

論文 3次元格子モデルによる鉄筋コンクリート高架橋全体系の地震時挙動の予測

三木 朋広^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}

要旨：地震動は構造物に3次元的に作用するため、個別に求められた構成部材の応答や主軸に対する平面的な応答の重ね合せから得られる全体系の地震時挙動は、実際とは異なる可能性がある。本研究では、RC部材のせん断耐荷機構をシンプルに評価できる3次元格子モデルを用いて、地震力を受けるRC構造物全体系の3次元地震時挙動を評価した。解析対象は、兵庫県南部地震で異なる被害状況が見られたRC高架橋である。本検討によって、柱のせん断破壊、柱基部における鉄筋座屈など、実際の被害を本解析手法により再現できることを示した。

キーワード：構造全体系、地震時挙動、3次元、格子モデル、せん断破壊、鉄筋座屈

1. はじめに

コンクリート構造物の設計体系は性能照査型に移行し、例えばコンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕では、時刻歴応答解析によって地震時挙動を把握することが規定されている。このような設計体系の下では、部材の耐荷力や変形性能だけでなく、耐荷力に達した後の破壊進展挙動に関する情報も、その性能を照査する際の有用な判断材料となる。従来の基準におけるこれらの評価は、構造物を構成する各部材を個別に照査することによって、構造全体系の耐震性能照査としている。しかし、構造物の破壊はある部材で生じるものの、部材単体から求められる破壊挙動と、それらを重ね合わせることによって求められた全体系での挙動は、必ずしも一致するわけではない。より現実的な地震動を得ることができる場合、構造物を実際の形状に近い形に3次元でモデル化し、それらを用いた非線形解析によって、対象構造全体系としての性能を評価することが可能となる。

一方で、材料レベルに帰着した3次元のモデル化を行った場合、実務において全体系を解析対象として照査することは多大な労力が必要となり、現実的ではない。これまで著者らは、より簡便な解析モデルを開発するために、格子モデル^{1),2)}に着目してきた。格子モデルは、RC部材を軸力のみを

伝える1次元のトラス要素に離散化しているので、RC部材のせん断耐荷機構をシンプルに評価できる。そこで、本研究では、3次元格子モデルを用いて、RC構造物全体系の地震時の3次元非線形挙動を評価していくことを試みる。ただし、本研究における全体系とは構造物自体であり、地盤や基礎の影響は含まれていない。

2. 解析モデル

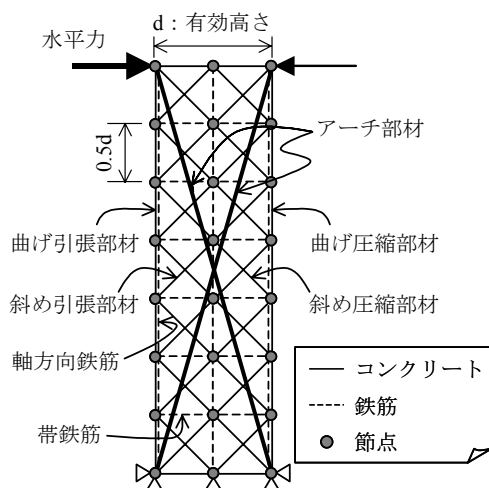
2.1 格子モデル^{1),2)}の概要

図-1に示す2次元格子モデルでは、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。そのため、これらの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の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。図のようにトラス部分とアーチ部分に区分すると、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、構成要素のひずみエネルギーの総和と外力

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助手 博士(工学)(正会員)

*2 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)

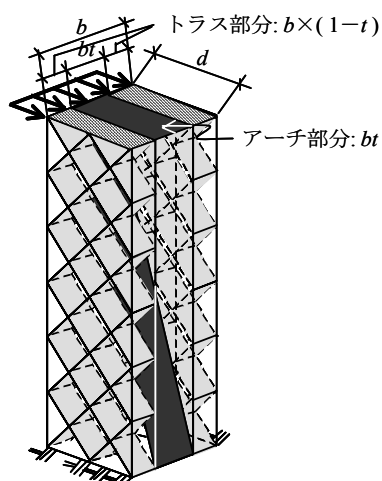


図－１ RC柱に対する2次元格子モデルの概略

仕事の和で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。このようにして求めた t 値を、以後の解析に用いていく。

