

解析モデルの違いによる2軸曲げの影響について

為広 尚起¹・森 敦²・沖見 芳秀³

¹正会員 株式会社構造計画研究所 解析営業部（〒164 東京都中野区本町四丁目 38-13）

²正会員 工博 日本技術開発株式会社 地震防災部（〒164 東京都中野区本町五丁目 33-11）

³正会員 鹿島建設株式会社 情報システム部（〒107 東京都港区元赤坂一丁目 2-7）

1. はじめに

曲率半径の小さい曲線橋や偏心橋脚を有する橋梁等では、3次元解析モデルによる検討が実施されるケースが多い。加えて、構造物に作用する地震力の方向を限定した検討が合理的でない場合は、その橋梁の形状等の特性に応じ地震力の入力方向を変えて、複数ケースの解析検討が実施されることもある。このような外力条件に明確な方向性を設定できない3次元解析の場合には、橋脚のモーメントが実際に発生する方向での塑性化判定（2方向の合成モーメントによる塑性化判定）が本来行われるべきであり、通常行われている断面主軸別の独立した塑性化判定を用いることは、必ずしも適切に橋脚の動的挙動を評価していない可能性もある。これは一般的に「2軸曲げ」問題として知られている。

本論文は、鉄筋コンクリート橋脚の非線形動的解析を実施し、2軸曲げを考慮した場合としない場合の比較、および2軸曲げ評価手法の違いによる影響について考察を行うものである。

2. 2軸曲げの評価手法

2軸曲げを評価する解析方法の代表的なものとして、ファイバーモデルを用いる手法と塑性論に基づく手法の二つが挙げられる。前者は部材内のコンクリートや鉄筋などの構成要素の微小部分（ファイバー）毎に応力-歪み構成則を与え、これにより弾塑性性を考慮するもので、2軸曲げ効果は自ずと反映される。この点でのファイバーモデルの有効性は既に認知されていることから、ここでの評価手法に関する検討は後者の塑性論に基づく手法を中心に行う。

塑性論に基づく手法は、骨組み解析のM-φまたはM-θ関係における2軸曲げ評価手法として提案され¹⁾、さらに改良が加えられて建築の柱部材への適合性が報告されている²⁾手法である。この手法では3次元はり要素

内の弾塑性評価位置毎に、図-1に示す様なMy-Mz平面上の2軸曲げ相関曲線（ひび割れ曲線と降伏曲線）を設定する。これらは主軸別に設定されたひび割れモーメントMc、降伏モーメントMyを包絡する曲線で、従来から式(1)のような方程式が採用されてきた。

$$\left(\frac{m_y}{M_y}\right)^a + \left(\frac{m_z}{M_z}\right)^a = 1.0 \quad (1)$$

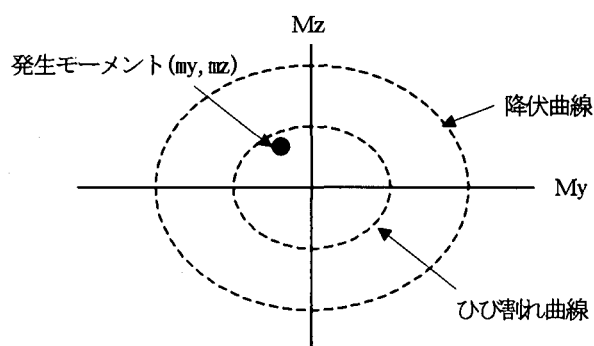


図-1 2軸曲げ相関曲線

式(1)中My, Mzは2方向の曲げ耐力で、ひび割れ曲線の場合2方向のMc、降伏曲線の場合は2方向のMyである。一般的に式(1)は補間曲線の次数a=2.0、すなわち2方向の曲げ耐力を半径とする楕円の方程式として適用されてきた。この曲線と部材内の評価位置に発生している2方向モーメント(my, mz)の位置関係を、解析の各ステップでチェックし、点(my, mz)がひび割れ曲線の内側にある場合は「弾性」、ひび割れ曲線の外側かつ降伏曲線の内側にある場合は「ひび割れ」、降伏曲線の外側にある場合は「降伏」の各判定を行い、判定に応じて2方向の曲げ剛性を同時に変化させる。点(my, mz)が曲線に内側から到達し、さらに外側に向かって進行している状況では、塑性論に規定される硬化則³⁾に従って、点(my, mz)が曲線上に乗るように、曲線を移動あるいは膨張して点(my, mz)に追従させる。

