

論文 RC 橋の地震応答解析におけるモデル化の影響に関する研究

杉浦弘治^{*1}・Shahid Nasir^{*1}・Supratic Gupta^{*2}・岩本政巳^{*3}

要旨：地震応答解析における構造物のモデル化によって、応答性状にどの程度の影響があるのかを明らかにすることを目的として、RC 橋の解析を行った。最も簡易的な 1 質点系モデルから全体系モデルまで徐々に変化させたところ、橋桁や橋脚のモデル化によって解析結果に影響が出たため、橋桁と橋脚にパラメーターを設定して解析を行うこととした。その結果、橋桁と橋脚の分割数を変化させることにより、解析結果が大きく左右されることが明らかとなった。

キーワード：地震応答解析、モデル化、1 質点系モデル、3 次元多質点系モデル

1. はじめに

兵庫県南部地震では、鉄筋コンクリート橋脚（以下 RC 橋脚と略記）の挙動が弾性領域を超え、被害の程度は、塑性領域における変形性能に大きく依存したと考えられている¹⁾。そのため耐震性能の照査では、構造物の変形性能を正しく把握することが基本的な要件となる。本来ならば実験で確認すべきものであるが、橋脚のみでなく橋梁全体の挙動を把握する場合には、解析的アプローチが有効であり、地震応答解析が重要視されている。

現在、耐震設計において地震応答解析を積極的に活用するために計算方法の整備等が急がれているが、中でも構造物のモデル化は重要である。地震応答解析には様々な解析モデルがあるが、そのモデル化によって解析結果に差が生じることがすでに確認されている²⁾。しかし、どのような影響があるのかについては、十分に議論されていない。

そこで本研究では、実際の設計でよく使われている 1 質点系モデルと各部材を梁要素とした 3 次元多質点系モデルを用いて非線形地震応答解析を行った。

次に、結果の違いの要因を探るために、1 質

点系モデルから徐々にモデルを変化させた解析を行い、モデル化の影響を検討した。また、その結果を踏まえて、いくつかのパラメーターを設定し、その影響についても考察した。

2. 地震応答解析の手法

2.1 1 質点系モデル²⁾

橋脚の上載荷重のみを質点とし、橋脚のすぐ上に配置した。上部工の質量を m 、ばね定数を k 、減衰係数を c 、空間に固定した座標を z 、橋脚の支点からの距離を u とし、地動変位を ϕ とすれば $\phi + u = z$ となり、1 質点系モデルの振動方程式は次式のようなになる。

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + ku = -m \ddot{\phi} \quad (1)$$

2.2 梁要素を用いた 3 次元多質点系モデル²⁾

M 、 C を質量および減衰マトリックス、 K^t を時刻 t から $t + \Delta t$ までの接線剛性マトリックス、 ΔF を外力増分ベクトル、 $\Delta \ddot{U}$ 、 $\Delta \dot{U}$ 、 ΔU をそれぞれ加速度、速度、変位増分ベクトルとして、3 次元多質点系モデルでは次式のような増分形運動方程式を用いる。

$$M \Delta \ddot{U} + C \Delta \dot{U} + K^t \Delta U = \Delta F \quad (2)$$

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻（正会員）

*2 名古屋工業大学助手 工学部社会開発工学科 工博（正会員）

*3 名古屋工業大学講師 工学部社会開発工学科 工博

2.3 解析条件²⁾

橋脚の復元力モデルとしては、ひび割れ（A点）、鉄筋降伏（B点）、終局（C点）を直線で結ぶ図-1に示すようなモデルを用いた。履歴特性の除荷時において以下のように仮定した。OA間では原点に戻る。AB間では、 $OR = 0.3 \times OP$ として、

$$OR \times (OX - OP) / (OS - OP) \quad (3)$$

の比率でOR間に戻る。B点以後は、BRに平行に戻る。再載荷時および逆方向への載荷時においては、既往最大点を目指す。なお、幾何学的非線形は考慮していない。

3次元多質点系モデルでは上述の荷重変位関係より換算された曲げモーメント-曲率関係を用いることとした。橋桁の復元力特性は線形とした。減衰係数は0.05を用いた。

3. 対象とした橋梁

解析には、名古屋市に実在する橋を用いることとし、橋軸方向の揺れに対して、中央の橋脚を対象とした。橋梁の概要図、橋脚の側面図、断面図を図-2に、切断法³⁾により断面から求められた橋脚の特性を表-1に示す。

