

論文

[2052] 鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断耐力評価式に関する検討

清水 泰*¹ ・ 李 正浩*²

1. はじめに

鉄筋コンクリート造梁に開孔を設ける際のせん断補強方法としては、現在までに多種多様なものが提案されている。特に、簡易補強材を用いた開孔部補強方法は、現在、様々なものが氾濫しており、多くの製品が市販され建設現場で使用されている。これらの補強方法は施工性の改善、施工管理の容易さ、工場生産品の使用による品質の向上、特殊技能者の不足解消等と言った利点があるため一般には歓迎され利用されているが、中には、耐震性能上好ましくないと考えられる補強方法も見られる。

また、各種の補強を施した鉄筋コンクリート造有孔梁の耐震性能に関しては古くから多くの実験研究が行われており多数の資料が蓄積されて来ている[1]。最近では解析的な研究[2、3]や総合的な研究も行われており有孔梁のせん断耐力の推定式も数種類の算定式が提案されている。

本論文は上記の現状を考慮したもので、最近行われた簡易せん断補強材を用いて円形開孔を補強した55体の鉄筋コンクリート造有孔梁の実験結果[4~7、他多数]を収集、整理し、各構造因子のせん断耐力に及ぼす影響を統計的に調査、分析し、既往のせん断耐力推定式の信頼性に関して検討を加えた結果をまとめたものである。

2. 実験資料の内訳

本研究で用いた実験資料は、参考文献(4)~(7)等で公表されているもので、文献(4)の20体の試験体を中心に収集、整理、検討を行った。調査対象とした実験は、簡易補強材を用いて補強した鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断耐力に着目して行われた実験研究で、比較的最近行われたせん断加力実験を対象とした。また、資料収集および整理を行う際に、以下に示す条件に適合した試験体のみを採用した。

- (a) 鉄筋コンクリート造有孔梁試験体、 (b) 逆対称応力加力を行った実験、
- (c) 主筋が一段配置の試験体、 (d) 開孔位置が部材中央部で、孔数は1の試験体、
- (e) 開孔径比 H/D は材せい D に対して $1/3$ 以下の試験体

以上の条件に適合した試験体は総数で55体であった。なお、鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断耐力に関して統計的分析を加える際には、この中からせん断破壊した試験体を選出するために、さらに、次に示す条件により実験資料の選定を行った。

- (f) 実験で曲げ破壊した可能性が高い試験体 $\cdots \cdots \cdots \circ Q_y < \circ Q_m$ となる試験体
- (g) 曲げ破壊指向型で設計されていると考えられる試験体 $\cdots \cdots \cdots \circ Q_y < \circ Q_H$ となる試験体
- (h) 開孔部以外でせん断破壊した可能性のある試験体 $\cdots \cdots \cdots \circ Q_{mean} < \circ Q_H$ となる試験体

$$\circ Q_y = 0.9 \Sigma a_t \cdot s \sigma_y \cdot d / a \quad (1)[8]$$

$$\circ Q_H = \{0.092 k_u \cdot k_p (180 + c \sigma_B) (1 - 1.61H/D) / (M/Qd + 0.12) + 2.7 \sqrt{p_{wo} \cdot H \sigma_y}\} b \cdot j \quad (2)[8]$$

$$\circ Q_{mean} = \{0.115 k_u \cdot k_p (180 + c \sigma_B) / (M/Qd + 0.12) + 2.7 \sqrt{p_w \cdot w \sigma_y}\} b \cdot j \quad (3)[8]$$

* 1 東工大附属工業高校教諭、工博(正会員)、 * 2 東京テクニカルカレッジ、工修

ここで、 $\circ Q_m$ ：最大耐力実験値、 $\circ Q_y$ ：曲げ降伏荷重計算値、 $\circ Q_H$ ：せん断耐力計算値（広沢式）、 $\circ Q_{mean}$ ：孔の開いていない鉄筋コンクリート造梁のせん断耐力計算値（大野・荒川式）、 a_t 、 $s\sigma_y$ ：梁引張り主筋断面積、降伏点強度、 d 、 b 、 j 、 a ：梁有効せい、幅、応力中心間距離、曲げ長さ、 $a=M/Q$ 、 k_u 、 k_p ：梁せいと引張り主筋比による補正係数、 $c\sigma_B$ ：コンクリート圧縮強度、 H/D ：開孔径比、 M/Qd ：シアスパン比、 p_{wo} 、 $h\sigma_y$ ：開孔部補強筋比、補強筋降伏点強度、 p_w 、 $w\sigma_y$ ：肋筋比、肋筋降伏点強度

