

## 新猪名川大橋の耐震検討

保全施設部 保全技術課 米澤 康夫  
湾岸管理部 湾岸維持事務所 閑上 直浩

### 要 約

大阪池田線（延伸部）の新猪名川大橋は、橋長400m、支間長200mの長支間のPC斜張橋であるだけでなく、河川条件からその中間橋脚が橋軸に対し約24度の斜角を有しているため、地震時の挙動が複雑になる。本橋では、このような特性を考慮し、「新猪名川大橋設計指針・II耐震設計編」の供用期間中に相当高い確度で期待される地震動に対して部材設計を行うP1過程およびまれにでも発生する可能性がある大規模地震を想定した照査を行うP2過程、さらに「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」（以下、復旧仕様）により、耐震設計を実施した。

P1過程については、規定された照査用スペクトルに対し、応答スペクトル法を用いて、構造物の各部材の耐力および有害な変形が生じないことを確認し、P2過程については、規定された照査用スペクトルに適合する開北橋波を2方向同時入力し、軸力変動を考慮できる非線形時刻歴応答解析法を用いて解析を実施し、構造系が所要の変形性能を確保していることを確認した。

さらに、復旧仕様については、兵庫県南部地震時に新猪名川大橋付近で観測された地震波形を神戸海洋気象台波レベルに増幅して3方向同時入力し、軸力変動を考慮できる非線形時刻歴応答解析を行い、構造系が所要の変形性能を有していることを確認した。

キーワード：PC斜張橋、耐震検討、復旧仕様、非線形時刻歴応答解析、ファイバー要素

### まえがき

新猪名川大橋は、橋長400mの2径間連続PC斜張橋で、このタイプの橋梁として日本最大級である。また、中間橋脚が斜角を有するため、橋梁として動的挙動が複雑なものになる。

このため、昭和59～61年度の委員会における「新猪名川大橋設計指針・II耐震設計編」に基づいて、P1過程、P2過程の2段階の動的耐震設計を実施した。

さらに、本橋架橋地点で観測された地震波を神戸海洋気象台波レベルに増幅して3方向同時入力し、軸力変動を考慮できるファイバー要素を用いた非線形時刻歴応答解析により、兵庫県南部地震

クラスの地震動に耐えられることを確認した。

ここでは、これらの検討のうち、大規模地震を想定したP2過程に適合させた開北橋波および神戸海洋気象台波レベルに増幅した猪名川波を用いた耐震検討について報告する。

### 1. 耐震設計の基本方針

新猪名川大橋は、支間長200mの長支間のPC斜張橋であるだけでなく、主塔部橋脚が橋軸に対し、約24度の斜角を有するため、地震波の入力方向と直交する方向にも連成して振動し、地震時挙動が複雑になる。また主塔部は、RC構造としてはわが国でも例のない規模の高軸力を受ける長柱であ