2.2 3次元格子モデル²⁾ 構成要素の配置

3次元格子モデルの概念図を図－2に示す。本モデルでは、RC部材のせん断耐荷機構を、アーチ機構とトラス機構に分けて考えている。図－3に示すように、4本のアーチ部材をそれぞれが荷点位置と基部を結び、部材断面の対角方向に向かうように、かつ、互いに交差するように配置している。これによって、断面斜め方向からの加力に対して、荷点位置から部材基部へ向かって、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。また、正負繰返し荷重を受ける場合、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



図－２ 2次元格子モデル断面区分の概念図

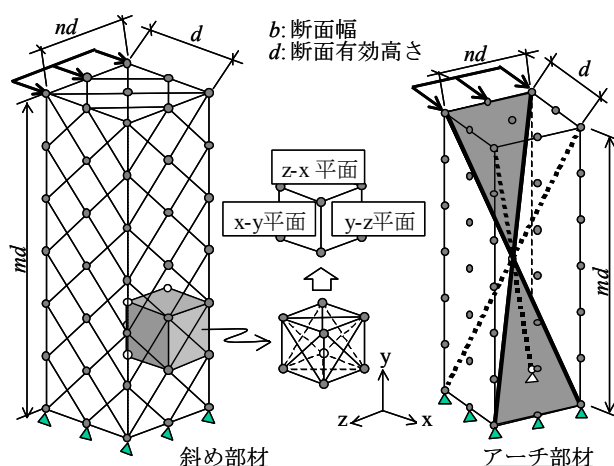
とを考慮して、アーチ部材はお互いが交差するように対称的に配置している。

トラス機構をモデル化した斜め部材に関しては、3次元応力場をx-y平面、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。それぞれの面内に配置された直交する2つの斜め部材によって、コンクリートの圧縮応力－圧縮ひずみ関係において、Vecchioら³⁾が提案する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。

2.3 アーチ部材の断面積の決定方法

3次元モデルでは、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。このとき、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、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。また、これらは、 $0 < t_b < 1$ 、および $0 < t_d < 1$ の範囲で変化させた際、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。ここで、全ポテンシャルエネルギーを求めるときに作用させる微小変位は、モデルの簡略化のため、部材の断面弱軸方向に加えることにしている²⁾。

これらの t_b 値と t_d 値を用いてアーチ部材の断面積を決定する。まず、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、



図－３ 3次元格子モデル中コンクリート要素の配列

アーチ部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。

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

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

ここで、 $A_{arch-3D}$ および $A_{arch-2D}$ 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。 θ は、アーチ部材と RC 部材の部材軸のなす角度である。また、 m と n は、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 として表すことで定義される。ただし、このモデルでは、鉛直方向、水平方向の隣り合う節点間の距離を $d/2$ 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。ここでは、モデルの高さや断面幅を、実際の値に比較的近くなるように設定している。

2.4 材料モデル

材料モデルは、従来の格子モデル²⁾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⁴⁾を用いる。さらに、Vecchio らの実験的な研究³⁾に基づき、ひび割れたコンクリートの引張ひずみ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や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こととする。

コンクリートの引張モデルに関して、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⁶⁾で表現する。この時、破壊エネルギー G_F には、0.1 N/mm を用いる。

