

論文 複数の開口を有する RC 造有孔梁のせん断性状に関する実験研究

杉浦泰樹*1・東健二*2・香取慶一*3・林静雄*4

要旨：本研究は鉄筋コンクリート造の複数の孔を有する梁の耐震性能に関して、孔数、孔中心間距離、孔の梁せい方向の偏心量及びこれらの因子によって変動するC区間の重なり量が梁のせん断性状に与える影響を明確にすることを目的にせん断実験と二次元非線形有限要素法解析を行ったものである。その結果、偏心させると最大耐力は上昇するが耐力は急激に低下すること、孔中心間距離を3倍以上離してもC区間が重なる場合にはせん断力伝達機構が単数孔とは大きく異なることなどの知見を得た。

キーワード：有孔梁、せん断実験、複数開口、孔の偏心、孔中心間距離、応力分布

1. はじめに

RC造の梁に開孔を設けた場合その断面欠損により孔周囲に応力が集中し破壊が生じやすくなり部材としての強度や変形状が著しく低下することが知られている。そのため、これらを克服すべく多くの研究がなされてきて多くのせん断耐力式が提案されている。しかし、どの提案も的確に開孔の影響を示したものではない。また、梁に複数の孔を設ける場合、孔径の3倍以上離すことが規定されているが十分な研究が行われておらず定量的な根拠に乏しい。さらに、設備配管の水勾配や基礎梁の人通孔など実際には梁に偏心して開孔を設ける場合も多く、孔中心間距離を孔径の3倍以上離しても孔を中心とした45°のせん断ひび割れが入るC区間の重なり量が大きくなる可能性がある(図1参照)。この場合、C区間の重なり量が大きくなれば重なった区間のコンクリートやせん断補強筋の応力分担が増大し、部材の耐力は小さくなると考えられる。そこで、本研究では複数の孔を有する梁の応力の流れをとらえることによってその破壊性状を明らかにすることを目的とする。有孔梁の耐震性能に影響を及ぼす因子として孔位置、孔数、孔の梁せい方向の偏心量及び複数孔の場合には孔の中心間距離が考えられる。本研究ではこの中から孔数、孔中心間距離、孔の梁せい方向の偏心量及びこれらの因子によって変動するC区間の重なり量を主な因子として実験を行った。あわせて、コンクリートのひび割れと鉄筋の付着を考慮した二次元非線形有限要素法解析を行い、有孔梁の応力伝達機構について検討を行った。

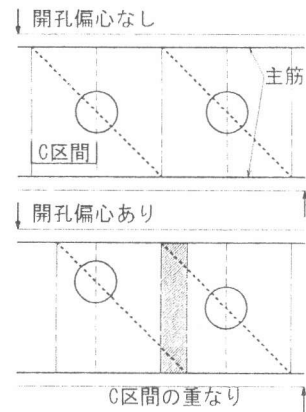


図1 偏心と重なり

2. 実験概要

試験体一覧を表1に、試験体配筋例を図2に示す。試験体の共通要因は断面 $b \times D=250 \times 400$ (mm)、せん断スパン比 $a/d=3.59$ 、主筋比 $p_t=0.86$ (%)、一般部せん断補強筋比 $p_w=0.43$ (%)、コンクリート

*1 佐藤工業株式会社 工修

*2 東京工業大学大学院 工修

*3 東京工業大学工業材料研究所 助手 工修

*4 東京工業大学工業材料研究所 教授 工博

強度 $F_c=26.1(N/mm^2)$ 、孔径=9(cm) ($H/D=1/4.4$)とし、すべての試験体に危険断面から1.0Dのところを開孔を設けている。変動要因は、孔数、孔の梁せい方向の偏心量、孔中心間距離およびC区間の重なり量である。孔数は、1個および2個の2種類を設定した。孔の偏心量は、0.0(cm)と4.0(cm)の2種類とし、危険断面に近いほうの孔のみ偏心