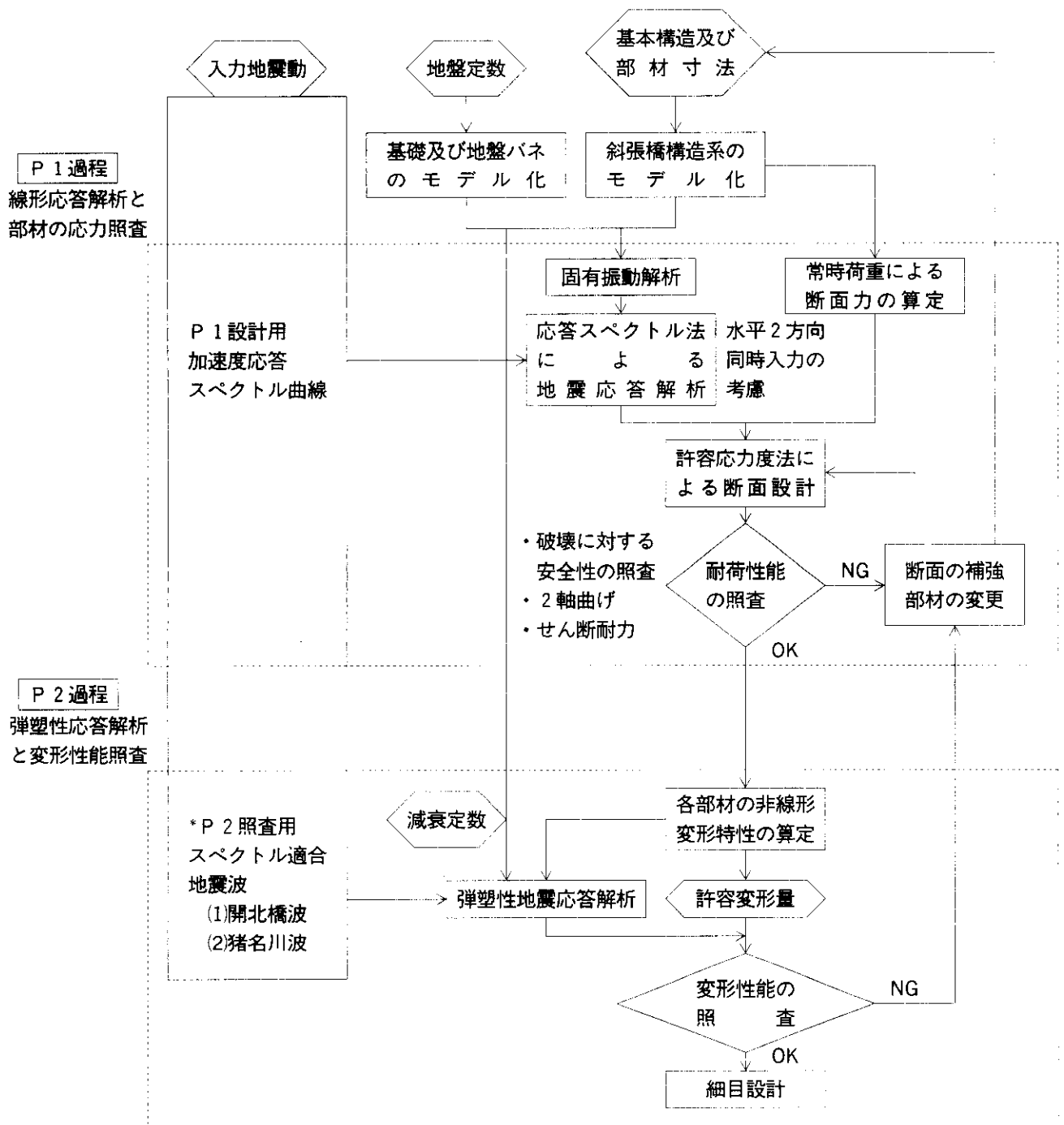


図-1 耐震設計の全体フロー

り、河川条件から形状寸法に厳しい制限を受ける橋脚とともに、耐震性の確保が重要な課題となる。

そこで、猪名川第2橋梁技術委員会(昭和59～61年度)において耐震照査方法に関する検討が行われ、以下の2段階耐震設計法により照査することを基本方針とした。

- ①P1過程：詳細設計用地震波（震度法レベル）
- ②P2過程：照査用地震波（大規模地震を想定）

また、平成7年1月17日の兵庫県南部地震に鑑み、直下型地震に対応するため、海洋型大規模地震動であるP2過程の見直しを図った。この地震において1種地盤で観測された地震動は以下の2種類である。

- ①神戸海洋気象台波（MAX NS方向818gal）
- ②猪名川波（MAX NS方向420gal）

ここでは、本橋架橋地点で観測され、本橋の直

下型地震特性を示していると考えられる猪名川波を、神戸海洋気象台波の最大加速度に合わせるように、各成分を約2倍(=818/420)に増幅させて耐震検討用直下型地震波とした。

図-1に本橋の耐震検討の全体フローを示す。

図-2にP1過程、P2過程と増幅させた猪名川波の加速度応答スペクトル曲線を示す。なお、地盤の減衰定数については、猪名川第2橋梁技術委員会が実施した地盤振動解析に基づき5%としている。

また、P1過程において固有振動解析を実施しており、固有振動モード(1次モード、2次モード)

