

論文 RC 造有孔梁のせん断伝達機構に関する実験研究

平瀬 智樹^{*1}・日比野 陽^{*2}・篠原 保二^{*3}・林 静雄^{*4}

要旨：本研究は，RC 造有孔梁のせん断伝達機構を明らかにする目的で行った。力の流れが単純な孔際あばら筋のない場合において，孔径比と補強筋角度を変動要因とした実験を行い，せん断強度が孔径比に反比例し，補強筋角度の正弦に比例することを明らかにした。実験結果から，開孔斜め上下の部分小さな梁とみなし，この梁にトラス・アーチ理論を適用することにより，せん断強度評価式を提案した。この提案式は，金物で補強した場合においても精度よく評価でき，特に孔周り無補強の場合において既往の評価式より精度が向上した。

キーワード：有孔梁，せん断強度，孔径，補強筋角度，トラス・アーチ，金物

1. 背景・目的

鉄筋コンクリート造建物では，梁に設備配管用の貫通孔を設けることが多々ある。孔を設けることによるせん断強度の低下を防ぐための補強方法として，現在では孔周りに簡易金物を配置することが一般的となっている。

設計では，金物で補強した場合のせん断強度を推定することが必要となるが，「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説¹⁾」(以下，規準)，「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説²⁾」(以下，指針)とともに，金物を適用範囲としておらず，各々の金物について検討が必要であるとしている。既往の研究では規準式を準用している場合が多いが，様々な形状の金物をどの程度の精度で評価できるかは明らかになっていない。

本研究では，まず力の流れが単純な孔周り無補強の場合について，孔径によるせん断伝達機構の変化を明らかにする。次に補強筋の角度がせん断補強効果に与える影響を明らかにすることから，力の流れが複雑な金物を用いた場合へとアプローチする。そして，金物を用いた場合のせん断強度の評価法を提案することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体形状を図-1，試験体一覧を表-1，コンクリートの材料特性を表-2 に，鉄筋の材料特性を表-3 に示す。全7体を計画し，梁幅 $b=200\text{mm}$ ，梁せい $D=300\text{mm}$ ，スパン $L=780\text{mm}$ ，主筋 3-D16(USD980)，あばら筋 3-UD10(UBD785)@70 とした。No.3~5 は，付着割裂破壊を防ぐため，各あばら筋の中間と孔の上下に D10(SD295A)の割裂補強筋を配置した。いずれの試験体も，既往式¹⁾⁻³⁾により，曲げ降伏に先行して開孔部せん断破壊となるように設計した。

