

# 論文 多方向入力による RC 中空断面高橋脚の地震応答解析

趙 唯堅\*1・福浦尚之\*2・加納宏一\*3・田中良弘\*4

要旨：鉄筋コンクリート高橋脚を設計する場合、地震時の橋脚自重による影響を軽減するために中空断面にすることが多い。本研究では、約 80 m の高さを有する RC 中空断面高橋脚を対象に、多方向入力による 3 次元非線形地震応答解析を行い、幾何学的非線形性の影響が小さいこと、材料非線形性の影響で 2 方向同時入力の応答が必ずしも大きくならないこと、及び通常の橋脚に比べ高橋脚自重の慣性力による影響が大きく、橋脚基部の応答せん断力が地震時保有水平耐力法より得られたものを大きく上回る可能性があることを明らかにした。

キーワード：RC 中空断面高橋脚，地震応答解析，多方向入力，Fiber モデル，積層 Shell

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC と略す）高橋脚を設計する場合、地震時における橋脚自重による影響を軽減するために中空断面にすることが多い。RC 中空断面高橋脚では、そのプロポーション（せん断スパン比が大きいこと）から上載荷重による幾何学的非線形性の影響がまず懸念される。また、曲げ変形が卓越することから、実務耐震設計では材料の 1 軸特性に基づいた Fiber モデルによる簡便な非線形

解析手法<sup>1)</sup>が有力と考えられるが、中空断面であるため、厚さの薄い壁部においてせん断力の影響が大きいだけでなく<sup>2)</sup>、多方向地震入力の場合、壁部に図-1 に示すような 3 方向以上のクラック

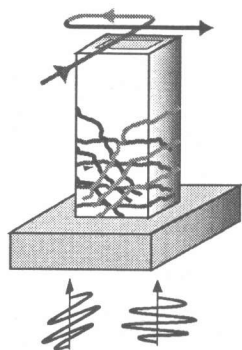


図-1 多方向ひび割れ

が発生する恐れがあり、その耐荷・変形挙動が複雑となる<sup>3), 4)</sup>。さらに、通常の高さの橋脚に比べ、橋脚自重と上載荷重の割合が異なることから、橋脚基部の応答せん断力が地震時保有水平耐力法<sup>5)</sup>により算定されたものを上回る可能性がある。

本論文では、上記の問題点を明らかにし、今後の RC 中空断面高橋脚の耐震設計に役立つ知見を得ることを目的として、現在建設中の実構造物で、約 80 m の高さを有する RC 中空断面高橋脚を対象に、鉄筋コンクリート用有限要素法 (FEM) 解析プログラム COM3<sup>1), 3), 4)</sup>を用いて、多方向入力による 3 次元非線形静的解析および地震応答解析を行った。

## 2. 対象構造物の概要

対象構造物は、橋脚および基礎が鉄筋コンクリート製、橋桁が 5 径間連続ワーレントラス鋼橋の混合構造形式の道路橋である。橋全長は 412 m、A1・A2 橋台と P1～P4 橋脚からなっている。このうち、P3 橋脚の橋脚

