

論文 斜め貫通孔を有する RC 有孔梁の剪断耐力に関する実験的研究

池田秀樹*1・佐藤立美*2

要旨：本論は、実際施工された貫通孔傾斜角を有する RC 有孔梁の剪断耐力の確認実験の結果を報告するとともに、梁背の中央に傾斜した貫通孔を有する有孔梁の貫通孔傾斜角と有孔梁の剪断耐力の関係を実験的に検証したものである。3 シリーズの実験結果より、斜め貫通孔を有する RC 有孔梁は、コンクリート断面の欠損が梁中央部に集中しないことにより、水平貫通の有孔梁に比べ亀裂の分散効果が大きくなること、終局時の破壊性状が異なること、およびそれらの影響により剪断耐力が上昇することを実証した。
キーワード：鉄筋コンクリート有孔梁、斜め貫通孔、傾斜角、剪断耐力

1. はじめに

RC 中空スラブの中空部に設置された設備用配管が周辺の梁を貫通する場合、図 1 に示す方法で周辺の有孔梁の貫通孔は水平にするのが一般的であるが、実際に図 2 のように貫通孔傾斜角を有する有孔梁とした建物がいくつかあることが判った。斜め貫通孔を有する有孔梁では、梁の断面欠損を考慮した開口部剪断補強が必要であるが、実際には水平貫通孔と同じ補強方法で施工されていた。そこで、実在 RC 梁と相似な試験体による有孔梁の剪断耐力を実験的に確認したが、2. に示すように断面欠損の影響による剪断耐力の低下は認められなかった。この結果は、従来 RC 有孔梁の設計で梁の両面での開口の包絡線で囲まれる縦長円開口を有する有孔梁として補強設計していることに矛盾する事になる。また、神戸市内に実存するこの種の斜め貫通有孔梁はいずれも 1995 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震でも、ひび割れの発生が無かったことを確認している。以上の背景から、本論は斜め貫通孔の傾斜度と有孔梁の剪断耐力の関係を明らかにする事を目的に、斜め貫通孔の傾斜角の異なる有孔梁の剪断耐力を実験的に検証した。

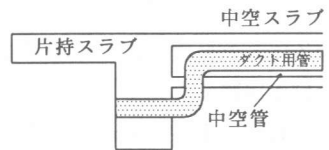


図 1 水平貫通孔の場合

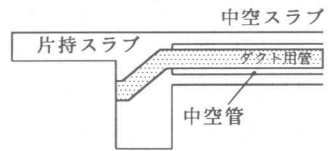


図 2 斜め貫通孔 (断面図)

2. 実存する斜め貫通孔を有する RC 有孔梁と相似な試験体の剪断耐力実験 (TND シリーズ)

試験機の問題で実存する 3 種類の斜め貫通孔を有する有孔梁の 3/7 の大きさの試験体としたため、試験体の断面寸法は 245 × 490 mm である。貫通孔の設置状況・傾斜角および孔径等を図 3 に示す。

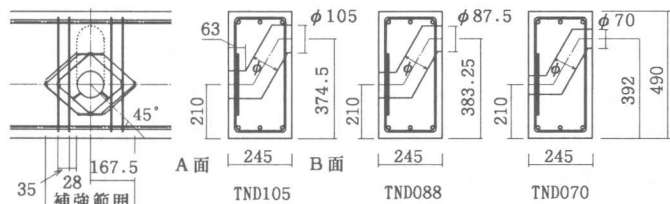


図 3 開口周囲の補強金物・補強筋配筋図

*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)

また剪断耐力の確認が目的であるため、剪断破壊が先行するように実存の梁形状と配筋を若干変更し、剪断スパン比は $M/Qd=1.5$ 、主筋はSD390で3-D25、あばら筋はSD345でD10@140とした。