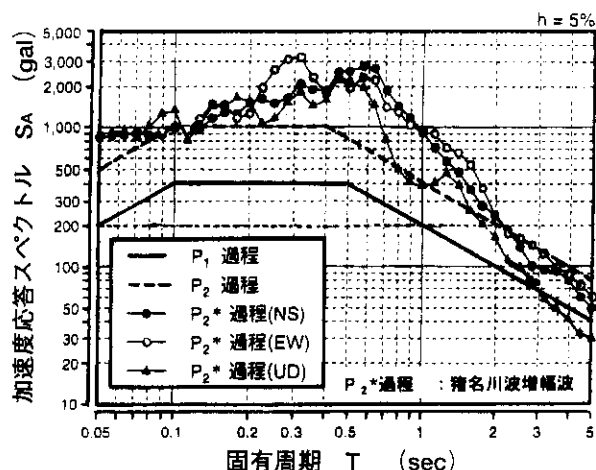


図-2 加速度応答スペクトル曲線

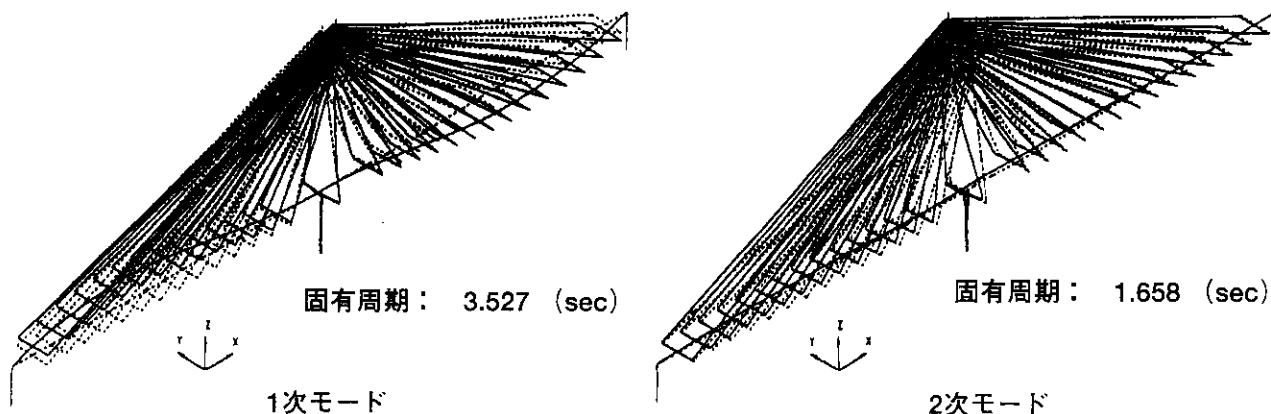


図-3 固有振動モード図

図-2)を本橋の振動特性の一例として図-3に示す。1次モードは、主塔の振動が橋軸方向で固有周期が最大となる振動モードであり、2次モードは、主塔の振動が橋軸直角方向で固有周期が最大となる振動モードである。

## 2. 時刻歴応答解析

### 2-1 解析手法

大規模地震動における変形性能の照査では、部材の弾塑性挙動を扱うことになり、材料の非線形性を考慮した解析が必要である。

また、本橋は高次不静定構造物であり、特に主塔が逆Y型で構成されトラスになっていることから、地震時には主塔に変動軸力が作用すると考えられる。変動軸力は、部材じん性に対する影響が大きく、これを評価することは適切な耐震評価を

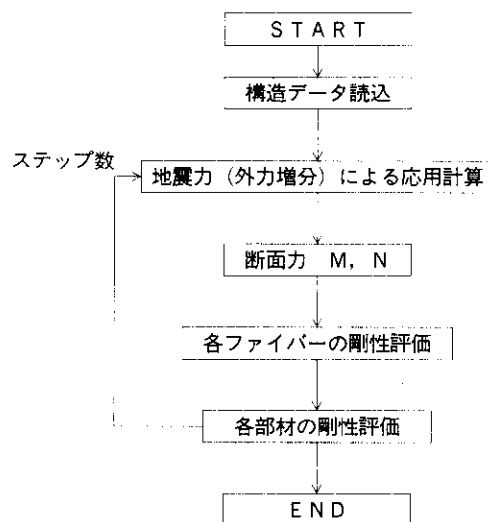


図-4 解析フロー

行う上で重要となる。そこで、変動軸力が大きい部材については、材料の非線形性に基づくコンクリート部材の曲げ非線形性を動的解析に取り入れた、軸力変動が考慮可能な弾塑性時刻歴応答解析

により検討を行った。

弾塑性時刻歴応答解析は、部材の剛性が逐次変化（劣化）していくため、各応力評価点で応力度を算定し、応力-ひずみ関係から劣化剛性を評価し、各応力評価点の剛性を積分することで、新たな部材剛性を求めていくことにより実施した。図-4に解析フローを示す。

各時刻刻みにおける部材の非線形剛性の算定には、軸力変動の影響を考慮するため、応力~ひずみレベルでの材料非線形性を評価するファイバーモデルを用いた。すなわち、各部材の断面をその高さ方向に細分割し、各分割要素（ファイバー）ごとに部材軸方向に積分することにより部材の剛性を算定した。材料の応力~ひずみ関係には軟化域および帯鉄筋の拘束を考慮した履歴特性を用いており、コンクリートファイバーの応力~ひずみ関係は修正六車一渡部モデル、鉄筋ファイバーの応力~ひずみ関係は、Ristic, Dの提案モデルによっている。図-5に本解析の基本概念である複合非線形の評価法概念図を示す。なお、複合非線形とは、材料非線形と作用荷重による変形を非線

