

論文

[2066] 高強度せん断補強筋を用いた RC 有孔梁の変形性能に関する研究

藤川昌作*1 香取慶一*2 林静雄*3

1. はじめに

建物を高密度化するため梁に孔を設ける事がよく行われるが、RC構造ではこのような孔の存在は著しい強度低下を招くため従来より数多くの研究がなされてきた。そのためせん断強度に関しては精度の良い実験式の提案もなされている。一方、孔は単に強度低下を招くだけでなく変形能の低下も引き起こす事が明らかであるが、現在の設計法ではせん断余裕度という指標を用いた間接的な変形能評価に留まっている。そこで本研究は高強度せん断補強筋を用いた有孔梁の曲げせん断実験から曲げ破壊後の挙動について検討を行った。

2. 実験概要

試験体一覧を表1、配筋図の一例を図1に示す。試験体は断面25×40cm、 γ_s/γ_c 比2.73、コンクリート圧縮強度260kgf/cm²、主筋比 $p_s=1.09\%$ を共通とし、肋筋断面0.4, 0.6, 0.8(cm²)の3水準、肋筋間隔4, 6(cm)の2水準、孔位置0.5D, 1.0D, 1.5Dの3水準、孔径D/3, D/4, D/5の3水準を設定し総数9体を計画した。加力は片持ち梁式で正負繰返しとし、変形制御で部材角で $\pm 1/1000$ で1回、 $\pm 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25$ で各3回行い、その後1/20まで正載荷し実験を終了した。使用材料の力学的性質を表2、表3に示す。

表1 試験体一覧

試験体	孔径比 H/D	孔位置 A/D	肋筋間隔 x (cm)	肋筋断面 a _w (cm ²)
1	1/3	0.5	4	0.4
2			4	0.4
3			4	0.6
4		6	0.8	
5		6	0.4	
6		1.0	0.5	4
7	1.5	4		0.4
8	1/4	4		0.4
9	1/5	4	0.4	

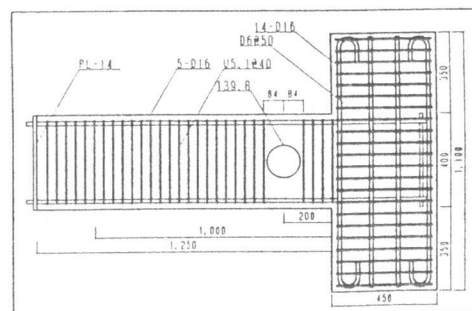


図1 試験体形状(N02)

表2 コンクリートの力学的性質

試験体	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
1~9	260	22.3	2.34×10 ⁵

表3 鉄筋の力学的性質

種類	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
D16	3618	5301	1.78×10 ⁵
U5.1	13500	14425	1.85×10 ⁵
U6.4	13667	14436	1.88×10 ⁵
U7.4	13775	14453	1.96×10 ⁵

表4 実験結果一覧

試験体	降伏荷重 (tf)	最大耐力 (tf)	曲げ強度時せん断力 (略算) (tf)	せん断耐力計算値	
				修正広沢式 (tf)	学会指針式 (tf)
1	12.40	15.00	11.86(1.05)	20.1 (0.62)	39.4 (0.31)
2	12.70	12.70	11.86(1.07)	15.2 (0.83)	13.7 (0.93)
3	12.50	12.90	11.86(1.05)	18.2 (0.69)	13.7 (0.91)
4	12.60	13.00	11.86(1.06)	20.7 (0.61)	13.7 (0.92)
5	12.40	13.10	11.86(1.05)	12.7 (0.98)	13.7 (0.90)
6	12.50	12.90	11.86(1.05)	15.2 (0.82)	13.7 (0.91)
7	12.60	14.60	11.86(1.06)	15.2 (0.83)	13.7 (0.92)
8	12.60	14.10	11.86(1.06)	15.9 (0.79)	21.4 (0.59)
9	12.40	14.70	11.86(1.05)	18.4 (0.67)	27.7 (0.45)

():降伏荷重/計算値

*1 東急建設株式会社 (正会員)
 *2 東京工業大学 助手(正会員)
 *3 東京工業大学 教授(正会員)