4. 入力地震波⁴⁾

将来この地域で生じる可能性が指摘されている、東海地震を想定して断層モデルを設定し、工学的基盤面の地震加速度を求め、橋の基礎位置での地盤特性を考慮して得られた地表面での加速度を用いた。想定東海地震の加速度波形を図-3に示す。最大加速度は、238.0 gal 卓越周波数は1.208 Hzである。

5. 1質点系モデルと3次元多質点系モデルの比較

5.1 橋梁のモデル化

図-4、5に示すようにモデル化を行った。1質点系モデルは、橋脚の上部工の質量のみを質点としている。多質点系モデルは、実際の橋梁と同じ寸法の橋脚、橋桁の要素を設定し、それ

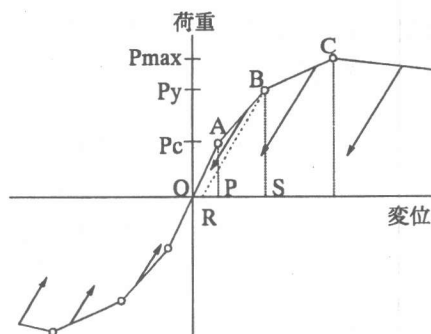


図-1 復元力モデル

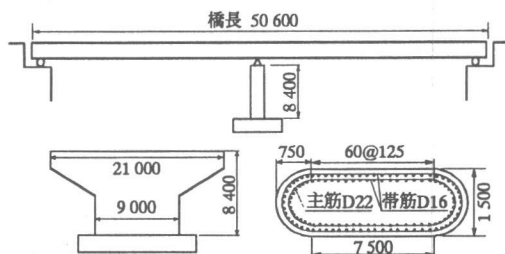


図-2 橋梁の概要 橋脚の側面図、断面図

表-1 橋脚の特性

上部工質量 (ton)	ひび割れ時		降伏時		終局時	
	変位 (cm)	荷重 (tf)	変位 (cm)	荷重 (tf)	変位 (cm)	荷重 (tf)
750.0	0.49	140.99	2.10	221.63	9.06	254.65

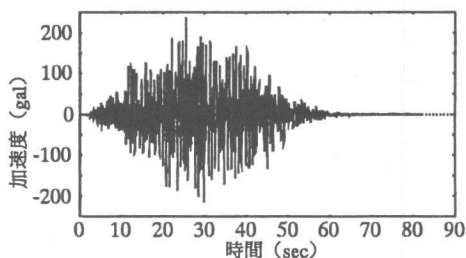


図-3 地震加速度波形

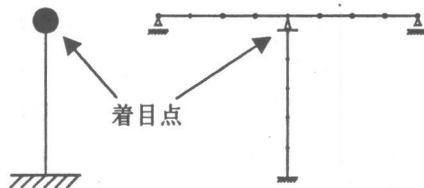


図-4 1質点系モデル 図-5 全体系モデル

それを5要素、8要素に分割した（以下、全体系モデル）。両モデルとも、上部工の総質量は等しいものとする。

5.2 解析結果および比較

橋軸方向の揺れに対する解析結果を、時刻歴応答変位として図-6、7に示す。なお1質点系

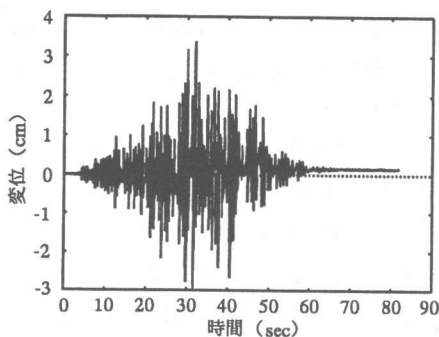


図-6 時刻歴応答変位 (1 質点系モデル)

