

I-25 鉄筋コンクリート橋脚の地震時非線形振動応答解析

北見工業大学 学生員 小 倉 裕 介
 北見工業大学 正 員 三 上 修 一
 北見工業大学 正 員 大 島 俊 之

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚の振動解析においては、その構成材料の力学的特性や破壊にいたるプロセスの複雑さから動的解析により安定性の検討を行うことが重要である。昨年1月に発生した釧路沖地震では、鉄筋コンクリート橋脚の主鉄筋段落とし部における破壊が報告されている¹⁾が、どの様にして橋脚が耐力低下を起こしコンクリートの圧壊や鉄筋の座屈を伴う破壊に至るのか、またその過程で橋脚の振動にどのように影響を及ぼすかもまだ明らかになっていない。構造物の動的な振動解析において解決すべき問題は先に述べた構造物の弾塑性挙動の他に地盤の動的特性、構造物と地盤との動的相互作用などがあり、これらは全て非線形振動問題として取り扱われる。そこで本研究では鉄筋コンクリート橋脚を離散質量系の骨組構造物と考え、弾塑性挙動に着目して非線形振動応答解析を行い、動的挙動を検討する事を目的とする。

2. 鉄筋コンクリート橋脚の動的解析モデル

2.1 運動方程式

骨組構造物系の運動方程式は変位ベクトルを $\{\delta\}$ とすると、

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + [C] \{\dot{\delta}\} + [K] \{\delta\} = \{Q(t)\} \quad \dots (1)$$

で与えられている。ここで $[M]$ は質量マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $[C]$ は減衰マトリックス、 $\{Q(t)\}$ は外力の列ベクトルである。また、(1)式を増分形で表すことは容易であり次式のようになる。

$$[M] \{\Delta\ddot{\delta}\} + [C_e] \{\Delta\dot{\delta}\} + [K_e] \{\Delta\delta\} = \{\Delta Q(t)\} \quad \dots (2)$$

$[C_e]$ $[K_e]$ はそれぞれその時間間隔のあいだに適用できる有効な減衰および剛性マトリックスである。非線形な構造物においてはこれらのマトリックスはその構造物が応答するあいだに変化するが、時間間隔を十分短くとるならば各時間間隔において、それぞれ一定であるとできる。

2.2 鉄筋コンクリート橋脚の断面計算

一般に鉄筋やコンクリート材料などの弾塑性挙動を振動解析に取り入れる事は、対象構造物の剛性変化をモデル化し非線形振動問題として扱うと考えて良い。そこで、骨組構造系の剛性マトリックスを得るために橋脚断面の剛度 (EI) の履歴特性をモデル化する必要がある。ここでは、鉄筋コンクリート橋脚を軸力と曲げモーメントを受ける弾塑性柱と仮定して橋脚断面のモーメントー曲率関係を誘導する。

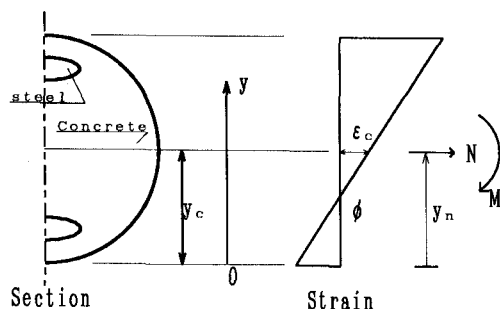


図-1 軸力とモーメントを受ける断面

任意の断面における増分形の力のつり合い式は、断面保持の仮定が成り立つとすると次式のようになる。(図-1参照)

$$\dot{N} = \int_A \dot{\sigma} dA \quad \dots (3)$$

$$\dot{M} - \dot{N} \cdot y_N = - \int_A \dot{\sigma} y dA \quad \dots (4)$$

次に、断面中各点のひずみを与える式として、

$$\dot{\epsilon}(y) = \dot{\epsilon}_c + k(y) \cdot \dot{\phi} \quad \dots (5)$$

$$k(y) = -y_c + y \quad \dots (6)$$

を仮定すると $\dot{\sigma}(y) = \dot{\epsilon}(y) \cdot E_c$ より、 $\dot{M}$ と $\dot{N}$ は $\dot{\epsilon}_c$

