論文 交番ねじりとせん断の複合荷重を受けるRC橋脚の3次元格子モデル解析

# 三木 朋広\*1・鈴木 暢恵\*2・二羽 淳一郎\*3

要旨:平面応力下において RC 部材の非線形挙動を予測できる 2 次元格子モデルの,3 次元荷重下に おける適用性を検討するため,交番ねじりと曲げの複合荷重を受ける中空断面 RC 橋脚を対象とし た解析を行った。格子モデルでは,せん断耐荷機構をトラス機構とアーチ機構に分けて考え,さら に適切な材料モデルを組み込んだ要素に離散化しているため,RC 部材のせん断挙動を妥当な精度で 評価できる。新たに提案した 3 次元格子モデルによって,中空断面 RC 橋脚の最大耐荷力,変形性 能,履歴挙動,およびねじりと曲げの複合荷重の影響を精度良く予測できることを明らかにした。 キーワード:中空断面 RC 橋脚,ねじり,複合荷重,トラス機構,アーチ機構,3 次元格子モデル

#### 1.はじめに

構造設計手法が性能照査型へ移行している中,鉄 筋コンクリート(RC)構造物の非線形挙動,さらに, ポストピーク領域の破壊進展に関する情報は,設計 において非常に有効な評価基準である。従来の構造 物の性能評価は,その主軸方向,およびそれと直交 する方向に対してそれぞれ別個に検討されている。 しかしながら,実際の地震動は構造物に3次元的に作 用し,多方向からの曲げ,せん断,ときにねじりを 受けるため,構造物は非常に複雑な応答を示すこと となる。また,3方向から同時に地震動を受ける構造 物の非線形応答を解析的に追跡する場合,解析モデ ルは当然3次元モデルである必要がある。

これまで著者らは,簡便な解析モデルのひとつで ある格子モデル<sup>1),2)</sup>に着目し,それを用いた解析的な 研究を進めてきた。格子モデルは,RC部材を軸力の みを伝える1次元トラス要素に離散化しているので, 力の流れを容易に特定することができ,RC部材のせ ん断耐荷機構をシンプルに評価できる。さらに,橋 脚基部における軸方向鉄筋の局部的な座屈挙動を考 慮することによって,大変形領域の履歴挙動の精度 向上に成功している<sup>2)</sup>。本研究では,従来の2次元格 子モデルを3次元に拡張し,さらに,本モデルを用い た非線形解析によって,3次元荷重下における中空断 面RC橋脚の変形挙動を評価することを試みる。 2. 解析モデル

2.1 2次元格子モデルの概要

2 次元格子モデルでは,図-1に示すように,コ ンクリートの斜め圧縮部材と斜め引張部材を,部材 軸に対して45度と135度方向に規則的に配置してい る。さらに,端部節点以外で変位が独立な部材であ るアーチ部材を組み込んでいる点も特徴のひとつで ある。適切に配置されたコンクリート部材の組合せ によって,斜めひび割れ発生後,マクロ的な圧縮力 の方向の変化に対応することができる。

図 - 2は,2次元格子モデルにおける部材断面の 区分の概念図である。図 - 2に示すように,トラス





- \*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 博(工) (正会員)
- \*2 東京工業大学 工学部土木工学科 (非会員)

\*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)



図 - 2 2次元格子モデルの断面区分の概念図

部分とアーチ部分に区分する。それぞれの要素の幅 は、断面幅bに対して、アーチ部分は $b \times t$ 、トラス 部分は $b \times (1-t)$ となる(ただし、0 < t < 1)。このと き、t値は、微小な強制変位が作用した RC 部材にお いて、構成要素全体のひずみエネルギーと外力のな す仕事から定義される全ポテンシャルエネルギーが 最小となる時の値として定義する。このようにして t値を予め求めておき、以後の解析に用いている。