この手法を橋梁の橋脚に適用するに当たっては、主と

して下記の点に関する検討がこれまでのところ十分に行われていない。したがって、これらを念頭においた考察を行う必要がある。

- ①橋脚断面形状としては一般的な、強軸・弱軸の差が大きい長方形断面への適合性。
- ②橋脚内に発生する2方向モーメント (M_y , M_z) の履歴曲線 (以下MM履歴と記す) が規則性のないランダムなものである場合の適合性 (橋脚の主軸に沿わない方向に地震波が入力された場合、比較的単純な構造形式でもMM履歴はランダムなものとなる可能性が高い)。
- ③式(1)における a 値と剛性低下の与え方。

3. 解析モデルと条件

2軸曲げの影響の現われ方と評価手法の検討を行う目的で、同一対象構造物について3次元のファイバーモデルと骨組みモデルを用意し、同様の解析条件下で動的非線形解析を実施した。以下に解析モデルと条件を示す。

(1) 対象構造物

検討対象構造物としては図-2に示される矩形のRC橋脚の基本例題を選択した⁴⁾。解析モデルは図-3のような3次元1本棒モデルである。

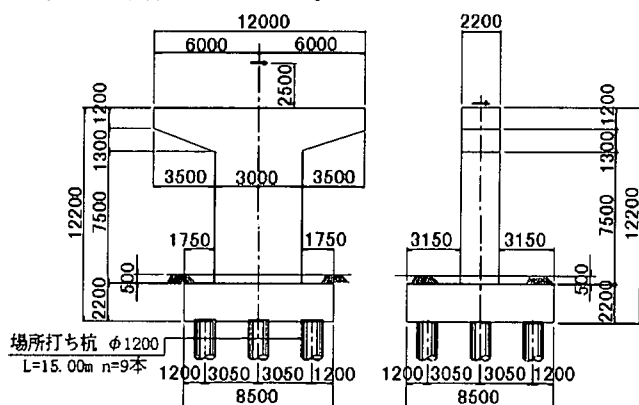


図-2 対象構造物

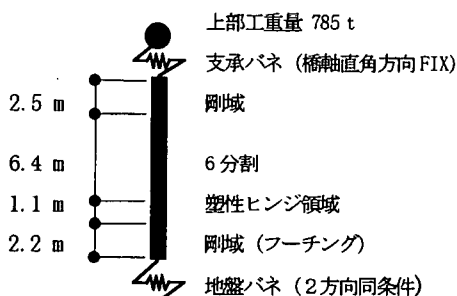


図-3 解析モデル図

尚、この例題については橋脚の弱軸周りの曲げを M_y 、強軸周りの曲げを M_z と呼ぶことにする。

(2) ファイバー部材のモデル化

断面を拘束コンクリート部と非拘束コンクリート部分け、前者を 30×60 分割、後者を3層にそれぞれ分割

した。鉄筋に関しては側方筋を含め全てモデル化した。コンクリートの応力-歪み曲線のスケルトンは、道路橋示方書耐震設計編に示されたコンクリートの応力-歪み曲線とした。履歴ルールは修正六車-渡部モデルである。鉄筋の応力-歪み曲線のスケルトンは、バイリニアで第2勾配は初期勾配の $1/1000$ とした。履歴ループはGMPモデルとした。

(3) 骨組み部材のモデル化

骨組みモデルの場合、2軸曲げを考慮する場合も、しない場合も、解析の与条件として設定するのは、2方向の M - ϕ 関係である (文献⁴⁾ 参照)。弾塑性履歴則としては武田型を用いている。前述した式(1)における a の値は、試解析の結果、 $a=2.0$ ではファイバーの解析結果と比較して大幅な耐力の過小評価となることが確認された。これについてはさらに検討を要するが、本論文では $a=6.0$ の解析結果について報告する。