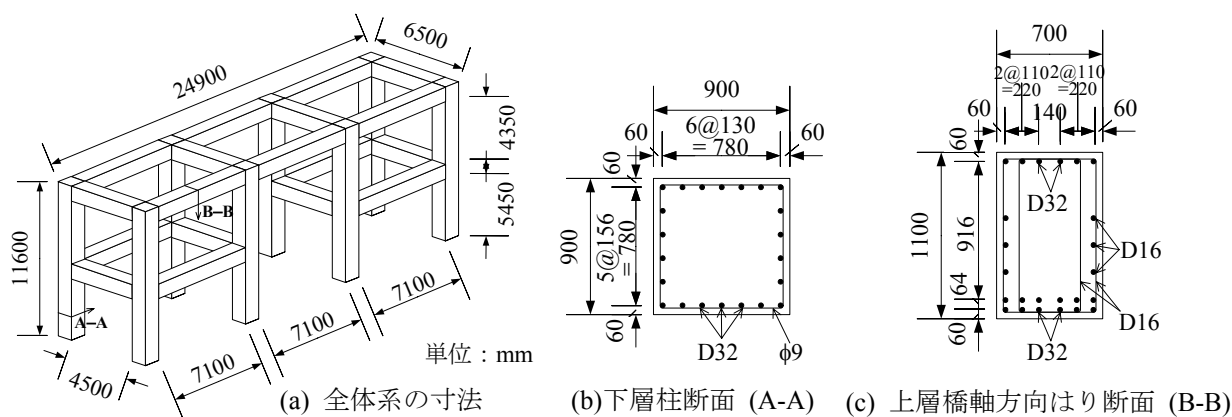
鉄筋モデルに関して、座屈の生じていない鉄筋の応力-ひずみ関係において、応力が正負反転する際に現れるバウシinger 効果を考慮するために、福浦らの数値モデル⁷⁾を用いる。一方、鉄筋の座屈挙動を取り扱う際には、Dhakar らによって提案された座屈モデル⁸⁾を採用する。このモデルでは、空間的に平均化する領域（座屈長 L ）と軸方向鉄筋の直径 ϕ の比 L / ϕ 、および軸方向鉄筋の降伏強度をパラメータとして考慮している。

3. RC 高架橋の被害解析

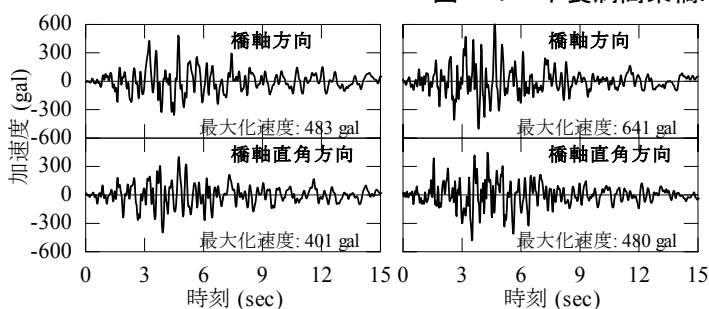
3.1 対象構造物

兵庫県南部地震で実際に被害を受けた 2 つの RC 高架橋⁹⁾を対象として、3 次元格子モデルを用いた時刻歴応答解析を行った。解析対象は、下食満高架橋 R5 と阪水高架橋 R5 とした。これらはほぼ同様の構造形式、断面形状であり、中層はりを有する三径間連続ラーメン高架橋である。下食満高架橋 R5 の方が阪水高架橋 R5 より若干柱が高く、それぞれ上層柱 4.35m、下層柱 5.45m（下食満高架橋 R5）、および上層柱 4.00m、下層柱 5.00m（阪水高架橋 R5）となっている。このうち、下食満高架橋 R5 の全体系寸法、および代表的な柱とはりの断面図を図-4 に示す。また、それぞれの高架橋での使用材料の強度特性を表-1 に示す。

地震後の被害調査⁹⁾によれば、対象構造物の損傷は以下のとおりである。下食満高架橋 R5 では、損傷は比較的軽微であり、上層柱上端に曲げひび割れが観察された。近傍の地点において、同一形式ではあるが、高さが 10.1 m から 10.5 m である下食満高架橋 R5 より若干低い高架橋において、柱がせ