2.2 3次元格子モデルの提案

(1) 格子モデル構成要素の配置

従来の2次元格子モデルにおけるコンセプトを踏 襲し,3次元モデルへ拡張していく。3次元格子モデ ルの概念図を図 - 3 に示す。本モデルでは,2次元格 子モデルと同様に、せん断耐荷機構をアーチ機構と トラス機構に分けて考えている。2次元格子モデルで は,平面応力の仮定に基づき,3次元のRC部材を平 面的な2次元モデルに置き換えていた。一方,3次元 格子モデルでは,図-3に示すように,4本のアーチ 部材を,それぞれが載荷点位置と基部を結び,部材 断面の対角方向に向かかうように,かつ,互いに交 差するように配置している。つまり,断面斜め方向 からの加力に対しては,載荷点位置から橋脚基部へ 向かって,部材を斜め対角方向に貫くように圧縮ス トラットが形成されると仮定している。さらに,正 負繰返し荷重を受ける際,水平力の方向が反転し, 反転後に形成された圧縮力の流れがそれまでの流れ と交差することを考慮して,アーチ部材はお互いが 交差するように対称的に配置している。

トラス部材に関しては,3次元応力場をx-y平面,



図 - 3 3次元格子モデルの要素配列

y-z平面, z-x平面の3つの面に離散化し, これらの組 合せによって表現することにする(図-3), それぞ れの面内に配置された直交する2つのトラス部材で は,コンクリートの圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係にお いて, Vecchioら<sup>3)</sup>が提案する,斜めひび割れの生じ たコンクリートの圧縮強度の軟化挙動を考慮するこ とができる。

### (2) t 値の決定方法について

従来の2次元格子モデルにおいて, t 値は,部材 断面幅に対するアーチ部分の割合として定義されて いた。3次元モデルへ拡張するにあたり,断面幅方向 に対してだけでなく,断面高さ方向についてもアー チ部材の割合を変化させることにする。図 - 4に3 次元格子モデルにおける部材断面の区分図を示す。 断面幅 bに対するアーチ部分の占める割合を $t_b$  値, また断面有効高さdに対するアーチ部分の占める割合を $t_b$  値, また断面有効高さdに対するアーチ部分の占める割 合を $t_d$  値とする。これらは,それぞれの値を変化さ せたときの全ポテンシャルエネルギーが最小になる ときの値として求める。全ポテンシャルエネルギー の分布の一例を図 - 5に示す。この場合, $t_b$ = 0.35,  $t_d$ =0.25を用いることになる。ここで,全ポテンシャ ルエネルギーを求める際に作用させる微小変位は, 部材の断面弱軸方向に加えることにしている。

(3) アーチ部材の断面積の決定方法

図 - 6 に示すように,2次元格子モデル,および3 次元格子モデルにおいて,ある1方向から力を受ける 1組のアーチ部材を考える。ここでは,3次元格子モ デルにおける構造系としての全体剛性が,2次元格子 モデルにおけるそれと等価になるように,アーチ部



図 - 4 3次元格子モデルにおける断面の区分図

材の断面積を仮定している。この仮定を用いると、 以下の式より3次元格子モデルにおけるアーチ部材 の断面積を決定することができる。

$$A_{arch-3D} = \left(\frac{1+m^2+n^2}{1+m^2}\right)^{3/2} \cdot A_{arch-2D}$$
(1)

$$A_{arch-2D} = \frac{1}{2} b \cdot t_b \cdot t_d \cdot d\sin\theta \tag{2}$$

ここで, Aarch-3D および Aarch-2D は, それぞれ 3 次元格 子モデル,および2次元格子モデル中のアーチ部材 の断面積である。また, m と n は, 前述の図-3中 に示すように,3次元格子モデルの基部から載荷点 位置までの高さを md とし, 断面幅を nd (d: 断面有 効高さ)として表すことで定義される。例えば図 -3中では, *m* = 3 であり, *n* = 1 である。ここで, 3 次元格子モデルでは,鉛直方向,水平方向の隣り合 う節点間距離を有効高さの 1/2, つまり d/2 を基準に 定めているため,モデルの高さや断面幅は,対象部 材の実際の寸法と必ずしも一致しているわけではな い。本研究では,モデルの高さ,断面幅を,実際の 値に比較的近くなるように設定している。

