

# 論文 FEM 解析を用いた有開口 RC 梁の構造性能に関する研究

渋市 克彦\*1・杉本 訓祥\*2・増田 安彦\*2

**要旨:** 新設貫通孔を有する梁や、それに補強を施した梁の構造性能に関する研究は未だ充分とは言えない。そこで本報ではまず、FEM 解析によってこれらの梁の解析手法を確立すべく、過去に行った実験を対象に追跡解析を行い、実験結果と照合することによって解析手法の妥当性を確認した。次に同手法を用い、貫通孔位置をパラメータとして解析を行い、貫通孔の条件による構造性能への影響を検討した。現在、鉄筋コンクリート構造計算規準において示されている有孔梁のせん断終局強度を求める式では、貫通孔位置は考慮していないが、本報で行った解析では、貫通孔位置による耐力の差が生じる結果となった。

**キーワード:** 有限要素法, CFRP, 開口補強, 耐震補強

## 1. はじめに

既存建築物のリニューアル工事において、設備配管を新設するために、鉄筋コンクリート梁（以後、RC 梁）に新たな貫通孔を設けることがある。しかし既存梁に貫通孔を新設すれば、梁の構造性能は低下すると考えられ、補強が必要となる。そのような要求から、これまでも様々な補強工法が提案されている<sup>1)</sup>。本報では、これらのうち特に施工手順が簡便な炭素繊維強化プラスチック（以後、CFRP と称す）を用いた補強工法に関する実験的研究を対象として、解析的な検討を行った。

本報で対象とする CFRP による有開口 RC 梁の補強効果の確認実験（以後、単に「既往実験」と称す）では、新設貫通孔の影響や補強効果の確認が、限定的な条件の実験で行われている。一方、新設貫通孔の影響は、既存部材の特性や貫通孔の条件（位置、大きさ等）により異なると考えられるが、このような部材の構造性能に関する研究は充分とは言えず、解析的検討をされた事例も多くはない。このような背景から、まず非線形 FEM 解析を用いて既往実験を追跡し、実験結果と解析結果を比較することによって、解析手法の妥当性を検証した。さらに妥当性が確認された解析手法と同様の手法でパラメトリック解析を行い、貫通孔の条件による構造性能への影響を検討した。本報では、有開口 RC 梁を対象としたこれらの非線形 FEM 解析について述べる。

## 2. 既往実験概要

本章では、既往実験の概要について述べる。詳細については文献<sup>1)</sup>を参照されたい。また実験結果（各試験体の荷重変形関係や破壊性状等）については、次章にて解析結果と合わせて述べる。

表-1 解析対象とした試験体一覧

| 試験体名     | M/QD | 貫通孔           | 補強 |
|----------|------|---------------|----|
| B15-RC   | 1.5  | 無し            | 無し |
| B15-O    |      | 有り<br>(H=D/3) | 有り |
| B15-CFRP |      |               |    |
| B20-RC   | 2.0  | 無し            | 無し |
| B20-O    |      | 有り<br>(H=D/3) | 有り |
| B20-CFRP |      |               |    |

