

報告 梁ヒンジ域における開孔が部材性状に及ぼす影響に関する検討

成川将人*1・岩淵一徳*1・濱田 真*1・石橋久義*2

要旨：本報告は梁ヒンジ域に開孔を設けた場合の影響をFEM解析を用いて検討したものである。開孔位置をパラメータとした解析の結果から、開孔位置によりひび割れ発生状況が異なり、また引張主筋のひずみ分布が異なることが分かった。さらに開孔補強方法をパラメータとした解析結果からは、肋筋と斜筋を併用した補強方法が開孔部せん断変形を抑制するために効果的であることが分かった。そして、ヒンジ域の開孔に対しても肋筋と斜筋による補強を行えば、解析的には補強可能であることが分かった。

キーワード：有孔梁、開孔位置、ヒンジ域、開孔補強方法、FEM解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築の骨組を構成する梁の腹部に電気、ガス、給排水等の設備配管用貫通孔が設けられることがある。このような貫通孔が設けられた梁を有孔梁と呼んでいる。梁に開孔を設けた場合、構造性能のうち特にせん断力に対する耐力低下が著しい。また開孔周辺には応力集中によるひび割れも発生しやすいことから、開孔周囲は何かしらの補強をする必要がある。このせん断耐力の低下に対して、従来は図-1に示すような肋筋と斜筋による補強が推奨されてきた。しかし、在来補強は施工が困難なため様々な補強方法が検討され、現在では簡易補強金物が多く利用されている。

一方、せん断補強が十分に施されていても、剛性の低下は免れない。したがって、一般的には開孔径は梁せいの1/3以下、同じ梁に2個

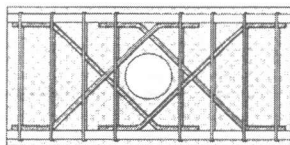


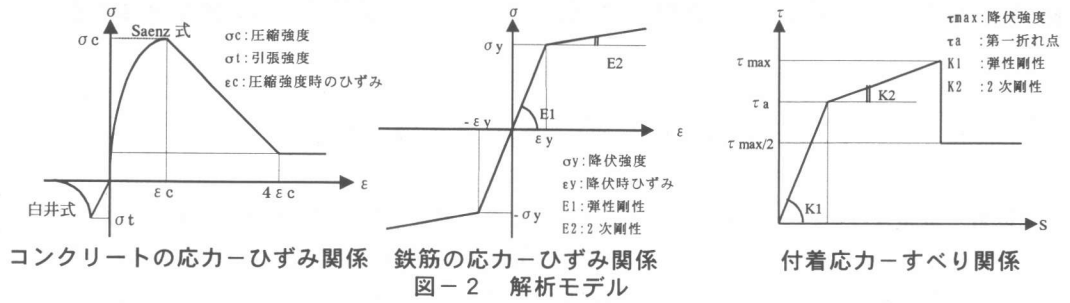
図-1 従来の補強方法

以上の開孔を設ける場合は、開孔の中心間隔は開孔径の3倍以上とすることが望ましい¹⁾とされている。開孔がスパン中央、梁せいの中央にあり、かつ十分に開孔補強が施されていれば、開孔位置が曲げ耐力や変形性能に及ぼす影響はないとされている。しかし、開孔が柱際に寄ったり、梁下端方向に偏心するとその影響は無視できないものとなる。ヒンジ域に開孔を設けた実験研究によると、ヒンジ域に開孔を設けた場合でもせん断耐力は既往の実験式によりほぼ推定可能²⁾であるが、変形性能を確保するためには主筋の座屈を防止する必要がある³⁾と報告されている。

本報告では、コンクリートや鉄筋の応力状態を推定できるFEMを用いて、開孔位置と開孔補強方法をパラメータとした解析を行い、解析結果による剛性、ひび割れ発生状況、開孔部せん断変形角および主筋のひずみ分布を比較検討することにより、ヒンジ域における開孔が部材性能に及ぼす影響を把握するとともに、その有効な補強方法を探ることを目的とした。なお、本報告は一連の研究のための第一段階であり、梁ヒンジ域の開孔およびその補強方法が部材性状に及ぼす影響を定性的に検討したに留まる。