2.3 材料構成モデル

材料モデルは,従来の格子モデル<sup>2)</sup>で用いている ものと同様である。より精度の高い材料モデルが提 案された際には,これらのモデルを更新する必要が あるが,ここでは一般的に広く使用されている材料 モデルを採用している。コンクリートの斜め圧縮部 材,アーチ部材に対して,帯鉄筋による横拘束効果を 考慮するために,圧縮応力-圧縮ひずみ関係に Mander らのモデル<sup>4)</sup>を用いる。さらに, Vecchio らの 全ポテンシャルエネルギ<u>ー(</u>kN-m)



図 - 5 全ポテンシャルエネルギーの分布



図 - 6 格子モデル中のアーチ部材の仮定

実験的な研究 <sup>3)</sup>に基づき, ひび割れたコンクリート の,引張ひずみ  $\varepsilon_t$ の増加に伴う,引張と直交方向の 圧縮強度の軟化挙動を考慮する。一般に,圧縮破壊 は局所化するので,平均応力-平均ひずみ関係に軟 化域を含むように仮定する際,これを適用する要素 の長さと実際の破壊領域長さの関連に十分に注意す る必要がある。ここでは,十分な拘束が行われた結 果, 圧縮破壊の局所化挙動が緩和されたものと仮定 し,軟化域を含めた平均的な応力-ひずみ曲線を適 用する。ただし、この場合であっても、適切なモデ ルが得られた後には、当然変更していくこととなる。

コンクリートの引張モデルに関して,コンクリー トの曲げ引張部材は、軸方向鉄筋を含んだ領域に位 置しているため,コンクリートと鉄筋の付着作用を 考慮する。ひび割れ前は弾性体と仮定し,ひび割れ 発生後には岡村・前川のテンションスティフニング モデル 5を用いる。一方,コンクリートの斜め引張 部材,およびアーチ部材は,鉄筋の付着作用が影響 しない部材と仮定する。よって,コンクリート特有 の脆性的な軟化挙動を 1/4 モデル<sup>6</sup>で表現する。この 時,破壊エネルギー $G_F$ には,普通コンクリートの標

準的な値として 0.1 N/mm を用いる。

鉄筋モデルに関して,座屈の生じていない鉄筋応 力-ひずみ関係において,応力が正負反転する際に 現れるバウシンガー効果を考慮するために,福浦ら の数値モデル<sup>7)</sup>を用いる。一方,鉄筋の座屈挙動を 取り扱う際には,Dhakalらによって提案された座屈 モデル<sup>8)</sup>を採用する。このモデルでは,空間的に平 均化する領域(座屈長 L)と軸方向鉄筋の直径 фの 比 L/φ,および軸方向鉄筋の降伏強度をパラメータ として考慮している。

#### 3. 解析概要

#### 3.1 供試体および載荷方法概要

解析対象には,中空断面RC橋脚の1/10縮尺供試体 <sup>9)</sup>を選定した。供試体の概要を図-7に示す。コンク リート圧縮強度は38~42 N/mm<sup>2</sup>であり,弾性係数は 25~29 kN/mm<sup>2</sup>の範囲にあった。鉄筋は,軸方向鉄 筋にD6(降伏強度320 N/mm<sup>2</sup>),帯鉄筋に異形4 mm 筋(降伏強度397 N/mm<sup>2</sup>)が用いられた。

実験では,同一形状の供試体に対して,載荷履歴 が異なる2ケースが加力された。供試体No.1は交番曲 げ載荷のみを受けるRC橋脚で,供試体No.14は交番 曲げにねじりを加えたものである。設計降伏荷重 178.4 kNに達したときの載荷点位置における水平変 位δy = 11.3 mmを基準に,振幅変位をその整数倍に順 次増加させて載荷している。書く繰返し回数は3回で ある。軸力は,圧縮力588 kNを載荷中常に加力して いる。ねじり力の作用方法は、ひび割れ発生前では, 弾性領域におけるねじりモーメントが,柱基部にお ける曲げモーメントの15%で一定になるように荷重 制御で載荷している。ひび割れ発生後は,ひび割れ 発生前における曲げとねじりの変形量の比率と等し くなるように,変位制御で載荷している。