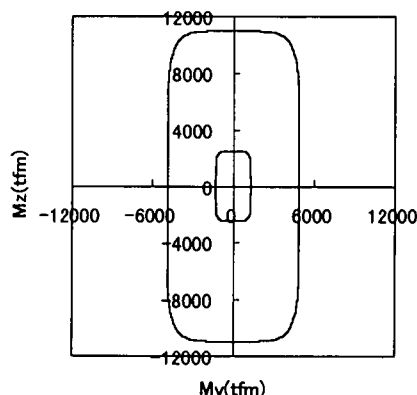


図-4 相関曲線の形状

(4) 解析条件

固有値解析結果に基づき、1次 (周期 1.29 秒) と3次 (0.236 秒) のモード減衰 (3.0%、10.2%) についてレーリー型減衰を定義した。地震波はII種地盤タイプIIの '1995 OGAS FUKIAI N27W' の主要動を含む 20 秒間を使用し、橋脚の断面主軸に対して 45° 方向に入力した。動的解析はニューマーク β 法による直接積分法である。

4. 解析結果

(1) ファイバー/2軸曲げ非考慮骨組の比較

ファイバーモデルの解析結果と、2軸曲げを考慮しない骨組みモデルの解析結果を図-5~8に示す。

波形図、履歴図とも太線がファイバーモデルの結果、細線が2軸曲げを考慮しない骨組み解析の結果である。

当初予測された通り、MM履歴には規則性のないランダムな形状が見られた。このような一般的な形状・構造であっても、橋脚の断面主軸に沿わない方向に地震波が入力された場合は振動性状が複雑になり、主軸別に投影された M や ϕ での塑性化判定では、実際の塑性化挙動と離れてくることが解る。

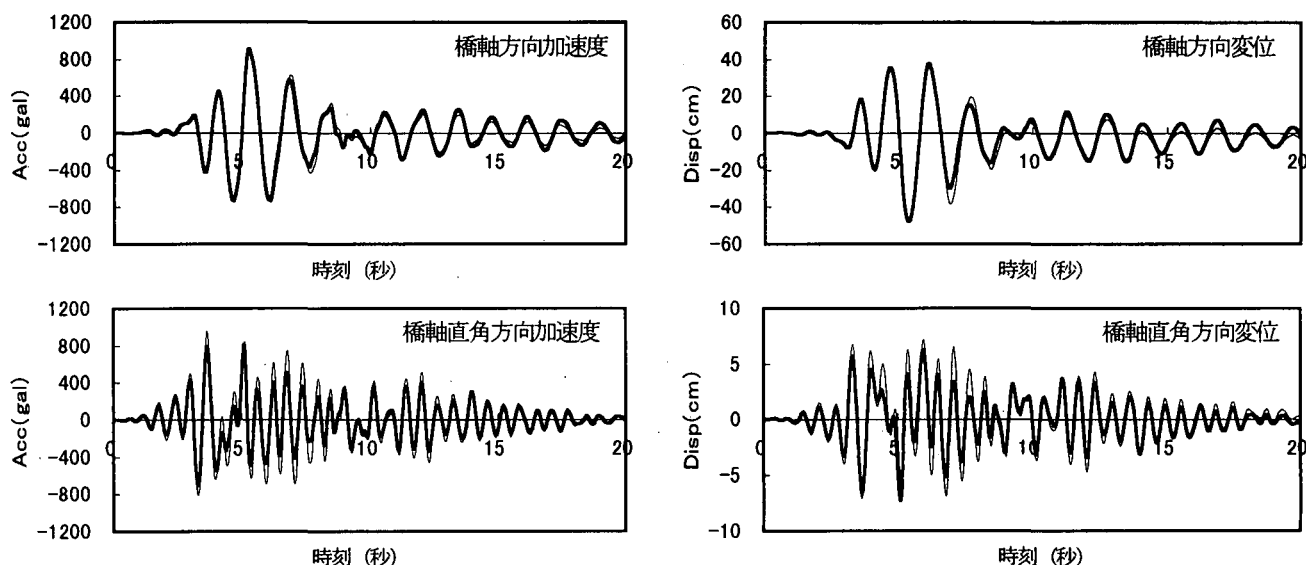


図-10 上部慣性力作用位置 応答波形 (ファイバー/2軸考慮)