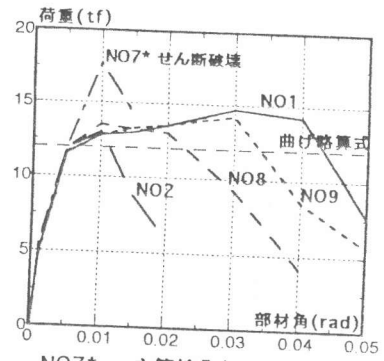
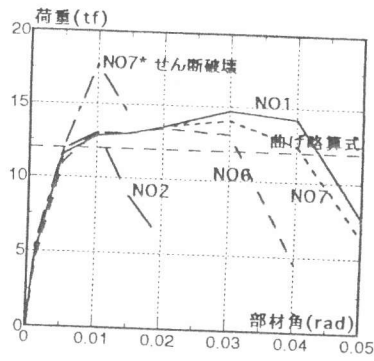
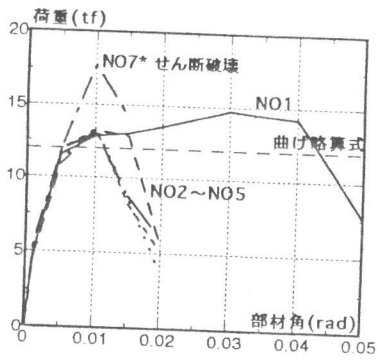


図2 包絡線

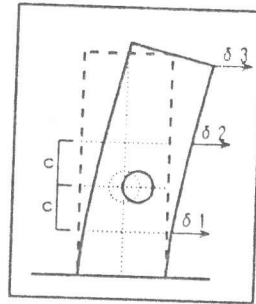
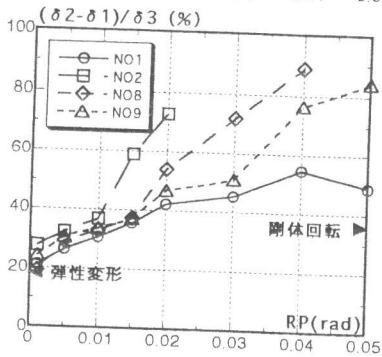
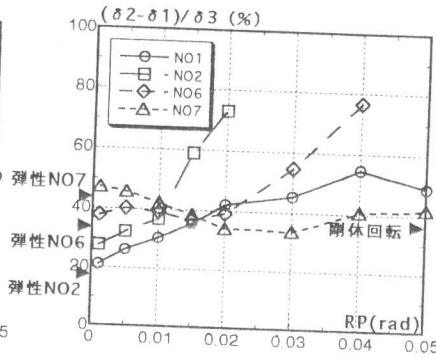
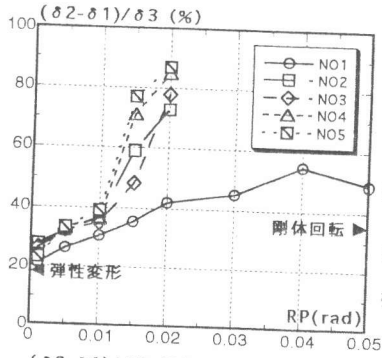