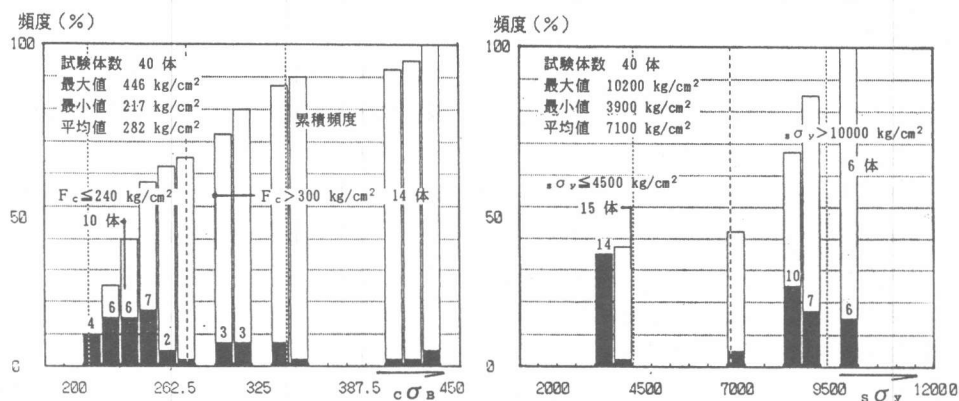
なお、付着割裂破壊に関しては一方向加力試験体が多く、繰返し加力を行った実験でも2～3回程度の少ない繰返し加力でせん断破壊している試験体が大多数を占めているため、ここでは特に検討を加えなかった。以上の条件を加えると試験体数は40体となる。

3. 実験資料の分析

実験資料の主要な構造因子に関する分類を図1～図5に示す。同図は縦軸に頻度を採り、横軸に各構造因子の値を採って示したもので、黒の棒グラフで頻度分布を、白の棒グラフで累積頻度を表した。また試験体数 n 、最大値 max 、最小値 min 、平均値 μ および標準偏差 σ を記入した。

3.1 使用材料

試験体の製作に用いられている使用材料に関しては、コンクリート圧縮強度 $c\sigma_B$ 、主筋降伏点強度 $s\sigma_y$ 、肋筋降伏点強度 $w\sigma_y$ 、および開孔部補強筋降伏点強度 $h\sigma_y$ 等について調査したが、この中で $c\sigma_B$ と $s\sigma_y$ の頻度分布を図1(a)、(b)に示す。コンクリート圧縮強度は200～300 kg/cm^2 の試験体が36体と大半を占め、平均値は282 kg/cm^2 で比較的強度の高いコンクリートが用いられている。また、200 kg/cm^2 を下回る試験体は無く、400 kg/cm^2 を上回る試験体は4体あった。梁主筋降伏点強度は、せん断破壊指向型で試験体を設計する事もあって高強度鉄筋が使用されている例が多く、4,500 kg/cm^2 前後の試験体が15体で、残りの全ては7,000 kg/cm^2 以上となっており、8,000 kg/cm^2 以上の高強度の材質が使用されている試験体は23体あった。肋筋の降伏点強度の平均値は3,640 kg/cm^2 で、開孔部補強筋降伏点強度の平均値は4,060 kg/cm^2 であった。



(a) コンクリート圧縮強度 $c\sigma_B$ の頻度分布

(b) 梁主筋降伏点強度の頻度分布 $s\sigma_y$

図1. 使用材料の頻度分布

3.2 試験体形状

試験体形状に関しては、全せい D (cm)、シアスパン比 M/Qd 等について検討したが、 M/Qd の頻度分布を図2に示す。シアスパン比の分布を見ると1.1以下の試験体が15体あり、せん断に対し

て相当厳しい条件で実験を行っている例がある。また、梁せいに関しては最大値85cm、最小値40cm、平均値50cmで比較的大きな試験体が多く、従ってスケールエフェクトは小さいと考えられる。