開口補強は、実際に即して開口両側にあばら筋2組（開口部縦筋比 $p_s=0.69\%$ ）と、A面側にのみ図3に示す形状の簡易開口補強金物（開口部斜め筋比 $p_r=0.49\%$ ）を使用している。

実験は大野式逆対称加力で単調荷重とした。剪断耐力の実験結果を表1に示し、荷重-変形関係を図4に示す。なお、実験計画時の剪断耐力計算値は、梁中央に $H=\phi$ の円形貫通孔を有する有孔梁として修正広沢式を適用しており、斜め貫通孔による断面欠損の影響は考慮していない。

表1 実験結果耐力一覧表

試験体名	開口径比 H/D	剪断初亀裂耐力						最大剪断耐力		
		開口部		接線		梁部		実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値 計算値
		A面	B面	A面	B面	A面	B面			
TND105	0.214	167.0	124.4	257.6	256.8	-	-	320.2	249.5	1.28
TND088	0.179	194.9	152.3	-	269.2	235.9	235.9	326.1	257.1	1.27
TND070	0.143	333.8	214.9	301.4	326.1	243.5	197.4	341.0	264.6	1.29

材料強度 試験日材令コンクリート強度 27.4MPa 鉄筋降伏強度 $\sigma_y=397\text{MPa}$, $w\sigma_y=368\text{MPa}$

3体とも計画どおり剪断破壊しており、最大剪断耐力実験値を見ると、開口径の大きい試験体ほど実験値は小さくなっているが、いずれも計画時予想耐力の1.27~1.29倍とほぼ等しく、また無孔梁の剪断耐力（荒川式下限値）以上である。

図4の荷重-変形曲線においても、最大耐力時までの挙動は非常に良く近似しており、最大耐力以後は緩やかな耐力低下が見られているが、断面欠損の差異による耐力低下への影響はさほど認められない。

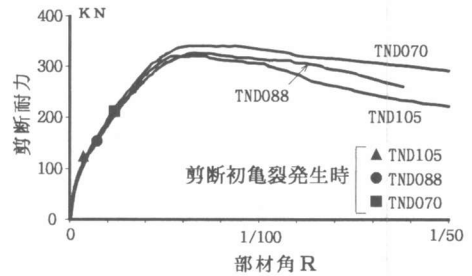


図4 剪断耐力-部材角曲線

図4の荷重-変形曲線においても、最大耐力時までの挙動は非常に良く近似しており、最大耐力以後は緩やかな耐力低下が見られているが、断面欠損の差異による耐力低下への影響はさほど認められない。

試験体の剪断亀裂の伸展状況を見ると、いずれの試験体とも開口が梁上端に近く且つ開口補強金物の無いB面の開口部から最初に剪断亀裂が発生し、次いでA面の開口部から剪断亀裂が発生している。最大耐力直後には、B面の開口部から発生した剪断亀裂がほぼ水平に梁断面を貫通してA面に達し、その後、貫通した剪断亀裂の拡大により終局に至っている。しかし、A面の開口部から発生した亀裂の伸展は少なく、B面まで達し拡大した亀裂はほとんど見られていない。図5に、各試験体の両面に生じた終局時亀裂図を示し更に終局時に拡大の顕著であった亀裂を太線で示した。

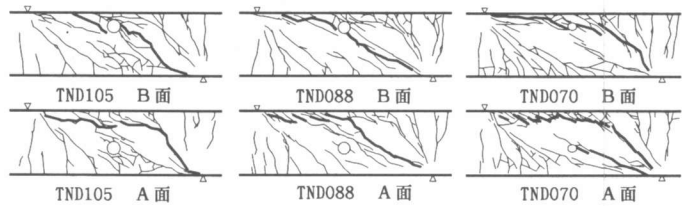


図5 終局時亀裂図

この実験結果からは、亀裂の伸展状況以外には斜め貫通孔とすることによる断面欠損の影響はほとんど見られず、既往の水平貫通孔を有する有孔梁の耐力と変わらないと考えることが出来る。しかし、斜め貫通孔を有する有孔梁では明らかに貫通孔による断面欠損は水平貫通の場合より大きいにも関わらず剪断耐力の低下が認められなかったことと、斜め貫通孔の傾斜角等の適用範囲を確認する目的で以下の実験を行うこととした。