*1 (株)熊谷組 技術研究所 建築構造研究グループ 工修 (正会員)

*2 (株)熊谷組 技術研究所 建築構造研究グループ 工修



2. 解析手法および解析対象

2.1 解析手法

FEM解析には野口・張らによって開発された2次元非線形有限要素解析プログラム⁴⁾を用いた。以下にコンクリート、鉄筋およびボンドリクの概要を説明するとともに図-2にそのモデルを示す。

コンクリート: コンクリート要素には、要素内剛性の評価が可能な内部積分点を有する8節点アイソパラメトリック4角形要素を使用した。2軸応力下の構成則にはDarwin-Pecknoldの等価1軸ひずみに基づく直交異方性モデルを用い、破壊条件はKupfer等の実験に基づくものとした。応力-ひずみ関係については図-2に示すように、圧縮上昇域にはSaenz式⁵⁾を用い、ひずみ軟化域ではせん断補強筋による拘束効果を考慮しないモデルとした。コンクリートのひび割れは分布ひび割れモデルとした。

鉄筋: 主筋には2節点からなる1次元の線材要素を用いた。応力-ひずみ関係には図-2に示すようなバイリニヤ型の完全弾塑性モデルとした。

ボンドリク(付着): 鉄筋とコンクリートの付着を表すために、ボンドリク要素を用いた。ボンドリク要素は鉄筋節点とコンクリート節点間に配置した。ボンドリク要素は、鉄筋軸に平行方向および垂直方向の2本のバネからなり、平行方向のリンクが付着を、垂直方向のリンクがダボ作用を表している。付着挙動を表している軸と平行なバネの包絡線は図-2に示すようなバイリニヤ型モデルで、最大付着強度に達した場合は応力を半減する非線形バネとした。

ダボ作用を表している軸と垂直なバネは、剛性の高い線形バネとした。なお、水平非線形バネ定数は既往の研究⁶⁾を基に定めた。

2.2 解析対象

ヒンジ域に設けた開孔について検討するので、ここでは片持ち梁形式の仮想試験体を解析対象とした。梁断面は $b \times D = 295 \times 360 \text{mm}$ 、主筋は上下端とも4-D19(SD345)を配筋した。せん断スパンは $a = 720 \text{mm}$ 、コンクリート強度は30MPaとした。せん断補強は、曲げ略算式¹⁾による曲げ耐力と大野荒川min式¹⁾によるせん断耐力がほぼ等しくなるように2-D10@90($p_w = 0.534\%$)とした。また、有孔梁のせん断耐力式は、大野荒川min式の第1項に係数を乗じた修正広沢式⁷⁾により計算するものとした。

図-3に有限要素分割の例を示す。コンクリートは4角形要素で表し、せん断補強筋はコンクリート内に一様に分布していると仮定して積層要素によって評価するものとした。主筋は線材要素とし、ボンドリクを介してコンクリート要素と結合するようにした。スタブは梁に比

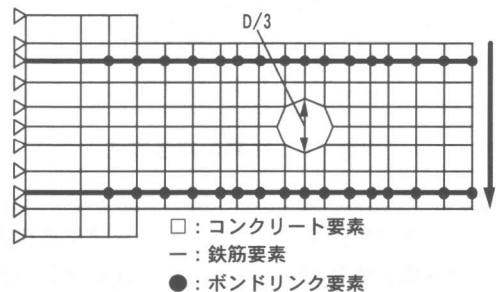


図-3 要素分割図

べて十分に剛性を大きくした。スタブの梁が取り付く側の反対面の全節点をピン支持として、梁自由端に一樣に力が分布するようにし、荷重増分による1方向単調載荷とした。表-1に解析に用いたコンクリートと鉄筋の材料定数、ポンドリンクバネ係数を示す。