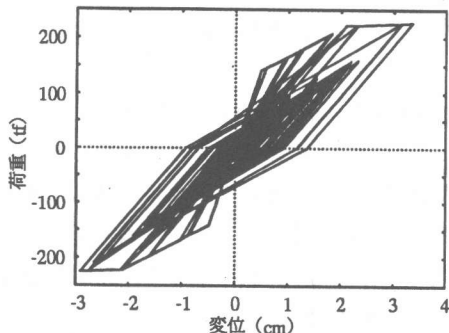


図-8 荷重変位履歴曲線 (1 質点系モデル)

モデルでは質点の位置を、全体系モデルでは中央の橋脚の最上部を着目点とした。

1 質点系モデルにおける最大応答変位は 3.34cm, 全体系モデルにおける最大応答変位は 2.91cm となり, 1 質点系モデルが約 15% 大きな値となった。最大応答変位に至るまでの時間は, それぞれ 31.92 秒, 31.96 秒となり, ほとんど差が見られなかった。また, 両モデルとも地震加速度と同じように, 60 秒付近から揺れが収まっているが, 1 質点系モデルでは, 収束する位置が変位 0 の位置から若干ずれている。

次に, 荷重変位履歴曲線を図-8, 9 に示す。両モデルとも, コンクリートのひび割れ, 鉄筋の降伏が確認でき, 荷重, 変位とも終局時の値には至っていないものの, 最大応答変位に差が生じたように, 塑性変形にも差が生じている。

6. 1 質点系モデルと全体系モデルにおけるモデル化の影響

6.1 橋梁のモデル化

前章の解析結果に何が影響しているのかを調べるために, 1 質点系モデルから全体系モデル

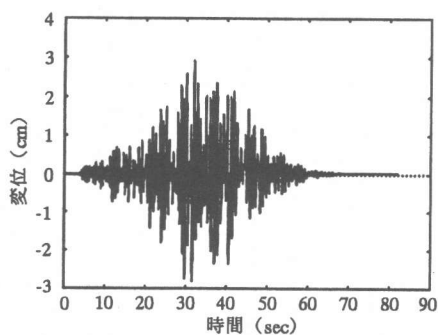


図-7 時刻歴応答変位 (全体系モデル)

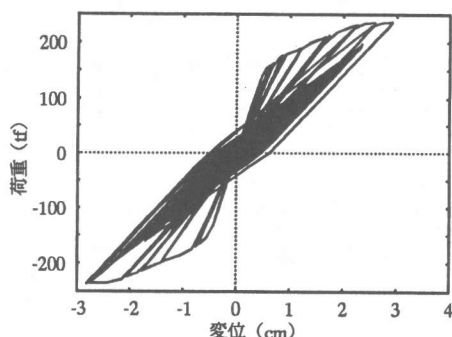


図-9 荷重変位履歴曲線 (全体系モデル)

まで, 橋桁の高さ, 橋脚の自重等に注目して, 徐々に変化させてモデル化を行った。解析モデルの諸元を表-2 に, 解析モデルを図-10 に示す。なお model 1, model 12 は前章における 1 質点系モデル, 全体系モデルである。

model 2, 3 は橋桁の要素を設定せず, 橋脚のすぐ上に, 十分に小さく質量が上部工に等しい要素を配置して, 1 質点系モデルに近い形とした。model 4, 5 も同様の形ではあるが, 橋桁と上部工の重心を同じ位置にするために, 要素の長さを橋桁高さの 2 倍とした。model 6~9 は橋桁の長さの影響を小さくするため, 全体系モデルの 1/4 に短縮し 2 要素に分割した。model 6, 7 は 1 質点系モデルと同様に橋脚のすぐ上に橋桁要素を配置し, その他は実際の橋桁の重心の位置に橋桁要素を配置した。model 10, 11 は全体系モデルと全く同じ寸法とし, それぞれ橋桁を 2 要素, 橋脚の分割数を 1 とした。

6.2 解析結果および比較

それぞれのモデルにおける最大応答変位の値と, 最大に至るまでの時間を図-11 に示す

model 1 のみ解析手法が他と異なっているが,

表-2 解析モデルの諸元

model	橋桁			橋脚	
	桁長	分割数	高さ	自重	分割数
1	×	×	×	×	×
2	×	×	×	×	5
3	×	×	×	○	5
4	×	×	○	×	5
5	×	×	○	○	5
6	L	2	×	×	5
7	L	2	×	○	5
8	L	2	○	×	5
9	L	2	○	○	5
10	4L	2	○	○	5
11	4L	8	○	○	1
12	4L	8	○	○	5

