

## 橋脚と鋼桁の剛結と端支点の免震化による 連続桁の耐震性能向上

大島 俊之\*、山崎 智之\*\*、井上 稔康\*\*\*、大島 徹\*\*\*、佐藤 孝英\*\*\*、小林 勝\*\*\*\*

\*工博 北見工業大学教授 土木開発工学科 (〒090 北海道北見市公園町165番地)

\*\*北見工業大学助手 土木開発工学科 (〒090 北海道北見市公園町165番地)

\*\*\*(株)釧路製作所 (〒060 北海道札幌市中央区北1条西1丁目5番地)

\*\*\*\* JH東北支社構造技術課長 (〒980 宮城県仙台市青葉区中央3丁目2-1)

連続桁と橋脚を中間支点で剛結化し、ラーメン構造とすることによる耐震特性を評価し、さらに端支点部に免震支承を設けることによる耐震性の向上について検討する。本論文では3径間連続桁の中間支点部で桁と橋脚を剛結合としたモデルおよびヒンジ結合としたモデルと中間支点を剛結したモデルにおいて端支点部に免震効果を考慮したバネ要素(バイリニア)を加えたモデルの3ケースについて耐震性能の検討を行った。解析は平面骨組要素でモデル化し、橋脚部は非線形要素とするため部材の曲げモーメント-曲率曲線の関係をモデル化して非線形性を考慮して非線形振動解析を行った。

*Key Words : Fixed joint, Isolation shoe, Earthquake resistance*

### 1. はじめに

昨年12月に改訂された道路橋示方書が発行された。改訂された内容は種々あるが、耐震設計において動的解析による安全照査が設計段階で一般化され、免震設計が望ましいとされている。特に支承部構造については橋脚や橋台から落橋を防ぐため衝撃力の緩和、連結部材の強度増大、変形性能の向上を図り、落橋防止システムによる設計を行うとされている。また2年前に起きた兵庫県南部沖地震の復旧時にラーメン構造を採用した例がみられる。このラーメン構造の特徴としては支承構造が不要で維持管理上有利であり、落橋防止にもなる。

本研究では連続桁と橋脚を剛結合とするラーメン構造の耐震性能を評価し、さらに端支点部に免震支承を設けることによる耐震性能の向上について検討する。

### 2. 動的応答解析

#### 2.1 解析方法

橋脚部は非線形要素とし橋脚断面の曲げモーメント-曲率曲線を算出するが、一般に使われている道路橋示方書・耐震設計編による中立軸の位置を試算によって求めながら計算を行う方法では、除荷時に中立軸が断面外に移動してしまうことがあるため正確に値が求められなかったり、中立軸が無限遠方となり計算ができな場合がある。そこで本解析では断面内のひずみ分布を断面図心位置のひずみと曲率で表してモーメント-曲率関係を計算する方法を用いて解析を行った。<sup>1)</sup> またせん断応力-せん断ひずみ、軸応力-軸ひずみ曲線についても算出した。

次に各計算モデルに対して平面骨組構造によるマトリ

ックス構造解析を行い、増分法によりWilsonの $\theta$ 法を用いて( $\theta=1.4$ )応答変位、速度および加速度を求める。そして前述したせん断応力-せん断ひずみ、モーメント-曲率、軸応力-軸ひずみの関係と応答変位から各要素のせん断弾性係数G、曲げ剛度EI、弾性係数Eをもとめ、剛性マトリックスを組み替えることによって弾塑性解析を行った。<sup>2)</sup>