3. 孔位置をパラメータとした解析

3.1 解析変数

前章で示した無孔梁に対して、孔径を一定 ($H=D/3$) とし、危険断面から孔中心までの距離 (A) を変数とした解析を行った。試験体概要を下記に記す。

No. 1 : 無孔梁

No. 2 : $A/D=1$

No. 3 : $A/D=1/2$

No. 4 : $A/D=1/3$

No. 5 : $A/D=1/4$

孔を設けた位置によりひび割れ発生状況にどのような違いがみられるのかを検討するため、開孔を設けた場合についても開孔周辺の補強はせずに解析した。なお、無孔梁の曲げ耐力 (Q_y) およびせん断耐力 (Q_{su}) は $Q_y=Q_{su}=179\text{kN}$ である。また、修正広沢式により求めた孔径 $H/D=1/3$ を有する開孔部のせん断耐力 (Q_{suh}) は 131kN であるので、計算上 No. 2~5 は開孔部でせん断破壊となるものである。

3.2 解析結果

梁端荷重 (Q) と梁端変位 (δ) 関係を図-4に示す。いずれも $Q=30\text{kN}$ 近傍での曲げひび割れの発生とともに剛性低下を示し、その後無孔梁と有孔梁で変形量に差が現れている。 $\delta=4\text{mm}$ あたりで剛性が大きく低下し、変形が大きく流れて解析がストップした。無孔の No. 1 試験体は、解析においては 185kN で曲げ降伏しており、計算結果とよく対応している。有孔の No. 2~5 試験体は、梁端コンクリートの圧縮破壊あるいはせん断補強筋の降伏によるせん断破壊となった。また有孔の試験体の中で最も危険断面近くに孔

を設けた No. 5 試験体の耐力は他の 3 体と比較して高く、曲げ耐力を上回っていることが観察できる。

$Q=150\text{kN}$ 時のひび割れの発生状況を図-5に示す。無孔梁では危険断面位置での曲げひび割れと、梁の圧縮縁へと進展する 45 度方向のせん断ひび割れが顕著に発生している。一方、有

表-1 材料定数 (表中の記号は図2参照)

コンクリート	σ_c (MPa)	ϵ_c	$4\epsilon_c$	E_c (MPa)	σ_t (MPa)
梁	30	$2.00E-03$	$8.000E-03$	$2.10E+04$	2.95
鉄筋	σ_y (MPa)	E (MPa)			
梁主筋	385				
肋筋	300	$2.00E+05$			
開孔補強筋					
ポンドリンク	$K1$ (MPa)	$K2$ (MPa)	τ_a (MPa)	τ_{max} (MPa)	
	800	40	2	4	