図－４ 下食満高架橋R5の概要⁹⁾



図－５ 入力地震動

ん断破壊して崩壊したものもあった。一方、阪水高架橋 R5 では、これより被害は甚大であり、上層柱、下層柱ともに大きなせん断ひび割れが生じ、下層柱は高架橋を支えきれずに崩壊に至っていた。

3.2 解析手法

解析対象は、対象高架橋の三径間を一単位とし、これを構造全体系としてモデル化した。ただし、解析モデルの要素には、はりおよび柱を対象としており、上部スラブを含んでおらず、その剛性も無視している。そのため、スラブを含む上部構造の重量を 7200 kN と仮定し、この重量を構造物最上面の節点に等分配した。高架橋の自重は、はり、柱に含まれるコンクリートと鉄筋の体積にそれぞれの密度を乗ずることで各構成部材に対して求め、モデル中の各節点に一様に配置した。

入力地震動には、工学的基盤面における波形を

それぞれの高架橋位置における地盤表面の波形に変換するために、FDEL¹⁰⁾を用いて求めた主要動を含む 15 秒間の加速度波形を使用した。その概要を図－5 に示す。

解析において、直接積分は積分定数 $\beta = 0.36$ 、 $\gamma = 0.70$ を用いた Newmark 法⁹⁾によって行い、速度比例の減衰を無視した。積分時間間隔は 0.01 秒とした。収束計算には修正

Newton-Raphson 法を用いた。収束判定には、力とエネルギーの釣合いを考慮し、基準値をそれぞれ 1/1000、および 1/100 とした。

4. 解析結果と考察

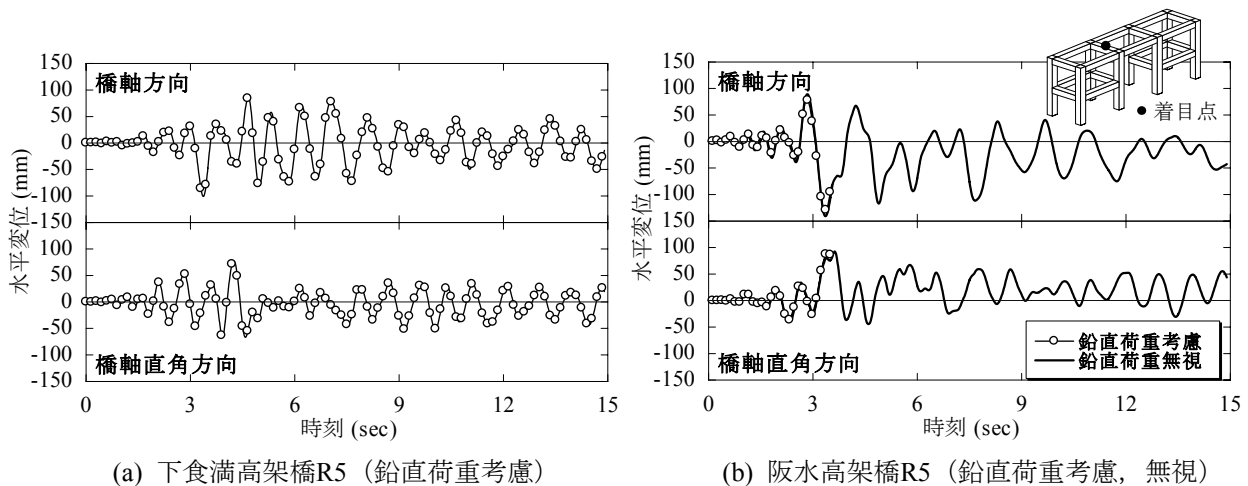
4.1 RC 高架橋の地震時挙動

下食満高架橋 R5 および阪水高架橋 R5 を対象とした 3 次元格子モデル解析の結果を図－6 に示す。ここでは、着目点における応答変位の時刻歴を示している。着目点は、応答変位が最も大きかった、高架橋最上面における橋軸直角方向の上層はり中央の節点であり、その位置を図－6 中に示す。