この実験結果からは、亀裂の伸展状況以外には斜め貫通孔とすることによる断面欠損の影響はほとんど見られず、既往の水平貫通孔を有する有孔梁の耐力と変わらないと考えることが出来る。

しかし、斜め貫通孔を有する有孔梁では明らかに貫通孔による断面欠損は水平貫通の場合より大きいにも関わらず剪断耐力の低下が認められなかったことと、斜め貫通孔の傾斜角等の適用範囲を確認する目的で以下の実験を行うこととした。

3. 斜め貫通孔の傾斜角とRC有孔梁の剪断耐力に関する実験

(1) 実験計画と試験体概要

試験体の実験因子は斜め貫通孔の傾斜角であり、貫通孔の傾斜角と最大剪断耐力の関係を実験的に検証することとした。試験体断面は300mm×450mm、試験区間長は1000mmとし、剪断スパン比は $M/Qd=1.25$ である。試験体の剪断破壊が先行するように、主筋にはSD345の3-D25を使用し($p_t=1.27\%$)、あばら筋はSD295でD10@120($p_w=0.36\%$)、コンクリート設計規準強度は21MPaで計画した。

実験計画時の有孔梁の剪断耐力は開口径100mmの水平貫通として修正広沢式計算値を用いた。この結果、試験体の剪断余裕度は0.71であり剪断破壊が予想できる。また試験区間外では、あばら筋をD13@80とし剪断破壊が生じないように計画している。

実験方法は大野式逆対称加力とし、単調載荷と繰り返し載荷の2シリーズとした。

単調載荷では、耐力が最大耐力の75%まで低下するか、試験体が破壊するまで加力することとし、繰り返し載荷の場合は、変位制御で部材角が $R=1/400, 1/200, 3/400, 1/100$ で正負各1回繰り返し載荷したのち終局まで加力した。

貫通孔は梁中央部で断面の中心を通る位置に設け、貫通孔の傾斜角のみを変化させている。貫通孔の形状は梁側面から50mmの水平部分を持つ厚さ $t=0.6\text{mm}$ の鉄板製で水平部分の開口径は $\phi=100\text{mm}$ であり、あばら筋の内側でのみ傾斜している。また、全ての試験体とも開口補強筋は開口両側の2組の135°フック付きのあばら筋($p_r=0.54\%$)のみであり、斜め補強筋は使用していない。貫通孔の傾斜角は梁の中心線よりの偏心距離で決定し、偏心距離 e はそれぞれ、0,25,50,75,100mmの5種類とした。単調載荷試験体の試験体名称と中央部断面を図6に示し、最も傾斜角の大きい試験体TNH100の配筋図を図7に示した。但し、繰り返し載荷の試験体の貫通孔形状は、水平部分と傾斜する部分の貫通孔径はいずれも $\phi=100\text{mm}$ と一定であり、傾斜角毎に貫通孔による断面欠損が異なる形状となっている。

(2) 単調載荷実験結果 (TNHシリーズ)

実験結果の開口部剪断初亀裂および最大剪断耐力の一覧表を表2に示す。また、斜め貫通孔を有するRC有孔梁の剪断耐力の一評価として、計画時の修正広沢式計算値との比を参考に示した。試験日材令でのコンクリート強度は計画値よりやや大きいが、全ての試験体とも剪断破壊しており、貫通孔の傾斜角の異なる有孔梁の剪断耐力実験値を直接比較することができる。