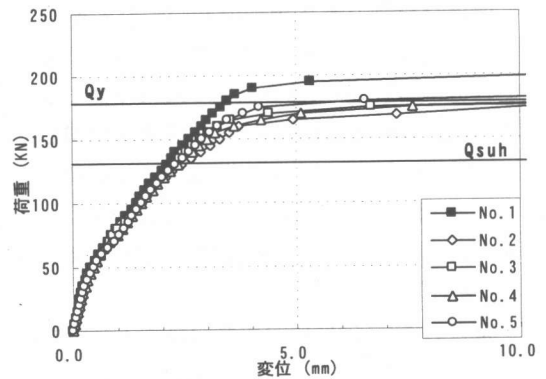


図-4 荷重-変位関係

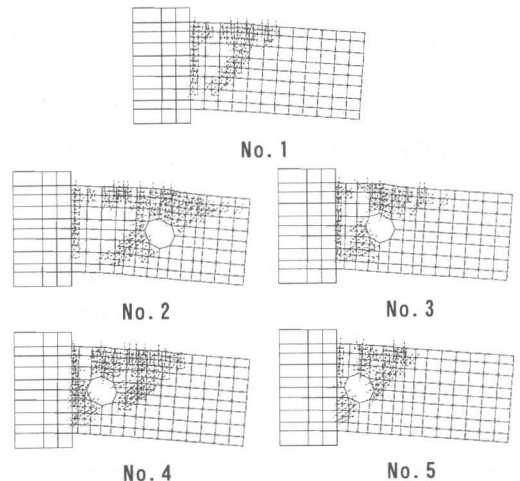


図-5 ひび割れ図

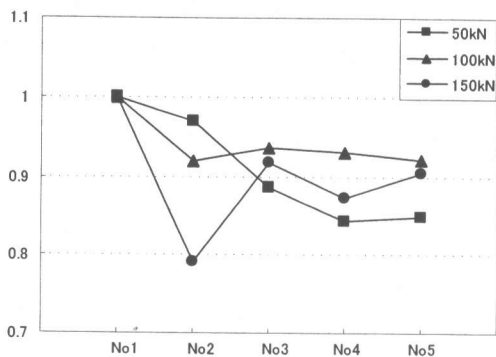


図-6 割線剛性の比較

孔梁においては、曲げひび割れの他に孔直上のひび割れが発生しており、せん断ひび割れは孔を中心として45度方向に進展していることが観察できる。

曲げひび割れ発生後の $Q=50\text{kN}$ 、せん断ひび割れ発生後の $Q=100\text{kN}$ 、そして最大耐力近傍の $Q=150\text{kN}$ 時の割線剛性を無孔のNo.1の値で基準化したものを図-6に示す。初期剛性に関しては、開孔が危険断面に近づくほど剛性が低下しているが、せん断ひび割れ発生後の剛性は、有孔梁においてNo.2試験体を除いてほぼ横這いである。

図-7に $Q=150\text{kN}$ 時の主筋のひずみ分布を示す。各試験体ともに、孔の直上および孔から45度の位置に主筋のひずみのピークがあり、図-5に示したひび割れ発生状況と整合している。圧縮鉄筋のひずみに顕著な違いは観察されなかった。

4. 開孔補強の形をパラメータとした解析

4.1 解析変数

3章の孔位置をパラメータとした解析のNo.2に対して、開孔部周辺のせん断補強方法を変数とした解析を行った。せん断補強方法は、図-8に示す4タイプとした。肋筋、斜筋ともせん断補強筋と同じ径のD10で補強するように計画した。なお、開孔補強の肋筋と斜筋は線材要素で表し、両端をコンクリート節点に結合した。試験体概要を下記に記す。

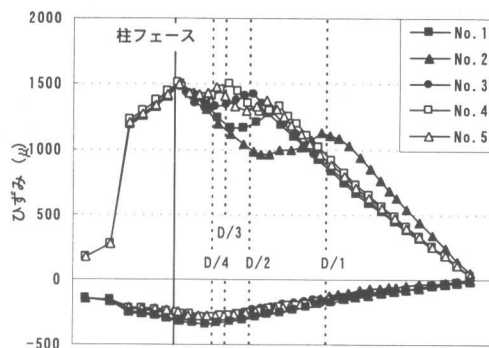


図-7 主筋ひずみ分布

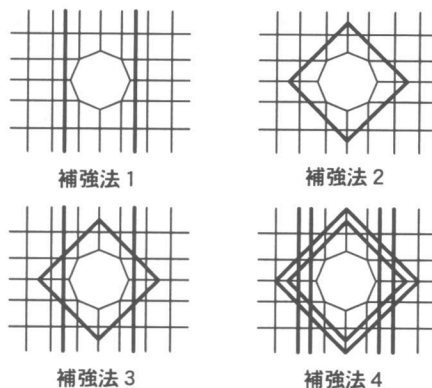


図-8 補強方法

No.2-1: 肋筋のみによる補強

(肋筋4-D10, $P_s=0.669\%$)

No.2-2: 斜筋のみによる補強

(斜筋4-D10, $P_s=0.945\%$)

No.2-3: 肋筋と斜筋を併用した補強

(肋筋, 斜筋とも2-D10, $P_s=0.807\%$)

No.2-4: 肋筋と斜筋を2重にした補強

(肋筋・斜筋とも 1×2 -D10, $P_s=0.807\%$)

4.2 解析結果

荷重-変位関係を図-9に示す。肋筋により補強したNo.2-1試験体と比較して、斜筋により補強したNo.2-2試験体の方が耐力が上昇したことから有孔梁の補強には斜筋が有効であることが確認できる。斜筋を用いたNo.2-2~4試験体の中では肋筋と斜筋を2重にしたNo.2-4試験体の補強方法が効果的であることが観察で