と $\dot{\phi}$ の線形式で表すことができる。すなわち、

$$\dot{M} = \alpha_1 \cdot \dot{\epsilon}_c + \alpha_2 \cdot \dot{\phi} \quad \dots (7)$$

$$\dot{N} = \alpha_3 \cdot \dot{\epsilon}_c + \alpha_4 \cdot \dot{\phi} \quad \dots (8)$$

ここで E_c は接線ヤング係数であり鉄筋、コンクリートの応力-ひずみ曲線をあらかじめ仮定しておくことにより求めることができる。図-4は図-2のように各材料の応力-ひずみ曲線を仮定し、図-3に示される断面について解析したモーメント-曲率曲線である。この図からモーメント-曲率の履歴特性は過去に経験した履歴の最大値を経由する経路で新しい最大値に向かっていることが分かる。

2.3 解析モデルと解析方法

ここでは円形断面の単柱形式鉄筋コンクリート橋脚を対象とし、頂部に上部構造の死荷重と質量を有する変断面の片持梁としてモデル化を行いその動的振動応答について調べる。

解析対象とした鉄筋コンクリート橋脚とその解析モデルは図-5に示すように高さ5.77mの橋脚を4分割し、Lumped Mass モデルを用いた。また橋脚には段落としがほどこしてあり、ほぼその高さが地表面である。しかし、基礎地盤にはその変形を考慮するため道路示方書下部構造編に基づき線形の地盤ばね(水平、垂直、回転ばね)をケーソン部に限り仮定し、その他の地盤による影響は無視した。表-1に各地盤ばね係数を示す。また、比較のために基礎地盤に橋脚を固定したモデルでも解析を行った。減衰は無視し、弾塑性解析については最下部の①部材のみ弾塑性状態を判定して、他の部材はすべて弾性領域

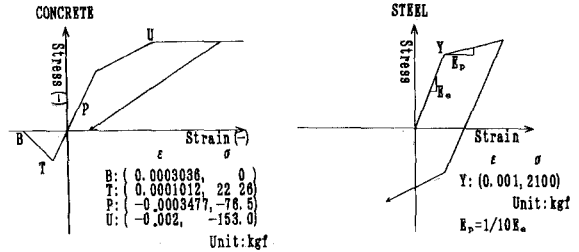


図-2 材料の応力ひずみ曲線モデル

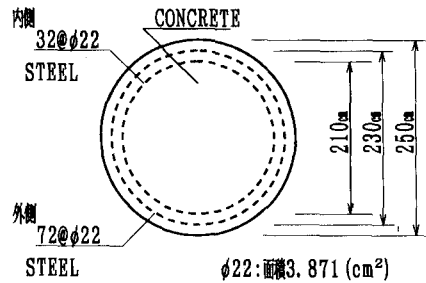


図-3 解析対象断面

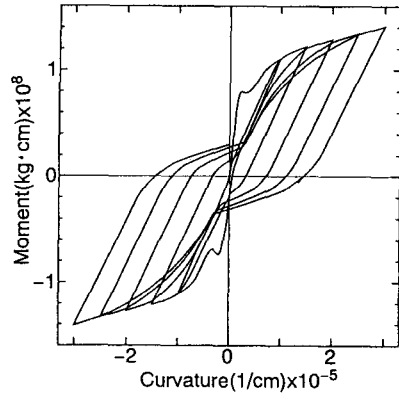


図-4 モーメント曲率曲線

表-1 地盤ばね係数

ばねの種類	ばね係数
水平ばね	2.614×10 ⁶ (kgf/cm)
垂直ばね	2.138×10 ⁶ (kgf/cm)
回転ばね	3.401×10 ¹¹ (kgf·cm/rad)

