開口補強のある RC 版のモデル化と 補強鉄筋の性能について

解析技術部 佐藤 剛

1. はじめに

コンクリート構造物では、コンクリート打設の都合等により、RC版の一部に開口を設ける ことがある。その際には、開口の為に削除された鉄筋と同量の補強鉄筋を配置することが、 様々な設計基準の中に記されている。本研究では、開口がある RC版を対象に、開口部の大き さとモデル化の範囲についての検討と、補強鉄筋径が変形性能に与える影響について検討を 行った。

2. 解析モデル概要

2.1 解析概要

Midas FEA Ver 3.7.0を使用し、3次元 FEM 非線形解析を行った。①開口部を考慮した適切なモデル形状、②補強鉄筋の鉄筋径による変形性能の比較、の2項目について検証を行った。

2.2 モデル概要

解析は、RC部材を分散ひび割れモデルとし、コンクリート要素を引張軟化モデルのソリッド要素、鉄筋要素を離散鉄筋モデルの埋め込み要素でモデル化した。表-1に材料物性を示す。

モデルの基本形状を図-1 (左)に示す。モデルは、モデル中央の最下面を原点とし、厚さH = 500mmのRC版とした。モデルの幅Wと奥行きDについては、解析条件に応じて適宜調整す る。開口部は、モデル中央に500mm × 500mm × 500mmの開口とした。ソリッド要素の大き さは、厚さ500mmの4分割相当の125mm × 125mm × 125mm とした。

配筋は図-1(右)に示す通りとした。主筋 D25 を奥行き Y 方向に 125mm 間隔、配力筋 D16 を 幅 X 方向に 250mm 間隔で配置した。主筋のかぶりは 100mm とした。補強鉄筋のかぶりは既存 鉄筋と同位置とし、主筋は開口端より 50mm と 150mm、配力筋は開口端より 50mm の位置に配 置した。補強鉄筋は定着長も考慮し、長さは道路橋示方書・同解説等に示された重ね継手長 とする。今回は D25・D16 ともに定着長を 28 ¢ とし、補強鉄筋の全長を D25 で 2000mm、D16 で 1500mm とした。

定着長 L =
$$\frac{\sigma_{sa} \times \varphi}{4 \times \tau_a} = \frac{200\varphi}{4 \times 1.80} = 27.7\varphi = 28 \varphi$$
 (D25:700mm, D16:450mm)

表-1 材料物性

N/mm²

| | 3 | ンクリート | · 物性值一賢 | ī | |
|-------|-----------------------|-------|---------|---------------|------------------|
| 使用材料 | Fc30 | | | | |
| ヤング係数 | 2.80.E+07 | kN/m² | - | | |
| 重量密度 | 24.5 | kN/m³ | | | |
| ポアソン比 | 0.2 | | _ | | |
| | | | | | |
| 材料モデル | ひび割れ全ひずみ [※] | | | 引張モデル:Hordijk | |
| 引張 | Hordijk | | | Ft | 2.22 N/mr |
| 圧縮 | 弾性 | | | Gf | 0.1 N/mm |
| せん断 | 定数 (0.01) | | | h | 141 mm |
| ※多方向 | 同定びび割 | れモデル | - | | |

| 鉄筋物性値一覧 | | | | | |
|---------|------------------------------|--|--|--|--|
| 使用材料 | SD345 (D25 · D16) | | | | |
| ヤング係数 | 2.00.E+08 kN/m ² | | | | |
| ポアソン比 | 0.3 | | | | |
| | | | | | |
| 材料モデル | Von Mises | | | | |
| 降伏応力 | 345 N/mm ² | | | | |



図-1 モデルの基本形状(左)と配筋(右)

境界条件は、Z-Y平面に対してはZ方向に固定、Z-X平面に対してはY方向を固定した。こ れにより、Y軸回りに曲げ変形が発生するように設定した。荷重条件は、モデル上面に面分 布荷重を付加した。

解析は非線形静的解析とし、面分布荷重 10 kN/m² /STEP の荷重増分とした。この解析の 結果をモデル下面の節点・要素に着目し 荷重-変形図を示し性能比較を行う。

3. 理論値の算出

本解析モデルの変形は、両端がピン支持の梁の変形を想定しており、奥行きが Y 方向の梁 の変形と考えると、図-2 で示す公式から断面力と変形が計算できる。この計算式によると、 モデルの中心に発生する曲げモーメントは、梁の長さ(モデル幅 W)によって決まり、過度に 幅の大きいモデルを使用すると、解析時間の増大や特異点の発生による収束性の悪化が予想 される。今回のモデル幅は両端がそれぞれ開口の 2 倍の長さ 1000mm をとった W=2500mm とし た。



図-2 楽の公式(岡端ビン文持)