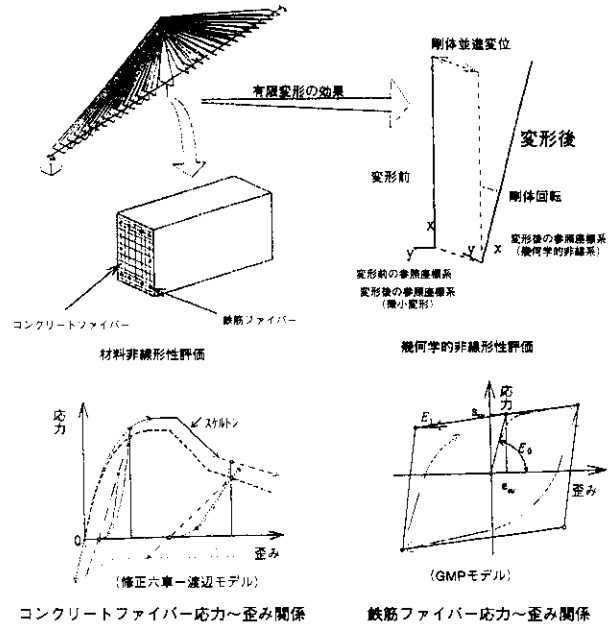


図-5 複合非線形の評価法概念図

形で評価する幾何学的非線形の両非線形を意味する。

2-2 解析モデル

本解析に用いるモデルは、材料非線形を考慮した3次元骨組モデルを使用した。図-6に解析モ

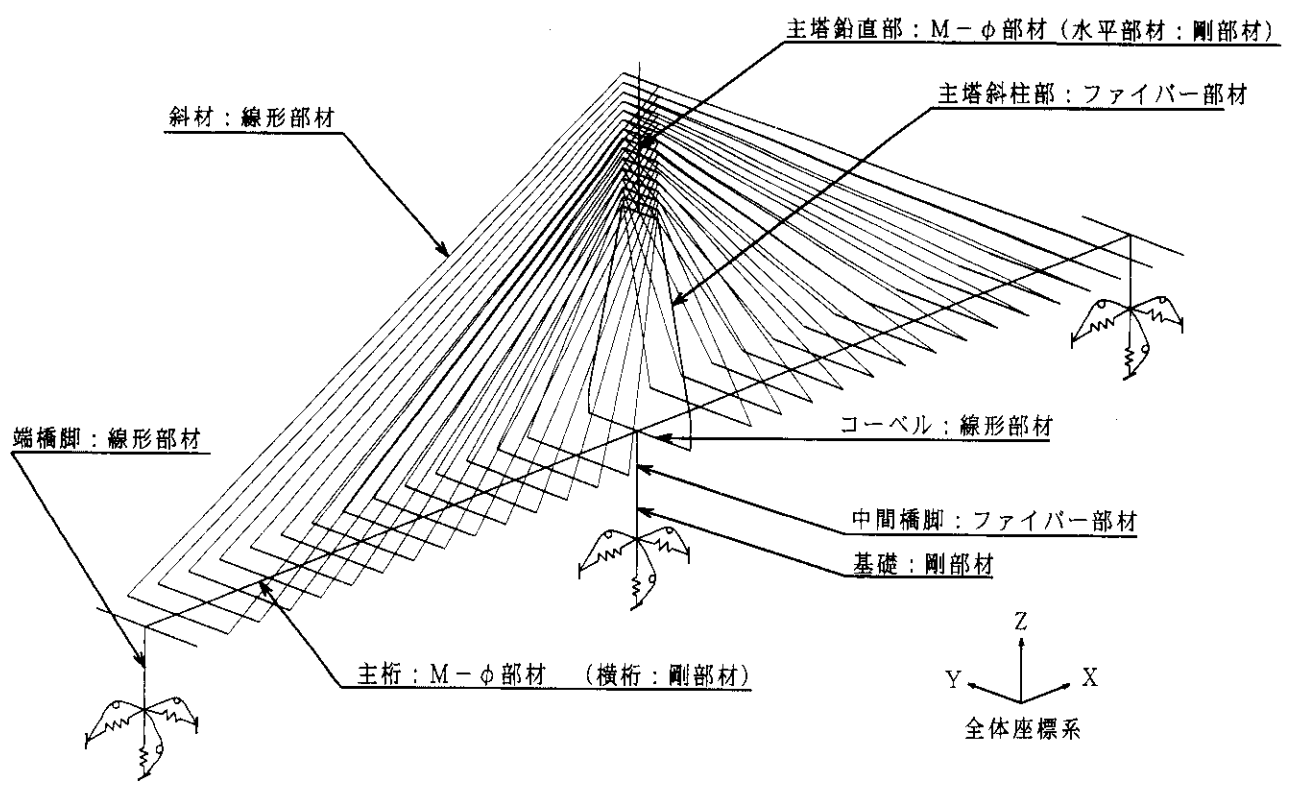


図-6 解析モデル図

デル図を示す。

なお、地盤は軸バネおよび回転バネにより連結されたバネ部材とし、軸力の変動が比較的小さいと考えられる主塔鉛直部および主桁はM-φ部材、斜材およびコーベルについては線形部材とした。なお、前述したファイバーモデルは、軸力の変動を考慮できるほか、曲げ-軸力の連成などを自然に評価できるという特徴を有しており、主塔斜柱部に加え、2軸曲げの発生が予想される中間橋脚もファイバー部材として評価した。

### 2-3 入力地震動

入力地震動は以下の2種類を用いた。

#### (1) 開北橋波

「新猪名川大橋設計指針」<sup>1)</sup>に示されているP2照査用応答スペクトルに適合させた開北橋波を、橋軸方向、橋軸直角方向の2成分同一波同時入力した。

#### (2) 猪名川波

兵庫県南部地震時に本橋架橋地点で観測された地震波を神戸海洋气象台で観測された地震波レベルに増幅した地震波のNS, EW, UD波を3成分同時入力した。図-7に開北橋波、図-8に猪名川波の入力波形を示す。

### 2-4 減衰

非線形時刻歴解析では、部材の履歴特性により繰り返し载荷の剛性劣化を考慮することで材料非線形による減衰（内部減衰および履歴減衰）を考慮する必要がある。本検討では、「振動実験からみた斜張橋の振動特性」<sup>2)</sup>より、構造減衰としてレイレー型減衰定数2%とした。

