

閉鎖型金物で補強した鉄筋コンクリート有孔梁の有限要素解析によるせん断抵抗機構の検討

正会員 ○落合 等*
同 北山 和宏**せん断抵抗機構 鉄筋コンクリート 有孔梁
有限要素解析 終局強度 閉鎖型金物

1. はじめに 現在、鉄筋コンクリート有孔梁の開孔補強方法として、現場作業の省力化などのため種々の補強金物が提案されているが、金物の補強効果を適切に評価する力学モデル及び理論式は未だない。本研究では、閉鎖型金物を有する有孔梁を対象として有限要素解析を行うことで、そのせん断抵抗機構を検討する。

2. 解析方法 本研究では、大林組が開発した非線形有限要素汎用解析ソフトウェア FINAL¹⁾を用いた。解析は2次元で実施し、変位制御の一方向単調載荷とした。有限要素モデルの要素分割及び境界条件を図1に示す。試験区間が逆対称曲げを受けるよう載荷を行った。

コンクリートに4節点アイソパラメトリック要素、鉄筋にトラス要素を用いた。主筋はコンクリートの要素分割に合わせ、コンクリートとの間に接合要素を挿入し附着すべり特性を表現した。肋筋の両端は主筋の節点と共有させた。金物の折曲げ部はコンクリートと共有させて完全定着とした。また、分布ひび割れモデルを用いた。

コンクリートの応力ひずみ関係は、圧縮側は長沼による修正 Afmad 式²⁾を用いた。圧縮破壊条件は Kupfer-Gerstle の提案³⁾に従った。コアコンクリートは正田らの研究⁴⁾による肋筋の拘束効果を考慮したが、孔周囲は肋筋間隔が広くその拘束効果が低いと考え、かぶりコンクリートと同じ扱いとした。ひび割れ後の圧縮強度低減は長沼の提案式⁵⁾によって考慮し、Al-mahaidi の提案モデル⁶⁾によってせん断伝達特性を与えた。引張側は引張強度まで線形(勾配は圧縮側の初期弾性係数)とし、ひび割れ発生後の軟化特性は出雲らのモデル⁷⁾(係数 C=1.0)によって与えた。鉄筋の応力ひずみ関係は、バイリニア型モデルを用い、降伏後の2次剛性はヤング係数の1/100とした。附着応力すべり関係は、Naganuma らのモデル⁸⁾によって与えた。最大附着強度は靱性指針⁹⁾によって算定し、最大附着強度時滑りは1mmを仮定した。

2. 解析対象 篠原ら¹⁰⁾の試験体 No.4 を対象とした。梁幅 $b=320\text{mm}$ 、梁せい $D=450\text{mm}$ 、試験体スパン $2a=1350\text{mm}$ 、開孔径 $H=150\text{mm}$ 、せん断スパン比 $a/D=1.5$ 、開孔径比 $H/D=1/3$ である。コンクリート強度 σ_B は、 30.3N/mm^2 であり、引張鉄筋比 $p_t=0.95\%$ 、主筋降伏強度 $\sigma_y=732\text{N/mm}^2$ である。肋筋比 $p_w=0.48\%$ 、肋筋降伏強度 $\sigma_{wy}=366\text{N/mm}^2$ である。閉鎖型金物は一辺が 230mm の正方形で、金物径 13mm 、降

伏強度 892N/mm^2 、材軸となす角度 45° であり、2組(両金物の距離は主筋間距離と等しい)配された。

3. 解析結果 試験体 No.4 のせん断応力度変形角関係を図2に示す。せん断応力度は、せん断力を有効断面積で除した値である。ここで有効断面積とは、梁幅と、梁せいから開孔径を引いたものの積である。変形角は、解析においては変位増分を与えた二点の垂直変位の絶対値の和をその二点間の距離で除して求めた。実線が解析値、点線が実験値¹⁰⁾を示す。最大荷重の解析値は 329kN 、実験値は 327kN と良く一致した。図3に最大強度時のひび割れ図を示す。解析における孔周囲と材端部の載荷点近傍の濃い灰色のコンクリート要素は、圧縮ひずみ軟化領域に入っていることを示す。実験・解析ともに孔周囲の圧縮ひずみ軟化領域のコンクリート要素から伸びる孔接線方向のせん断ひび割れが卓越しせん断破壊した。