\* 1 大成建設株式会社 技術研究所 土木研究部土木構造研究室 研究員、工博（正会員）

\* 2 大成建設株式会社 関西支店 係長、工博（正会員）

\* 3 大成建設株式会社 技術研究所 土木研究部土木構造研究室 室長（正会員）

\* 4 大成建設株式会社 技術研究所 土木研究部土木材工研究室 室長、工博（正会員）

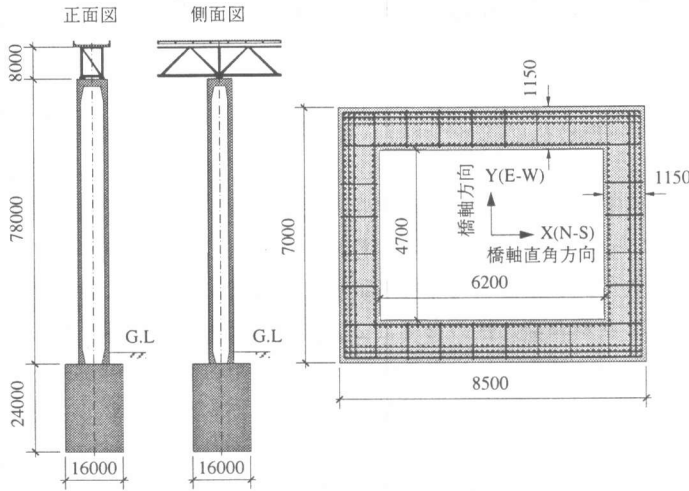


図-2 P3橋脚構造一般および断面配筋図

高さが最も高いため、本研究の解析対象として取り上げた。

図-2にP3橋脚の構造寸法及び断面配筋を示す。橋脚はRC中空柱式橋脚、基礎はRCケーソン基礎である。桁高さ8m、橋脚高さ78m、橋脚断面寸法は、橋軸方向7000mm、橋軸直角方向8500mm、中空断面の壁厚は1150mmである。橋桁の支持条件は、橋軸方向では弾性支持、橋軸直角方向では固定である。その他の構造条件は、耐震設計Ⅱ種地盤、橋脚自重約59MN、上載荷重約16MN、固有周期2.1~2.6secである。断面配筋条件は、軸方向主鉄筋が外側3段D51@150と内側1段D51@150、横方向鉄筋が外側3段D22@150と内側1段D22@150となっている。鉄筋種別はSD345、コンクリートの設計基準強度は40N/mm<sup>2</sup>である。

### 3. 解析方法

本研究では、解析ツールとしてFiberモデル、および4方向ひび割れを有する平面RC要素の空間平均化構成則が組み込まれている鉄筋コンクリート用3次元非線形FEM解析プログラムCOM3<sup>1), 3), 4)</sup>を使用している。

### 3.1 解析モデル

解析モデルとして、図-3に示すようにFrame要素(線材要素)を用いたモデル(以下Fiberモデルと略す)と、積層シェル要素を用いたモデル(以下Shellモデルと略す)の2種類を使用し、中空断面高橋脚の耐震設計の実務レベルにおいて両者の比較を行うこととする。橋脚はフーチング上面で剛結とする。地震入力直接フーチング上面から入射し、基礎、地盤との連成は考慮しない。