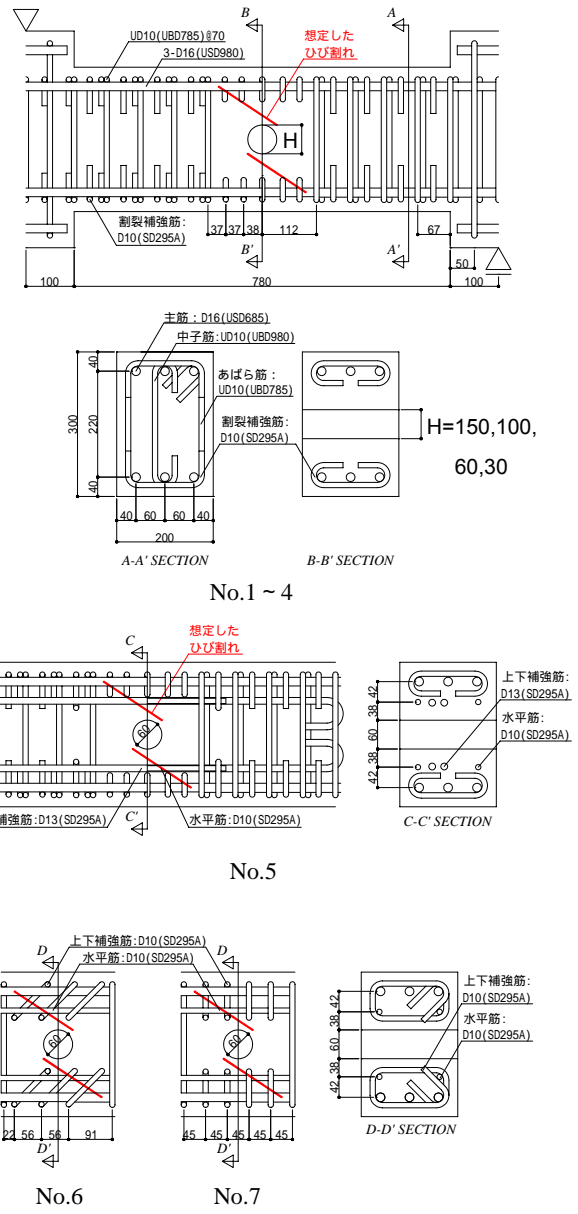


図-1 試験体形状

*1 北陸電力(株) 工修 (正会員)

*2 東京工業大学 応用セラミックス研究所セキュアマテリアル研究センター助教 博士(工学) (正会員)

*3 東京工業大学 応用セラミックス研究所建築物理研究センター准教授 工博 (正会員)

*4 東京工業大学 応用セラミックス研究所セキュアマテリアル研究センター教授 工博 (正会員)

2.2 変動要因

No.1~4 は、孔周り無補強の場合に孔径がせん断強度に及ぼす影響を確認するため、孔径比を変動要因とした。せん断強度がコンクリートのみで決定するように、開孔中心を通る 45 度の直線と交わらないようにあばら筋を配置した（規準でいう c の範囲にあばら筋がないようにした）。

No.5~7 は、開孔上下の補強筋の角度が補強効果に及ぼす影響を確認するため、上下補強筋の角度を変動要因とした。設計段階で林らの研究³⁾による開孔部接線ひび割れ（図-1 中の赤線）を想定し、そのひび割れを横切る断面積が同程度となるように上下補強筋を配置した。D10 の水平筋は上下補強筋の固定用であり、せん断性状に影響を及ぼさないように折り曲げ定着を設けなかった（No.5 の D13 は折り曲げ定着とした）。

2.3 加力方法

実験は大野式逆対称加力で行った。正負繰返し載荷では、反対方向のひび割れの影響を受け、力の流れを把握し難いと考えられるので、一方向単調載荷とした。部材角 $R=1/800, 1/400, 1/160, 1/80$ でそれぞれ載荷を一時停止してひび割れの記録を行い、 $1/40$ を超えたところで除荷した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

最大耐力時のひび割れを図-2 に示す。いずれの試験体も、 $R=1/800$ で端部曲げひび割れ、開孔部対角ひび割れ、 $R=1/400$ で曲げせん断ひび割れの順に発生した（ただし、No.1 のみ曲げせん断ひび割れが発生しなかった）。孔径の大きい No.1, 2 は、 $R=1/160$ で開孔部接線ひび割れが発生した。また、開孔部上下に補強筋を配置した No.5~7 試験体は、配置しなかった No.3 に比べ、開孔部ひび割れが分散する傾向にあった。全試験体、主筋は降伏しておらず、開孔部ひび割れが拡大して最大耐力を迎え、大きなせん断ずれが進んだことから、開孔部せん断破壊と判断した。

3.2 孔径の影響

No.1~No.4 の荷重変形曲線を図-3 に、孔径比 H/D とせん断強度 Q_{max} の関係を図-4 に示す。孔径が大きいほど小さな変形角でせん断強度に達し、せん断強度は低くなった。孔径比とせん断強度は線形の関係にあり、孔周り無補強の場合は、規準式、指針式による計算値の 2 倍以上のせん断強度となることがわかる。（なお、No.1 は、 $R=1/316$ で一旦ピークを迎え荷重が低下したが、その後実験終了まで緩やかに上昇した。これは、主筋のひずみからダボ効果によるものと判断し、コンクリートで決定したせん断耐力は $R=1/316$ 時のものとした。）

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	孔径比	孔径	想定したひび割れと交わる上下補強筋
		H/D	H mm	
1	A2	1/2	150	/
2	A3	1/3	100	
3	A5	1/5	60	
4	A10	1/10	30	
5	T0	1/5	60	0°-D13-2本 (= 253mm ²)
6	T45	1/5	60	45°-D10-2組 (= 285mm ²)
7	T90	1/5	60	90°-D10-2組 (= 285mm ²)