篠原らの実験¹⁰⁾の別の試験体について同様に解析を行ったところ、試験体 No.4 と比較して、肋筋降伏強度 $\sigma_{wy}=989\text{N/mm}^2$ 、金物径 8mm が異なる試験体 No.6 及びコンクリート強度 $\sigma_B=45.1\text{N/mm}^2$ 、肋筋降伏強度 $\sigma_{wy}=989\text{N/mm}^2$ 、金物径 10mm が異なる試験体 No.8 の解析値に対する実験値の比は、それぞれ 1.03, 0.98 であり、破壊性状も解析は実験を良好に再現し、孔部せん断破壊した。

4. 金物の有無による比較 金物のせん断抵抗機構を検討するために、試験体 No.4 と試験体 No.4 から金物のみ除いた仮想試験体を比較する。図4に最大強度時の(a)上端主筋附着応力度、(b)最小主応力、(c)鉄筋応力度を示す。金物がある場合、無い場合と比較して、孔上下のコンクリートストラットの傾きが緩やかになり、孔上下金物折曲げ部から梁端圧縮域に伸びるストラットが顕著になり、肋筋の負担する引張力が梁全域

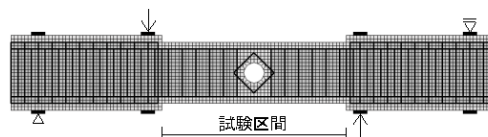
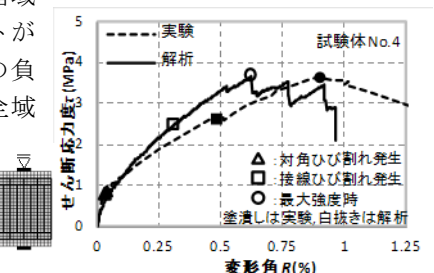
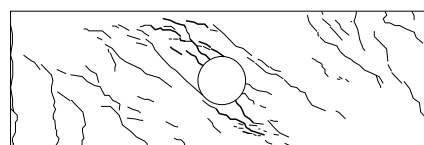
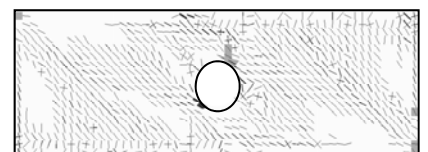


図1 解析モデルと境界条件

図2 荷重変形関係¹⁰⁾図3 最大強度時のひび割れ図(左図: 実験¹⁰⁾, 右図: 解析)

に渡って一様に生じ、孔上部主筋の付着応力度が大きくなった。

5. 提案トラスモデル 以上のことを考慮し、閉鎖型金物を有する有孔梁のトラスモデルを**図 5**に示す。孔周囲のストラットを孔中心からの距離で便宜的に 2 色に塗り分けた。赤色で示す外側ストラットは孔上下の金物折曲げ部で折れ曲がり、緑色で示す内側ストラットは孔左右と孔上下の金物折曲げ部で折れ曲がる。金物は圧縮ストラットが折れ曲がるための反力として働く。**図 6**に金物折曲げ点での力の釣り合いを示す。孔上部の折曲げ点 (**図 5** 中①) では、コンクリートストラットの折れ曲がりの合力として青で示す反力が働く。赤で示す金物引張力 T の鉛直成分がこの反力と釣り合い、水平方向の緑で示す力が必要になるが、この力は孔上部の主筋の付着力が負担する。これは、**図 4(a)**で示した、金物を有することで孔上部主筋の付着応力度が大きくなったことに一致する。孔左部の折曲げ点 (**図 5** 中②) では、金物引張力 T と釣り合うようなコンクリートストラットが形成されると考える。