下食満高架橋 R5 に関して、解析結果では下層柱の基部において、鉄筋の座屈が生じていた。一方、全ての柱はり接合部分の軸方向鉄筋に座屈モデルを導入しているものの、上層柱の頂部や上下層は

表－１ コンクリートおよび鉄筋の材料特性⁹⁾

高架橋	コンクリート			軸方向鉄筋			帯鉄筋		
	f_c' (MPa)	f_t (MPa)	E_c (GPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (GPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (GPa)
下食満 R5	31.7	2.43	16.8	349	533	197	296	436	204
阪水 R5	29.1	1.27	18.4	322	521	203	263	380	183



(a) 下食満高架橋R5（鉛直荷重考慮）

(b) 阪水高架橋R5（鉛直荷重考慮，無視）

図－6 上側はり中央位置着目点における応答変位（3次元格子モデル解析の結果）

りでは鉄筋座屈は生じていなかった。また、すべての上層柱、下層柱において、コンクリートの斜め部材でひび割れが生じ、引張軟化挙動を示していた。ただし、斜め部材やアーチ部材に生じた圧縮ひずみは小さく、ピークには達していなかった。これらの解析によって得られた挙動は、地震後の調査結果とおおむね一致していることがわかる。

一方、阪水高架橋 R5 については、約 3.5 秒時に解の発散により計算が終了している。これは、下層柱の斜め部材および曲げ部材において、コンクリートの圧縮軟化が急激に生じているためである。このとき、上層柱においては、斜め部材やアーチ部材における圧縮軟化挙動は見られなかった。実際、阪水高架橋 R5 では、下層柱のせん断破壊が生じており、上部構造の重量を支えられなくなり構造全体が崩壊に至っていることが、地震後の被害調査で見られている。

4.2 RC 高架橋のせん断破壊挙動の検証

解析が発散によって終了した阪水高架橋 R5 について、地震時のせん断破壊挙動をより詳細に検証するために、各構成要素の応答を見ていく。ここでは、下層柱の構成要素に着目する。

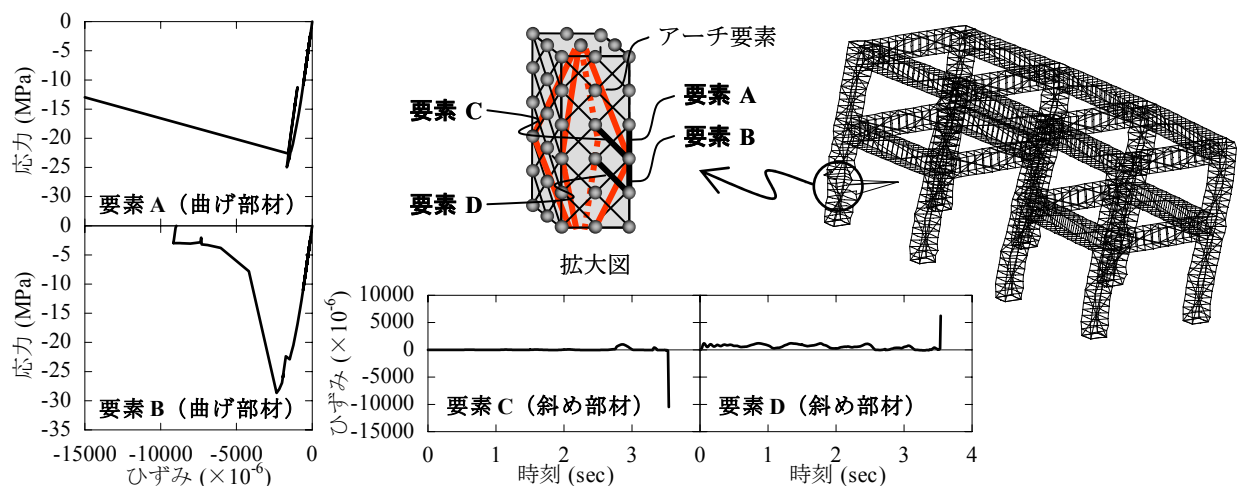
コンクリートの曲げ部材の応力－ひずみ関係と斜め部材のひずみ履歴を図－7 に示す。同図には、解析によって得られた発散する時刻から 1 つ前のステップの変形図も示す。解析結果を見ると、コンクリートの曲げ部材の圧縮軟化挙動が見られる。さらに、要素 A, B, C において非常に大きな圧縮