開口部初亀裂耐力は傾斜角により特に顕著な差異はなくまた、A,B両面の亀裂発生耐力にも明確な特徴は

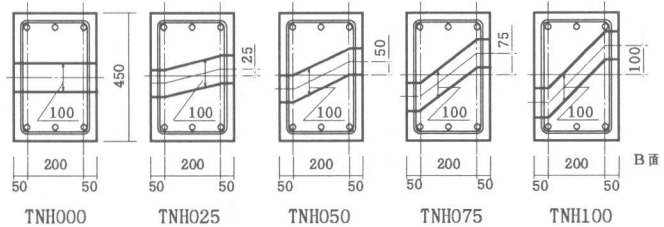


図6 開口スリーブの貫通角度および試験体名

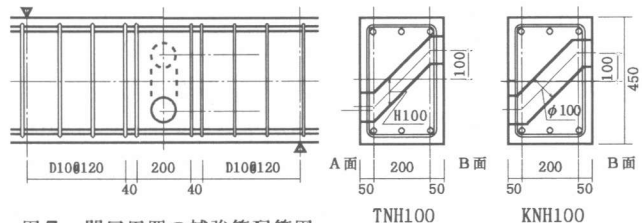


図7 開口周囲の補強筋配筋図

表2 実験結果耐力一覧表

試験体名	開口部剪断		最大剪断耐力	
	初亀裂耐力		実験値 (kN)	実験値 計算値
	A面	B面		
TNH000	147.9	137.9	296.5	1.35
TNH025	139.9	147.9	305.9	1.39
TNH050	150.5	147.3	307.4	1.40
TNH075	126.8	134.8	310.1	1.41
TNH100	173.6	153.3	321.0	1.46

材料強度 試験日材令コンクリート強度 23.5MPa
鉄筋降伏強度 $\sigma_y=377\text{MPa}$, $\sigma_w=354\text{MPa}$

見られなかった。しかし最大耐力を比較すると、斜め貫通孔を有するRC有孔梁の剪断耐力は、いずれも同一開口径の水平貫通孔の試験体THN000の剪断耐力より大きくなっており、また貫通孔の傾斜角が大きくなると共に剪断耐力は大きくなっていることが確認できる。最も剪断耐力が大きい開口偏心距離 $e=100\text{mm}$ の試験体TNH100では、水平貫通孔の試験体THN000の剪断耐力の1.08倍であり、明確な剪断耐力の上昇を示している。

図8に、各試験体の荷重-変形曲線の比較を示した。いずれの試験体とも開口部の亀裂発生時変形と最大耐力時変形に顕著な差異は見られていない。しかし、最大耐力後の剛性の低下と終局時変形には顕著な差異が見られ、貫通孔の傾斜角の大きいものほど耐力低下が小さく、且つ終局時変形が大きくなっていることが確認できる。

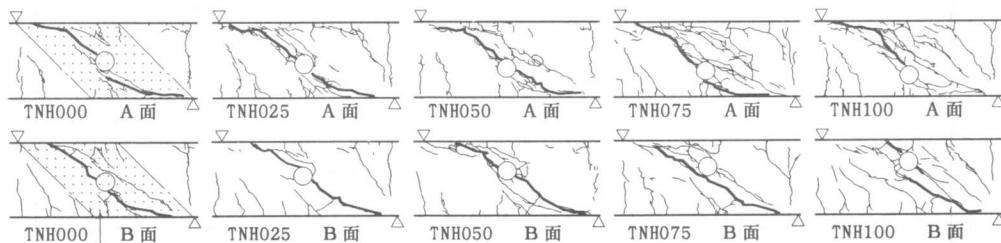
また、斜め貫通孔を有する有孔梁の剪断亀裂の伸展状況が、水平貫通の場合と明らかに異なった挙動を示すことが確認された。斜め貫通孔を有する試験体の亀裂の伸展状況を概説すると、まず