表-2 コンクリートの材料特性

コンクリート設計強度 F_c (N/mm ²)	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	圧縮強度時ひずみ (μ)	ヤング係数 E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)	割裂強度 τ (N/mm ²)
27	29.4	1998	2.92	2.6

表-3 鉄筋の材料特性

部位	種類	呼び名	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
主筋	UBD980	D16	1062*	6634	1116	6.3
あばら筋	USD785	UD10	937*	5879	978	9.6
割裂補強筋	SD295A	D10	385	2035	525	19.1
水平筋						
上下補強筋	D13	332	1813	464	23.0	*は0.2%オフセット耐力
上下補強筋						

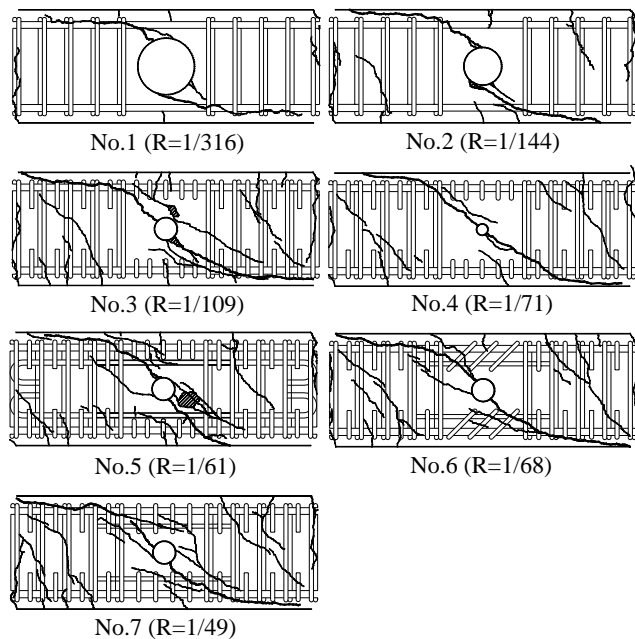


図-2 最大耐力時のひび割れ

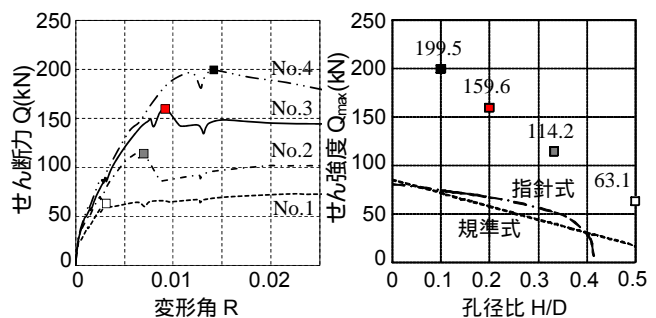


図-3 荷重変形曲線 (No.1~4)

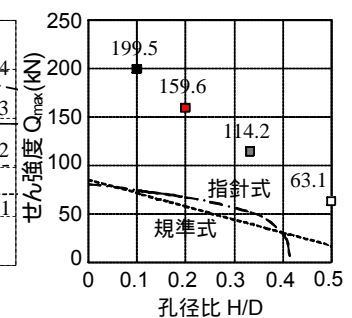


図-4 H/D - Q_{max}

3.3 水平筋の影響

No.3, 5 の荷重変形曲線を図 - 5 に示す。水平筋の有無でせん断強度の値に差はないが、水平筋のある場合の方が大きな変形角でせん断強度に達した。No.5 には定着のない水平筋 D10 と、定着のある 0° の上下補強筋 D13 の 2 種類を配置したが、定着の有無に関わらず水平筋はせん断強度に影響を及ぼさなかった。

3.4 補強筋の角度の影響

No.5 ~ No.7 の荷重変形曲線を図 - 6 に、上下補強筋の角度の正弦 $\sin\alpha$ とせん断強度 Q_{max} の関係を図 - 7 に示す。3 体とも 1/100 より大きい変形角でせん断強度を迎えた。材軸に対する上下補強筋の角度が大きくなるほどせん断強度は大きくなり、 \sin に比例することがわかる。これは、標準の $\sin + \cos$ に比例するという記述とは異なる結果となった。