#### 2.2 解析モデル

本研究では橋脚と連続桁を剛結したラーメン構造、ヒンジ結合した構造およびラーメン構造の端支点部に免震効果を付加した構造を比較するため図-1(a)~(c)の

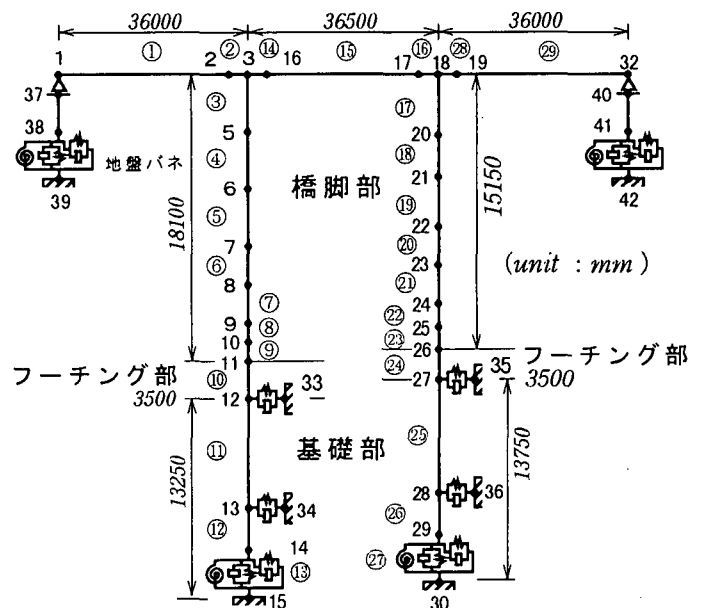


図-1 (a) 解析モデル1 (剛結合)

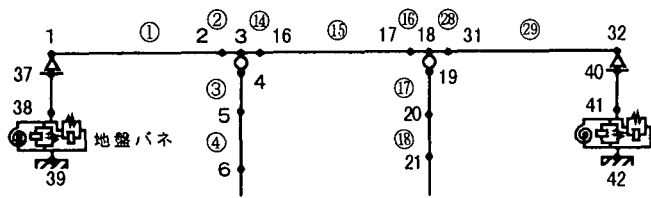


図-1 (b) 解析モデル2 (ヒンジ結合)

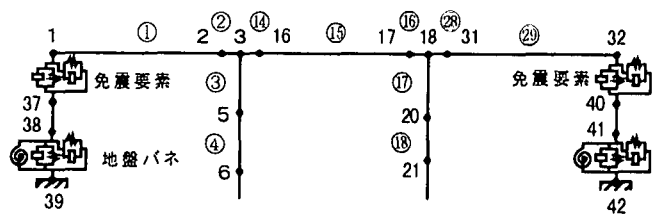


図-1 (c) 解析モデル3 (免震)

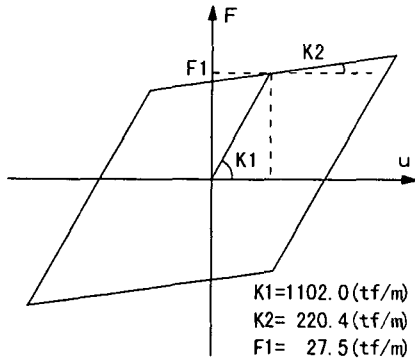


図-2 免震支承の水平力-変位モデル

ようにモデル化した。図-1 (a)橋脚と桁の結合部を剛結合とした場合(モデル1)、図-1 (b)橋脚と桁の結合部をヒンジ結合とした場合(モデル2)、図-1 (c)モデル1の端支点部に免震要素を付加した場合(モデル3)の3ケースを解析モデルとした。図-1の解析モデルは橋脚部の要素が3ケースとも同一なので、モデル1のみ全体モデルを表し、モデル2、3については桁部分と支持条件のみを表している。図中に記載した数字は要素番号と節点番号を示しており、丸で囲まれた数字が要素番号、ただの数字が節点番号を表している。これらのモデルは橋全体を簡略化し、橋脚と桁の2要素を組み合わせてモデル化している。このうち橋脚部の要素のみ非線形要素として、他の要素は線形とした。

各基礎と地盤の間に地盤バネ要素を用いた。また免震要素は鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)を仮定し、鉛直方向剛度は線形と考えるが、水平方向については水平力-水平変位の関係を図-2に示すようなバイリニア型モデルとし、降伏後の剛度K2を初期剛度K1の1/5として諸値を設定した。また減衰定数は免震要素および地盤バネ要素をモード減衰比27.6%とし、上部工要素はモード減衰比3%、下部工要素はモード減衰比10%とした。

### 2.3 入力波形

応答解析に用いた入力波形は振幅100galのsin波形加速度を用いた。その周期は0.6~1.6secまでの間を0.2sec間隔で変化させた6種類とし、解析時間10sec、解析時間間隔1msecで加速度を入力した。また地震波として兵庫県南部沖地震において神戸海洋気象台で観測されたEW方向の加速度波形を用いた解析も行った。図-3に地震波の加速度波形を示す。これらの加速度に刺激係数を乗じて力の量として基礎要素の各節点に入力した。