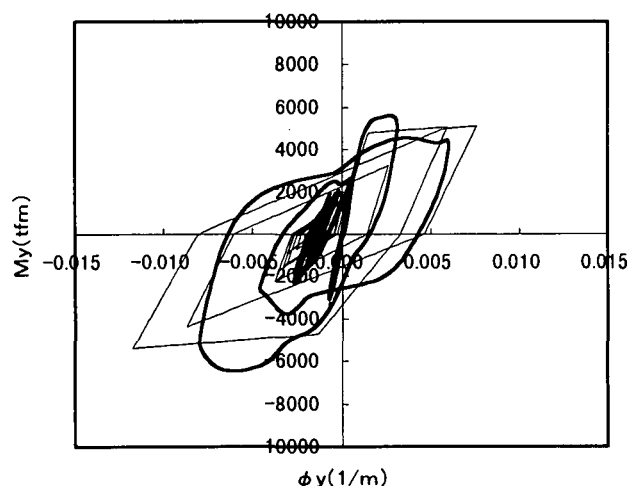


図-11 橋脚基部My- ϕ_y 履歴 (ファイバー/2軸考慮)

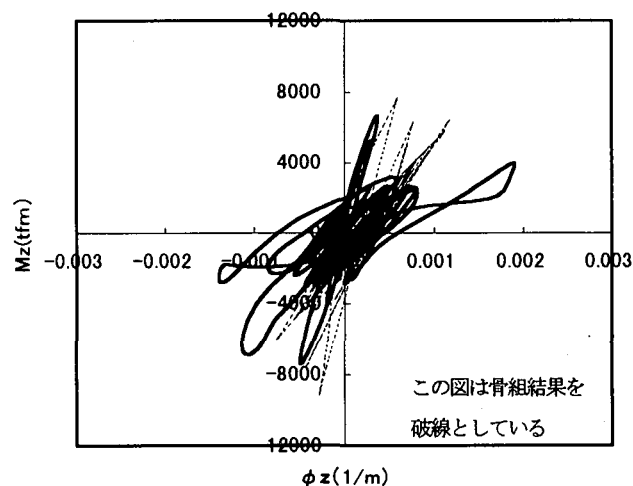


図-12 橋脚基部Mz- ϕ_z 履歴 (ファイバー/2軸考慮)

5. 考 察

評価手法によらず2軸曲げ効果が考慮された解析では、不規則なMM履歴と関連して、橋脚の主軸別に投影したM- ϕ 履歴ループも整形にはならず、途中から傾向が逐次変化している。特に橋軸(強軸)周りのMz- ϕ_z 履歴にこの傾向が著しい。2軸曲げを考慮しない解析では、両方向とも一定の傾向で整形な弾塑性履歴ループが描かれており、これにより最大断面力の発生状況や塑性化によるエネルギー吸収量などの点で性状に違いが出ている。

骨組みモデルは、塑性論に基づく手法により2軸曲げを考慮することで、ファイバーモデルの結果におおむね近い傾向を見せている。この点で、2で課題として挙げた①②についてはある程度の妥当性および適合性が確認されたものと考えられる。今後さらに他条件での解析や実験との対比を行い、2の③に示した項目を始めとする諸条件の取り扱い方について実用化に向けた検討を行っていく必要がある。