4. せん断伝達機構

4.1 部分梁のアーチ機構

指針では、孔際をあばら筋や斜め筋で補強した場合のせん断伝達機構を、トラス機構によるものとして理論的な評価法を示している。しかし、金物で補強した場合は、金物の形状が様々であること、金物の定着部が明確でないことなどから、トラス機構による伝達機構は説明が困難である。

指針では、本実験のように孔周り無補強の場合のトラス機構を示していないが、孔際をあばら筋で補強した場合（図 - 8(a)）の考え方を適用すると図 - 8(b) のようなトラス機構になると考えられる。ここで、孔の斜め上下の部分を取り取って考えると、一般梁のアーチ機構に類似していることに着目する（図 - 8(c)）。また、この部分の開孔部ひび割れは、一般梁のせん断ひび割れに類似している。以上のことから、孔の斜め上下の部分を取り取った梁（以下、部分梁）に一般梁のアーチ機構の考え方を適用し、せん断強度の評価を試みる。評価式は以下のようなになる。

$$Q_a = 2 \sigma_{cb} b \frac{D'}{2} \tan \theta \quad (1)$$

σ_{cb} : コンクリート強度の有効係数
(CEB 式: $\sigma_{cb} = 3.68 \times (10 \sigma_{cB})^{-0.333}$)

D' : 部分梁せい (= $(D - H) / 2$)

θ : 部分梁のアーチ角度 ($\tan \theta = \frac{\sqrt{L'^2 + D'^2} - L'}{D'}$)

L' : 部分梁のスパン (= $D / 2$)

右辺の係数 2 は、孔の上下で 2 つの部分梁が存在し、せん断強度がその和であることを意味する。スパン L' については、図 - 9 に示すように、主筋軸と開孔部ひび割れの

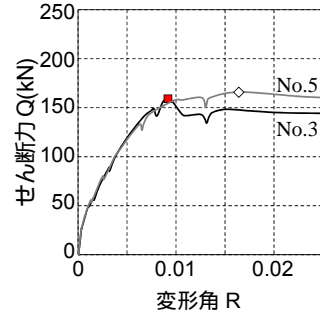


図 - 5 荷重変形曲線(No.3,5)