させた。孔中心間距離は孔径の3倍を基準として、孔を偏心させない試験体(偏心量=0.0(cm))ではそれに0.0、5.0(cm)を加えた2種類、孔を偏心させた試験体(偏心量=4.0(cm))ではそれに0.0、2.0、4.0、9.0(cm)を加えた4種類を設定した。C区間の重なり量は、孔の偏心量と孔中心間距離に連動しており、孔を偏心させない試験体(偏心量=0.0(cm))では0.0(cm)と5.0(cm)の2種類、孔を偏心させた試験体

(偏心量=4.0(cm))では0.0、5.0、7.0、9.0(cm)の4種類を設定した。せん断補強筋にはD6を(偏心させた試験体のみC区間のせん断補強筋比を等しくするため図2に示す位置にD10を使用)、主筋にはD19をそれぞれ用いた。補強筋には350(N/mm²)級を用い、主筋にはせん断破壊を先行させるために焼き入れ処理を施し、降伏強度を945(N/mm²)程度まで高め用いた。コンクリートは梁の側面の方向から打設した。偏心させた孔を複数持つ梁は、加力方向によりC区間の重なり量が変化するが、C区間の重なり量が大きい方が耐力が低くなると考え、本実験ではC区間の重なり量が大きくなる方向への一方向単調載荷とした加力は490(KN)オイルジャッキを用い、変位は加力点に取り付けた電気抵抗式変位計により測定した。

表1 試験体一覧

| NO | 試験体名 | 孔数(個) | 偏心量 | 孔中心間距離 | C区間重なり量 |
|----|--------|-------|-----|--------|---------|
| 1 | 0- | 1 | 0 | - | - |
| 2 | 0-0-32 | 2 | | 320 | 0 |
| 3 | 0-5-27 | 2 | | 270 | 50 |
| 4 | 4- | 1 | 40 | - | - |
| 5 | 4-0-36 | 2 | | 360 | 0 |
| 6 | 4-5-31 | | | 310 | 50 |
| 7 | 4-7-29 | | | 290 | 70 |
| 8 | 4-9-27 | | | 270 | 90 |

※単位は(mm)

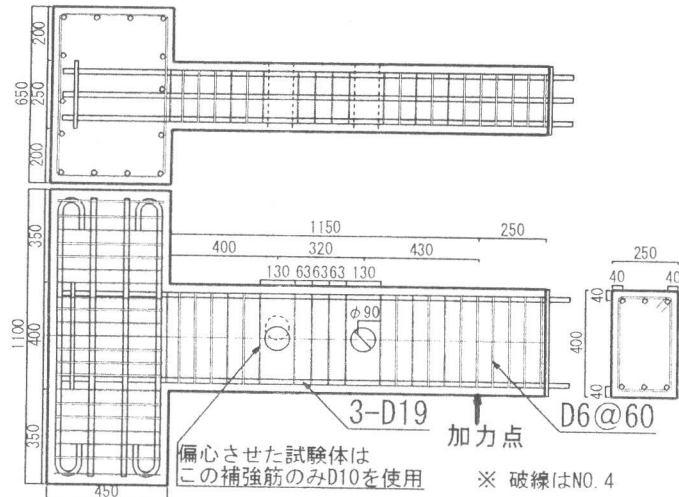


図2 試験体配筋例(No. 2)

3. 実験結果

3. 1 破壊状況

試験体の破壊状況例を図3に示す。いずれの試験体も30(KN)程度で曲げひび割れが生じた。偏心のない試験体では、危険断面に近い方の孔に70(KN)程度の時にせん断ひび割れが入り、複数孔の試験体ではその後すぐに加力点に近い方の孔にもせん断ひび割れが発生した。その後、加力点側の孔のせん断ひび割れが危険断面付近まで進展して、