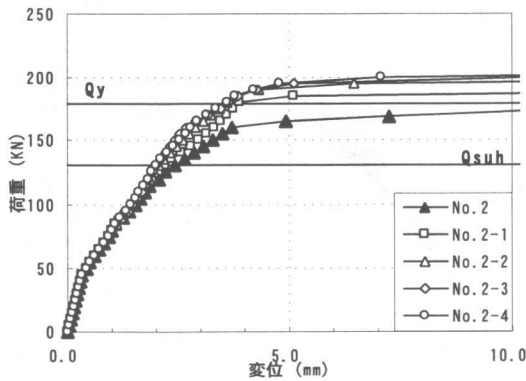


図-9 荷重-変位関係

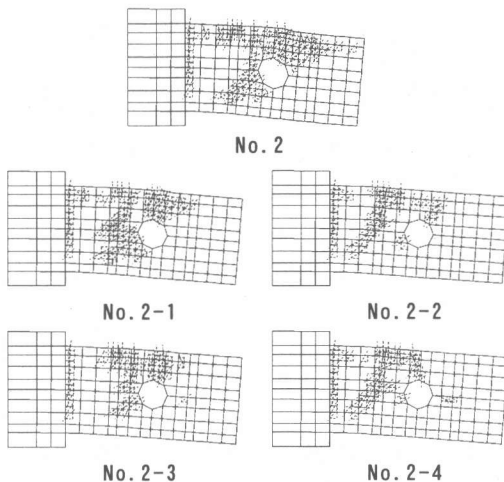


図-10 ひび割れ図

きる。

Q=150kN時のひび割れの発生状況を図-10に示す。開孔補強を行った試験体の中で、特に斜筋を用いて補強したNo. 2-2~4試験体では開孔周辺のひび割れが抑制され、孔直上の局所的な変形が抑えられていることが観察できる。

Q=150kN時の主筋のひずみ分布を図-11に示す。筋筋あるいは斜筋のみで補強したNo. 2-1, 2試験体と比較して、両補強筋を併用したNo. 2-3, 4試験体において主筋のひずみが抑えられていることから、後者の開孔補強が有効であることが確認できる。

Q=150kN時の開孔部せん断変形角の比較を図-12に示す。開孔部のせん断変形角は図-1

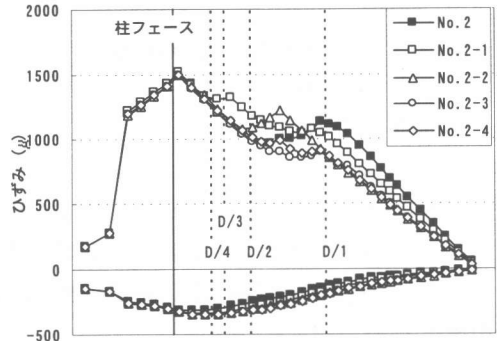


図-11 主筋のひずみ分布

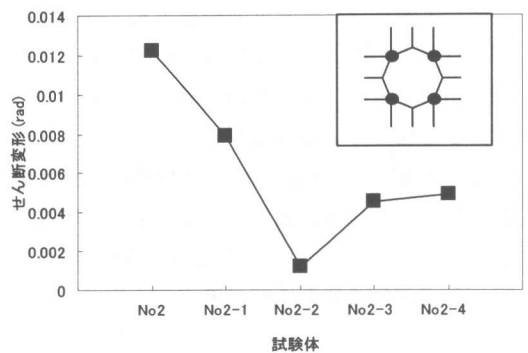


図-12 せん断変形角の比較

2内に示す4節点から求めた。せん断補強筋比を最大としたNo. 2-2試験体において、最もせん断変形が抑えられていることが確認できる。筋筋と斜筋を併用したNo. 2-3, 4試験体の比較において、両試験体の補強方法の違いによる顕著な違いは確認できなかった。

5. ヒンジ域の開孔補強解析

5.1 解析変数

4章の開孔補強の形をパラメータとした解析結果では、補強法2が最も開孔部せん断変形角を抑えているが、ここでは筋筋と斜筋を併用した補強法3により、3章の有孔梁を補強した場合の解析を行った。試験体概要を