## 3. 照査方法

### 3-1 変形性能の照査

変形性能の照査は、弾塑性時刻歴応答解析で求められた曲率が、その許容値を越えないことを確認することにより行った。部材断面の曲率の許容値φ<sub>a</sub>は、「新猪名川大橋設計指針・II耐震設計編」<sup>1)</sup>により、鉄筋降伏点曲率φ<sub>y</sub>から終局曲率φ<sub>u</sub>に至る範囲の2/3の値とした。なお、φ<sub>y</sub>および

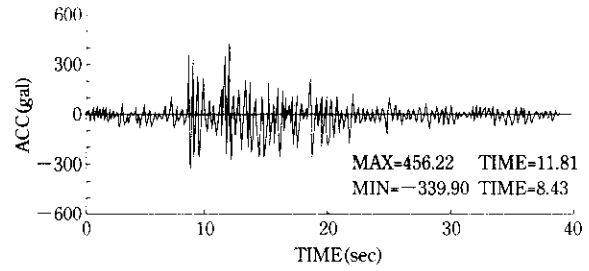


図-7 開北橋波

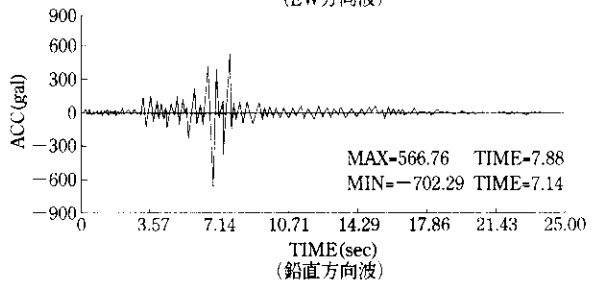
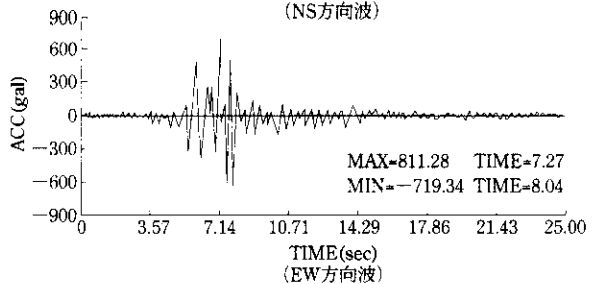
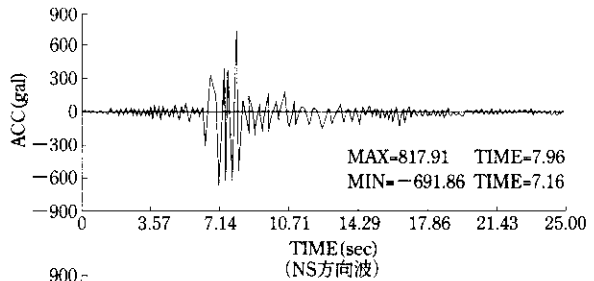


図-8 猪名川波

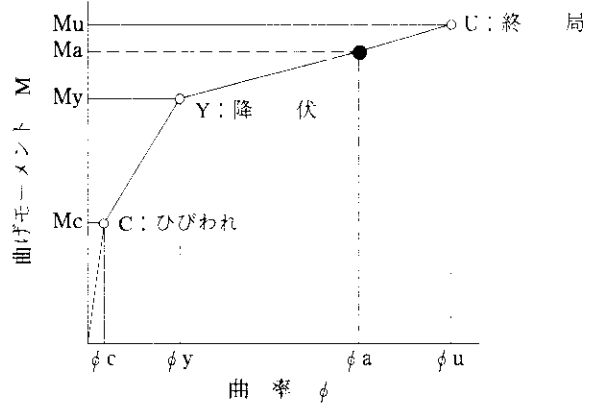


図-9 M-φ曲線

$\phi_u$ の算出は、曲率が最大および最小となる軸力を固定して行った。また、 $\phi_u$ はコンクリートの縁ひずみが終局ひずみ(=0.0035)に達した時点とした。

### 3-2 2軸曲げの照査

発生断面力は、軸力N、せん断 $S_z$ 、 $S_y$ 、曲げモーメント $M_y$ 、 $M_z$ 、ねじりモーメント $M_x$ の6種類ある。同時発生する曲げを考慮するため、2軸曲げの検討として、発生軸力Nを一定としたときの鉄筋が降伏点に達したときとコンクリートが破壊ひずみに達したときの $M_z$ - $M_y$ 曲線を算出し、発生曲げモーメント $M_y$ 、 $M_z$ がコンクリート破壊時範囲内におさまっているかを確認した。なお、 $M_z$ - $M_y$ 曲線を算出時の応力~ひずみ曲線は道路橋ボ方書(平成6年)に準拠した。

## 4. 照査結果

### 4-1 時刻歴応答解析結果

非線形時刻歴応答解析による開北橋波および猪名川波による主塔、橋脚における曲げモーメントの最大応答値を図-10に示す。結果を概観すると、 $M_y$ はいずれの検討断面でも最大応答値は猪名川波の方が大きい。一方、 $M_z$ では両波に対する最大応答値の差は $M_y$ に比べ小さくなっており、橋脚位置では開北橋波の方が上回っている断面もみられる。また、 $M_y$ における主塔鉛直部や $M_z$ における主塔斜柱部では、最大応答値が最大となる断面が両波で異なっている。これらは、両波の特性と入力方法の違いによるものと考えられる。