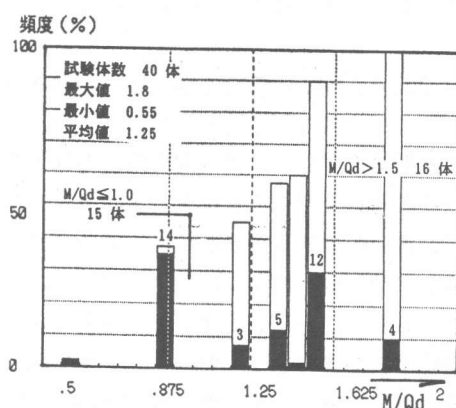


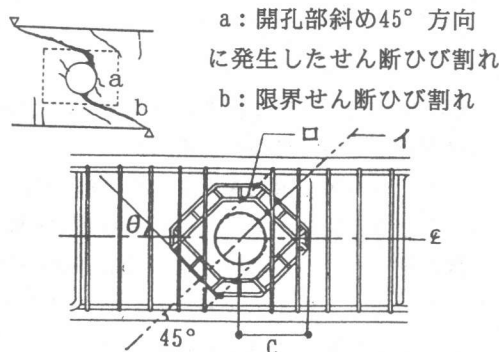
図2. シアスパン比M/Qdの頻度分布

3.3 開孔部補強筋量

鉄筋コンクリート造有孔梁の破壊モードを詳細に観察すると、加力初期に開孔部斜め45°方向に発生したせん断ひび割れ(図3 a)は必ずしもせん断破壊に直接関係するせん断ひび割れ(以下、限界せん断ひび割れと言う)とはならず、むしろ、それ以後多少遅れて開孔部上下に発生する斜め方向のせん断ひび割れが限界せん断ひび割れとなることがある(図3 b)。両者の破壊モードを比較すると、最も特徴があるのは、後者のせん断破壊を生じる試験体では開孔部上下の補強筋量が開孔部斜め45°方向の補強筋量に比較して、相当に少ない値になっているということである。従って、無補強有孔梁や開孔周囲に十分な補強が施されている有孔梁では後者のせん断破壊は生じない。

後者のせん断破壊(開孔部上下のせん断破壊)を生じる原因を考察してみると、これは現在多用されているせん断補強材の多くの製品は広沢式を目安として開発されているものが多く、算定式で有利に設計される事を期待して開孔部斜め45°方向のみに配筋を集中し、その他の所の配筋を手薄にしているために生じた現象であると考えられる。そこで、本研究では後者の破壊モードを考慮するために、従来より用いられている開孔部補強筋比 p_{wo} と開孔部最少補強筋比 p_{wod} の両方に関して検討を加えた。 p_{wo} は図3イに示す割線を限界せん断ひび割れに想定して求めるもので、通常有孔梁で用いられている開孔部のせん断補強筋比である。これに対して、 p_{wod} は図3ロで求めるもので、開孔部を通過する斜め45°線に横切られる補強筋の断面積の内、最少の値 Σa_{wod} が得られる破壊線(通常の場合接線方向となる)を限界せん断ひび割れの発生位置と考えて、この最少補強筋断面積 Σa_{wod} を開孔部補強の必要範囲Cと梁幅bで除して求めた値である。なお、 p_{wo} および p_{wod} の値を算定する際に、開孔部のせん断補強筋として有効に働くと考えられる有効補強筋の選定条件としては以下の事項を考慮した。

- 仮定した破壊線と交わる縦筋(肋筋)、斜め筋(傾斜角度 θ を考慮)、横筋を考慮する。
- 破壊線と主筋とが交わる点で破壊線と交わる補強筋は全て無視する。
- リング状補強筋は45°方向の斜筋として算定する。ただし、接線方向破壊線に対しては横筋($\theta=0^\circ$)として算定した。
- 基本的に十分な定着長(周辺肋筋を2本以上横切る程度で、15dを目安とした)を持つ補