図4 孔部の変形推移

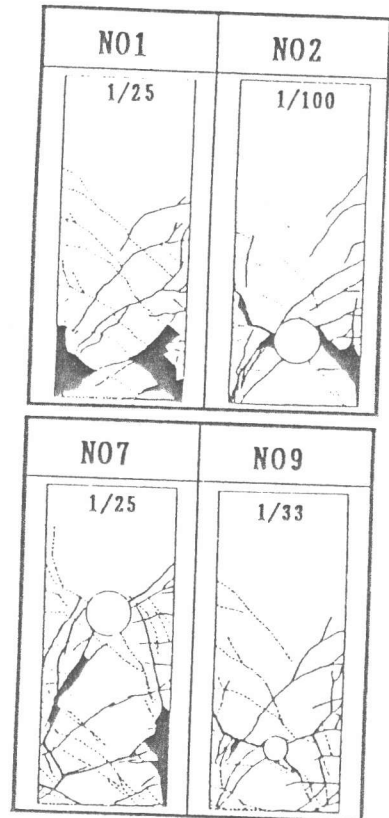


図3 ひび割れ状況

3. 実験結果

3-1 包絡線・破壊性状

表4に実験結果一覧を示す。表中の降伏荷重とは引張主筋降伏時の荷重を示しており、この値がどの試験体においても曲げ略算式から計算される値にほぼ等しいことから曲げ破壊したと考えられる。図2に各変動要因に対する包絡線の比較を示す。各変動要因の差は主筋降伏後に現れ、材端にD/3の孔をもつ場合は肋筋比に関わらず変形能は非常に乏しいが、孔位置を材端から離すに従い、また孔径を小さくするに従い耐力低下開始時の変形は大きくなっている。なお図中にはせん断強度を確認する意味でNO7と同形状で主筋のみ焼入れを施した試験体NO7*の包絡線も示した。図3に耐力低下開始時のひび割れ状況を示す。材端に孔のある場合、どの試験体も孔の接線方向のせん断ひび割れの拡大あるいは圧縮せん断亀裂により耐力低下している。また孔を材端から離れた場合、材端においても曲げせん断ひび割れが多数あらわれるが、最終的には孔接線方向のせん断ひび割れの拡大で耐力低下している。

3-2 変形性状

孔部の変形と部材角の関係を図4に示す。ここで孔部の変形は広沢修正式[1]の2C区間の相対

変位を加力点変位で無次元化して示した。C区間とは孔中心から45度方向に引いた仮想のひび割れ線と梁せい方向に引いた線が、それぞれ主筋心と交わる2交点間の距離をいう。なお無孔梁についてはC区間に対応する塑性域の変形とした。図中の弾性変形、剛体回転はそれぞれ部材の材料線形、幾何線形を示す指標であり、孔位置の変化に対してそれぞれ弾性変形の値は異なる。図よりどの試験体も部材角1/100ではほぼ弾性変形の値に等しいものの、有孔梁では初期の変形レベルから孔周辺で曲げひび割れ等が生じるため、やや大きな値から変形が進行していく。また図の勾配は変形の局所的な進行を示しているが、無孔梁では塑性域の変形が部材角の増加に伴い徐々に大きくなるが、塑性域にD/3の孔径を有する場合1/100から1/67にかけて変形が著しくなっている。孔径を小さくした場合は孔の局部変形の増大は遅れ、また孔位置を材端から離すと孔の変形は抑制され、孔を材端から離れたN07では大変形下でも弾性変形とそれほど変わらない事が分かる。