梁の両面の開口部の 45° 方向に剪断亀裂が生じ、次いで梁両面とも開口上下に接する亀裂が生じ、荷重の増大とともにこれらの亀裂の伸展と、開口部周辺に新たな剪断亀裂が発生するが、開口周辺の亀裂発生は貫通孔の傾斜角の大きいものほど多くなる傾向が見られている。更に、最大耐力時以後では、開口部から発生し拡大した剪断亀裂と、貫通孔表面とで囲まれるコンクリートブロックが貫通孔表面に沿って梁面外へ剪断スリップすることが特徴である。各試験体の終局時亀裂図を図9に示したが、同時に終局時に顕著に拡大した亀裂を太線で示している。

試験区間の荷重点から 45° 方向の線で囲まれた領域内に発生した亀裂の長さ変化を図10に示す。

図10は、ひび割れのスケッチをデジタル化し解析したもので精度はやや劣るが亀裂の伸展状況を定量化するには意味がある。水平貫通の場合、最大耐力時及び終局時の亀裂長さは他の試験体に比べて明らかに小さいが、これはAB両面にほぼ等しいひび割れが伸展するためであり、両面の亀裂は比較的早期から梁断面を貫通していることによる。斜め貫通で傾斜角が大きくなるとAB両面での剪断亀裂は各面の開口位置付近からお互いに独立して発生伸展するようになり、最大耐力時前後で初めてこれらの亀裂が梁断面を斜めに貫通することに起因すると考えられる。

そのため梁両面での剪断亀裂の発生本数が多くなり、合計亀裂長さも長くなるのが判る。



亀裂長さ解析範囲

図9 終局時亀裂図

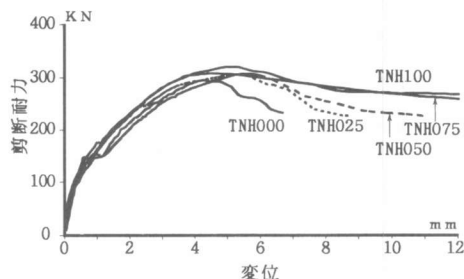


図8 荷重-変形曲線の比較

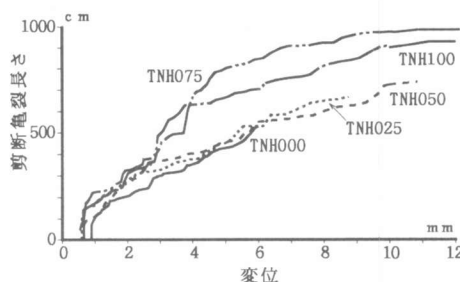


図10 剪断亀裂長さの比較

(3) 繰り返し載荷の実験結果 (KNHシリーズ)

本実験の試験体は、貫通孔の傾斜部の直径も100mmであり、貫通孔傾斜角と共に欠損断面積が増加している。

本シリーズの実験でも、全ての試験体は予想どおり剪断破壊しており、実験値を直接比較できる。

最大耐力はいずれも $R=1/200$ 時に生じており、その後 $R=3/400$ 迄の耐力低下はKNH100を除きいずれも約10%と緩やかであるが、KNH100の低下率は20%と大きい。

実験結果の剪断初亀裂耐力および最大剪断耐力の一覧表を表3に示す。なお、計画時剪断耐力は開口径比を $H/D=2/9$ として修正広沢式を使用し、剪断耐力実験値と計算値の比を求めている。本実験では、コンクリート強度がほぼ計画値どおりであったことと、繰り返し載荷の影響のため、および実際の開口高さHが開口径 ϕ 以上であることで、いずれの試験体とも剪断耐力実験値は単調載荷の実験結果に比べやや小さくなっている。