6. おわりに

以上、橋脚構造における2軸曲げの影響とその評価手法に関する考察を行った。尚、ここで報告した内容は、

(財)土木研究センター内に設置された耐震ソフトウェアに関する研究委員会(座長:川島一彦東京工業大学教授)で検討されたものの一部である。

参考文献

- 1) 滝沢春男: Tri-Linear Modelの2軸曲げ問題への拡張、昭和48年度日本建築学会大会(東北)学術講演梗概集
- 2) 福沢栄治、磯崎 治、高橋元美: 柱の変動軸力と2軸曲げモーメントを考慮したRC造立体骨組の弾塑性地震応答解析、日本建築学会構造系論文報告集 第441号、1992年11月
- 3) 山田嘉昭: 塑性・粘弾性、培風館
- 4) 平成8年度耐震ソフトウェアに関する研究委員会報告書、(財)土木研究センター、1997年5月

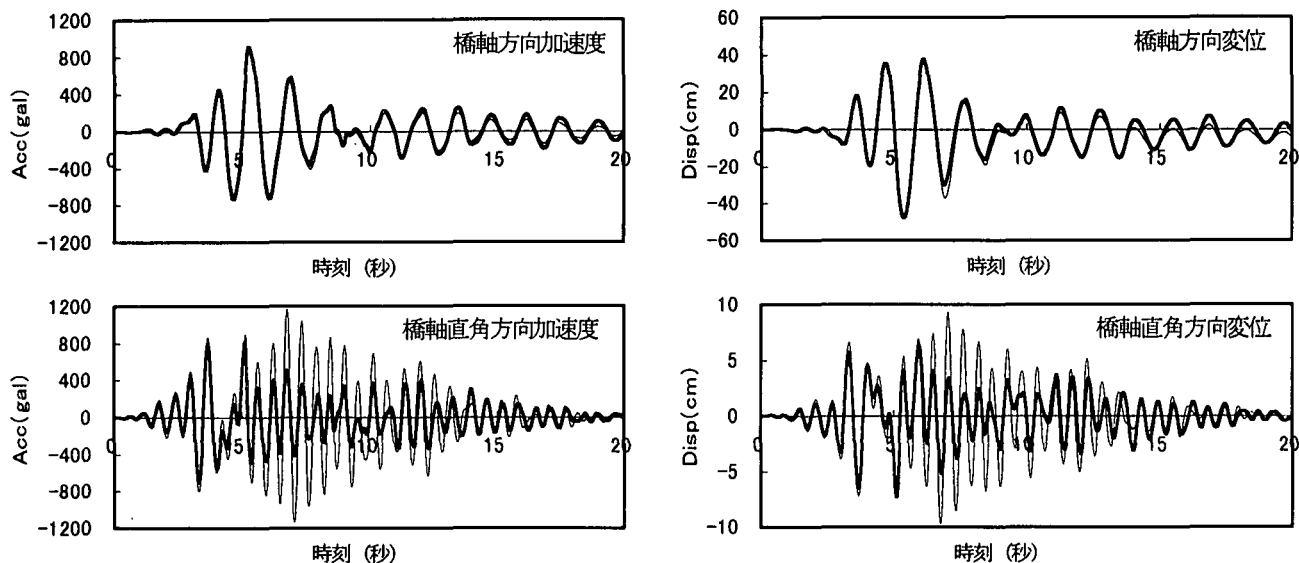


図-5 上部工慣性力作用位置 応答波形 (ファイバー/2 軸非考慮)

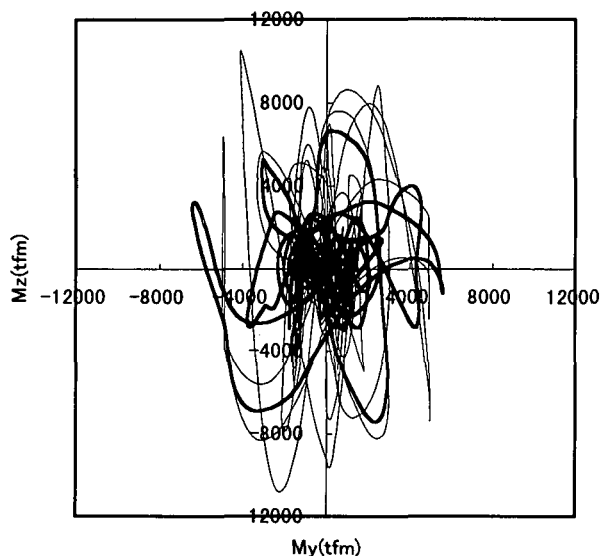


図-6 橋脚基部My-Mz履歴 (ファイバー/2 軸非考慮)