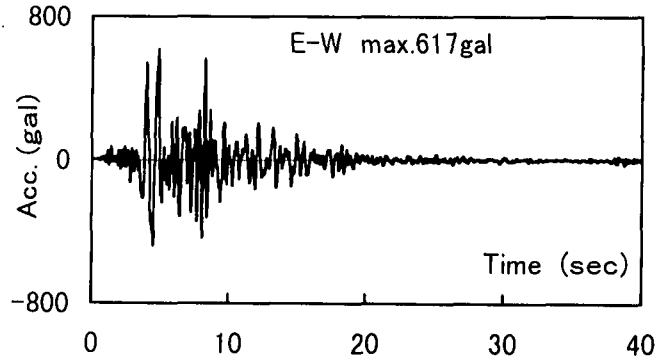


図-3 兵庫県南部沖地震の加速度

## 3. 解析結果

### 3.1 固有振動数

動的応答計算をするなかで得られた固有値解析の結果で、各モデルの水平1次固有周期および固有振動数を表-1に示す。中間支点部を剛結としたモデル1とヒンジ結合であるモデル2の固有周期では、ラーメン構造であるモデル1の方が0.12sec程度短く、端子点部に免震要素を持つモデル3ではモデル1より更に0.08sec程度短くなっている。モデル2よりモデル1の方が短いのは当然であるが、モデル3の固有周期がモデル1より短くなっていることは免震要素による長周期化は見られず、端子点部を固定することによる拘束効果から固有周期が短くなったと考えられる。この免震モデル3に対してさらに橋脚部とフーチング部の間に免震要素を設けた場合には固有周期が1.846secとなり、固有周期の長周期化が見られ免震効果が現れた。

表-1 各モデルの固有周期、固有振動数

	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)
モデル1 (剛結)	0.922	1.085
モデル2 (ヒンジ)	1.041	0.961
モデル3 (免震)	0.844	1.185

### 3.2 応答変位と位相平面

図-4は入力波がsin波加速度の時の節点3(橋脚と桁の結合部の節点)における水平応答変位で、各モデルの最大応答変位が得られたときのものである。また図-5はそのときの速度-変位の位相平面である。応答変位の最大値はモデル1(剛結)の場合約0.12m、モデル2(ヒンジ結合)は約0.2m、モデル3(免震)は約0.07mとなり、ヒンジモデルが一番大きく剛結の1.66倍で免震モデルは剛

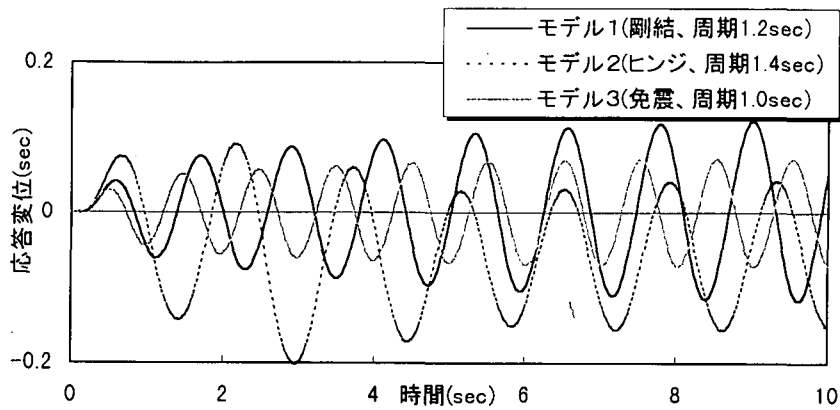


図-4 水平応答変位(節点3)