# 3.2 解析モデル

中空断面を解析対象とする場合,力の流れは各側 壁内に限定されるために,中実断面部材のように部 材中央部を貫くようなアーチ機構が形成されると仮 定することは現実的ではない。本研究では,中空断 面RC橋脚を取り扱う場合,4つの各側壁内で別々の アーチ機構とトラス機構が形成されると仮定する。3 次元格子モデルでは,図-8に示すように各壁内に2 本のアーチ部材を配置する。なお,解析では,橋脚 基部における軸方向鉄筋のフーチングからの伸出し は考慮していない。

### 4.解析結果および考察

4.1 履歴挙動

供試体No.1およびNo.14を対象とした静的格子モ デル解析によって得られた結果を,実験結果ととも に図 - 9,10に示す。供試体No.1において,実験で は,軸方向鉄筋が降伏し,38yでほぼ最大耐荷力に達 し,その後約98yくらいまでほぼ同程度の水平力を維 持している。実験時の観察より,約88yで橋脚基部に おける,かぶりコンクリートの剥落が観察された。







その後,中間帯鉄筋のフックが外れ,軸方向鉄筋は, 局部的な座屈によって曲げ伸ばしを繰り返されたた めに破断に至っている。一方解析では,実験結果に 見られるような,水平変位の増大に伴い軸方向鉄筋 が降伏し,その後耐力を保持し続けるという,約86, 程度までのRC橋脚の曲げ破壊型の変形挙動を,おお むね予測できていることがわかる。また,履歴曲線 は実験同様,安定したエネルギー吸収性能を示して おり,除荷剛性を含め,その形状は実験結果と非常 に良く一致している。最大耐荷力について,既往の 結果<sup>2)</sup>と同様,実験結果をやや大きめに評価している。 これは,鉄筋周辺のコンクリートにひび割れが生じ ることで,鉄筋の平均的な強度が見かけ上,低下し ていることを解析で考慮していないためである。

交番曲げとねじりを受ける供試体No.14では,実験 において,88,時にねじりによる圧縮と曲げによる圧 縮が累加される断面の隅角部で,かぶりコンクリー トの剥落が見られた。さらに,98,で中間帯鉄筋のフ ックがはずれ,その後,水平力が低下していった。 これに対し解析では,ねじりおよび曲げによる圧縮 が累加される部分の斜め部材が最大に達し,その結 果,水平変位が約70 mmのときに水平力が低下し始 めた。このような早期の水平力の低下は,中空断面 壁部のような部材厚が薄い部分において,中間帯鉄 筋によるコンクリートの横拘束効果を適切に評価で きていないためであると考える。しかし,この状態 でも履歴曲線はエネルギー吸収の大きな形状を示し ており,実験結果を程良く捉えることができている。



4.2 RC 橋脚の曲げ挙動に与えるねじりの影響

実験では,ねじりモーメントと橋脚基部の曲げモ ーメントの比が15%で一定となるように,曲げとね じりの変形を調整している。ここでは,ねじりの割 合をさらに大きくすることで,RC橋脚の変形挙動に 与えるねじり作用の影響を調べた。図 - 11には,ね じりモーメントと曲げモーメントの比を20% ~ 50% としたときの水平力 - 水平変位関係の包絡線を示す。