上述のトラスモデルからせん断終局強度評価式を導く。

$$V_u = b_e \cdot j_{ew} \cdot p_{ws} \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi_s$$

$$j_{ew} = H - H' \quad (\text{図 6 参照})$$

$$\cot \phi_s = \sqrt{\lambda v \sigma_B / (p_{ws} \sigma_{wy})} - 1$$

$$\lambda = 1 - b_s / (4H')$$

記号は、 b_e : 有効幅、 H' : 金物径、 p_{ws} : 孔際筋筋比 (**図 6** 参照、金物は含まない)、 σ_{wy} : 筋筋降伏強度、 ϕ_s : 孔上下の圧縮ストラットの傾き、 λ : **図 6** A-A 断面のトラス機構の有効係数、 b_s : 金物の梁断面方向の最大間隔を表す。ただし、筋筋補強限界 $p_{ws} \sigma_{wy} = 0.5 \lambda v \sigma_B$ である。

既往実験¹⁰⁾⁻²¹⁾を用いて提案式の検証を行う。対象とした有孔梁は、単独の円形孔をスパン中央かつ材軸中央に有する。また、開孔補強方法が、孔際筋筋、定着の十分とれた斜め筋、閉鎖型金物による。金物は角度が明確なものに限った。収集した 86 体の提案式及び広沢式²²⁾計算値と実験値の比の平均値・変動係数は、それぞれ $1.46 \cdot 21.1\%$ 、 $1.17 \cdot 14.2\%$ だった。**図 7**に提案式計算値と筋筋補強量との関係を示す。筋筋補強量によらず全般的に提案式計算値が実験値を過小評価している。両式を比較すると、変動係数は大きく変わらないが、平均値は提案式の方が大きい。これは、提案式において金物をコンクリートストラットの折れ曲がりのみに寄与すると捉え、広沢式と異なり補強筋比に算入していないためと考えられる。

6. まとめ せん断破壊する閉鎖型金物で補強された有孔梁について有限要素解析を実施することにより、孔周囲の応力状態を確認し、閉鎖型金物で補強された場合のトラスモデルの一案を提示した。

参考文献 (日本建築学会学術講演梗概集: 大会、コンクリート工学年次報告論文集: 年次)

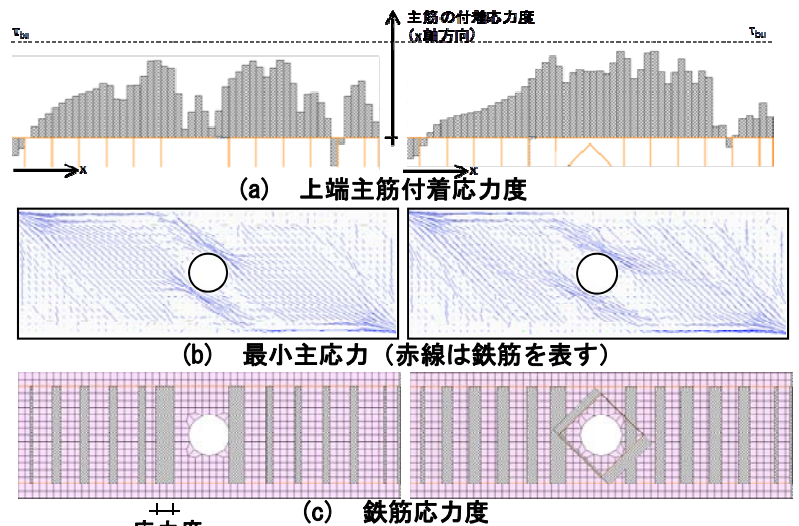


図 4 最大強度時の応力状態
(左図: 金物無し, 右図: 金物有り=No. 4)