ここで RC 断面計算(FORUM8 社)を使用し、奥行き Y 方向 1m 当たりの断面における、ひび割 れモーメント Mc と、鉄筋が引張許容応力度 180 N/mm² に達する抵抗モーメント Mr を算出し た。また、その時の分布荷重 q (kN/m)とひび割れ発生時のたわみ y を算出した。図-3 と表-2 に算出結果を示す。ひび割れ発生時の分布荷重は 130 kN/m で変位は 0.227mm、鉄筋が許容応 力度に到達時の分布荷重は 320 kN/m となる。



図-3 ひび割れモーメント・抵抗モーメントの算出

| | 曲げモーメント | 分布荷重 | たわみ | | |
|---|----------|----------|--------|--|--|
| | M (kN*m) | q (kN/m) | y (mm) | | |
| ひび割れ | 104.1 | 130 | 0.227 | | |
| 鉄筋許容 | 246.9 | 320 | _ | | |
| $F : 2 \ 80 \times 10^7$ [kN/m ²] | | | | | |

表-2 分布荷重・変位の算出

 $E: 2.80 \times 10^{6}$ kN/m^2

I: 0.01042 [m⁴]

①開口部を考慮した奥行き幅の検証 4.

4.1 解析条件

モデルの幅は W=2500mm とし、本検証では開口端を考慮したモデル奥行き方向の検証を行っ た。今回はモデルの奥行きを開口部の大きさ d=500mm を基準に、3d、5d、9d、17d となるモ デルの性能の比較を行った。図-4に解析モデルの概形を示す。変位の抽出は図中の赤点に示 す点の最下面の節点・要素とした。



図-4 解析条件(奥行きの影響)

表-3 に q=130、320 kN/m² 時点での各着目点の変位を示す。図-5 に Y-0mm、-250mm 地点の 荷重-変位図を示す。図-6 には D=1500mm と D=4500mm のモデルでのひび割れ発生時点での主 応力コンター図・塑性状況図、鉄筋降伏時の鉄筋応力コンター図を示す。

コンクリートのひび割れ発生時(130 kN/m²)の荷重と変形を見ると、どのモデルも変位の理 論値 0.227mm より小さい変位となっている。これは、各モデルのひび割れ発生が 140~180 kN/m² であったためである。しかし、どのモデルも同程度の変位で、奥行き方向の影響はほ とんどない。ひびわれの進行としては初めに開口部のある Y=+250mm ~ -250mmの位置でひび 割れが先行している。図-6 に示す主応力コンター図は q=180 kN/m² の開口端周辺でひび割れ が発生した時点のものとなっている。左側の D=1500mm のモデルではコンター図が比較的均質 に表示されている。D=4500mm のモデルでは奥行き方向への応力分布が均等にならないことや、 応答に対称性がないことなど、応答の特異点が確認できる。このコンター図だけでも、同じ 変位が発生していても、モデルの大小によって結果の直感的な認識に差が出ることがわかる。

鉄筋の許容応力到達時(320 kN/m²)に着目すると、奥行きが短い順に到達までの荷重が大き くなる傾向がみられる。図-5の荷重-変位図で見ると、4500mm・8500mmのモデルではほぼ同 じような曲線となっており、幅 2500mm に対して 2 倍以上の奥行き長さのモデル化は、開口部 付近の変位には影響が少ないことがわかる。図-6の鉄筋応力度のコンター図をみると、モデ ル奥行きに関係なく上面に配置した鉄筋の圧縮応力が小さく、配力筋は上下面ともに応力が 小さい。また、開口のある Y=+250mm ~ -250mm の範囲の引張側鉄筋の応力は、他の引張鉄 筋の応力の半分程度となっており、開口部端の補強鉄筋と主鉄筋に応力が集中していること がわかる。

解析結果より開口部に対するモデル奥行きの影響は、鉄筋に着目すると大きいが、コンク リートに着目すると影響は少ない。今回は補強鉄筋の長さを考慮して長さを決定したため、 開口の大きさがモデルに対して比較的小さかったこともあるが、今回のような解析条件にお いては開口がモデル形状に与える影響は少ないと考えられる。ただし、無筋モデルや、開口 の割合がかなり大きいモデル、RC版の厚さなどの余条件について考慮していないため、今後 の検討項目とたい。

この結果より、今回の解析条件ではモデルを必要以上に大きくすることは結果に影響しないことが分かった。次に行う補強鉄筋に関する検証のモデルの大きさは、W=2500mm D=2500mm、H=500mm として検証を行う。

| | | 解析モデル | | | | | |
|-------|-------|-----------|-----------|-----------|------------|--|--|
| 状態 | Y座標 | 1500 (3d) | 2500 (5d) | 4500 (9d) | 8500 (17d) | | |
| | | mm | mm | mm | mm | | |
| | 0 | 0.1624 | 0.1739 | 0.1791 | 0.1793 | | |
| | -250 | 0.1677 | 0.1797 | 0.1850 | 0.1853 | | |
| ひび割れ | -750 | 0.1702 | 0.1843 | 0.1908 | 0.1913 | | |
| (130) | -1250 | | 0.1857 | 0.1949 | 0.1959 | | |
| | -2250 | | | 0.1983 | 0.2017 | | |
| | -4250 | | | | 0.2046 | | |
| | 0 | 1.1475 | 1.3762 | 1.5004 | 1.5083 | | |
| | -250 | 1.1439 | 1.3749 | 1.4931 | 1.5060 | | |
| 鉄筋許容 | -750 | 1.1404 | 1.4033 | 1.5096 | 1.5219 | | |
| (320) | -1250 | | 1.4182 | 1.5628 | 1.5465 | | |
| | -2250 | | | 1.5486 | 1.5960 | | |
| | -4250 | | | | 1.6535 | | |