橋桁の支持条件は、橋軸方向と橋軸直角方向とは異なるが、簡単のため、解析上両方向ともに固定(剛結)とした。また、橋脚上端より上の要素を剛とした。

解析において橋軸直角方向(橋脚断面長辺方向)をX方向(地震入力N-S方向)、橋軸直角方向をY方向(E-W方向)とした。

Fiberモデルでは、断面を橋軸直角方向30×橋軸方向24=720分割した。Shellモデルでは、

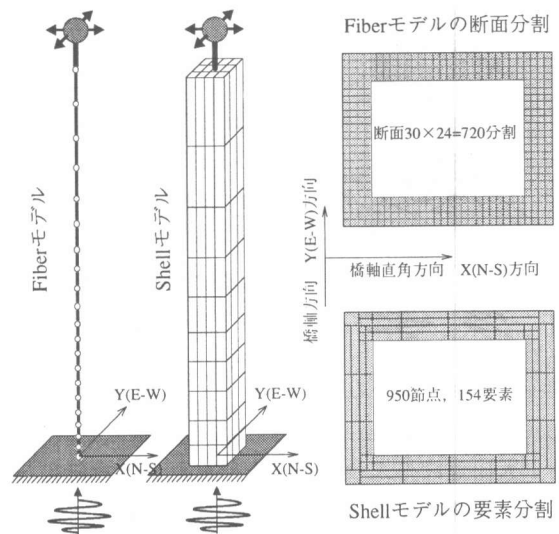


図-3 解析モデルおよび要素分割

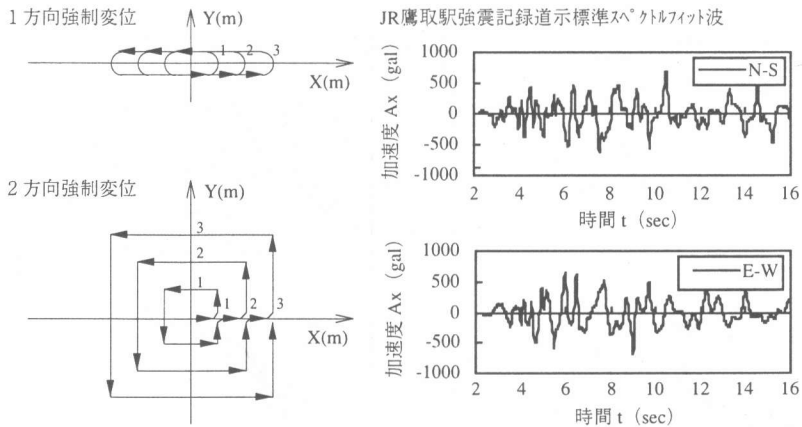


図-4 静解析強制変位および動解析地震入力

断面周方向を14要素、壁厚方向を4層とした。コンクリートと鉄筋の構成則は、除荷・再載荷を含む経路依存型の平均歪み-平均応力の関係で与えられる分散ひび割れモデルを採用している。また、ひび割れ以降の剛性の精度を高めるために、断面を付着作用が及ぶ領域(RC Zone)と付着作用が及ばない領域(PL Zone)のゾーニングを行った<sup>1), 3), 4)</sup>。

### 3.2 解析ケース

本研究では、FiberモデルとShellモデルごとに以下の諸ケースについて解析を行った。

- 1) 1方向強制変位による静的単調解析
- 2) 1方向強制変位による静的交番解析
- 3) 2方向強制変位による静的交番解析
- 4) 1方向地震入力による動的応答解析
- 5) 2方向地震入力による動的応答解析

なお、ケース1)と2)のFiberモデルについて幾何学的非線形性(P- $\Delta$ 効果)を考慮した解析も実施した。

図-4に静的解析に用いた強制変位履歴、および動的解析に用いた入力地震動の加速度波形を示す。入力地震動として、JR鷹取駅で観測された強震記録(N-S成分とE-W成分)を道路橋示方書・同解説V耐震設計編<sup>5)</sup>に規定されているタイプII地震動・II種地盤の標準加速度応答スペクトルにフィットした波形<sup>6)</sup>

を使用した。ただし、試解析では橋脚の応答変位等が非常に小さくほぼ弾性範囲内(降伏を越えていない)にとどまっていることから、本解析では地震入力加速度の強さ(振幅)を2倍にして動的解析を行った。

## 4. 解析結果および考察

### 4.1 静的解析

#### (1) 幾何学的非線形性の影響

図-5に1方向(X方向、橋軸直角方向、以下同)静的単調載荷と交番載荷の水平力 $P_x$ -水平変位 $\delta_x$ 関係のFiberモデルによる解析結果を示す。実線と破線はそれぞれ幾何学的非線形性を考慮しないと考慮した解析結果を表し、丸印付のものは道路橋示方書・同解説V耐震設計編<sup>5)</sup>の地震時保有水平耐力法による計算結果である。本解析対象に限ったことであるが、幾何学的非線形性の影響が比較的小さい。これは、橋脚断面寸法に対して上載荷重が相対的に小さかったことによるものと考えられる。図-5からFiberモデルによる解析結果と保有水平耐力法による計算結果はほぼ一致すること、および橋脚の水平耐力は約26MN、降伏変位は約1.0mであることが判る。なお、地震時保有水平耐力法による終局変位は約3.0mであることから、静解析の最大強制変位もそれに合わせて $\pm 3.0\text{m}$ とした。