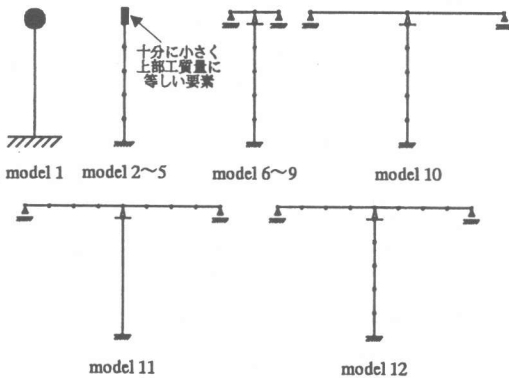


図-10 解析モデル

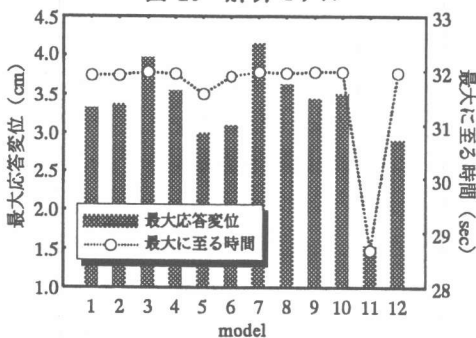


図-11 解析結果

1 質点系モデルに近い model 2 の解析結果と比較すると、最大応答変位で若干小さな値となったものの、最大に至るまでの時間が等しく、自由度による変化はほとんど見られなかった。

model 2 と 3、model 6 と 7 の結果を比較すると、model 3、7 がより大きな値となった。このことから橋桁の有無に関わらず、橋脚の自重が応答に影響を及ぼしたことが分かる。

model 2 と model 4 の解析結果を比較すると、model 4 が約 0.2cm 大きな値となった。これは、橋桁を実際の高さまで引き上げたことによる影

響であることが分かる。橋脚の自重の場合と同様に、橋桁を設定したモデルでも最大応答変位が大きくなった。

model 5 の最大応答変位 3.00cm は model 2, 3, 4 の最大応答変位を下回る結果となった。橋脚の自重、橋桁の高さをそれぞれ単独で入力すると、最大応答変位が大きくなるのに対して、両者を入力すると互いに抑制し合い、揺れが小さくなったものと考えられる。抑制される程度に差があるものの、橋桁を設定した model 6, 7, 8, 9 でも同じような結果となった。

model 9 と 10、model 9 と 12、model 10 と 12、model 11 と 12 の結果を比較すると、たとえ同じ桁長でも違いが生じていた。これは、橋桁の高さや橋脚の自重のみならず、橋桁や橋脚の分割数等モデル化の方法によって、結果が異なるということを意味している。

最大応答変位に至るまでの時間は、model 11 を除いてすべてのモデルで 31 秒台後半となり、モデルによる違いがほとんど見られなかった。

なお、各モデルの固有振動数にはある程度の変動が見られたが、その傾向は最大応答変位の変化する傾向と異なった。

以上より、1 質点系モデルと全体系モデルの結果の違いは、橋桁の高さや橋脚の自重が影響を及ぼしていたことが分かった。さらに、橋桁や橋脚のモデル化の方法については、より詳しく調べる必要があると言える。

7. パラメーターを設定した解析モデル

7.1 概要

前章の結果を踏まえて、桁長、橋桁の分割数、橋脚の分割数をパラメーターとして設定し、その解析結果を比較することによって、多質点系モデルにおける影響を検討することとした。