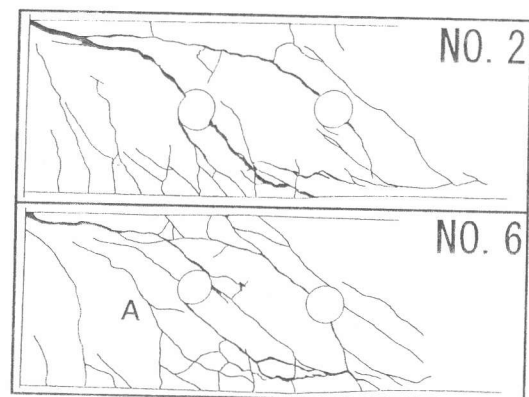


図3 最終破壊状況例

危険断面側のせん断ひび割れ幅が広がり耐力が低下した。いずれの試験体も破壊の進行は緩やかであり、せん断圧縮破壊であった。偏心のある試験体では曲げひび割れ、各せん断ひび割れが入った後、危険断面側の孔の圧縮域のせん断ひび割れの進展が一旦止まり、偏心の無い試験体には入らないひび割れが図中Aに入る。その後、偏心させた全ての試験体は梁端部圧縮域のせん断ひび割れ幅が広がると同時に急激に耐力を失った。

3. 2 荷重-変形関係

荷重-変形関係を図4、5に示す。複数孔の試験体は孔径の3~4倍離しても単数孔の試験体と同等の耐力を有していなかった。偏心の無い試験体は孔中心間距離が狭くても最大耐力はほとんど変わらないのに対して、偏心させた試験体では孔中心間距離が狭くなるほど最大耐力が小さくなる傾向があった。C区間の重なり量が等しくても偏心している試験体の最大耐力は偏心の無い試験体よりも大きい。

3. 3 主筋のひずみ分布

主筋のひずみ分布図を図6に示す。孔の偏心による影響はほとんど見られない。単数孔の試験体は、危険断面側の孔際のひずみが大きくなっており、最大耐力時にはこの孔際①のひずみ勾配は開孔の影響の少ない加力点近傍②の3~5倍になっている。複数孔の試験体は、同位置のひずみ勾配は単数孔のものとは比べ小さい。孔中心間距離が狭い場合、C区間が重なる区間を中心にひずみ勾配が緩やかになる区間が存在し、それに隣接して勾配の急な区間が存在する。また、孔中心間距離が広がるにつれてこの勾配は緩やかになり、C区間が重ならない程度離れると主筋の勾配は一様になる傾向がある。

3. 4 せん断補強筋の応力分布

せん断補強筋の応力分布図を図7、8に示す。D10のせん断補強筋を使用している試験体と使用していない試験体があるため、せん断補強筋のひずみ分布では無く応力分布で比較する。いずれの試験体もせん断ひび割れの発生およびひび割れ幅の拡大により孔付近の応力が増大し、荷重が140(KN)程度の際、孔付近のせん断補強筋が降伏した。孔数による差はほとんど認められなかった。複数孔の試験体では、孔の偏心の有無に関わらず孔中心間距離が狭い試験体は

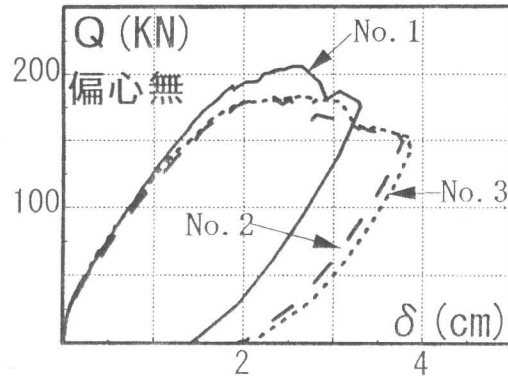


図4 荷重-変形関係(偏心無)