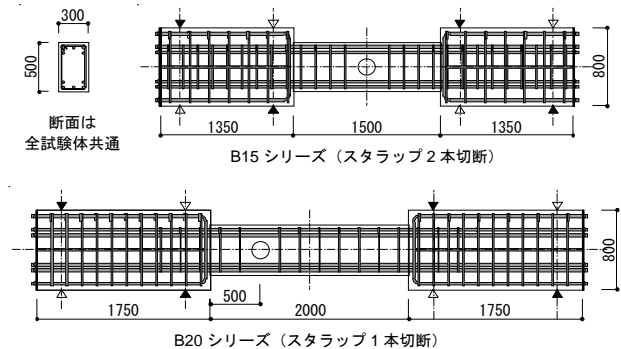


図-1 試験体概略

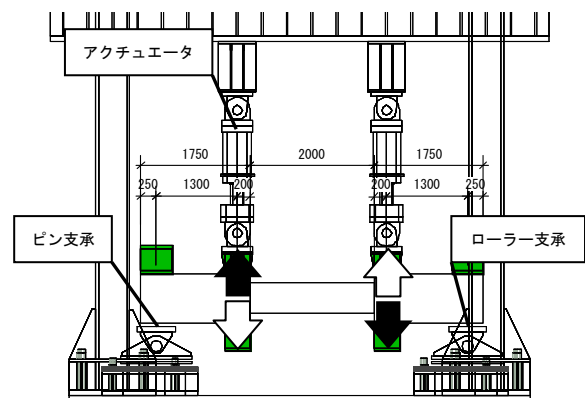


図-2 荷重装置

\*1 (株)大林組 技術研究所 修士(工学) (正会員)

\*2 (株)大林組 技術研究所 博士(工学) (正会員)

## 2.1 試験体

既往実験の試験体の中から、本報では6体のみを取り上げる。6体は表-1に示すように、せん断スパン比(1.5と2.0)と、貫通孔や補強の有無をパラメータとしている(以後、せん断スパン比が1.5の3体をB15シリーズ、2.0の3体をB20シリーズと称す)。また代表的な試験体の概略を図-1に、載荷装置の概略を図-2に示す。

## 2.2 補強方法概要

本報で対象とするCFRPによる補強方法を、写真-1及び図-3に示す。その補強は、貫通孔新設に伴って減少したせん断耐力を、貫通孔周辺に配したCFRP板によって補うことを基本方針とするものである。使用するCFRP板は予めL型に加工されており(以後、L型CFRP板と称す)、これを梁の両側面から底面でラップするようにコンクリート面に接着するとともに、上端部は梁側面で鉄板を接着、ボルト締めすることによってL型CFRP板を定着する。

L型CFRP板は、梁にかかるせん断力を負担する。終局時には、接着が切れてL型CFRP板が定着鉄板から抜け出す、あるいはL型CFRP板が破断するなどといった破壊も想定されるが、既往の実験ではそのような破壊が起こらなかったため、後述の解析でもこの破壊を考慮しないこととした。

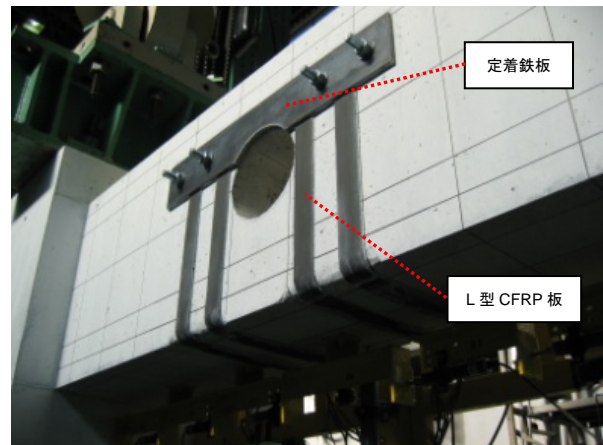


写真-1 CFRPによる補強方法

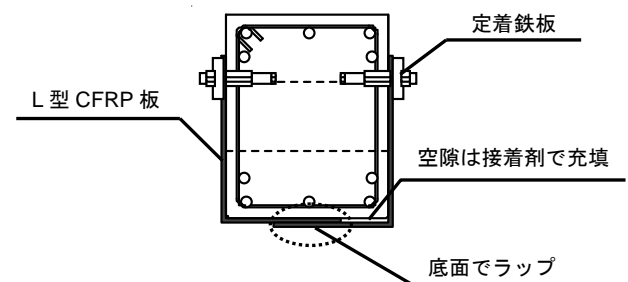


図-3 補強方法概要図

## 3. 既往実験を対象とした解析

### 3.1 解析概要

前述の既往実験における6体の試験体について、FEM解析を実施した。代表的な解析モデルを図-4に示す。各試験体とも、スタブを含めた試験体全体を二次元でモデル化し、コンクリートを四辺形要素、主筋及びせん断補強筋を線材要素とした。四辺形要素には、コンクリートの材料特性として、後述のひび割れ後のせん断伝達特性を与える際に必要な、鉄筋比の情報を与えている。なお、貫通孔の新設によってB15シリーズでは2本、B20シリーズでは1本のせん断補強筋を切断しているため、図-4に示すように孔周辺の四辺形要素に含まれる鉄筋比(せん断補強筋比 $P_w$ )を変化させた。

