2 剪断初亀裂発生耐力

既往の試験体数 274体中、開口部剪断初亀裂荷重を記録しているものは 182体である。開口部剪断初亀裂発生時のコンクリートの剪断応力度 τ_{cr} の F_c に対する比と剪断スパン比 M/Qd の関係を図-10に示す。

剪断初亀裂応力度 τ_{cr} と M/Qd の相関関係は見られず、いずれも $\tau_{cr}=0.015\sim0.03kc(500+F_c)$ 程度でほぼ一様になっている。このことは、無孔梁の場合では亀裂発生時のコンクリートの剪断応力度は M/Qd が小さいほど大きくなる傾向を持つことに対して明らかに異なっている。

また、この開口部剪断初亀裂の伸展拡大で剪断破壊に至る例はほとんどないことから、開口補強筋が開口部45°方向から生じる剪断亀裂の伸展を防止する効果を示していると言える。

3. 3 終局剪断耐力

既往の実験データによると、同一形状の簡易補強金物の剪断実験においても終局剪断耐力実験値にはかなりのばらつきが見られている。また、ほぼ同一条件の実験計画の試験体についても簡易補強金物形状・種類により相当の差異が見られており、したがって適用範囲等は当然異なるものとなっている。しかし、有孔梁の剪断耐力実験値は補強金物形状や使用材料強度等の影響よりも、ほぼ同一の開口補強の場合には、試験体の剪断スパン比による影響が大きいことに着目した。

したがって、既往の試験体の終局剪断耐力実験値 tQu と修正広沢式計算値 cQu の比(剪断余裕度)を再計算して求め、 tQu/cQu と剪断スパン比 M/Qd の関係を図-11に示した。図-11中、 $tQu/cQu<1.0$ となっている試験体の割合は14.6%であるが、 $M/Qd\leq 1.0$ の範囲については、 $tQu/cQu<1.0$ となる

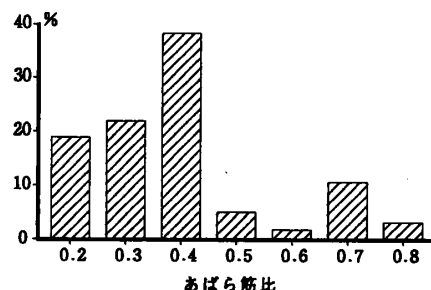


図-8 あばら筋比の分類

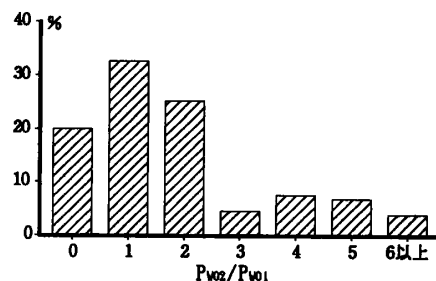


図-9 P_{w02}/P_{w01} の分類

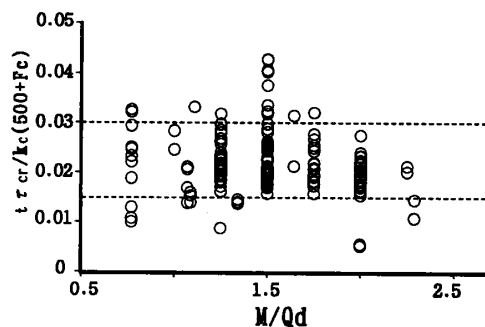


図-10 τ_{cr} と M/Qd の関係

試験体は47.1%となっており、剪断余裕度は M/Qd により明らかに異なることが判る。

tQu/cQu と M/Qd の関係を求める時、 M/Qd 毎の試験体数が非常に異なっているため、同一補強金物形状で同一剪断スパン比の試験体毎の剪断余裕度の平均値を計算し、この平均値と M/Qd との関係を求め次式を得た。

$$tQu/cQu = 0.99 + 0.134M/Qd \quad \cdots (1)$$

但し、 $M/Qd > 2.0$ の範囲では、 tQu/cQu はほぼ一定の値に収束しているが判った。

次に、有孔梁試験体の終局剪断耐力時剪断応力度 τ_u と M/Qd の関係を図-12に示し、同時に修正広沢式計算値を図示した。

図-12に見られるように、修正広沢式計算値を下回る試験体が14.6%あることから、修正広沢式は実験値の下限值または平均値

のいずれにも適合していないと考えられる。また、有孔梁の剪断耐力95%上限値は修正広沢式の2.74倍となるが、 $M/Qd < 1.0$ の試験体では上限値付近の実験値は存在していないことが指摘される。