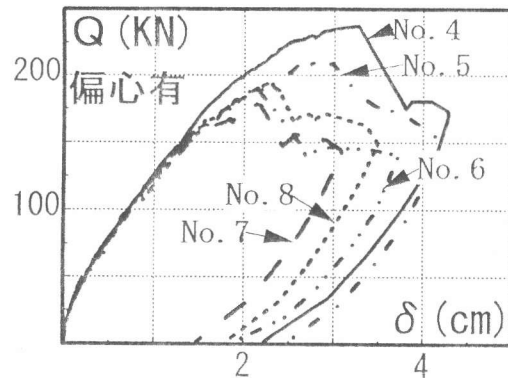


図5 荷重-変形関係(偏心有)

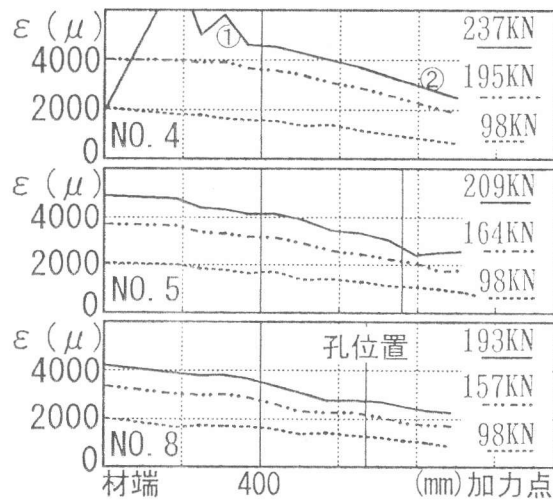


図6 主筋のひずみ分布

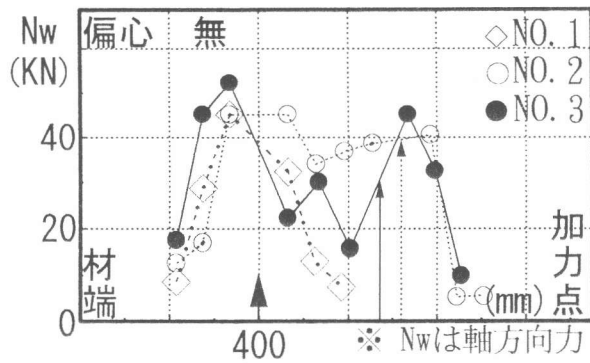


図7 せん断補強筋の応力分布(偏心無)

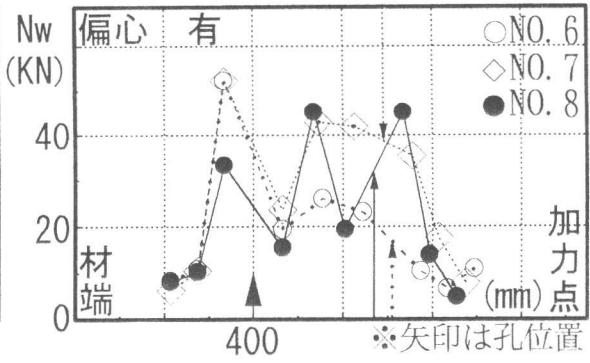


図8 せん断補強筋の応力分布(偏心有)

孔際よりもC区間が重なる箇所のせん断補強筋の応力の方が大きくなる傾向がある。孔中心間距離を広げるにつれてC区間が重なる箇所の応力は小さくなっていき、C区間が重ならない程度離すと孔際のせん断補強筋の応力の方が大きくなり単数孔によく似た性状になった。

3. 5 コンクリートのひずみ

コンクリートのひずみを図9に示す。孔中心間距離が広い試験体は狭い試験体よりもB点及びC点の梁水平軸に対する角度が大きくなっており、孔間にもトラス機構が働き、せん断力を有効に伝えていると考えられる。また、偏心させた試験体は偏心のない試験体と比べ147(KN)時のA点のひずみが大きく、よりコンクリートの負担が大きいのに見える。しかし、最大荷重に近づくと圧縮束が梁の水平軸に対してたってくるようになり、孔をさけるような圧縮束になってくる。これらのことより、コンクリートの圧縮束は孔により分断されるが、本実験のような場合には孔が偏心した方が孔が梁せいの中央にあるよりも材端からの圧縮応力の伝達に有利であると考えられる。また、圧縮応力が有効に伝達されることより最大耐力は大きくなるが、その分梁の圧縮域の応力が大きくなり破壊時の応力解放が大きくなるために耐力は急激に低下すると考えられる。