#### (2) 1方向と2方向入力の比較

図-6に解析モデルごとに1方向単調、1方向交番、および2方向交番解析結果のX方向での比較を示す。塑性域においてX方向の強制変位を維持しながら、Y方向の強制変位を

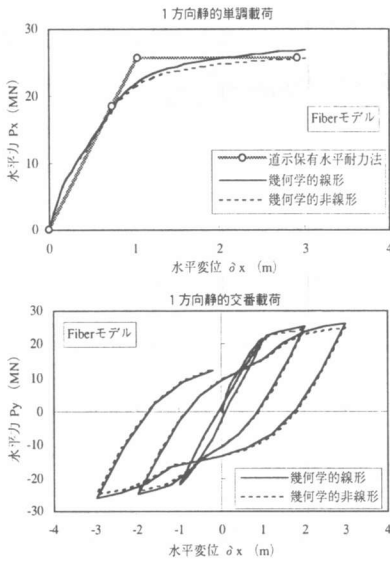


図-5 幾何学的非線形性の影響

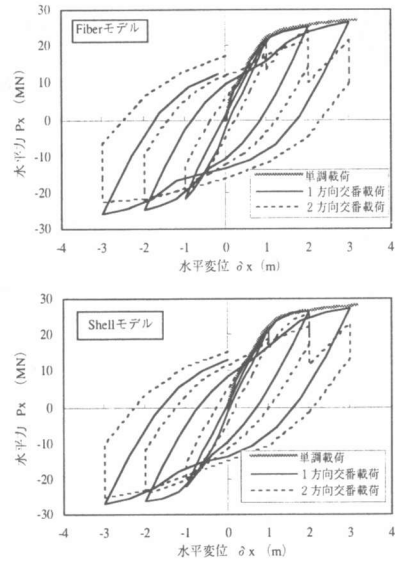


図-6 1方向と2方向载荷の比較

加えると、X方向の剛性低下が生じ、よってX方向の反力が下がる。これは主にX方向引張側の鉄筋がY方向の回転によって部分的に除荷されることによる。このこととは逆に荷重制御の場合を考えると、Y方向の荷重増加は、荷重を維持しようとするX方向の変位増加をもたらすことになる。

(3) FiberモデルとShellモデルの比較

図-7に1方向単調、1方向交番、および2方向交番静的解析ごとにFiberモデルとShellモデルの解析結果の比較を示す。どの解析ケースについても、Shellモデルの方がFiberモデルより若干大きな耐力を与えるが、両モデルはほぼ同じ結果を与えると考えられる。これは、

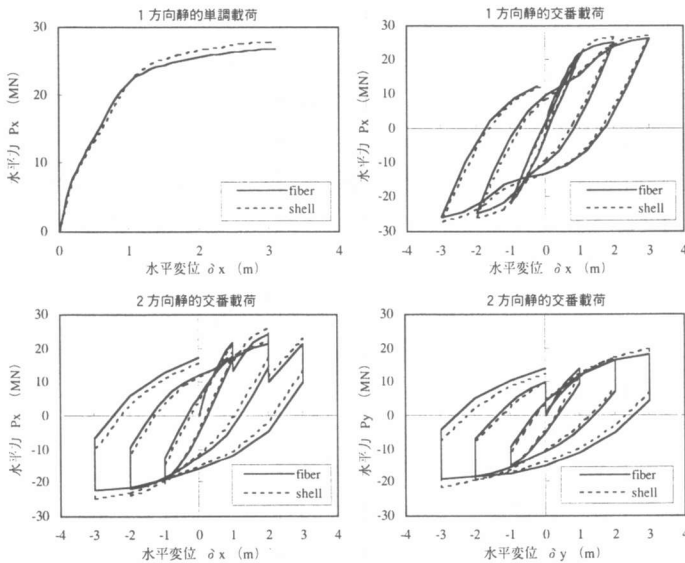
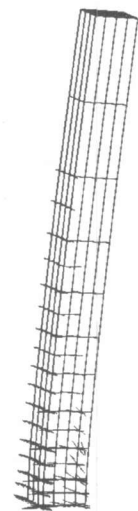