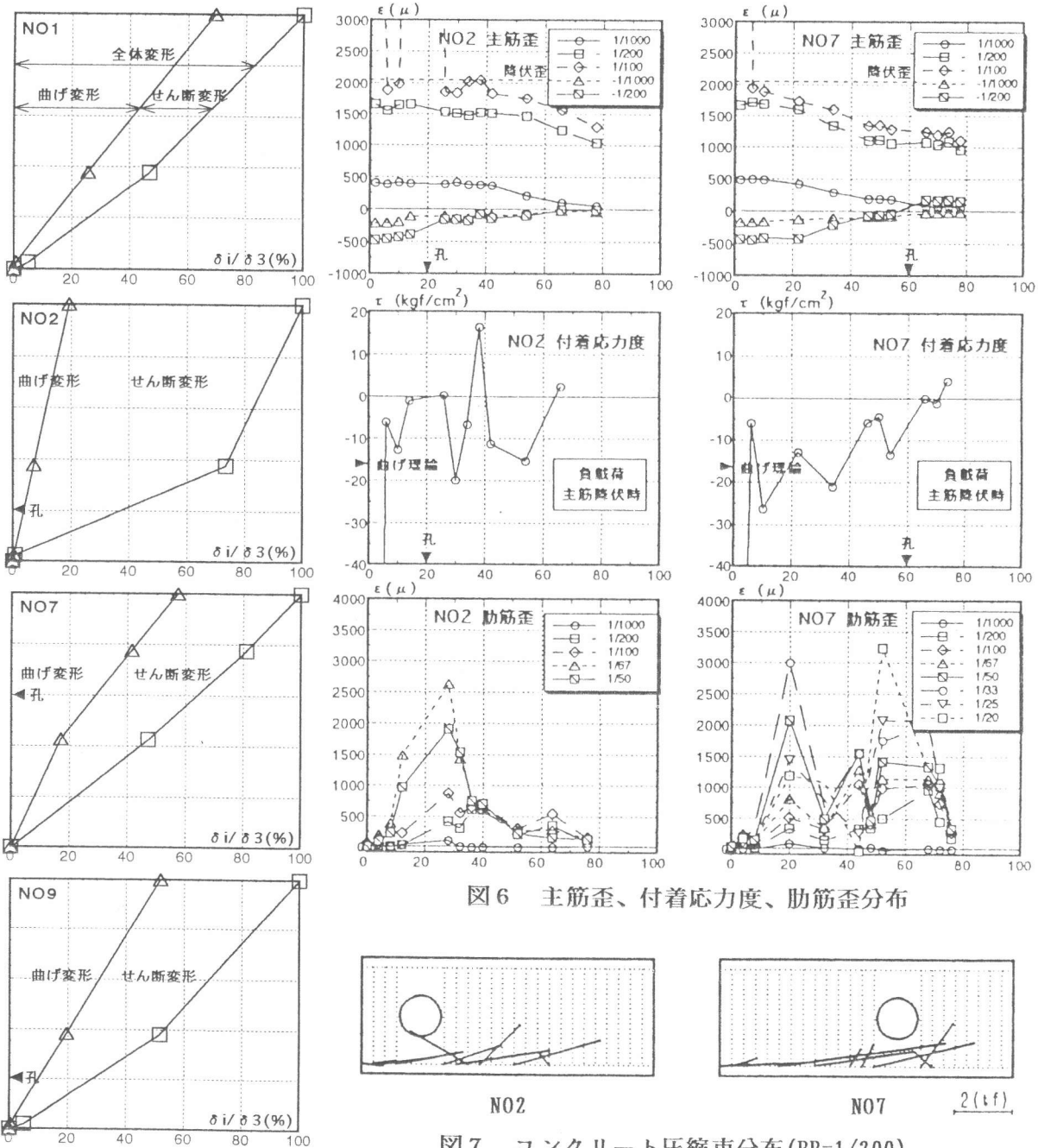


図6 主筋歪、付着応力度、肋筋歪分布

図5 水平変形分布(RP=1/50)

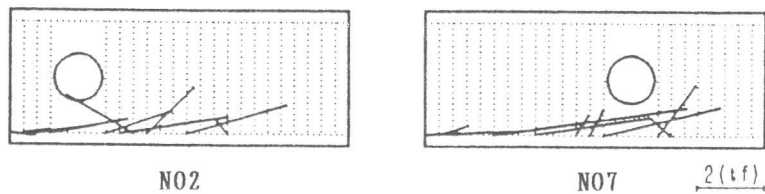


図7 コンクリート圧縮応力分布(RP=1/200)

図5に部材角1/50における水平変形分布を示す。ここで曲げ変形成分は部材の圧縮側及び引張側における鉛直変位の測定値から曲率を算出して求め、せん断変形成分は全体変形から単純に曲げ変形を差し引いた値とした。図の縦軸は部材の位置を、横軸は水平変形を示しており、各位置における変位は加力点変位で無次元化して示した。図から塑性域に孔径D/3を有する試験体では孔部の局所的な変形、特にせん断変形成分が卓越している事が分かる。

3・3 鉄筋の挙動

有孔梁の主筋歪、肋筋歪、主筋降伏時の付着応力度の一例を図6に示す。主筋歪は初期の荷重レベルでは曲げ理論で示されるように、ほぼ線形的に分布しているが、材端に孔がある場合は孔横で局所的な降伏みられる。孔位置を材端から離れた場合は孔周辺における歪分布の乱れがなくなり、材端部でのみ降伏している。肋筋歪は孔が塑性域にある場合は孔周辺に集中するが、孔を塑性域外に設けた場合は孔部と材端において歪が集中している。主筋の付着応力度は曲げ理論で示される様に一様でなく測定位置によりばらつきが見られる。これは曲げ作用による歪に加え肋筋の引張力により局所的に歪が増大しているからである。肋筋歪分布に変化がなければ曲げ作用が卓越するが、逆に肋筋の引張力の大きい孔近傍あるいは材端では付着応力度が大きく、また付着作用の逆転現象が生じ易いといえる。