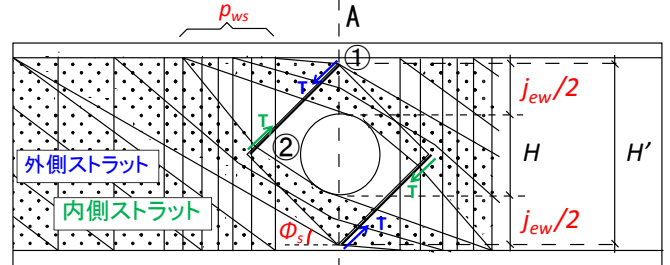


図 5 閉鎖型金物を有する有孔梁のトラスモデル

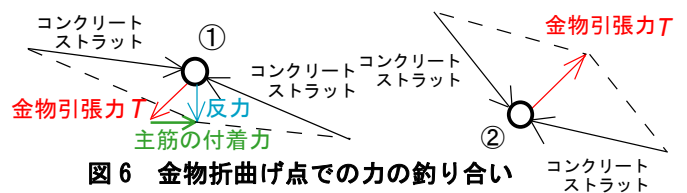


図 6 金物折曲げ点での力の釣り合い

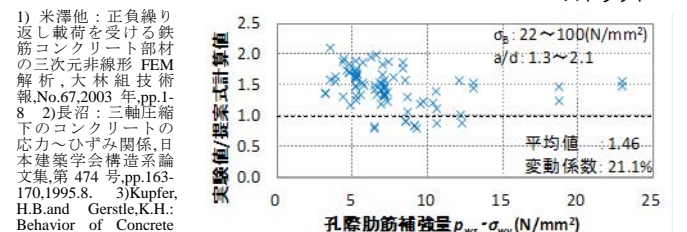


図 7 提案式と筋筋補強量との関係

- 1) 米澤他: 正負繰返し載荷を受ける鉄筋コンクリート部材の三次元非線形 FEM 解析, 大林組技術報, No.67, 2003 年, pp.1-8
- 2) 長沼: 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) 正田他: コンファインドコンクリートの強度・変形特性と曲げ靱性のためコンファインド補強について(その 1, 2), 大会, pp.929-931, 1989.10.
- 5) 長沼: 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.
- 6) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., Jan. 1979.
- 7) 出雲他: 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.
- 8) 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.
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.8.
- 10) 藤原他: 開孔を有する鉄筋コンクリート梁のせん断性状に及ぼす補強方法の影響, 年次, Vol.32, No.2, pp.235-240, 2010.
- 11) 前口: RC 造有孔梁における改良型螺旋補強材の補強効果に関する実験的研究, 年次, Vol.30, No.3, pp.253-258, 2008.
- 12) 前口他: スパイラル型補強材を用いた RC 造有孔梁の補強効果に関する実験的研究, 年次, Vol.26, No.3, pp.337-342, 2004.
- 13) 前口他: RC 造有孔梁の補強材開発に関する実験的研究, 年次, Vol.23, No.3, pp.271-276, 2001.
- 14) 山田他: 鉄筋コンクリート造有孔はりのせん断挙動に関する実験的研究, 年次, Vol.19, No.2, pp.831-836, 1997.
- 15) 前口他: 定着部を有する簡易補強材を用いた RC 造有孔梁の補強効果に関する研究, 年次, Vol.17, No.2, pp.619-624, 1995.
- 16) 前口: RC 造有孔梁における改良型螺旋補強材の補強効果に関する実験的研究, 年次, Vol.30, No.3, pp.253-258, 2008.
- 17) 村上他: $F_t=100\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートを用いた RC 有孔梁の力学的特性に関する基礎的研究, 大会, pp.229-230, 2007.
- 18) 久保他: 交差楕円形状の開孔補強金物を用いた RC 有孔梁のせん断耐力に関する研究, 大会, pp.259-260, 2006.
- 19) 武田: RC 造有孔梁のせん断強度に関する実験的研究, 大会, pp.89-90, 2005.
- 20) 田中他: 金物を高強度鉄筋とした場合の剪断耐力, 大会, pp.341-342, 2001.
- 21) 三橋他: 高強度鉄筋コンクリート造有孔梁の開孔補強に関する実験的研究, 大会, pp.353-354, 2001.
- 22) 広沢他: 鉄筋コンクリート造有孔はりのせん断強度と靱性, 建築技術, pp.93-101, 1979.3.

*清水建設株式会社 (元首都大学東京大学院), 修士 (工学)

**首都大学東京大学院 建築都学域 教授, 工学博士

*Shimizu Corporation, M. Eng. (Tokyo Metropolitan Univ.)

**Prof., Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.