コンクリートの応力度-歪関係は修正 Ahmad 式<sup>2)</sup>によりモデル化し、平面応力下の圧縮破壊条件は Kupfer-Gerstle の提案<sup>3)</sup>に従った。コンクリートの材料特性として、ひび割れ後の圧縮低減を長沼の提案式<sup>4)</sup>によって考慮し、同文献<sup>4)</sup>の提案モデルによってせん断伝達特性を与えた。また圧縮強度到達後の歪軟化域については Nakamura らのモデル<sup>5)</sup>を用い、テンションスティフニング特性は、出雲らのモデル<sup>6)</sup>によって与えた。

主筋の線材要素とコンクリートの四辺形要素の間には、物理的な大きさを持たない接合要素を配置し、付着応力

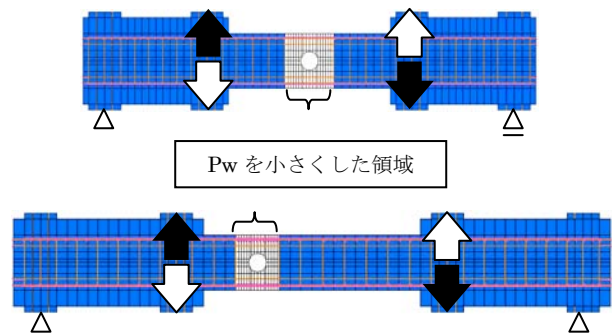


図-4 代表的な解析モデル

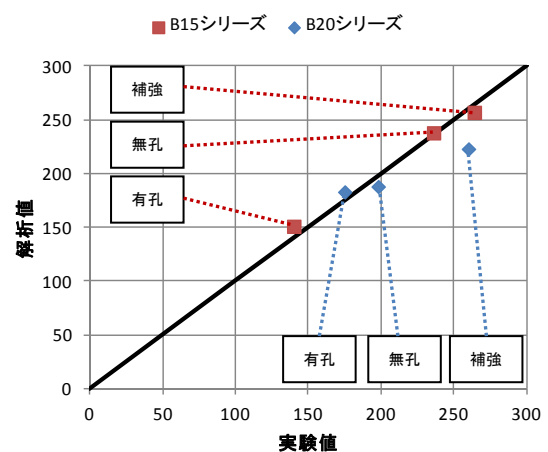


図-5 最大耐力の比較

度一すべり関係を Naganuma らのモデル<sup>7)</sup>によって与えることで、主筋とコンクリート間の付着劣化によるすべりをモデル化した。せん断補強筋はすべりを考慮せず、完全付着とした。また、コンクリート表面と接着剤を介して一体化された CFRP 板や鉄板との間は、本報では簡略的に剛接合とした。

また既往実験と同様に、部材角  $R=1/1000, 1/500, 1/250, 1/150, 1/100$  (rad) を正負 1 回ずつ繰り返す、静的正負交番漸増载荷とした。

### 3.2 解析結果

#### (1) 最大耐力

各試験体の最大耐力を、実験結果と解析結果を比較して図-5 に示す。

既往実験では、無孔試験体に貫通孔を新設すると耐力が低下し、有孔試験体に補強を施すと無孔試験体を上回っても上記の耐力の低下と回復は確認できる。またそれぞれ

る耐力に回復する、という結果となった。本解析におけるモデルの最大耐力についても、実験結果と解析結果は概ね良好に対応している。

#### (2) 荷重変形関係

各試験体のせん断力-部材角関係を、実験結果と解析結果を比較して図-6 に示す。なお図-6 における  $K_e$  は初期剛性、 $Q_{su}$  は荒川 min 式によって求めたせん断強度、 $Q_{suo}$  は鉄筋コンクリート構造計算規準<sup>8)</sup> (以後、RC 規準) に従って求めた有孔梁のせん断終局強度であり、 $Q_{suo\_st}$  は文献<sup>9)</sup>の提案式によって求めた、CFRP 補強を施した有孔梁のせん断終局強度である。