7.2 橋梁のモデル化

7.2.1 橋桁分割サイズを一定として桁長を変化させた解析モデル

図-12 に示すように、前章の全体系モデルの橋桁を 1/4 の長さに設定したモデルを model 1

として、順に橋桁を伸ばし、それに伴って要素数も増やした。また1要素分の質量を、設定した要素数に反比例して軽くなっていくものとし、橋桁の総質量をすべて等しくした。

7.2.2 橋桁分割数を一定として桁長を変化させた解析モデル

図-13 に示すように橋桁の要素数は2要素に固定し、長さのみを伸ばしてモデル化を行った。橋桁の総質量は前節と同様にすべて等しいものとした。

7.2.3 橋桁分割数を変化させた解析モデル

図-14 に示すように橋桁の桁長を実際の橋梁と同じ長さに固定し、その内部の節点を1節点ずつ増やしていきモデル化を行った。

7.2.4 橋脚分割数を変化させた解析モデル

図-15 に示すように、橋脚の内部の要素数、節点数を変化させてモデル化を行った。実際の橋脚は鉄筋量や断面積が一定ではなく、断面が位置によって均一ではないが、ここでは橋脚の分割数のみの影響を見るために、他の場合とは異なり、すべて均一な断面と仮定してモデル化を行った。なお、橋桁については全体系モデルと同様にモデル化した。

7.3 解析結果および比較

解析結果の最大応答変位を最大に至る時間とともに図-16~19 に示す。

7.3.1 橋桁分割サイズを一定として桁長を変化させた解析モデル

最大応答変位は、model 1 と model 2 を比較すると、model 2 が 0.5cm ほど小さな値となり、減少幅も最も大きかった。6 要素までは変位が減少していく傾向にあるが、それ以上では増減の波があり、図-16 から分かるように、最終的には 2.9cm あたりに落ち着くという結果となった。また、最大応答変位の最大値と最小値の差を値の範囲とすると、その範囲は最大値に対し

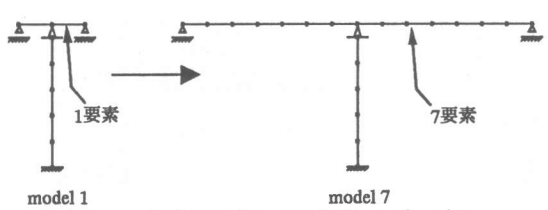


図-12 解析モデル（分割サイズ一定）

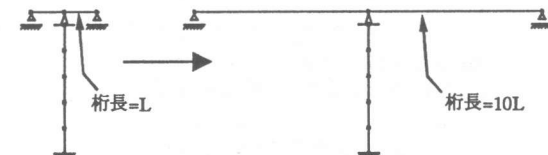


図-13 解析モデル（分割数一定）

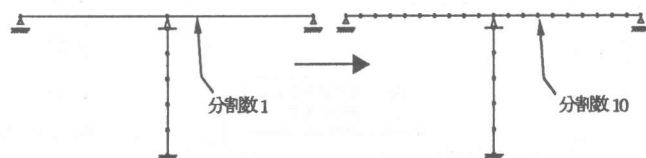


図-14 解析モデル（橋桁分割数の変化）

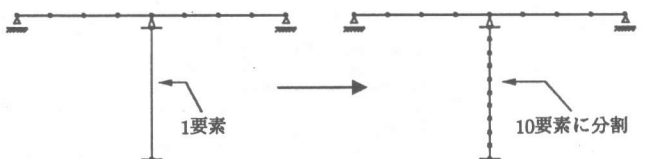


図-15 解析モデル（橋脚分割数の変化）

て 17.1%となった。

7.3.2 橋桁分割数を一定として桁長を変化させた解析モデル

要素数をパラメーターにした前節とは異なり、桁長を変化させると、最大応答変位は model 1, 2, 3 の段階から増減の波があり、少しずつ値が増加していく傾向にある。その波は model 10 まで続くが振幅は非常に小さく、3.53cm あたりを中心とした上下 0.03cm ほどの波となった。値の範囲も、最大値に対して 2.8%となり、ほとんど影響がないと言える。

7.3.3 橋桁分割数を変化させた解析モデル

解析結果より、橋桁の分割数が増加するに従って最大応答変位は小さくなっていく傾向が見られたが、いずれは橋桁要素数を変化させた場合と同じように、一定の値に収束していくものと考えられる。また、値の範囲は最大値の 52.3%