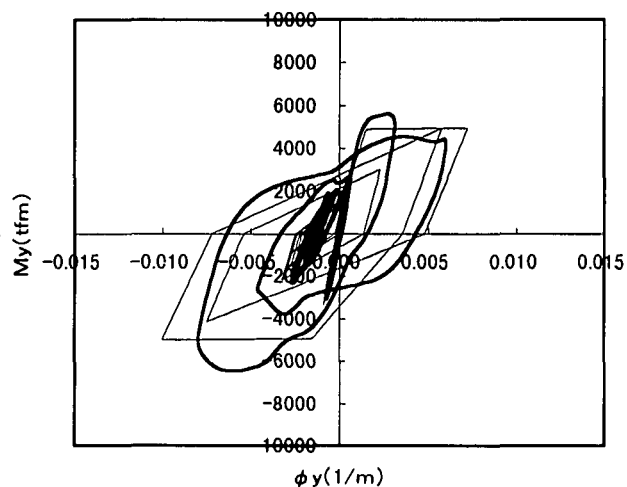


図-7 橋脚基部My- ϕ_y 履歴 (ファイバー/2 軸非考慮)

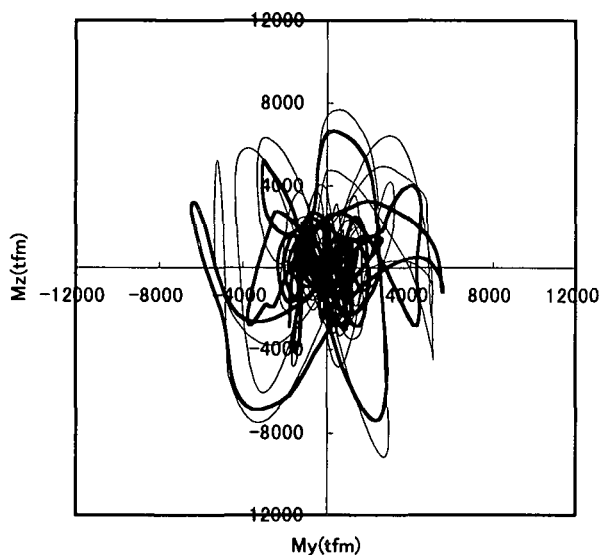


図-9 橋脚基部My-Mz履歴 (ファイバー/2 軸考慮)

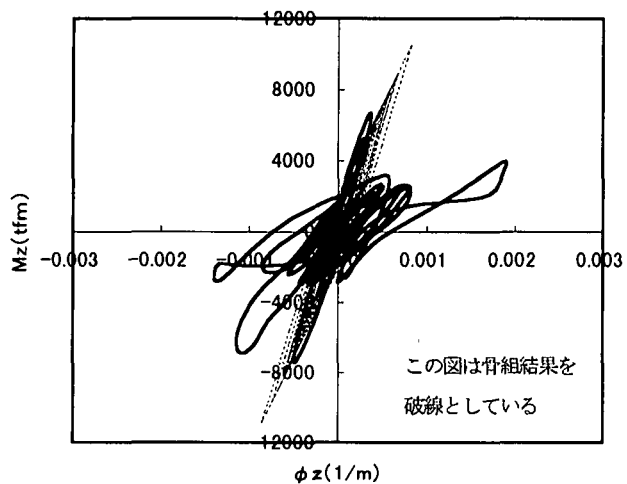


図-8 橋脚基部Mz- ϕ_z 履歴 (ファイバー/2 軸非考慮)

(2) ファイバー/2 軸曲げ考慮骨組の比較

2 軸曲げを考慮した骨組みモデルの解析結果を、(1)と同じファイバーモデルとの対比で図-9~12 に示す。

波形図、履歴図とも太線がファイバーモデルの結果、細線が2 軸曲げを考慮した骨組み解析の結果である。