$$p_{wo} = \Sigma a_{wo}(\sin\theta + \cos\theta) / (b \cdot C)$$

$$p_{wod} = \Sigma a_{wod}(\sin\theta + \cos\theta) / (b \cdot C)$$

図3. 限界せん断ひび割れの概念図と

開孔部補強筋比 p_{wo} 、 p_{wod} の算定

強筋のみ考慮した。また、溶接を基本とする補強材では少なくとも両側に1溶接点を有するものとし、その溶接も十分に強度上の信頼性が得られる形のものを有効と考えた。

(e) 開孔位置が梁せいの上下方向にずれている試験体では、補強筋量を上下の厳しい方 (p_{wo} が小さくなる方) の値で算定した。

(f) 補強筋が途中で折れ曲って、しかも、折れ曲る点で破壊線と交わる場合には、角度 θ の効果が小さい方の値を採用した。

ここで (a) 項で横筋を考慮した理由は開孔上下のせん断破壊に対しては横方向の鉄筋も効果が有ったとする実験結果があり、さらにせん断補強筋としての効果を考えると位置関係から見ても縦横の別無く、この部位で生じる限界せん断ひび割れの進展を防止する効果が期待出来ると判断した為である。以上の条件に基づいて求めた p_{wo} と p_{wod} の頻度分布を図4(a)、(b)に示す。なお、 p_{wod} に関しては値が0%となっている試験体が12体あったがこれは抜いて図を作成した。

同図を見ると、 p_{wo} は最大値1.8%、最小値0.2%、平均値0.93%となっており、1.0%を越える試験体は17体ある。全体的には相当多量の補強が行われている。しかしながら、 p_{wod} に関しては、最大値1.9%、最小値0.1%、平均値0.79%で、0.6%以下の試験体が11体となっており、比較的配筋量の少ない試験体が多くなっている。

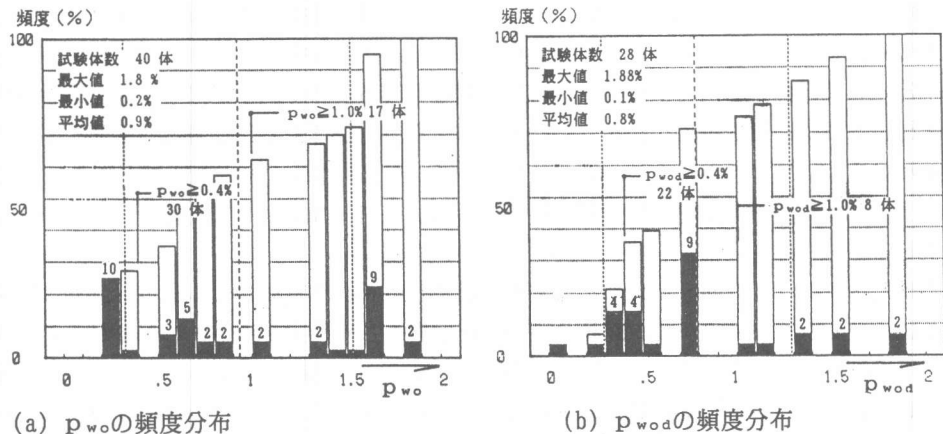
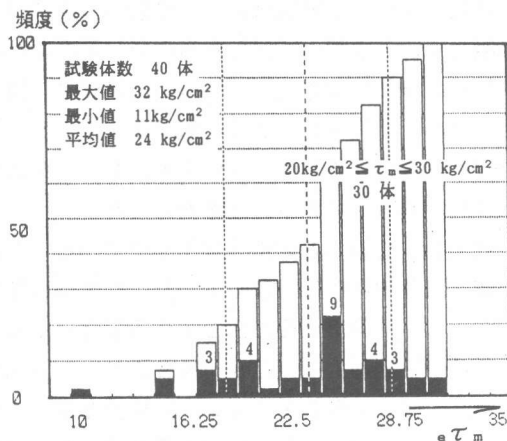
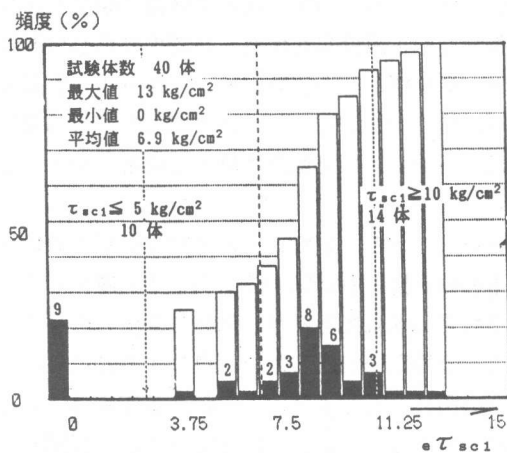