B15 シリーズではいずれのモデルも、実験結果と解析結果は良好に対応している。 $R=1/100$  まで変形が進むと、B15-RC や B15-CFRP ではやや精度が低下するが、いずれも最大耐力に達するまでは整合している。

B20 シリーズにおいても、概ね実験結果と解析結果は

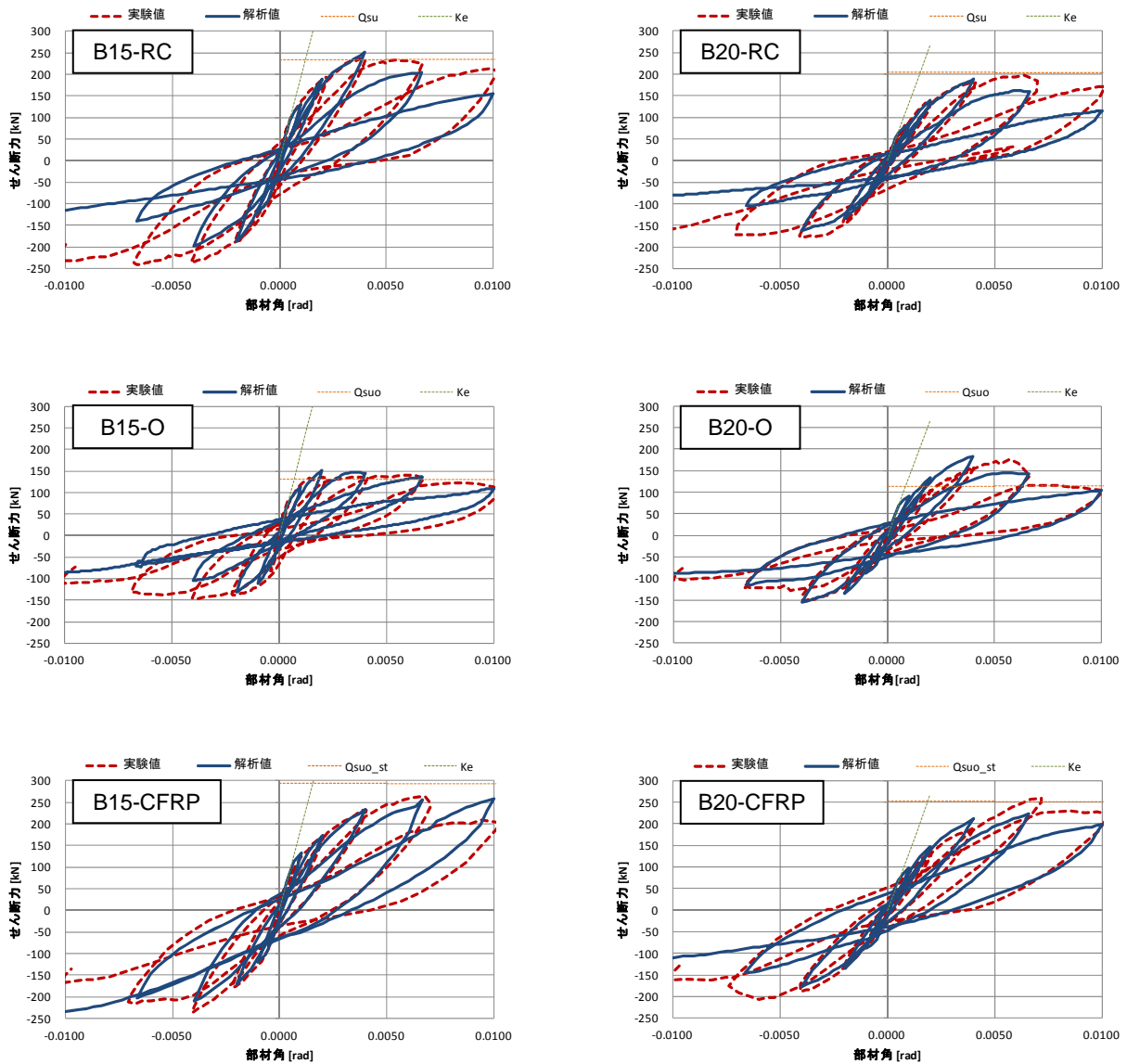


図-6 荷重変形関係の比較

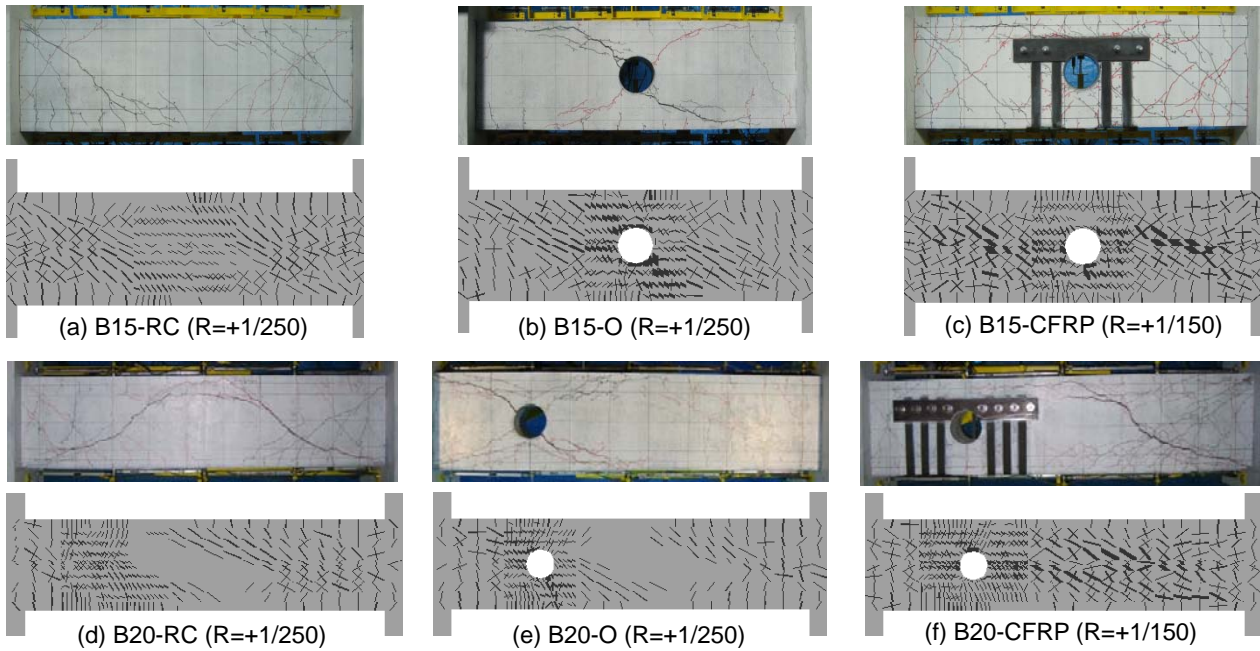


図-7 最大耐力時のひび割れ状況（上：実験結果／下：解析結果）

良好に対応している。ただし、B20-RC と B20-O では、最大耐力に達する部材角が実験と解析で異なっており、実験では  $R=1/150$  で最大耐力に達しているが、解析では  $R=1/250$  で最大耐力に達し、その後耐力は低下する結果となっている。

### (3) ひび割れ状況

最大耐力時のひび割れ状況を図-7 に示す。なお、B20-RC 及び B20-O は、実験と解析で最大耐力を發揮した変形角が異なっているが、図では解析において最大耐力を發揮した  $R=1/250$  の状況を示している。いずれの試験体も、せん断ひび割れが卓越した。ひび割れ発生領域について、実験結果と解析結果の対応状況と共にその特徴を述べる。

B15 シリーズでは実験結果・解析結果ともに、無孔試験体の B15-RC は両端部のせん断ひび割れが顕著であるのに対し、有孔試験体の B15-O は貫通孔周辺にせん断ひび割れが集中している。一方補強を施した B15-CFRP は、両端部と貫通孔周辺いずれにもひび割れが発生しており、補強によって貫通孔周辺へのひび割れの集中を免れていると考えられる。