開口部剪断初亀裂耐力は、試験体によりばらつきがあり、初亀裂発生位置の特定は出来ない。

各試験体の偏心開口距離と最大剪断耐力の実験値の関係をみると、開口偏心距離が50mm ($\tan \theta = 1/3$)迄は貫通孔の傾斜角が大きくなると共に剪断耐力が上昇し、それ以上の偏心距離の場合には剪断耐力は低下しており、KNH100では水平貫通孔の試験体KNH000とほぼ同等の剪断耐力まで低下している。また、最大の剪断耐力を示した $e=50$ mmの試験体KNH050の剪断耐力は、水平貫通孔の試験体KNH000の剪断耐力の1.06倍であり、水平貫通の場合に比べ有意な耐力上昇が見られている。

図12に、終局時の亀裂発生状況と終局時に特に拡大した亀裂を太線で示した。水平貫通孔の場合、梁両面に発生する剪断亀裂の発生・伸展状況は非常に良く似ており、両面の開口部から発生した剪断亀裂はほぼ水平に梁断面を貫通する。しかし、斜め貫通孔の場合には、梁の両面の各開口部から発生する亀裂はお互いに独立して伸展し、最大耐力前後で両面の亀裂は梁断面を斜めに貫通する事が特徴である。したがって、単調載荷の場合と同様に、最大耐力に到るまでに梁の両側面に発生する剪断亀裂の本数も多くなり、結果として亀裂分散効果が大きくなる事が判る。

また、斜め貫通孔の試験体では、終局時に拡大する剪断亀裂も各梁側面で独立しており、傾斜角が大きくなると、いずれかの梁側面では開口部を通る亀裂の拡大が見られるが、梁の反対側面では開口部を通らない位置で亀裂幅が拡大することが特徴である。さらに終局時には、図11に示すように、梁断面を貫通し拡大した剪断亀裂と貫通孔表面に沿った面で囲まれるコンクリートブロックが梁面外にスリップするが、このスリップ量は貫通孔の傾斜角が大きいものほど大きくなる傾向が認められた。

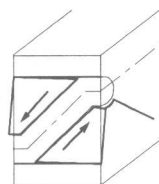


図11 剪断スリップ

表3 実験結果耐力一覧表

試験体名	開口部剪断		最大剪断耐力	
	初亀裂耐力		実験値 (KN)	実験値 計算値
	A面	B面		
KNH000	125.0	125.0	270.9	1.23
KNH025	112.3	145.9	283.5	1.29
KNH050	113.8	152.3	287.7	1.31
KNH075	162.8	168.0	276.2	1.26
KNH100	102.9	136.5	269.9	1.23

材料強度 試験日材令コンクリート強度 22.0MPa
鉄筋降伏強度 $\sigma_y=367$ MPa, $w\sigma_y=378$ MPa

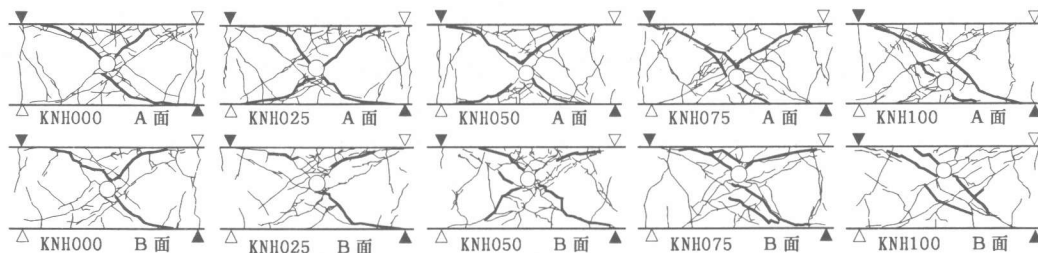


図12 終局時亀裂図

4. 斜め貫通孔を有するRC有孔梁の最大剪断耐力の比較

以上の実験結果より、斜め貫通孔を有する有孔梁の開口偏心距離と剪断耐力の実験値/計算値の関係を図13に示した。TNHシリーズでは、偏心距離が大きくなるとほぼ単調に剪断耐力は上昇しているが、KNHシリーズでは $e=75\text{mm}$ 以上の2体の最大耐力は $e=50\text{mm}$ の剪断耐力に比べ低下している。