にあるとした。断面のモーメント曲率曲線は図-6に示すように2.2で求めた上部構造の重量に相当する軸力を受ける曲線に近似させたバイリニアモデルを使用した。外力はモデルの各質点に310 (gal)、周期0.3 (s)の正弦波加速度を水平方向に入力した。また、解析にはNewmark β 法 ($\beta=1/6$) を用いた。

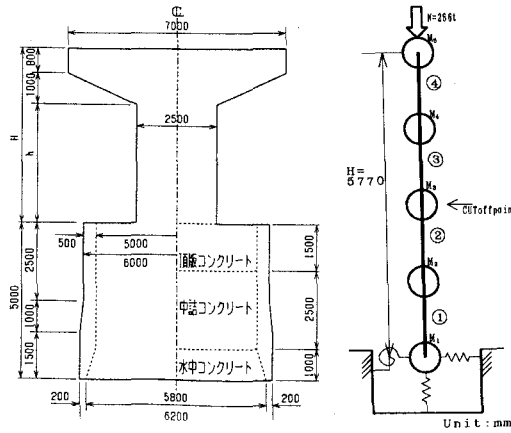


図-5 解析対象構造物とそのモデル

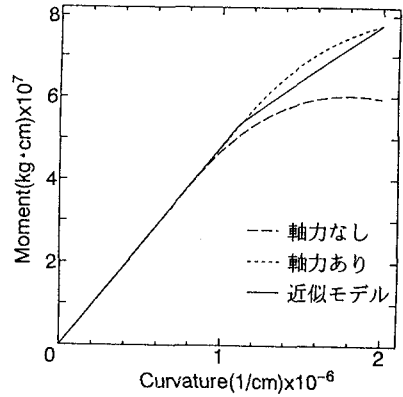


図-6 モーメント曲率曲線の近似モデル

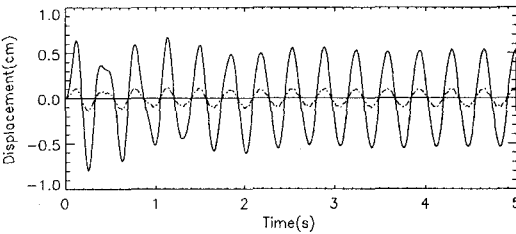


図-7 (a) Type I (地盤ばねタイプ) 弾塑性モデル

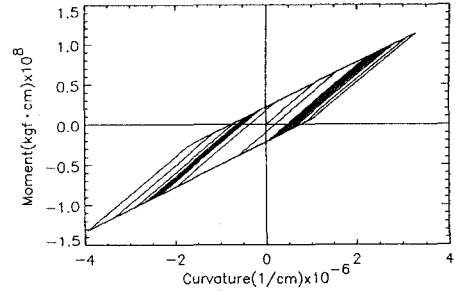


図-7 (c) Type I 弾塑性モデル
根元のモーメント曲率曲線

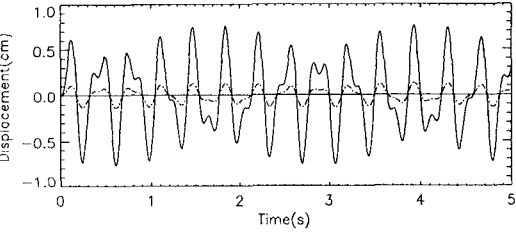


図-7 (b) Type I 弾性モデル

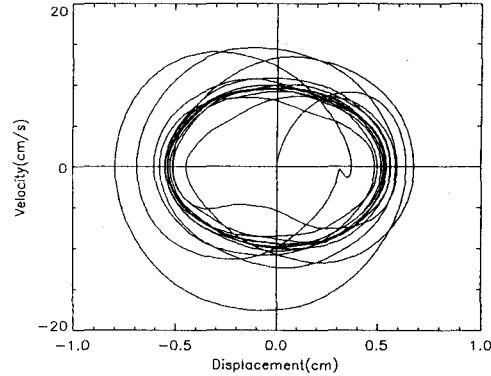


図-7 (d) Type I 弾塑性モデル頂部の位相平面

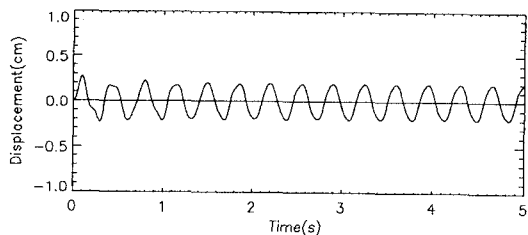


図-8(a) TypeII (固定タイプ) 弾塑性モデル

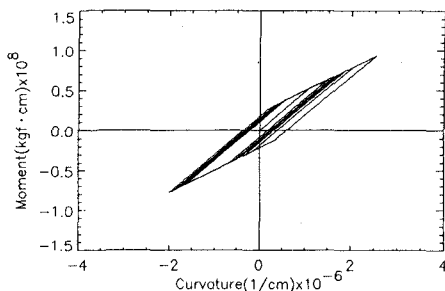


図-8(c) TypeII弾塑性モデル

根元のモーメント曲率曲線

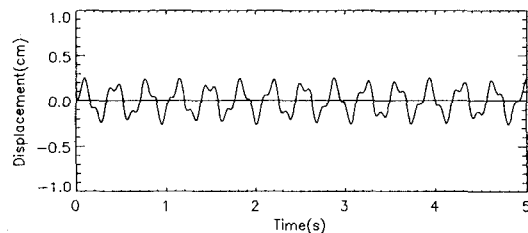


図-8(b) TypeII弾性モデル