3. 6 実験結果のまとめ

実験結果により、開孔を偏心させた場合には偏心させない場合と比べて主筋やせん断補強筋の応力状態に差違はほとんど見られないが、最大耐力は大きくなり、破壊の進行は急激であることが明らかになった。これは、孔を偏心させることにより、コンクリート圧縮束の負担及びせん断ひび割れあるいは主筋の付着割裂ひび割れの梁端部圧縮域へ

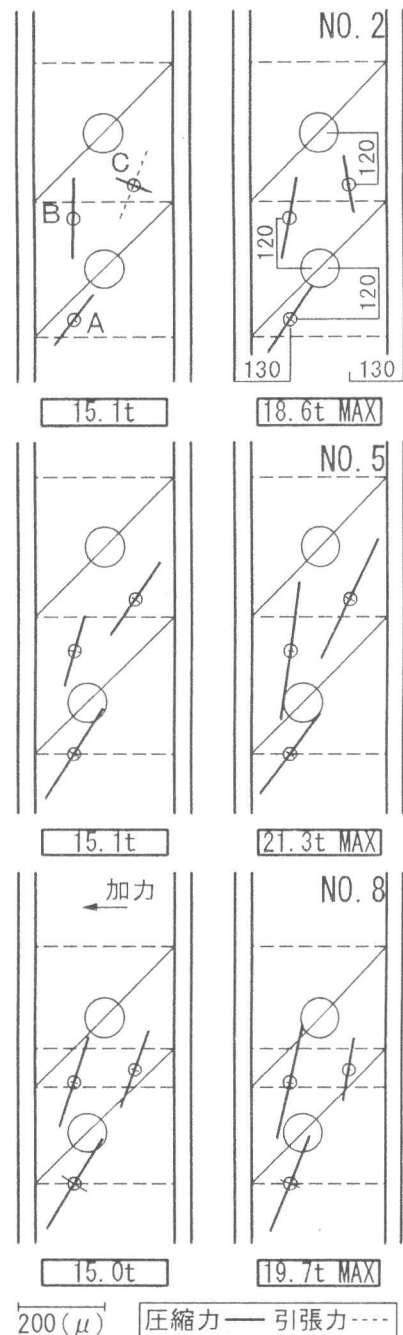


図9 コンクリートのひずみ

の進展が異なり、梁端部圧縮域及び孔周囲のコンクリートの応力分布に差がでたものと考えられる。また、C区間の重なり量の増減により主筋およびせん断補強筋の応力状態に差違が生じ、C区間が重ならないほど孔中心間距離を離せばそれらの挙動は単一孔に類似したものとなった。以上のことを確認するためにNO.1, NO.2, NO.3, NO.4, NO.5, NO.8の6体について解析を行い、両者の力の流れを比較検討した。

4. 有限要素法解析概要

解析モデル一例を図10に示す。コンクリートは四角形および三角形平面要素とし、主筋およびせん断補強筋は線材とする。コンクリートのひび割れは、バネ要素であるクラックリンクを用いて表し、ひび割れ位置は既往の研究を基に定めた。鉄筋とコンクリートの付着はバネ要素であるボンドリンクを用いて表し、外力は強制変位で与えた。尚、クラックリンク及びボンドリンクの力学的性状は参考文献2に示す通りにした。