図4. 開孔部補強筋比の頻度分布

3.4 実験結果

開孔部せん断ひび割れ発生時平均せん断応力度 τ_{sc1} ($=Q_{sc1}/b \cdot j$ kg/cm²) と最大耐力時平均せん断応力度 τ_m ($=Q_m/b \cdot j$ kg/cm²) の頻度分布を図5(a)、(b)に示す。なお、ここでは τ の値は無開孔梁との比較を行う事を考慮して、開孔を無視して梁断面 $b \cdot j$ でせん断力 Q を割った値とした。また Q_{sc1} に関しては9体の試験体について資料が得られなかった。同図を見ると τ_{sc1} に関しては平均で 7 kg/cm²、最大値 13 kg/cm² となっており、比較的低いせん断応力度で開孔部にせん断ひび割れを生じていることがわかる。 τ_m については平均値が 24 kg/cm² で、最大値 32 kg/cm²、最小値 11 kg/cm²、標準偏差 5 kg/cm² であった。なお、簡易補強材を用いて補強した試験体のみの結果では平均値 27.8 kg/cm²、最大値 32 kg/cm²、最小値 25 kg/cm²、標準偏差 2.2 kg/cm² で比較的ばらつきが小さい結果となっている。また、比較のための無開孔梁 42 体について同様な頻度分布を作成したがこれらは平均値 29.7 kg/cm²、最大値 43 kg/cm²、最小値 7.5 kg/cm² となっており、簡易補強材を用いた試験体の方が多少低い値となっている。



(a) 開孔部せん断ひび割れ時、 τ_{sc1} の頻度分布 (b) 最大耐力時、 τ_m の頻度分布

図5. 実験結果の頻度分布

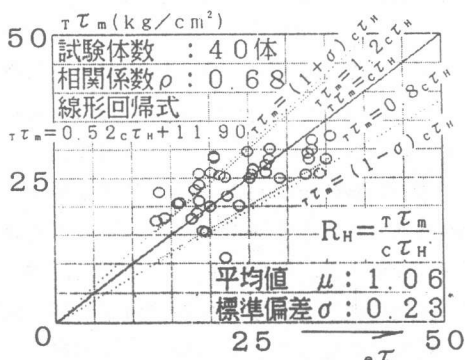
4. 実験値と計算値との比較

鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断耐力の算定式としては通常 (2) 式の広沢式を用いている。ここでは、上記の p_{wo} と p_{wod} とを用いて、広沢式により求めた有孔梁のせん断耐力計算値、 τ_H と τ_{Hd} に関して検討を行った結果に付いて述べる。

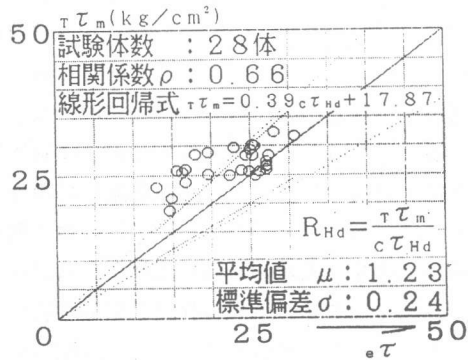
図6(a)、(b)に計算値、 τ と実験値、 τ を比較して示す。同図は縦軸に実験値を採り、横軸に計算値を採って示したもので、試験体数 n 、相関係数 ρ 、線形回帰式および比の値 R (τ/τ) の平均値 μ と標準偏差 σ を記入した。なお、 τ_{Hd} の (b) 図では $p_{wod}=0$ の試験体は除外している。これは、 $p_{wod}=0$ の試験体では破壊はかえって開孔部斜め 45° の破壊線で生じる事が多くなり、また、計算値が相当に安全側となって、ばらつきも極めて大きくなる事等によるものである。

同図を見ると、 τ_H に関しては、実験値と計算値の相関係数は0.68、比の値の平均値は1.06、標準偏差0.23となり、 τ_{Hd} では、実験値と計算値の相関係数は0.66、比の値の平均値は1.23、標準偏差0.24となっている。

τ_H では23体(58%)の試験体で安全側の値が得られているのに対し、 τ_{Hd} では23体(82%)の試験体で安全側の値となっており、 τ_{Hd} による計算値は大半の試験体に対して安全側の値が得られる事がわかる。また、 τ_H では大きな計算値となる所で危険側の判定となる試験体が多く見られ、 τ_{Hd} では小さな計算値となる所で比の値 R が1.2を大きく越える傾向が見られる。