B20 シリーズでは、無孔試験体の B20-RC は両端部のせん断ひび割れが卓越している。実験では梁中央の付着割裂ひび割れも目立っているが、解析では確認できていない。有孔試験体 B20-O では、貫通孔側の端部にせん断ひび割れが集中し、反対側の端部のひび割れは B20-RC と比べて少なくなった。一方これに補強を施した B20-CFRP では、貫通孔を有する側の端部のひび割れは補強によって抑制され、代わりに反対側の端部のせん断ひび割れが卓越するという結果になったと考えられる。

上記のようなひび割れ発生領域の変化は、B15・B20 シリーズともに、実験と解析のどちらの結果からも確認することができ、実験結果と解析結果は良好に対応していると考えられる。

## 4. パラメトリック解析

前章までに、既往実験結果と解析結果が概ね良好に対応したことから、貫通孔を新設した梁や、それに補強を施した梁などの挙動も、FEM 解析によって比較的精度よく検証できるということがわかった。本章ではこれらの結果を踏まえ、貫通孔位置を変動因子としたパラメトリックスタディを行い、貫通孔の位置が梁部材の構造性能に与える影響を検討する。

### 4.1 検討方法

RC 規準において、有孔梁のせん断終局強度  $Q_{suo}$  は、式(1)で与えられている。

$$Q_{suo} = \left\{ \frac{0.092 \text{ ku kp} (F_c + 18)}{M/Q_d + 0.12} \left( 1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{P_s \text{ soy}} \right\} b_j \quad (1)$$

ここに、

$Q_{suo}$  : 有孔梁のせん断終局強度

$ku$  : 有孔せい  $d$  による係数

$kp$  : 引張鉄筋比  $P_t$  による係数

$F_c$  : コンクリートの設計基準強度  $[N/mm^2]$

$M/Q_d$  : せん断スパン比

$H$  : 円孔の直径  $[mm]$

$D$  : 梁せい  $[mm]$



Ps : 孔周囲の補強筋比

sδy : 孔周囲補強筋の降伏強度[N/mm<sup>2</sup>]

b : 梁幅[mm]

j : 応力中心間距離[mm]

式(1)は、荒川 min 式をベースに、貫通孔の大きさや孔周囲の補強筋による影響を考慮した式であるが、孔位置の影響については考慮されていない。しかし実際には、孔位置によって耐力は増減するものと思われる。例えば、変形時にひび割れが中央に集中する無孔梁に対して、有孔梁の場合、貫通孔位置によりひび割れ発生状況が異なり、耐力・変形性能も変化することが予測される。

そこで既往試験体 (B15-O, B20-O) を基準として、孔位置を変数とした 4 体の解析ケースを考え、合計 6 ケー

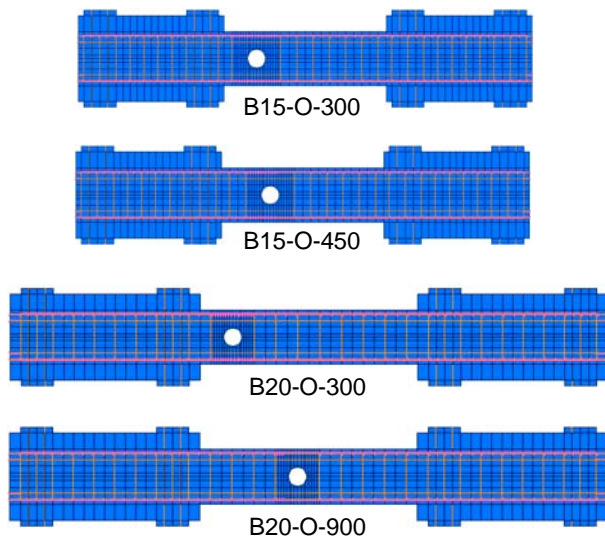


図-8 解析モデル

表-2 解析ケース一覧

| モデル名      | 端部から孔芯までの距離 |
|-----------|-------------|
| B15-O-300 | 300mm       |
| B15-O-450 | 450mm       |
| B15-O     | 750mm       |
| B20-O-300 | 300mm       |
| B20-O     | 500mm       |
| B20-O-900 | 900mm       |