これは、KNHシリーズでは貫通孔径形状の関係で梁断面欠損量が偏心距離の増大と共に大きくなっていることも原因である。そこで、KNHシリーズの貫通孔の平均開口径を用いた修正広沢式との比を求めKNH'として図示したが、これはTNHシリーズの場合と非常に近似した傾向を示していることが判る。更に、TNDシリーズの実験結果の適合性を比較するため、開口径比と両面の開口中心間距離と梁幅の比の積と最大耐力時の平均剪断応力度のコンクリート強度に対する比を図14に示した。

図14より、開口補強筋の影響を考慮しない場合、いずれも傾斜角が大きくなると最大耐力時のコンクリートの平均剪断応力度は大きくなることが判る。また、TNDシリーズの試験体はTNH、KNHシリーズの開口偏心距離75~100mm程度の試験体に相当する有孔梁であることが判り、この範囲の有孔梁では、水平貫通の場合より耐力が上昇する可能性が示され、これは2.の実験結果と整合する。

これらの結果は、斜め貫通孔を有する有孔梁の場合、断面欠損量を適切に考慮することで剪断耐力が評価できることを示唆しており、従来行われている梁両面の開口を包絡する縦長円開口を有する梁として評価すると安全率は上がるが、耐力を過小評価することになると考えられる。

5. 結論

本論の実験より、斜め貫通孔を有するRC有孔梁の剪断耐力と破壊形式について以下に結論する。

- 1) 傾斜した貫通孔では、開口による断面欠損位置が梁中央に集中しないため、水平貫通のように開口位置で発生した剪断亀裂は早期に梁断面を貫通しない。この傾向は貫通孔の傾斜角が大きくなるほど顕著である。また、開口部剪断亀裂が梁を貫通するまで耐力は低下しない。
- 2) 単調荷重の場合、傾斜角が大きいほど剪断耐力は大きく、最大耐力後の耐力低下も小さくなる。繰り返し荷重でも、傾斜角が 40° までは剪断耐力は上昇しそれ以上の傾斜角では耐力は低下するが、コンクリートの最大剪断応力度は、単調荷重の場合と同様な傾向を持つことを確認した。
- 3) 従来の設計方法のように梁両面の2つの開口を包絡する縦長円開口を有する有孔梁として補強設計することの必要性には疑問がある。本実験結果によると、あばら筋の内側でのみ斜めに貫通する有孔梁の場合、貫通孔による断面欠損量と等価な平均開口径を持つ水平貫通の有孔梁として取り扱うことで、剪断耐力を安全側に評価できると言える。

【参考文献】

- [1] 佐藤立美, 池田秀樹: 斜め貫通孔を有するRC有孔梁の剪断耐力に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.443-444, 1996.9

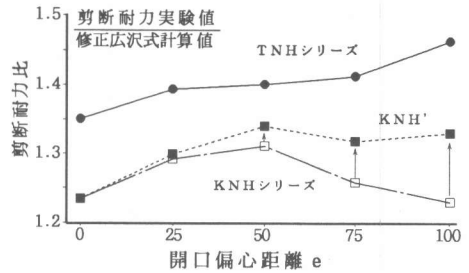


図13 剪断耐力比と開口偏心距離の関係

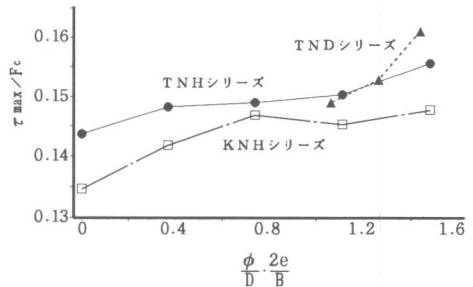


図14 τ_{\max}/F_c と開口比・傾斜率の関係