また、開口補強方法の差異による修正広沢式の適合性を検証するに当たり、開口部縦筋比 P_{w01} と斜め筋比 P_{w02} の比を考え、 tQu/cQu と P_{w02}/P_{w01} の関係を図-13に示した。全試験体の tQu/cQu の平均値は1.19であるが、図-13より明らかに P_{w02}/P_{w01} の大きい試験体ほど tQu/cQu は小さくなっており、過大な斜め筋比 P_{w02} の補強効果は小さくなると言える。

tQu/cQu と P_{w02}/P_{w01} の関係を求めると、

$$tQu/cQu = 1.24 - 0.028P_{w02}/P_{w01} \quad \cdots (2)$$

となり、特に、 $P_{w02}/P_{w01} > 4.5$ ではほとん

どの試験体が tQu/cQu の平均値を下回っており、開口部全補強筋量で有孔梁の剪断耐力を評価することには疑問がある。なお、 $tQu/cQu < 1$ となる試験体の75%は、 P_{w02}/P_{w01} が2.0以上の斜め補強筋比の多い開口補強方法を採用している試験体の場合である。

以上の結果より、既往の有孔梁試験体の剪断耐力の下限値を適切に評価するため、修正広沢式に(1)式で得られた剪断スパン比に対する正の勾配と、(2)式で得られた P_{w02}/P_{w01} に対する負の勾配を導入することとした。(1)式の M/Qd の影響は、前述したように $0.5 < M/Qd < 2.0$ の範囲で正勾配を持つことを考え、この範囲について修正広沢式の第1項に(1)式を乗じ、 M/Qd に関わる係数を決定した。次に、(2)式は斜め筋比が大きいほど左辺が小さくなることから、修正広沢式の第2項に(2)式の負勾配の影響 $(1 - 0.028P_{w02}/P_{w01})$ を乗じ、斜め筋比の低減係数を略算的に求めた。この

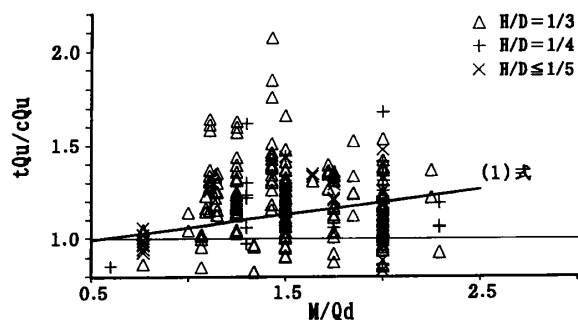


図-11 tQu/cQu と M/Qd の関係

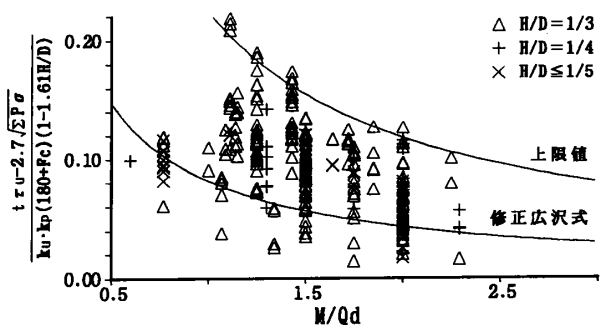


図-12 τ_u と M/Qd の関係

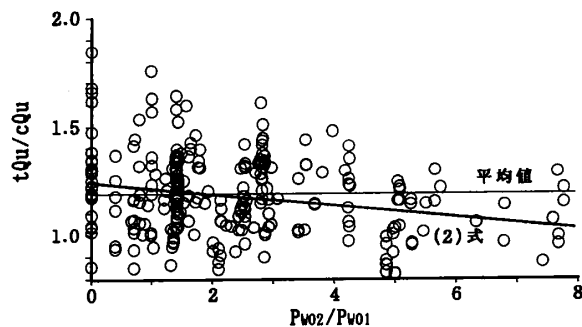


図-13 tQu/cQu と P_{w02}/P_{w01} の関係

場合低減係数は P_{w02}/P_{w01} の値によって異なるものとなるが、 $P_{w02}/P_{w01}=4.5$ では0.72となり、これは近似的に $1/\sqrt{2}$ とすることができる。以上実験データの解析結果から、既往の有孔梁の剪断耐力下限値を適切に評価できる式として下式を提案する。

$$cQu' = \left\{ \frac{0.054Pt^{0.23}(180+Fc)(1-1.61H/D)}{M/Qd+0.3} + 2.7\sqrt{P_{w01} \cdot \sigma_{y01} + (1/\sqrt{2}) \cdot P_{w02} \cdot \sigma_{y02}} \right\} bj \quad \dots(3)$$