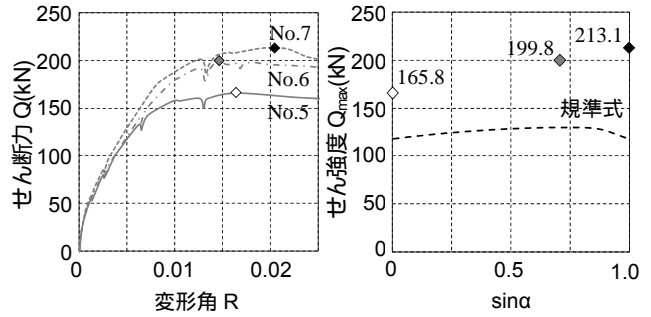


図 - 6 荷重変形曲線(No.5~7) 図 - 7 $\sin\alpha - Q_{max}$

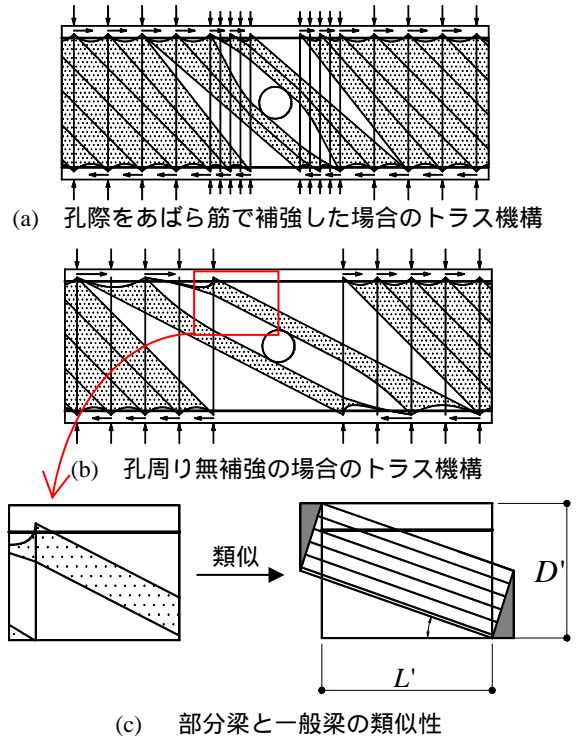


図 - 8 部分梁のアーチ機構

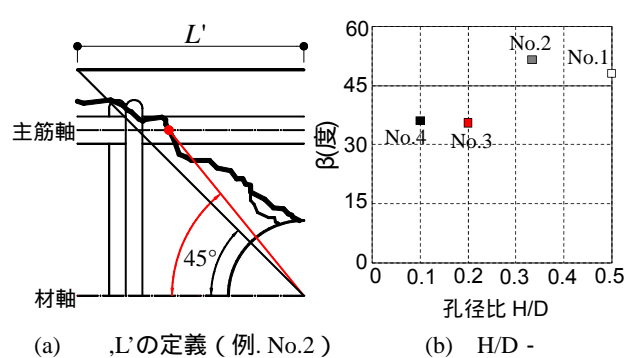


図 - 9 主筋と開孔部ひび割れの交点位置

の交点が、開孔中心から約 45 度の位置であるという実験結果から、45 度線と梁上(下)端の交点までの水平距離 $D/2$ とした。

実験値と式(1)による計算値の比 Q_{exp}/Q_a と孔径比 H/D の関係を図 - 10 に示す。式(1)により、孔周り無補強の場合のせん断強度を精度よく評価できることがわかる。

4.2 部分梁のトラス機構

前節では孔周り無補強の場合について考えたが、本節では孔周りをあばら筋や金物で補強した場合を考える。前節でも述べたように、金物を配置した場合の力の流れは非常に複雑であり、詳細に把握することは困難である。ここでは、図 - 11 のように、孔際あばら筋や金物を部分梁に一定間隔に配筋されたあばら筋に置換し、その効果をトラス機構として評価することを試みる。評価式は式(1)とトラス機構の負担分の和であり、以下ようになる。

$$Q_{st1} = 2b[d' p_{o\ oy} \cot + \{ p_{o\ B} - (1 + \cot^2) p_{o\ oy} \} \frac{D'}{2} \tan] \quad (2)$$

d' : 部分梁の有効せい ($=D'-d_c$)
 d_c : かぶり厚
 $p_{o\ oy}$: 開孔部ひび割れを横切る補強筋量

$$p_{o\ oy} = k \sum_i \left(\frac{a_i}{bL'} \sin i \right) \quad (3)$$

 ($p_{o\ B}/2$ を超えるときは $p_{o\ oy} = p_{o\ B}/2$ とする)
 k : 置換係数 ($=0.55$)
 a_i : 補強筋の断面積
 i_y : 補強筋の降伏強度
 i : 補強筋が材軸となす角度
 \cot : 部分梁のトラス角度 ($\cot = \sqrt{\frac{p_{o\ B}}{p_{o\ oy}} - 1}$)
 (2 を超えるときは $\cot = 2$)

開孔部ひび割れの定義を図 - 12 に示す。ひび割れは、接線ひび割れを仮定し、開孔の上(下)から発生するものとした。孔径の小さい場合は、対角ひび割れとなる傾向にあるが、孔径が小さいことにより、接線ひび割れとしても影響が小さいと考えられるので、これを許容する。

3.4 節から、補強筋断面積の \sin 成分のみがせん断強度に影響すると考えられ、補強筋量に \sin 成分を与えた。

置換係数 k は、式(2)に式(3)を代入して k について解き、既往の研究データ^{3)~35)}のうち、孔際あばら筋で補強したものでかつ補強筋量の小さい ($0 < p_{o\ oy} < 0.06$) もの 42 体について k の値を求め、それらの平均値から 0.55 とした(図 - 13)。