ひずみが生じている一方、それに隣接する要素 D では引張ひずみが増加していることもわかる。これは、地震力によって加えられたエネルギーが、数個の要素（図－7 中の要素 A, B, C）によって局所的に消費され、それに引きずられるように周りの要素（要素 D）が引張を受けていることによるものであると考えられる。

ここで、格子モデルでは、骨材のかみ合わせによるひび割れ面に沿ったせん断応力の伝達を直接表現することができないため、ひび割れ幅の拡大に伴う骨材のかみ合わせによる応力伝達性能の低下を、斜めひび割れ平行方向の圧縮伝達性能の低下としてモデル化している。その結果、解析におけるせん断破壊モードは、コンクリートの斜め部材やアーチ部材が圧縮軟化し、耐荷力が低下していく挙動として捉えることができる。つまり、阪水高架橋 R5 では、下層柱でせん断破壊が生じていることを解析的に再現していることがわかる。

4.3 地震時挙動に与える上部構造の自重の影響

構造物に地震時挙動に与える上部構造の重量の影響について調べていく。ここで、鉛直荷重を無視した場合では、地震動による水平荷重のみを加え、自重による鉛直荷重を加えずに解析している。上部構造と高架橋の自重によって下層柱下端で生じる圧縮応力は 1.5 N/mm^2 程度である。解析結果を前述の図－6 に示す。鉛直荷重を無視した場合、阪水高架橋 R5 の解析結果にはコンクリートの斜め部材の圧縮軟化挙動は見られなかった。この結果



図ー 7 阪水高架橋R5に関するコンクリート要素の応答（鉛直荷重考慮の場合）

は、鉛直荷重を考慮した場合にせん断破壊すると予測していたことと異なっている。この結果は、水平方向の変位が大きくなった際、上部構造による鉛直荷重が水平方向の変形を増大させたことによって生じたものと考えられる。これより、特に大変形領域を含む非線形解析には、軸方向鉄筋の座屈挙動やコンクリートの圧縮破壊を考慮する以外に、上部構造の重量や構造物の自重による鉛直荷重も考慮する必要性が示唆された。

5. まとめ

本研究では、3次元格子モデルを用いて、RC高架橋全体系を対象とした時刻歴応答解析を行った。解析の結果と、兵庫県南部地震でRC高架橋の実際に見られた被害を比較することによって、柱基部での軸方向鉄筋の座屈や柱のせん断破壊を妥当な精度で予測可能なことを明らかにした。以上の3次元格子モデルを用いた検証によって、構造部材レベルに加え構造全体系の地震時応答予測への適用可能性を示すことができた。ただし、ここでは地盤と基礎はモデル化に含まれておらず、地盤、基礎、構造物の連成作用が構造全体系の地震時挙動に与える影響については、今後の課題である。

参考文献

- 1) 二羽淳一郎ほか：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
- 2) 三木朋広，二羽淳一郎：3次元格子モデルを用いた鉄筋コンクリート部材の非線形解析，土木学会論文集，No.744/V-65，pp.39-58，2004. 11
- 3) 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
- 4) Mander, J.B. et al.: 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
- 6) 内田裕市，六郷恵哲，小柳 洽：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
- 7) 福浦尚之，前川宏一：RC非線形解析に用いる鉄筋の繰返し履歴モデル，土木学会論文集，No.564/V-35，pp.291-295，1997. 5
- 8) 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
- 9) 土木学会：阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証，コンクリート技術シリーズ 49，2002. 1
- 10) 杉戸真太ほか：周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤応答解析に関する一考察，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.49-58，1994. 6