図-7 FiberモデルとShellモデルの比較



Shellモデル、 $\delta x=3.00\text{m}$ 時

図-8 ひび割れパターン

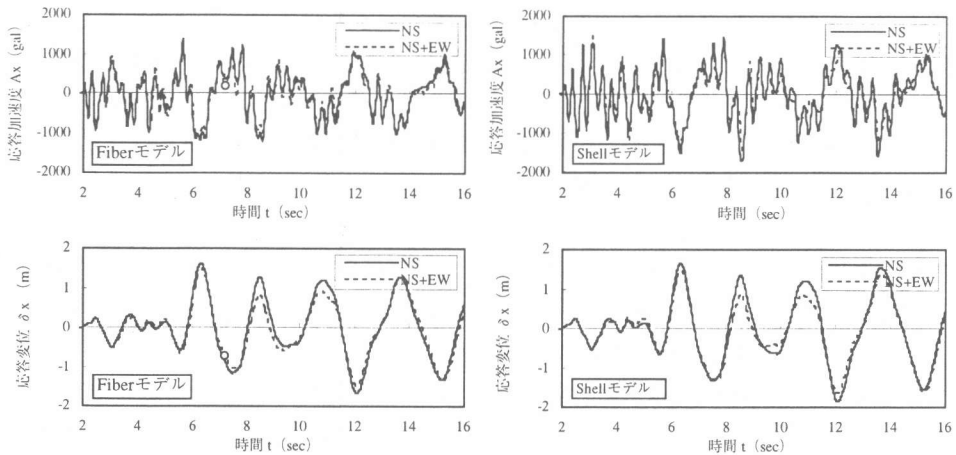


図-9 橋脚頭部の応答加速度と応答変位

本解析対象となるP3橋脚が非常に高く、橋脚基部から上部構造慣性力の作用位置（以下橋脚頭部と略す）までの距離と断面高さの比（以下せん断スパン比と呼ぶ）が10以上となり、図-8のひび割れ図に示すように曲げ挙動が卓越しているためである。このことから、中空断面の場合でもせん断スパン比が10以上であれば、非線形解析手法としてFiberモデルが十分適用できると判断される。

#### 4.2 動的解析

##### (1) 橋脚頭部の応答加速度と応答変位

図-9に地震入力としてJR鷹取駅波<sup>6)</sup>の加速度振幅を2倍にした動的解析結果を示す。左と右はそれぞれFiberモデルとShellモデル、上と下はそれぞれ橋脚頭部水平加速度と水平変位の時刻歴応答を示す。また、実線と破線はそれぞれ1方向(X方向、橋軸直角方向、N-S成分)のみと、2方向同時入力のX方向応答

成分を示す。1374galの最大入力加速度に対してFiberモデルとShellモデルではそれぞれ1393galと1704galの最大応答加速度が生じている。これはShellモデルの3次元的效果によるものと思われるが、履歴形状および応答変位の大きさその他では、FiberモデルとShellモデルの結果はほぼ一致している。また、最大1374galの地震入力にもかかわらず、応答塑性率が2以下となっている。なお、1方向地震入力に比

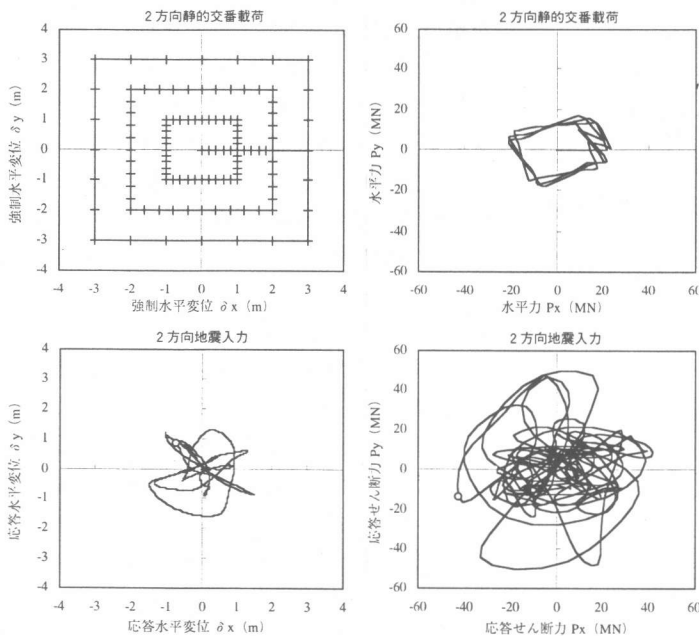


図-10 橋脚頭部の応答加速度と応答変位 (Fiberモデル)