4.3 精度検証

式(2)の精度検証を、本実験の試験体と既往の研究^{3)~35)}

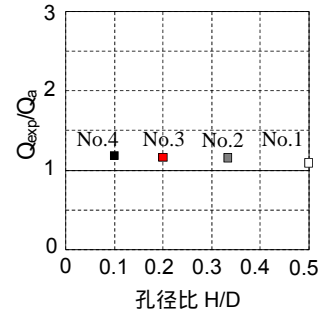


図 - 10 式(1)の精度

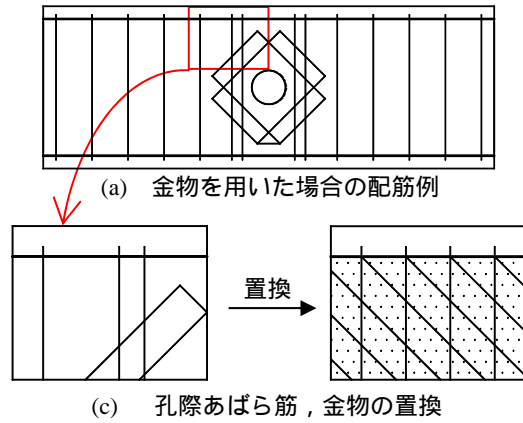


図 - 11 部分梁のトラス機構

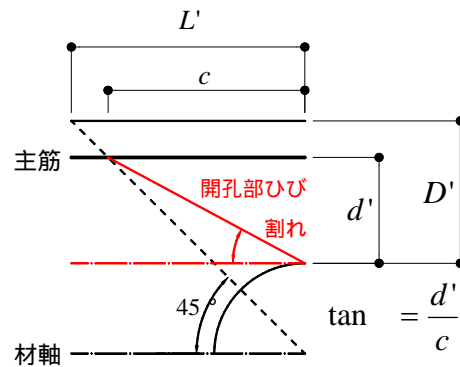


図 - 12 開孔部ひび割れの定義

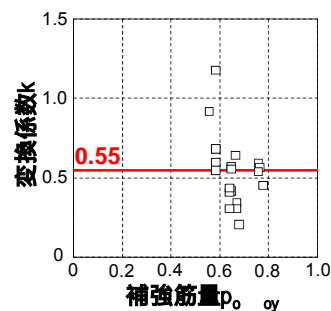
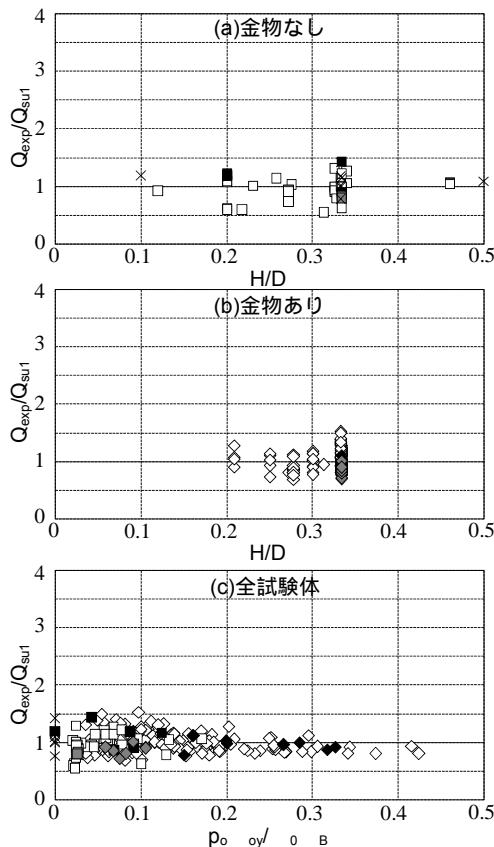


図 - 13 既往の研究データにおける置換係数 k

の試験体計 236 体により行った。データの選定条件は以下の(1)~(7)である。

- (1) $bD = 400\text{cm}^2$ である。
- (2) 単独の円形孔を有する。
- (3) 開孔位置がスパン中央でかつ材軸上である。



凡例 (図 - 15 と共通)

× 無補強	□ あばら筋	● 水平筋	▲ 上下補強筋
◇ 金物	◇ 金物 + 水平筋	◆ 金物 + 上下補強筋	

図 - 14 式(2)の精度

- (4) 一般部にあばら筋が配筋されている。
- (5) 逆対称加力である。
- (6) 補強方法が、あばら筋、水平筋、上下補強筋、金物による。または、それらの組み合わせである。
- (7) 金物の角度が明確である（円形や複雑な形状でない）。