ねじりモーメントと曲げモーメントの比が20%程 度であれば,15%のときと同様に,曲げのみを受け る場合と同様に評価できる。このとき,最大耐荷力 は若干小さくなっているものの,終局変位に大きな 違いは見られない。一方,40%を超えると,耐荷力 のみではなく,変形性能も低下していることがわか る。さらに50%になると,最大耐荷力は曲げのみを 受ける場合の約81%に低減している。これより,同 一の曲げ変形量のときの水平荷重は,ねじりモーメ ントの影響を受け,ねじりモーメントの曲げモーメ ントに対する割合が大きくなると,その影響の度合 いも大きくなることがわる。また,ねじりモーメン トの割合がある程度以上大きくなると,耐荷力や変 形性能が低下することがわかる。これは,ねじりに よる圧縮と曲げによる圧縮が累加され,曲げのみを 受ける場合より早期に斜めコンクリート部材が圧縮 強度に達するためである。また,ねじりひび割れ位 置の軸方向鉄筋に働く引張りと曲げによる引張りの 連成作用が,ねじりモーメントの割合の増大に伴う 耐荷力の低下に密接に関連していることもわかる。



図 - 11 曲げ挙動に与えるねじりの影響

## 4.3 せん断スパン有効高さ比の影響

3次元格子モデルにおいて,橋脚基部から載荷点位 置までの距離(せん断スパン)を1950 mmとしたと きの解析結果を図 - 12に示す。このとき, せん断ス パン有効高さ比は5.5から3.5になっている。それに伴 い, t 値は0.20から0.60となった。格子モデルにおけ る t 値は ,せん断変形が卓越する場合は1.0に近い値 となり,曲げ変形が卓越する場合には0.2程度の小さ い値となる傾向がある<sup>2)</sup>。この場合も, RC橋脚にお けるせん断挙動の影響が大きくなったことがわかる。 ねじりモーメントと曲げモーメントの比が15%の解 析結果では,せん断スパン有効高さ比が大きい場合, 軸方向鉄筋の降伏後,大きな水平変位に至る挙動を 示すのに対し,小さい場合では,鉄筋降伏後,水平 変位が約20mmに達したとき、斜めコンクリート部材 が圧壊し,水平力が低下していった。以上より,せ ん断スパン有効高さ比が異なる場合,ねじりと曲げ の複合荷重によるRC橋脚の破壊モードの変化を3次 元格子モデルによって追跡できることがわかる。

## 5.まとめ

RC部材のせん断耐荷機構のうち,トラス機構を表 現するために,3次元の応力場を,直交座標系にお ける3つの平面に分解した。アーチ機構に関しては, 2次元モデルの剛性と等価になるように,アーチ部 材を3次元的に配置した。新たに提案した3次元格 子モデルによって,交番ねじりと曲げの複合荷重を 受ける中空断面RC橋脚の最大耐荷力,ねじり変形, 履歴挙動,およびねじりと曲げの複合作用を妥当な 精度で予測できることがわかった。

謝辞:本研究では,日本道路公団,および鹿島建設



図 - 12 せん断スパン有効高さ比の影響

技術研究所で行われた実験のデータを使用させて頂 きました。ご協力頂きました皆様に感謝致します。

参考文献

- 二羽淳一郎,崔 益暢,田辺忠顕:鉄筋コンクリート はりのせん断耐荷機構に関する解析的研究,土木学会 論文集, No.508/V-26, pp.79-88, 1995.2
- 三木朋広、二羽淳一郎、Lertsamattiyakul, M.:鉄筋座屈 を考慮した鉄筋コンクリート橋脚の地震時応答解析、 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.225-239, 2003. 5
- Vecchio, F. J. and Collins, M. P.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, Mar./Apr. 1986
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Struct. Engrg., ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, Aug. 1988
- 5) 岡村 甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析
  と構成則,技報堂出版,1991.5
- 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 治:曲げ試験に基づく引 張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp.203-212, 1991.2
- 福浦尚之,前川宏一: RC 非線形解析に用いる鉄筋の繰
  り返し履歴モデル,土木学会論文集,No.564/V-35, pp.291-295, 1997.5
- Dhakal, R. P. and Maekawa, K.: Modeling for Postyield Buckling of Reinforcement, Journal of Struct. Engrg., ASCE, Vol.128, No.9, pp.1139-1147, Sep. 2002
- 湯川保之,緒方辰男,須田久美子,齊藤 宗:中空断面 鉄筋コンクリート高橋脚の耐震性能,土木学会論文集, No.613/V-42, pp.103-120, 1999.2