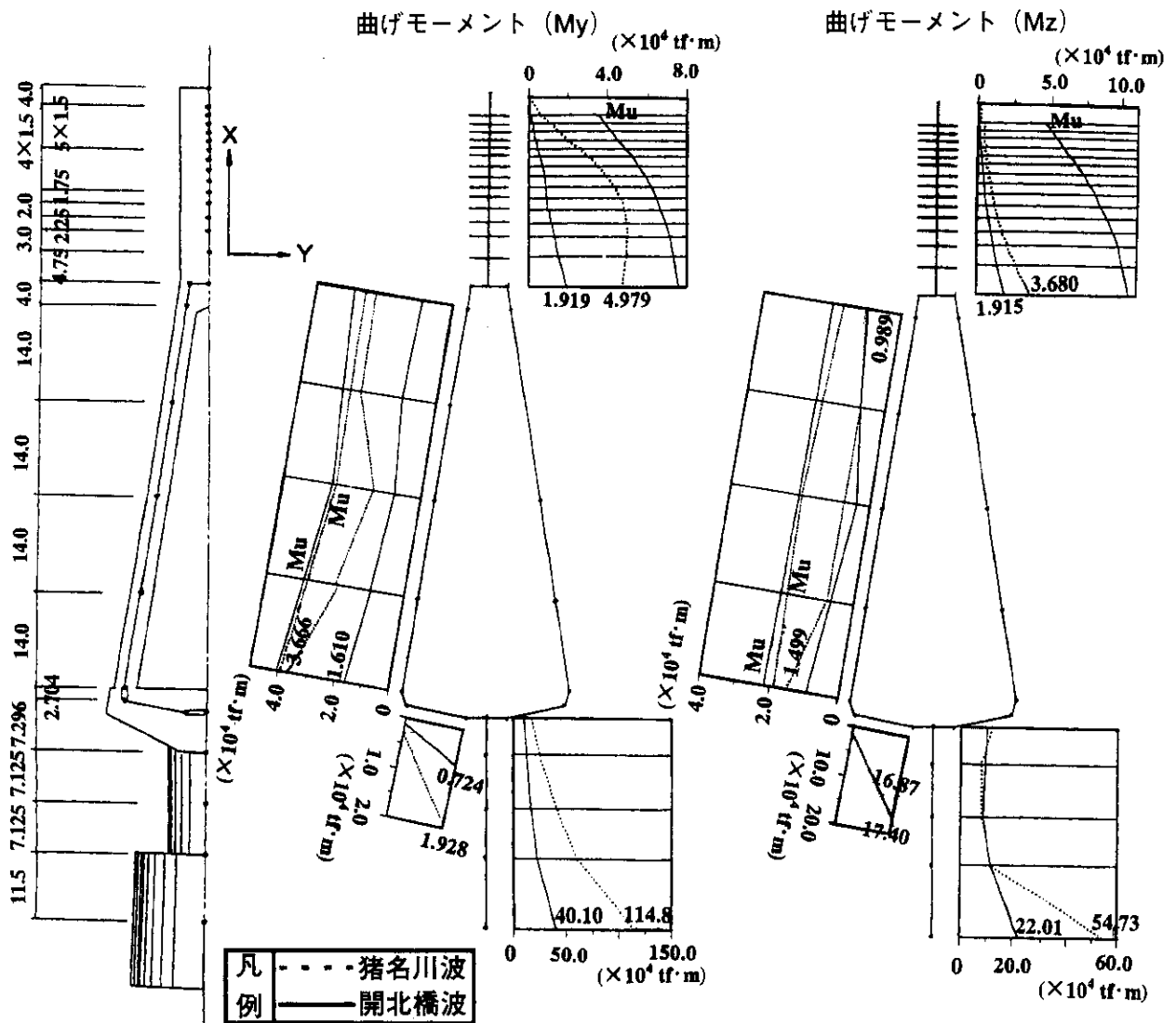


図-10 最大応答値

4-2 変形性能の検討結果

図-11に主塔下端の開北橋波と猪名川波のM- $\phi$ 履歴曲線を示し、図-12に橋脚下端の開北橋波と猪名川波のM- $\phi$ 履歴曲線を示す。

解析結果によると、主塔において、開北橋波および猪名川波いずれに対しても、許容曲率 $\phi_a$ 内にあり、耐震安全性が確保されていることが確認された。一方、橋脚下端において、開北橋波および