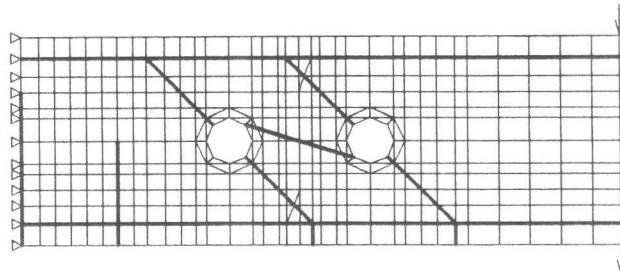


図10 解析モデル例(NO.3)

5. 解析結果

5.1 荷重-変形関係

解析による荷重-変形関係を実験値と比較し図11, 12に示す。解析による各ひび割れの進展状況はいずれの試験体も差は無かった。解析値の剛性はいずれも実験値より大きい。これは、コンクリートを弾性としたのでコンクリートの局所的な圧壊を評価できなかったことと、クラックリンクの設定が少なくひび割れ量が実験に比べて少ないことが挙げられる。同一変位におけるせん断力は、孔に偏心のある試験体の方が偏心の無い試験体よりも大きく、孔を偏心させた方が最大耐力が大きいという実験結果の傾向と一致していた。

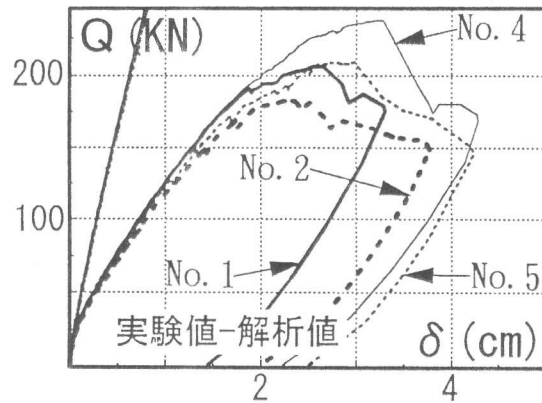


図11 荷重-変形関係(実験値+解析値)

5.2 補強筋の応力

解析によるせん断補強筋の応力(Q=147(KN)時)図を図13, 14に示す。材端より危険断面側の孔までの挙動はほとんど差は見られなかった。孔間の挙動は実験と同様に孔中心間距離が狭い場合、C区間が重なる箇所の応力が大きくなり山形の応力分布になるのに対し、孔中心間距離をC区間が重ならない程度広くした試験体はM形の応力分布となり単数孔と同様な挙動を示した。

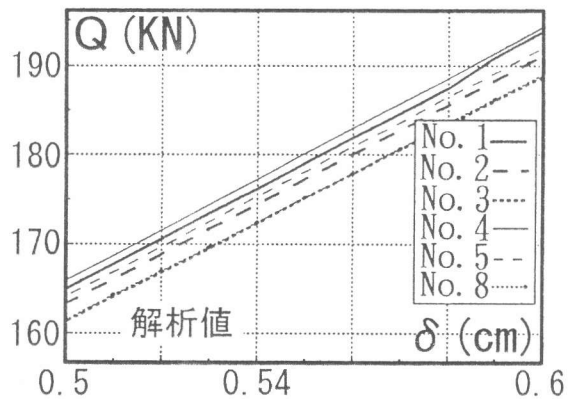


図12 荷重-変形関係(解析値拡大)

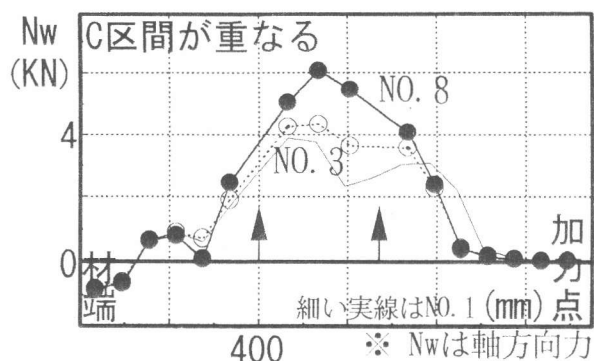


図13 せん断補強筋の応力分布(重なり有)