3・4 コンクリートの挙動

図7に部材角1/200におけるコンクリートの圧縮束の一例を示す。圧縮束力は主筋の付着力と肋筋の引張力からベクトル和として求められる[2]。図より圧縮束力はひび割れ状況に近似して伝達されている事が分かる。また圧縮束力は材端圧縮域に向かって作用する傾向が見られる。

3・5 等価粘性減衰定数

図8に部材角RP-等価粘性減衰定数(h_e)関係を示す。図より有孔梁では主筋降伏以前でも h_e が非常に低くエネルギー吸収能力が少ない事が分かる。主筋降伏後では孔径の大きいN02~5に h_e の急激な低下がみられる。これに対し孔径が小さく、孔位置が材端から離れると h_e の低下は遅れている。また一部を除き有孔梁は無孔梁の h_e を上回る事はなかった。

3・6 限界変形

図9に各変動要因に対する限界部材角実験値(R_u)の比較を示す。図より材端に孔径D/3の孔を有する場合は肋筋比によらず限界部材角はほぼ等しく、せん断余裕度による変形能評価は余り意味をなしていない。一方、孔位置を材端から離れた場合は材端からの距離に比例して限界部材角は増大する傾向がみられ、また孔径を小さくすることによっても限界部材角は増大している。しかし局所的な変形モードを避けるという点においては孔径を小さくするより、むしろ孔位置を材端から離れた方が有効であると考えられる。尚、限界部材角は包絡線において荷重が最大耐力の80(%)に低下した点として定義している。

図10に部材角(RP)と孔部のコンクリート圧縮束角度 ϕ_s の関係を示す。孔部 ϕ_s は学会指針[3]・有孔梁式の ϕ_s に対応しており、ここでは孔の材端側圧縮域における位置の測定値とした。また圧縮束力は主筋の σ - ε 関係を完全弾塑性と仮定し、3・4で示した方法で算出した。部材角(RP)が0近傍では $\cot \phi_s$ が非常に大きい値となる事、及び大変形下では歪データの信頼性が怪しく

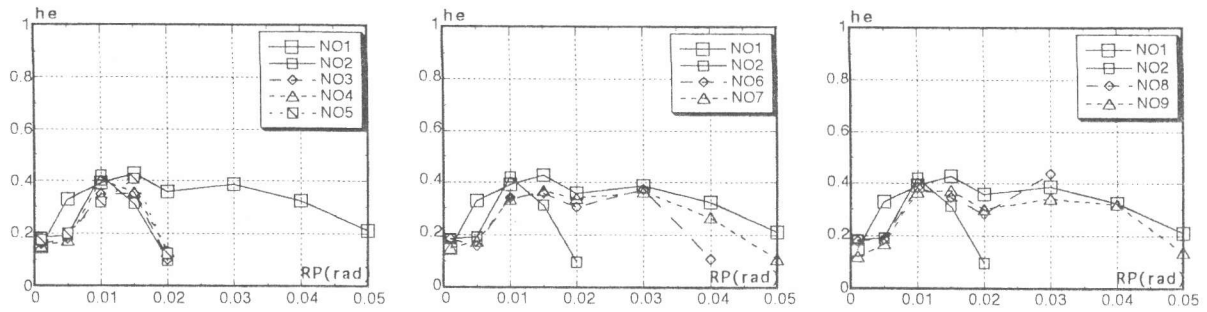


図8 等価粘性減衰定数 (he)