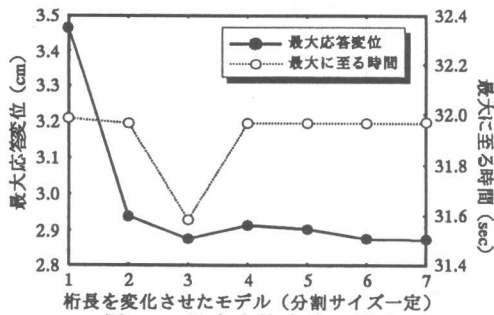


図-16 最大応答変位の推移

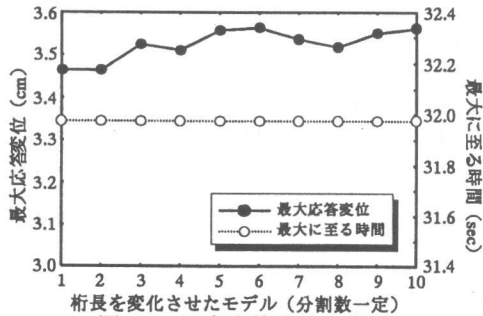


図-17 最大応答変位の推移

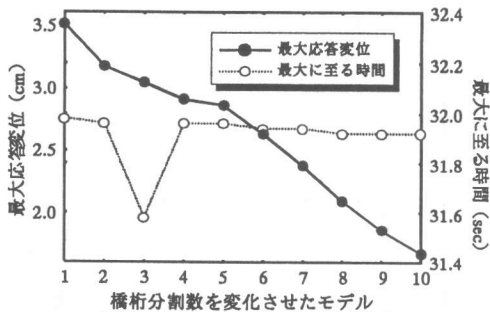


図-18 最大応答変位の推移

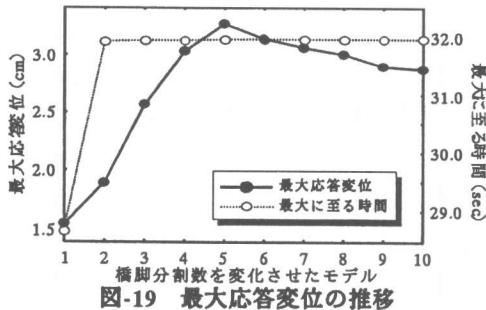


図-19 最大応答変位の推移

となった。すなわち最大値を得る model 1 は最小値を得る model 10 の約 2 倍の変位となっており、大きな影響があるという結果となった。

7.3.4 橋脚分割数を変化させた解析モデル

最大応答変位は、橋脚の分割数が増加するに従って大きな値となったが、model 5 で頭打ち

となり、それ以降は徐々に値が小さくなっている。しかし、減少幅も次第に小さくなってきており、このモデルにおいても一定の値に収束していくものと考えられる。値の範囲は最大値の 52.5% となり、前項同様モデル化によって大きな影響があったと考えられる。

7.4 解析結果のまとめ

以上より、橋桁の桁長を除いたパラメータで解析結果に大きな影響を及ぼすことが分かった。しかし、橋桁の分割数を変化させたモデルでは、未だ収束する傾向が見えておらず、さらにデータ数を増やして検討していく必要があると思われる。

最大に至る時間は橋脚の分割数を変化させた場合の model 1 を除いてほぼ等しくなった。このことから、橋脚についてはいくつか分割しなければ、ある程度の信頼性を得ることはできないと考えられる。

8. 結論

- (1) 質点系モデルと 3 次元多質点系モデルの解析結果に違いが生じるのは、橋脚の自重、橋桁の高さや桁長によることが明らかとなった。
- (2) 橋桁の長さ自体はそれほど影響を及ぼさないものの、その要素数や分割数、橋脚の分割数によって、解析結果が大きく左右されることが明らかとなった。しかしデータ数を増やしていくことで、一定の値に収束していく傾向があることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 土木学会「耐震基準基本問題検討会議」：土木構造物の耐震基準等に関する提言，1995 年 5 月
- 2) 杉浦弘治・岩本政己・梅原秀哲：コンクリート橋の地震応答解析におけるモデル化の影響，土木学会第 52 回学術講演概要集第 5 部，pp570-571，1997.9
- 3) R.Park・T.Paulay：Reinforced Concrete Structures，WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION
- 4) 名古屋市防災地震対策専門委員会：橋梁の地震被害検討用加速度波形