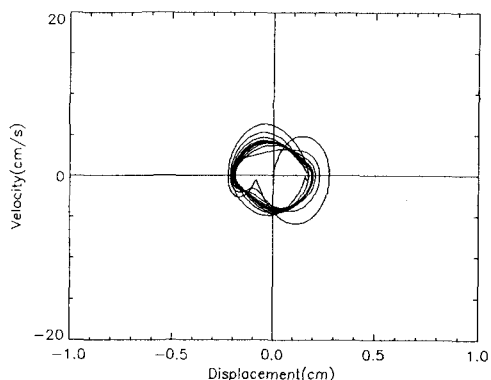


図-8(d) TypeII弾塑性モデル頂部の位相平面

3. 解析結果

図-7と図-8はそれぞれ地盤ばねを仮定したType Iと地盤に固定したTypeIIの解析結果を示し、(a)は弾塑性モデルによる水平変位の時刻歴応答で実線は頂部、破線は根元でのものである。固定したTypeIIでは根元の変位はないために実線のみになっている。両図中(b)は同じ条件での弾性モデルの結果である。Type IおよびTypeIIとも弾塑性モデルには減衰効果が認められ、橋脚の固有振動の影響は小さく、また応答振幅も弾塑性モデルの方が小さい。(c)は弾塑性モデルの根元部分のモーメント曲率曲線を示したものである。曲線のループの大きさは地盤ばねタイプがより大きいループを描いている。囲まれる面積から得られる構造物が吸収するエネルギーは、一般には構造物自身によって消費されと考えられるので破壊や安定性にとって重要なファクターとなる。次に両図中(d)に弾塑性モデルの頂部の位相平面(縦軸に速度、横軸に変位をとる)を示した。Type I、TypeIIとも複雑な非周期的位相平面が得られ、非線形振動の特徴をよく示している。

4. まとめ

以上、鉄筋コンクリート橋脚モデルの動的な非線形応答の解析結果を示した。また、鉄筋コンクリート梁断面のモーメントと曲率の関係を材料の応力-ひずみ曲線を仮定することにより増分法で計算する手法も示した。今後はよりモデルを実際の橋脚に近づけ、破壊モードの検討を行っていくことが課題である。

<参考文献>

- 1) 佐伯、三村、志村：1993年釧路沖地震による土木災害に関する調査 6. コンクリート土木構造物の被害、北海道地区自然災害科学資料センター報告, Vol. 8, 1993.
- 2) 河島佑男：動的応答解析, コンピュータによる構造工学講座, 培風館