図-14に(3)式による剪断耐力計算値 cQu' を用いた場合の τ_u と M/Qd の関係を示す。図-14に示すように、(3)式を下回るものは5.5%となり、既往の274体の実験値の終局剪断耐力の下限値を適切に評価できるとともに、下限値と上限値の幅も小さくなることでより合理的な評価が可能になると考えている。

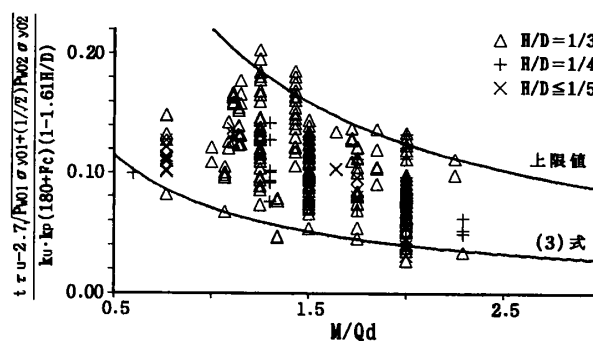


図-14 τ_u と M/Qd との関係

4. 結論

本研究で得られた、有孔梁の剪断耐力と補強方法・剪断スパン比の関係を以下に要約する。

- (1) RC梁に開口を設ける場合、形状や配筋量によって必要な安全率を確保できない場合が存在する。
- (2) RC梁の設計条件により計算上 $Q_{as} > Q_u$ となる場合があり、剪断補強時に十分検討する必要がある。
- (3) 有孔梁の剪断余裕度 tQu/cQu は、 $M/Qd < 2.0$ の範囲では剪断スパン比に比例して大きくなる。
- (4) 開口補強方法として斜め筋比が多くなると、剪断耐力実験値は全開口部補強筋量に比例しない。
- (5) 既往274体の剪断耐力実験値の下限値を適切に評価できる式として(3)式を提案した。

【参考文献】

- [1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1988
- [2] 佐藤立美，増田憲治：鉄筋コンクリート有孔梁の開口補強設計の現状に関する調査研究，日本建築学会大会梗概集，C-2，pp. 463-464，1995. 8
- [3] 建設技術評価書：鉄筋コンクリート造のはり貫通孔補強材の開発，建技評第87401～87405号，1988. 8
- [4] 佐藤立美，田中博昭，池田秀樹：交差楕円形状の開口補強金物で補強したRC有孔梁の剪断補強効果に関する研究(その1，その2)，日本建築学会大会梗概集，1995. 8
- [5] 佐藤立美，菊本一高：新形状の補強金物による鉄筋コンクリート有孔梁の開口補強に関する実験的研究(その3，その4)，日本建築学会大会梗概集，1993. 9，1994. 9
- [6] 黒正清治：鉄筋コンクリート造有孔梁の実験的研究(その1～その5)，日本建築学会大会梗概集，1981. 9
- [7] 東洋一，他：斜めワイヤメッシュで補強した鉄筋コンクリート造有孔梁の多数回繰返し水平耐力実験(その1～その6)日本建築学会大会梗概集，1981. 9，1983. 9，1985. 10
- [8] 下妻泰：鉄筋コンクリート有孔梁のせん断伝達に関する実験研究，日本建築学会大会梗概集，Vol. C，pp. 329-332，1990
- [9] 福地保長，他：正方形鉄筋リグで補強した鉄筋コンクリート造有孔梁の実験的研究(その2)，日本建築学会東海支部研究報告，1984. 10
- [10] 三原重朗，中澤淳，益尾潔，南宏一：高強度開口補強筋を用いたRC有孔梁のせん断破壊性状，コンクリート工学年次論文報告集，1993. 6