べ、2方向同時入力の応答が幾分小さく、静的解析と同じ傾向となっている。

## (2) 橋脚基部の応答せん断力

図-10にFiberモデルによる2方向同時地震入力の場合の橋脚頭部応答変位と橋脚基部応答せん断力の履歴ループを示す。比較のため2方向静的交番荷重のものも併せて示した。静的解析では、橋脚頭部に2方向最大±3.0mの強制変位を加えて最大約±26MN(X方向)の水平力(=橋脚の地震時保有水平耐力)が発生した。それに対して、動的解析では、橋脚頭部の最大応答変位が2方向ともに約1.5mと小さいにもかかわらず、橋脚基部に2方向ともに40MN以上、最大約51MNの応答せん断力が生じている。この原因は、上載荷重に比べてかなり大きな自重を有する高橋脚の自重慣性力の影響にあると考えられる。

図-11に、図-9および図-10中の白丸で示す時刻のX方向の応答加速度と応答変位の橋脚高さ方向の分布を示す。橋脚下部では上部より大きな応答加速度が生じているため、全体の慣性力合力の作用位置は橋脚頭部よりかなり低く、合力の大きさは静解析の値(橋脚の地震時保有水平耐力)を大きく上回った。すなわち、本解析対象のような高橋脚の耐震設計においては、地震時保有水平耐力法では作用せん断力をかなり小さく見積もる可能性がある。道路橋示方書<sup>5)</sup>では、固有周期の長

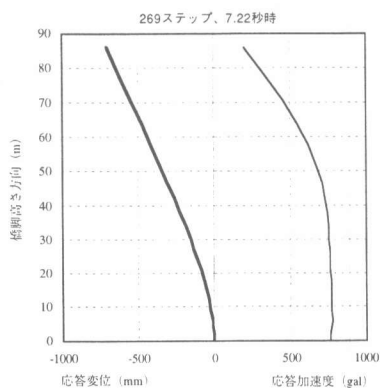


図-11 高橋脚の自重慣性力の影響

い橋(1.5秒以上)または橋脚高さが高い橋(30m以上)のものについて、動的解析により照査するのが望ましいとの解説はあるが、本研究の解析結果はそれを裏付けたものとなる。

## 5. まとめ

- 1) 高橋脚は曲げ挙動が卓越するため、中空断面でも3次元非線形解析におけるFiberモデルとShellモデルとの違いがほとんどない。
- 2) 高橋脚自重に対する上載荷重の比率が小さいため、幾何学的非線形の影響が小さい。
- 3) 静的解析も動的解析も1方向入力に比べ、多方向入力の応答は必ずしも大きくならない。
- 4) 通常の高さの橋脚に比べ、高橋脚自重の慣性力による影響が大きいため、橋脚基部の応答せん断力が上部構造慣性力の作用位置での静的水平荷重から得られたもの(地震時保有水平耐力)を大きく上回る可能性があり、高橋脚の耐震設計においては動的解析による照査が必要不可欠である。

## 参考文献

- 1) 土屋智史, 福浦尚之, 前川宏一: Fiber Modelを用いた3次元有限要素動的解析による多方向入力を受けるRC橋脚の応答, コンクリート工学協会「塑性域の繰返し劣化性状」に関するシンポジウム論文集, pp.359-368, 1998.8
- 2) 家村浩和, 高橋良和, 田中克直, 前堀伸平: 中空断面RC高橋脚の耐震性能に関する実験, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Volume2, pp2105-2110, 1998.11
- 3) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの構成則と非線形解析, 技報堂, 1991.5
- 4) 福浦尚之, 前川宏一: 非直交する独立4方向ひび割れを有する平面RC要素の空間平均化構成則, 土木学会論文集, No634/V-45, pp.177-195, 1999.11
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 平成8年12月
- 6) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 平成9年3月