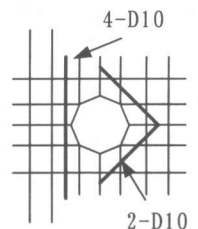


図-13 補強法

下記に記す。

No. 2-3 : A/D=1 (4. で実施済み)

No. 3-3 : A/D=1/2

No. 4-3 : A/D=1/3

No. 5-3 : A/D=1/4

A/D=1/4については、斜筋がスタブ(柱型)内に入り込んでしまうため、図-13に示すように片側のみを斜筋で補強し、斜筋が無い側は筋筋を2倍にした。

5. 2 解析結果

図-14に荷重-変位関係を示す。開孔部を補強したことにより、無補強のものに対しては変形が抑えられ、無孔梁の荷重-変位関係とほぼ同じとなっていることが観察できる。

図-15にQ=150kN時のひび割れの発生状況を示す。全試験体共通して、孔直上の局所的な変形が抑えられており、補強方法が孔の位置に関わらず有効であることが確認できる。

6. まとめ

3章で孔位置をパラメータとして解析を行った結果、有孔梁は無孔梁と比較して耐力が低下するが、危険断面からD/4の位置に孔を設けた試験体は他の有孔梁と比較して耐力が上昇した。

4章で開孔補強の形をパラメータとして解析を行った結果、筋筋と斜筋を併用した補強方法が開孔部せん断変形を抑制するために効果的であることが分かった。

5章でヒンジ域開孔補強解析を行った結果、孔の位置に関わらず筋筋と斜筋を併用する補強方法は効果的であり、無孔梁と同程度の耐力を示した。

謝辞

FEM解析プログラムは、千葉大学野口研究室で開発されたものを利用させて頂きました。

参考文献

1) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 一許容応力度設計法一, 日本建築学会, 1999. 10

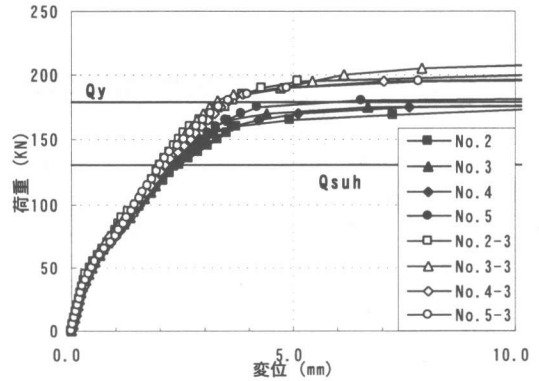


図-14 荷重-変位関係

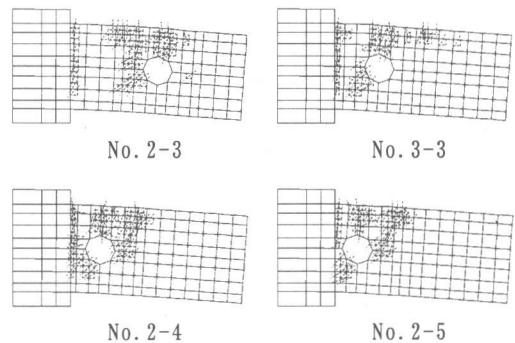


図-15 ひび割れ図

- 2) 飯塚正義, 八木敏行, 石原江利子, 益尾潔: ヒンジゾーンに開口を設けたハーフプレキャスト鉄筋コンクリート梁の耐震性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp. 389~394, 1994. 7
- 3) 藤川昌作, 香取慶一, 林静雄: 鉄筋コンクリート有孔梁の変形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. 467~468, 1994. 9
- 4) 張愛暉: 鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に関する非線形解析, 千葉大学学位論文, 1990. 2
- 5) Saenz, L.P.: Discussion of 'Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete' by Desayi and Krishnan, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 61, No. 9, pp. 1229-1235, 1964.
- 6) 森田司郎, 角徹三: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第229号, 1975. 3
- 7) 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料—鉄筋コンクリート有孔ばりの強度と靱性, 1987. 9