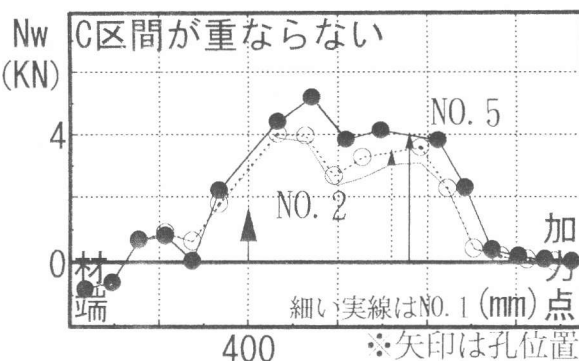


図14 せん断補強筋の応力分布(重なり無)

5. 3 コンクリートの応力

解析において、孔部のせん断ひび割れが発生し、かつ孔間にひび割れが発生する前の荷重98(KN)におけるコンクリートの各地点(3.5図9参照)付近の圧縮主応力と梁の水平軸に対する角度一覧の表を表2に示す。材端圧縮域であるA

表2 コンクリートの圧縮応力と角度(Q=98(KN)時)

| | A点 | | B点 | | C点 | |
|-------|------|------|------|------|-------|------|
| | 圧縮応力 | 角度 | 圧縮応力 | 角度 | 圧縮応力 | 角度 |
| NO. 1 | 4.00 | 31.8 | 3.26 | 19.7 | 0.56 | 78.1 |
| NO. 2 | 3.86 | 30.9 | 3.34 | 23.0 | 0.53 | 41.9 |
| NO. 3 | 3.84 | 31.6 | 3.14 | 22.9 | -0.71 | 9.3 |
| NO. 4 | 4.66 | 35.6 | 3.50 | 20.6 | 0.76 | 75.4 |
| NO. 5 | 4.44 | 34.8 | 3.54 | 23.8 | 0.47 | 41.3 |
| NO. 8 | 4.44 | 35.0 | 3.43 | 24.4 | -0.60 | 12.5 |

※応力単位(N)

点の応力は孔を偏心させたモデルの方が孔に偏心のないモデルよりもそれぞれ1.15倍ほど大きくなっており、実験結果を良く捕らえていた。また、孔を偏心させると、試験体梁せい軸に対する圧縮束の角度が1.12倍程度大きくなることより梁せいが広がる方に多く力が流れ、耐力が上昇したと考えられる。また、B点とC点における圧縮応力ではNO.1とNO.2、NO.4とNO.5が同等なものに対しNO.3、NO.8はそれぞれB点では小さくなり、C点に至っては圧縮応力が無くなることより、孔中心間距離が基準を満たしてても、C区間が重ならない程度離さないで単数孔と似たようなコンクリートの応力伝達機構にはならないと考えられる。

6. まとめ

本実験及び解析より以下の事柄が明らかになった。

- ・複数の孔を有する試験体は孔径の3~4倍離しても単数孔の耐力よりも小さい。
- ・梁端部側の孔を偏心させると梁せいが広がった方に力が多く流れるようになるために孔の偏心の無い試験体よりも梁端部圧縮域への圧縮応力の伝達に有利になり耐力は高くなるが、最大耐力以後剛性は急激に低下する。
- ・現行設計基準の通りに孔中心間距離を設けてもC区間が重なる場合は、耐力低下するだけでなく、主筋、せん断補強筋およびコンクリートの応力伝達も単数孔とは異なった性状になった。
- ・ひび割れを考慮した有限要素法解析によって、コンクリートを弾性とした簡単なモデルでも複数の孔を持つ梁の応力状態を把握することが可能である。

【謝辞】本研究の試験体制作に際し高周波熱錬(株)には多大な御協力を頂きました。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基準・同解説
- 2) 林静雄、森本敏幸、黒正清治:柱はり接合部内に通し配筋されたはり主筋の付着性状に関する実験と解析、日本建築学会構造系論文報告集、357号、pp101~111、1985.1