式(2)による精度を図 - 14 に、規準式 Q_{su2} による精度を図 - 15 に示す。どちらの式も精度良く評価でき、式(2)は実験値/計算値が1付近に、規準式は1より大きく分布することがわかる。式(2)においては、実際の建物における配筋とは離れてはいるものの、孔周り無補強の場合も精度良く評価できる。また、金物を用いたものだけで比較した場合、式(2)は平均値 1.06、標準偏差 0.18 であり、規準式は平均値 1.17、標準偏差 0.20 であった。

5. まとめ

(1) 孔径比と補強筋の角度を変動要因とした有孔梁試験体でせん断実験を行った。孔周り無補強の場合、せん断強度は規準式、指針式の2倍以上となった。せん断強度は、孔径比に反比例して低下し、補強筋断面積の正弦成分に比例して増加することがわかった。また、定着の

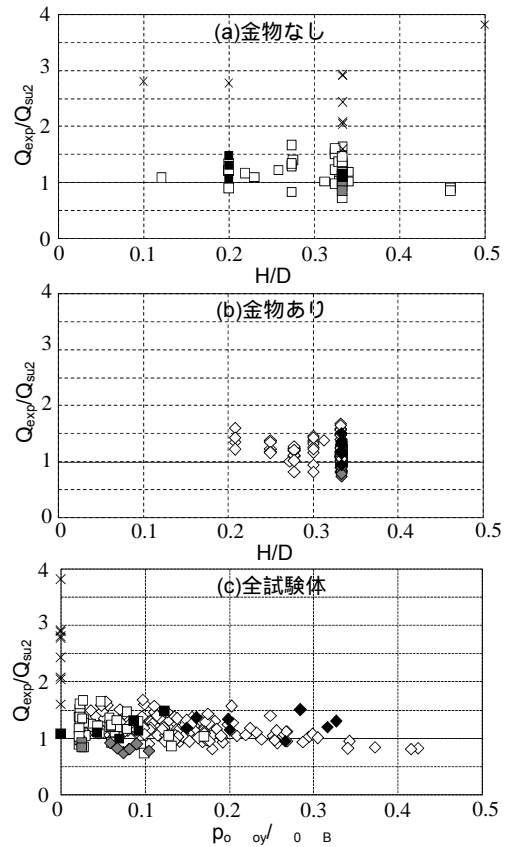


図 - 15 規準式の精度

有無に関わらず、水平筋はせん断強度に影響をあたえなかった。

(2) 実験結果より、せん断強度評価式の提案を行った。これは、開孔斜め上下の部分小さな梁とみなし、この梁にトラス・アーチ理論を適用したものである。提案式の精度は、規準式と比較して、金物で補強した場合には同程度であり、孔周り無補強の場合については大きく向上した。

謝辞

高周波熱錬(株)の中村佳史氏には、本実験で主筋・あばら筋として使用した高強度鉄筋を提供していただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