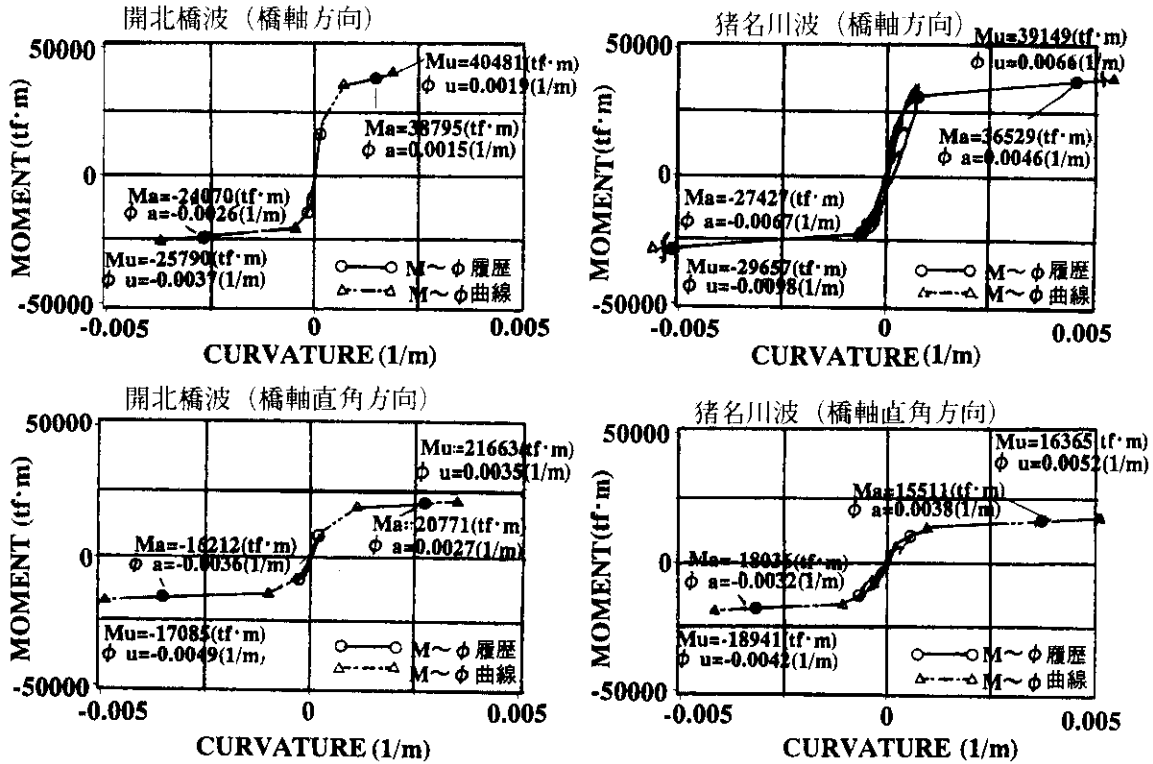


図-11 主塔下端のM- $\phi$ 履歴曲線

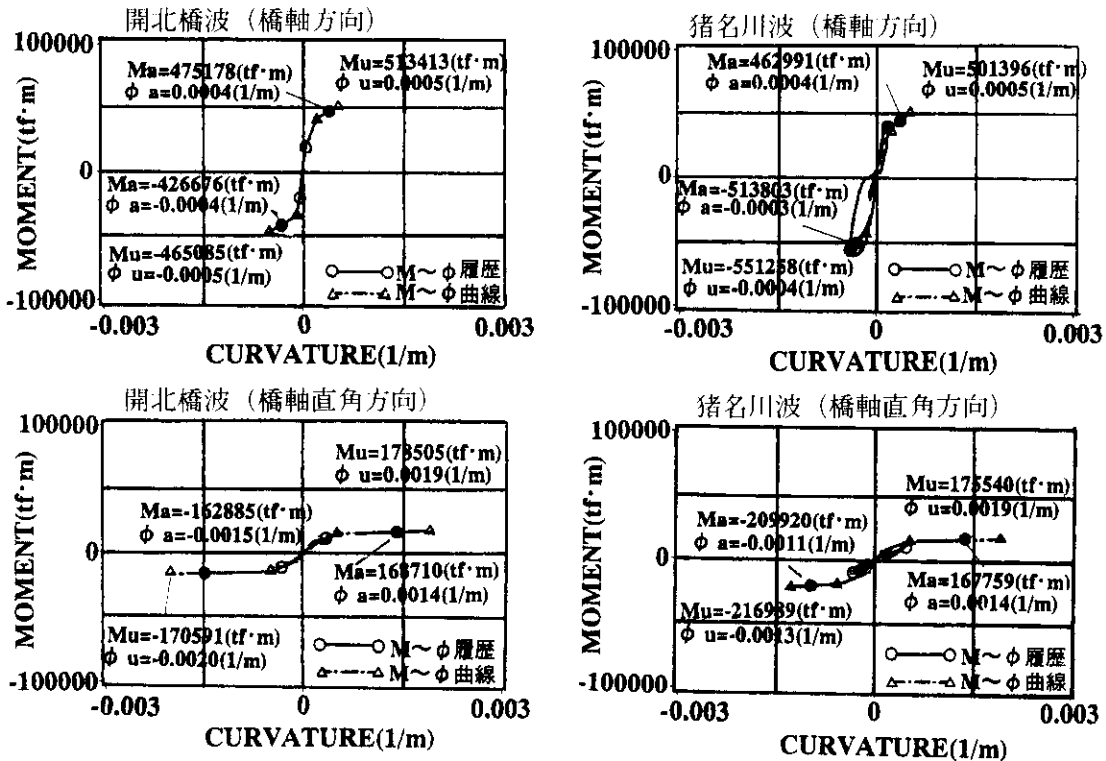


図-12 橋脚下端のM- $\phi$ 履歴曲線

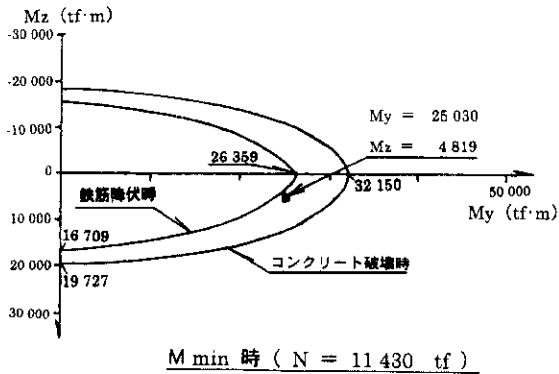
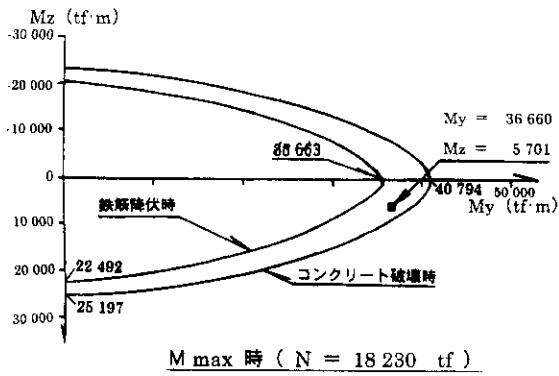


図 13 主塔下端の2軸曲げ結果

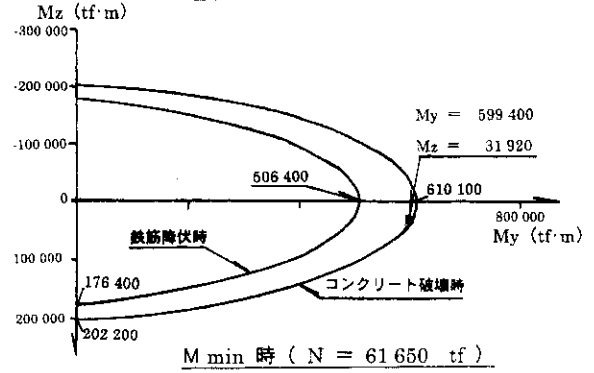
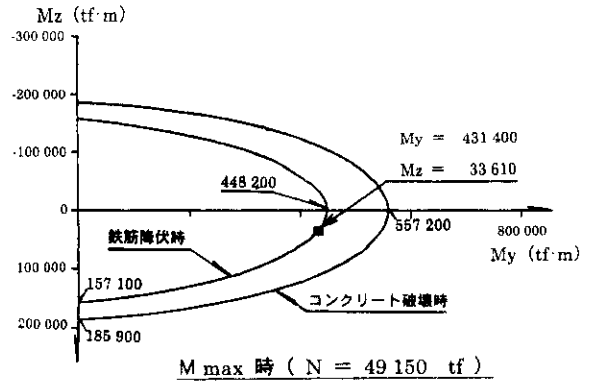


図 14 橋脚下端の2軸曲げ結果

猪名川波の橋軸直角方向に対しては、許容曲率 $\phi_a$ を満足し、猪名川波の橋軸方向に対しては、許容曲率は越えているが、終局曲率 $\phi_u$ は満足している。なお、猪名川波の橋軸方向については、帯鉄筋の有効長を、安全側を考慮して長手方向(約18m)としM- $\phi$ 履歴曲線を算出している。新道示を適用すると帯鉄筋の有効長が約5.5mとなるため、 $\phi_a=0.0024$ となり、許容曲率 $\phi_a$ を満足することになる。