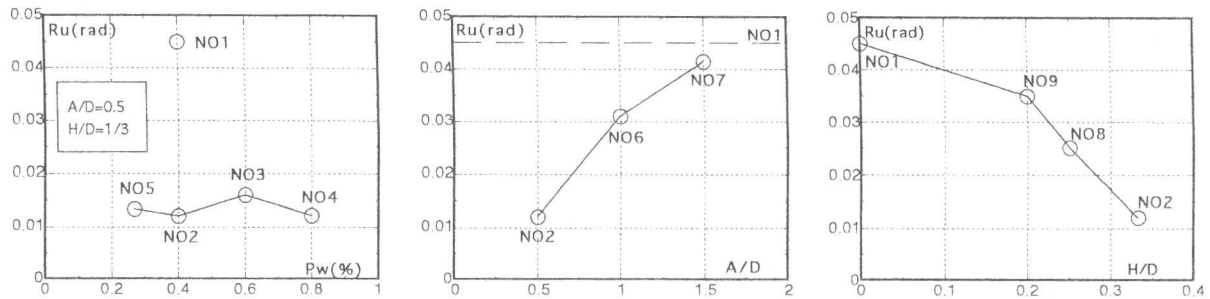


図9 限界部材角実験値 (Ru)

なる事から $\cot \phi s < 15$ 、 $RP < 1/50$ の範囲に限って表示した。どの試験体も部材角が大きくなるに従い、 $\cot \phi s$ の値は小さくなる傾向が見られる。また孔径の小さい場合は、孔径の大きい試験体と比べ $\cot \phi s$ の値が低く、また勾配も非常に緩やかとなっている。このような傾向をもとにデータのはぼ下限となる様に設定式を仮定した。大略的な仮定ではあるが、ここでは設定式は孔径のみにより一義的に定められるものとして孔径ごとに与えている(下式(1)、(2)、(3))。また主筋降伏時をヒンジ回転角 (RH)=0 であるとすると、この設定式のこの時の $\cot \phi s$ の値はヒンジ回転角 0 にお

$$\cot \phi s = -(6 - \cot \phi c) * RP / (Ry + 0.005) + 6 \quad \dots \dots \dots \text{設定式 (1) 孔径 } H = D/3$$

$$\cot \phi s = -(4 - \cot \phi c) * RP / (Ry + 0.008) + 4 \quad \dots \dots \dots \text{設定式 (2) 孔径 } H = D/4$$

$$\cot \phi s = -(4 - \cot \phi c) * RP / (Ry + 0.01) + 4 \quad \dots \dots \dots \text{設定式 (3) 孔径 } H = D/5$$

注) Ry: 主筋降伏時部材角

る $\cot \phi s$ の仮定上の上限値である。本研究では肋筋に高強度せん断補強筋を使用しているため、非靱性部材における学会指針・有孔梁式の計算値ではどの試験体も補強筋量が補強限界を超えている。しかし実験結果をみると肋筋歪は降伏歪以下であり部材角の進行に伴い大きくなり、またコンクリートもヒンジ回転角と共に劣化していくため $\cot \phi s$ 実験値は学会指針の $\cot \phi s$ 限界値より大きな値から低下し始める。この $\cot \phi s$ 実験値はある部材角(図11(b)・[3])において学会指針・有孔梁式の $\cot \phi s$ 限界値(図11(b)・[2])に到達し、 $\cot \phi s$ と RH との関係は図 11 (b) の様に表される。今、補強限界から計算される $\cot \phi s$ 限界値を $\cot \phi s$ の下限値と読み替えると、種々の孔径比 H/jt に対する図 11 (b) の [1]、[2]、[3] の値は図 11 (a) の様に表される。図中の曲線 [2] は学会指針・有孔梁式の $\cot \phi s$ 下限値、●印は理論値、□印は本実験における値である。また孔径比 H/jt が 0 の時は学会指針 A 法に対応する。[1]、[3] はそれぞれ $\cot \phi s$ の上限値、および $\cot \phi s$ が下限値になるときのヒンジ回転角 (RH) を表すものである。