凡例

年次 : コンクリート工学年次講演会論文集
大会 : 日本建築学会大会学術講演梗概集

支部 : 日本建築学会支部研究報告集

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2010
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、1999
- 3) 林 静雄ほか：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, 年次, Vol.12, No.2, pp.333-338, 1990.6
- 4) 有孔ばり研究委員会: 鉄筋コンクリート有孔ばりに関する研究(その3), 日本建築学会論文報告集, Vol.66, pp. 449-452, 1960.10
 - 5) 村内 明ほか: 鉄筋コンクリート有孔梁のせん断補強に関する実験的研究(その1)~(その2), 大会, pp. 1361-1364, 1973.10
 - 6) 東 洋一ほか: 斜めワイヤー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加力実験(その1)~(その3),(その6), 大会, (pp. 1495-1498, 1981.9), (pp. 1763-1764, 1983.9), (pp. 499-500, 1985.10)
 - 7) 黒正清治ほか: 鉄筋コンクリート造有孔ばりの実験的研究(その3)~(その4), 大会, pp. 1499-1502, 1981.9
 - 8) 福知保長ほか: 鉄筋リングで補強した鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断実験, 東海支部, pp. 121-124, 1982.2
 - 9) 福知保長ほか: トラス形鉄筋で補強した鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断実験, 東海支部, pp. 157-160, 1983.2
 - 10) 福知保長ほか: 正方形鉄筋リングで補強した鉄筋コンクリート造有孔梁の実験的研究, 大会, pp. 1761-1762, 1983.9
 - 11) 市之瀬敏勝ほか: RC有孔ばりの変形モードに関する実験的研究, 年次, Vol. 5, pp. 469-472, 1983.4
 - 12) 津村浩三ほか: 鉄筋コンクリート有孔梁の弾塑性挙動(その3), 大会, pp. 241-242, 1988.10
 - 13) 津村浩三: 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, Vol.407, pp. 47-59, 1990.1
 - 14) 渡辺朋之ほか: 高層鉄筋コンクリート造建物の耐震性に関する研究(その4), 大会, pp. 421-422, 1989.10
 - 15) 林 静雄ほか: 偏心開口を有する鉄筋コンクリート梁の実験研究, 年次, Vol. 14, No.2, pp. 227-232, 1992.5
 - 16) 林 静雄ほか: ひび割れの抑制を考慮した鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断補強, 年次, Vol. 24, No.2, pp. 295-300, 2002.6
 - 17) 林 静雄ほか: 開口を有する鉄筋コンクリート梁のせん断性状に及ぼす補強方法の影響, 年次, Vol. 32, No.2, pp. 235-240, 2010.6
 - 18) 佐藤立美ほか: 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4), 大会, pp. 925-926, 1994.9
 - 19) 佐藤立美ほか: 一筆書き簡易形状の高強度開口補強金物を使用した RC 有孔梁のせん断補強効果に関する研究, 大会, pp. 69-70, 2003.9
 - 20) 佐藤立美ほか: 高強度補強金物を用いた RC 有孔梁のせん断耐力に関する研究(その1)~(その3), 大会, (pp. 259-262, 2006.9), (pp.231-232, 2007.8)
 - 21) 佐藤立美ほか: $F_c=100\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートを用いた RC 有孔梁の力学的特性に関する基礎的研究, 大会, pp. 229-230, 2007.8
 - 22) 南 宏一ほか: 13,000 級開孔補強筋を用いた RC 有孔梁のせん断破壊性状(その1)~(その3), 大会, pp. 935-940, 1994.9
 - 23) 南 宏一ほか: 高強度開孔補強筋を用いた RC 有孔梁のせん断破壊性状に関する実験的研究(その1)~(その2), 中国支部, pp. 13-20, 2000.3
 - 24) 松崎育弘ほか: RC 有孔梁のせん断抵抗要素に関する実験的研究, 大会, pp. 445-446, 1996.9
 - 25) 松崎育弘ほか: 高強度材料を用いた RC 有孔梁のせん断性状に関する実験研究(その1)~(その2), 大会, pp. 925-928, 1999.9
 - 26) 松崎育弘ほか: 高強度開口補強金物を用いた RC 有孔梁のせん断性状に関する実験研究, 大会, pp. 237-238, 2002.8
 - 27) 松崎育弘ほか: 高強度開口補強金物を用いた大口徑 RC 有孔梁のせん断性状に関する実験研究, 大会, pp. 227-228, 2007.8
 - 28) 三橋博巳ほか: 鉄筋コンクリート造有孔梁に関する実験的研究, 大会, pp. 929-930, 1999.9
 - 29) 三橋博巳ほか: 鉄筋コンクリート造有孔梁の開孔補強方法に関する研究(その1)~(その2), 大会, pp. 243-246, 2006.9
 - 30) 三橋博巳ほか: 開孔補強筋使用の RC 造有孔梁のせん断性状に関する実験研究(その1)~(その2), 大会, pp. 461-464, 2008.9
 - 31) 武田 寛: RC 造有孔梁のせん断強度に関する実験的研究, 大会, pp. 89-90, 2005.9
 - 32) 武田 寛: 有孔梁のせん断強度に関する実験的研究, 大会, pp. 253-254, 2006.9
 - 33) 武田 寛: 有孔梁上下部の補強効果に関する実験的研究, 大会, pp. 235-236, 2007.8
 - 34) 武田 寛: 有孔梁のせん断強度に関する実験的研究, 大会, pp. 465-466, 2008.9
 - 35) 白井伸明ほか: RC 造有孔梁のせん断抵抗機構に関する検討(その1)~(その2), 大会, pp. 677-680, 2006.9