←基準モデル

←基準モデル

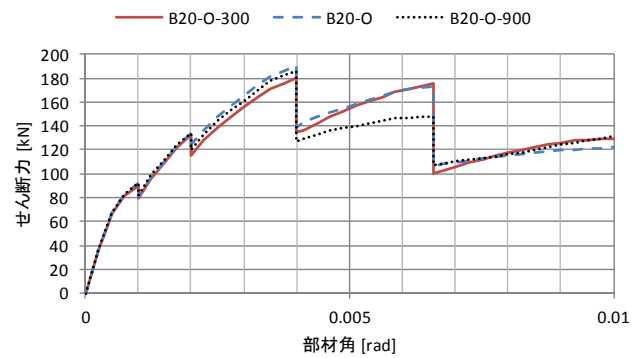
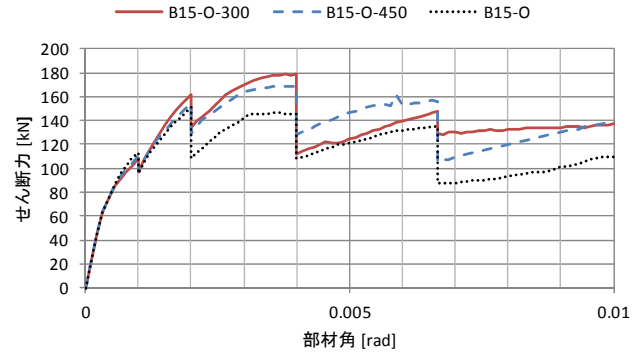


図-9 解析結果 (包絡線)

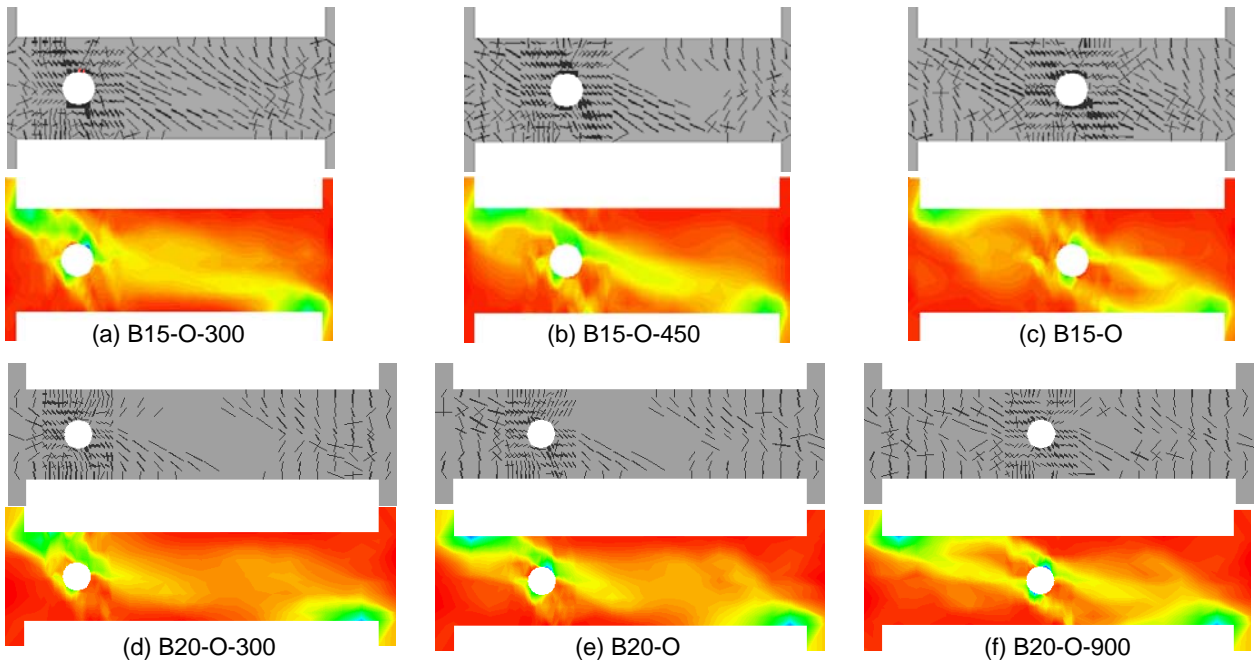


図-10 解析結果 (上: ひび割れ図/下: コンター図)