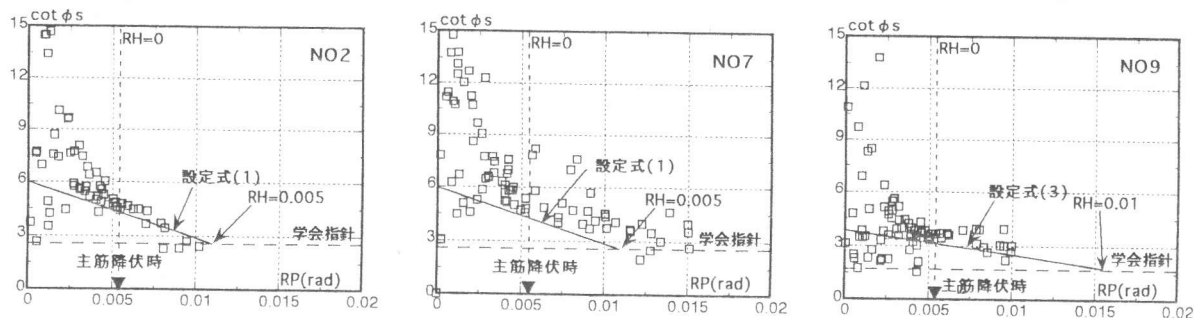


図10 cot φ s-RP関係

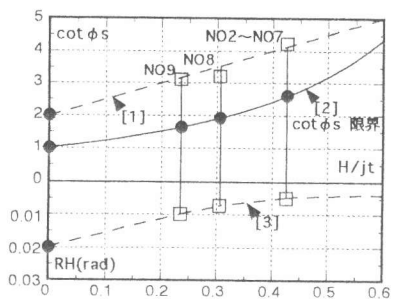


図11(a) cot φ s-H/jt関係

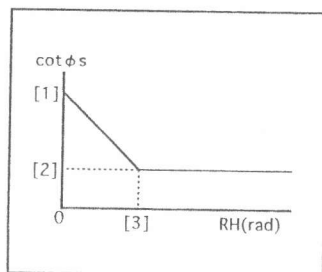


図11(b) 記号意味

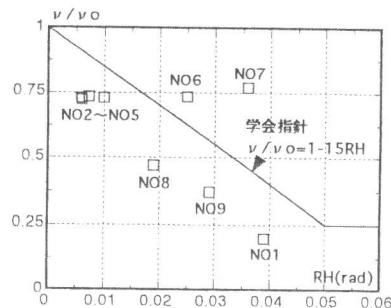


図12 ν/ν0-RH関係

図12はこれらcot φ s設定式を用い限界変形実験値から圧縮強度有効係数 ν を各試験体について逆算したものである。ここで限界変形実験値は包絡線において荷重が最大耐力の80(%)に低下した点として定義した。材端に孔がある場合は危険側になるものの孔径・肋筋比によらずほぼ同一線上に分布しているが、孔位置を変化させた場合は学会指針との相関がみられず、孔の材端からの距離が大きいほど学会指針では過小評価となり、大変形下に於ける ν の値は見かけ上大きく取る事ができる。これは ν がコンクリートの損傷の度合により変化する事から、孔位置が複雑な応力状態、及びひび割れ状態の材端である場合と孔が材端から離れた場合とで ν の特性が異なってくるからであると考えられる。以上より有孔梁の変形能は孔径に対しては圧縮角度 ϕ s、孔位置に対しては圧縮強度有効係数 ν が大きな影響を持っていると考えられる。

4. まとめ

- ・限界変形は補強筋量の影響をほとんど受けない。一方、孔位置を材端から離れた場合、或は孔径を小さくした場合は変形能は増大する。しかし局部的な変形モードを避けるという点で考えれば孔径を小さくするより、孔位置を変化させた方が有効であると思われる。
- ・限界変形は孔径に対しては圧縮角度 ϕ s、孔位置に対しては圧縮強度有効係数 ν の影響が大きいと考えられる。

【謝辞】本研究は平成5年度文部省科学研究費補助金により行いました。また試験体製作に際し高周波熱錬(株)に多大なご協力を頂きました。ここに記し厚く御礼申し上げます。

【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)林静雄、武居泰:鉄筋コンクリート部材のせん断伝達機構に関する実験研究、日本建築学会構造系論文報告集、No. 415、pp43-pp52、1990. 9

(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