表-3 変位一覧



図-5 荷重-変位図 (左:Y=0mm、右:Y=-250mm)



図-6 コンター図ー覧

4. ②補強鉄筋の鉄筋径による変形性能の比較

4.1 解析条件

次に補強鉄筋の鉄筋径の変化による変形性能の検証を行う。モデルの形状は、2500mm × 2500mm ×500mm とする。補強鉄筋の鉄筋径は D25, D22, D19, D16 の4 種類と、開口設計なし・D0(開口補強なし)の計6種類の荷重-変位関から比較を行った。

4.2 解析結果

表-4に q=130、320 kN/m² 時点での各着目点の変位を示す。図-7に Y-0mm、-250mm 地点の 荷重-変位図を示す。

| | | 解析モデル | | | | | |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 状態 | Y座標 | 開口なし | D25 | D22 | D19 | D16 | D0 |
| | | mm | mm | mm | mm | mm | mm |
| | 0 | 0.2051 | 0.1739 | 0.1747 | 0.1754 | 0.1759 | 0.1774 |
| ひび割れ | -250 | 0.2051 | 0.1797 | 0.1805 | 0.1812 | 0.1817 | 0.1832 |
| (130) | -750 | 0.2051 | 0.1843 | 0.1850 | 0.1857 | 0.1862 | 0.1876 |
| | -1250 | 0.2051 | 0.1857 | 0.1864 | 0.1871 | 0.1876 | 0.1889 |
| | 補強 | 1.7019 | 1.3763 | 1.4238 | 1.4690 | 1.5087 | 1.6911 |
| 鉄筋降伏 | -250 | 1.7029 | 1.3749 | 1.4227 | 1.4628 | 1.5046 | 1.6878 |
| (320) | -750 | 1.7059 | 1.4033 | 1.4532 | 1.4887 | 1.5208 | 1.6874 |
| | -1250 | 1.7065 | 1.4182 | 1.4621 | 1.4900 | 1.5178 | 1.6748 |

表-4 変位一覧



図-7 荷重-変位図 (左:Y=0mm、右:Y=-250mm)

結果より、鉄筋の許容応力度程度の荷重レベルでは、D25~D16の補強鉄筋の変形性能はほ ぼ変わらないことが分かった。また、「開口なし」と「D0」の荷重-変位の推移がほぼ同じで あり、補強鉄筋を入れたモデルよりは変形が大きくなっていることがわかる。これは、補強 鉄筋を入れたことにより、局所的に鉄筋が増えたことによる影響と考えられる。

図-8 に Y=-250mm 地点の鉄筋降伏までの荷重-変位曲線を示す。図のように許容応力程度で はどの鉄筋径でも同程度の性能を有していたが、鉄筋降伏レベルの荷重になると性能に違い が出てくる。その中でも「開口なし」と「D25」と「D22」は、ほぼ同じような変形性能を示 していることから、補強鉄筋においては鉄筋径を多少小さくしても性能には変わらないこと が分かる。



図-8 荷重-変位図(Y=-250mm)

今回の解析モデルの引張鉄筋比 pt は、開口端(X=±250mm)で補強鉄筋 D25 が 1.22%、補強 鉄筋なしで 1.01%と、0.2%程度違う。鉄筋比はモデルサイズが影響するため、今回の解析結 果だけでは、鉄筋比と変形性能の関係について詳細な評価をすることは難しい。実際に補強 鉄筋径を小さくする判断ができないのは、このようなデータが不足しているためであると考 えられる。また、ここで示した結果は「変形性能」であり、実構造物の「変形」を示したも のではない。実際に補強鉄筋径を小さくするためには、他条件の解析を行い、データを増や すことや、構造物サイズでの解析などで性能を証明していかなければならない。

5. まとめ

本研究では、開口のあるコンクリート版の性能にいて、補強鉄筋の径が与える影響につい て解析を行った。以下に知見を示す。

- 1) 鉄筋の許容応力度の荷重においては、D25、D22、D19、D16 鉄筋は同程度の能力を期待で きる。
- 2) 今回得られた傾向を評価するパラメーターとして引張鉄筋比 pt が考えられる。ただし、 その場合には、モデル形状や配筋まで影響してくるため、性能評価の指標を検討する必 要がある。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書【設計編】,2017
- 2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説:Ⅲ コンクリート橋・コンクリート部材編,2017