スの解析により、孔位置の影響を検討した。解析ケース一覧を表-2に、解析モデルを図-8に示す。貫通孔位置以外のパラメータは、切断されるスタラップの本数や、貫通孔周辺の $P_w$ 等も含め、全て既往試験体(B15-O, B20-O)の解析モデルと同一としている。

## 4.2 解析結果

解析によって得られた荷重変形関係の包絡線を図-9に示す。

B15シリーズでは、貫通孔位置が最も端部寄りであるB15-O-300の耐力が最も高く、梁中央に貫通孔を設けたB15-O-750の耐力が最も低くなった。一方B20シリーズでは、B15シリーズほど貫通孔位置の違いによる最大耐力差はあらわれなかった。

また、各解析モデルの最大耐力時のひび割れ図及び最小主応力のコンター図を図-10に示す。

B15シリーズにおいて、最大耐力が最も高い結果となったB15-O-300では、貫通孔周辺へのひび割れの集中が特に顕著であったが、梁中央部のひび割れは少なかった。B15-O-450も、概ね同様の傾向が見られる。一方最大耐力が最も低い結果となったB15-Oでは、梁の全域にわたってひび割れが発生している。またコンター図より、B15-O-300及びB15-O-450では、貫通孔を避けてアーチ機構が形成されているが、B15-Oでは梁中央の貫通孔によって、アーチ機構が十分に形成されていないことがわかる。このことが、B15シリーズにおいて最大耐力に差が生じた原因であると考えられる。

B20シリーズでも貫通孔位置の変化に伴い、ひび割れ発生領域が変化している。しかしB15シリーズと比較すると、全体として貫通孔周辺へのひび割れの集中が少なかった。コンター図からも、どの貫通孔位置においてもアーチ機構が形成されていることが確認できる。

上記結果より、せん断スパンが極端に短い梁の中央に貫通孔を新設すると、アーチ機構の形成に影響を及ぼし、耐力が低下するものと考えられる。

## 5. まとめ

新設貫通孔を有するRC梁の構造特性についての知見を深めることを目的として、既往実験を対象としてFEM解析を行い、解析手法の妥当性を確認した。

次に妥当性を確認した解析手法を用い、貫通孔の位置をパラメータとした解析を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

・せん断スパン比が1.5であるB15シリーズでは、貫通孔位置が梁中央であるB15-Oの最大耐力が最も低い結果

となった。

・せん断スパン比が2.0であるB20シリーズでは、貫通孔位置の違いによる耐力の差は、B15シリーズと比較して小さい結果となった。

・最大耐力時のひび割れ発生状況や応力状態から、B15-Oではアーチ機構が十分に形成されず、B20シリーズではいずれのモデルもアーチ機構が形成されていることが確認できた。これらのことより、せん断スパンが極端に短い梁の中央に貫通孔を新設すると、アーチ機構の形成に影響を及ぼすと推察された。

## 参考文献

- 1) 白井和貴, 他: 既存鉄筋コンクリート梁の新設貫通孔補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, 2005
- 2) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp.163-170, 1995.8
- 3) Kupfer, H.B. and Gerstle, K.H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.99, No.EM4, pp.853-866, Aug., 1973.
- 4) 長沼一洋: 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第421号, pp.39-48, 1991.3
- 5) H. Nakamura, T. Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10
- 6) 出雲淳一, 他: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 7) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H.: Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.586, August., 2004.
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 1999, pp.271-272, 1999
- 9) 白井和貴, 他: 既存鉄筋コンクリート梁の新設貫通孔に対する補強効果に関する研究, 大林組技術研究所報 No.68, p15, 2004