#### 4-3 2軸曲げの検討結果

最も厳しい条件となる猪名川波3方向同時入力で、主塔および橋脚の2軸曲げ耐力を検討した。

図-13に主塔下端の曲げ最大時および最小時の検討結果、図-14に橋脚下端の曲げ最大時および最小時の検討結果を示す。これより、主塔および橋脚のいずれも2軸曲げ耐力を満足している。

#### あとがき

本報ではファイバー要素を用いた3次元複合非線形動的解析プログラムを用いて、新猪名川大橋の耐震検討を行い、その概要を報告した。

本検討は、兵庫県南部地震直後の道路橋示方書改訂前に実施されたものであり、解析条件等の設定において現行の示方書に比べて厳しい部分も少なくない。本橋は、このような厳しい条件で、その耐震安全性が確認された。重要構造物での巨大地震に対する耐震検討では、現在においても、解析条件の設定や解析手法等について議論の余地が残されており、今後さらなる検討が必要であろう。

最後に、新猪名川大橋の耐震検討にあたって貴重なご助言、ご指導をいただきました関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団, (財)阪神高速道路管理技術センター: 猪名川第2橋梁技術委員会報告書, 1987.
- 2) 日本道路協会: 振動実験からみた斜張橋の振動特性: 耐震設計分科会報告書, 1992.