(a) τ と τ_H の関係



(b) τ と τ_{Hd} の関係

図6. 最大耐力時平均せん断応力度、 τ と広沢式による計算値(τ_H 、 τ_{Hd})との関係

次に、実験値と計算値との比の値の頻度分布を図7(a)、(b)に示す。同図は縦軸に頻度を採り、横軸に比の値を採って示したもので、図中には累積頻度や正規分布を仮定した際の確率密度関数、平均値、標準偏差を記入した他、試験体数、最大値、最小値、95%信頼限界（正規分布を仮定した場合の上側確率）及び比の値が1を越える確率等の値を示した。なお、比の値の分布形は資料にばらつきがあり正確に規定することは不可能であるため、ここでは理論構成上利用しやすい正規分布を仮定して以下の推論を行った。

同図(a)を見ると広沢式は比の値1.0を中心に分布している。また、正規分布を仮定すれば1を越える確率は0.61となっており、計算値に安全率0.69を掛ければ95%の資料は1を越える事になる。広沢式は安全側の値を与える設計式として提案された式であるが、簡易補強材を用いた有孔梁のせん断耐力を推定する場合には、ある程度の安全係数を考慮した方が良いと思われる。

次に、最少補強筋量を用いて計算値を求めた場合の図(b)を見ると、1を越える確率は0.83となっており、また、95%信頼限界を得る安全係数は0.84となっている。従って、ここで提案している最少補強筋量を用いて広沢式により有孔梁の設計を行う事も1つの方法であると思われる。

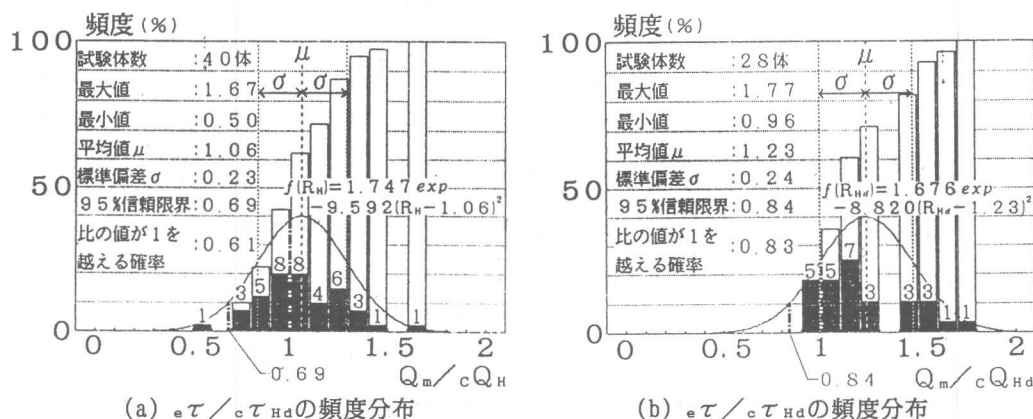


図7. 実験値と計算値の比の値の頻度分布

5. まとめ

簡易補強材を用いて補強した鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断耐力を中心に、実験値と計算値とを比較検討し、算定式の適合性に関して種々検討した結果、広沢式を目安にして開発された補強材を用いた有孔梁の補強方法は、補強が手薄となっているものがあり、この点を十分に考慮しないと、必ずしも広沢式で安全側の値が得られない場合があることがわかった。

[参考文献] 1)清水: 鉄筋コンクリート造有孔梁の補強方法、季刊カラム、Vol.113-pp.87~93、114-pp.89~97、1989.7、10、 2)津村: 鉄筋コンクリート有孔梁のせん断破壊に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.407、pp.47~60、1990、No.424、pp.35~46、1991、 3)日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.11、 4)広沢、三橋、清水他: 鉄筋コンクリート造有孔梁の耐震性能に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.333~340、1990.10、 5)佐藤他: 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、建築学会大会梗概集、pp.285~288、1991.9、 6)広沢、三橋、清水他: 鉄筋コンクリート造有孔梁の耐震性能に関する実験研究、建築学会大会梗概集、pp.289~292、1991.9、 7)松崎他: コンクリート開口梁のせん断性状に関する実験研究、建築学会大会梗概集、pp.293~296、1991.9、 8)日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説、1988