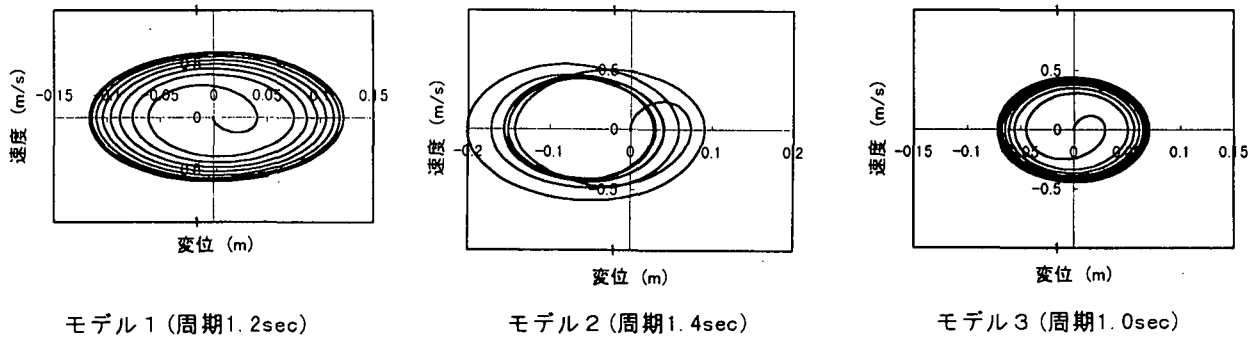


図-5 速度-変位相平面

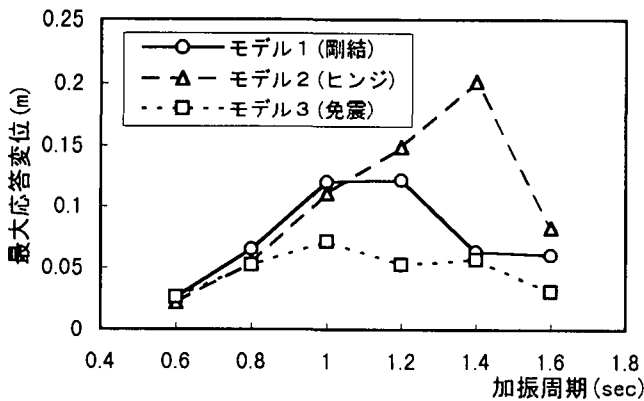


図-6 変位応答スペクトル

結の1/1.7であった。また位相平面から見て判るようにモデル1およびモデル3では中心軸に対称な位相面を描いており線形挙動を示しているが、モデル2の場合は振動初期において片側に大きく変形し塑性化した後、定常な波形となるが中心軸からずれており約5 cm程度のところを軸として定常となっている。この現象は橋脚基部が塑性化を示した頃から現れている。これらの応答変位から得られた周期による絶対応答変位スペクトルを図-6に示す。この図から加振周期1.0secまではモデル1(剛結)とモデル2(ヒンジ)ではあまり差はないが、1.0~1.4secにおいてモデル1の方が変位が小さく抑えられている。また、端支部位に免震構造を設けたモデル3では図中の周期に対して変位は小さくなっている。

### 3.3 曲げモーメント-曲率曲線

図-7は橋脚下部(要素9)における最大応答変位が得られたときの曲げモーメント-曲率(M- $\phi$ )曲線である。

入力sin波の周期はモデル1(剛結)は1.2sec、モデル2(ヒンジ)は1.4sec、モデル3(免震)は1.0secの波形を入力したときに得られたM- $\phi$ 曲線である。モデル1(剛結)とモデル2(ヒンジ)を比較すると最大曲げモーメントはほぼ同じ程度で約4500tfmであるが、曲率の最大はモデル2の方が大きくなっている。モデル2ではプラス側の曲率が極端に増大しており、応答変位において橋脚が塑性化するときに大きく片側に変形して塑性化することに対応している。また共振の影響で橋脚基部の塑性化が大きくなるが、この塑性化する振動周期の範囲はモデル1で1.0~1.2sec、モデル2で1.0~1.4secと剛結の方が共振の影響を受ける範囲が狭くなっている。モデル3(免震)では橋脚基部はほとんど弾性範囲内に抑えられており、曲げモーメントが低減されていることが判る。図-8は橋脚上部(要素3)におけるM- $\phi$ 曲線で、入力波周期が1.0secのときのモデル1(剛結)とモデル3(免震)を比較したものである。両者ともに弾性範囲内での変化を示しているが、全体的にモデル3の方が曲げモーメントが小さくなり、橋脚上部においても曲げモーメントの低減が見られる。

### 3.4 地震波入力の結果

図-9はモデル1(剛結)と2(ヒンジ)について地震波(兵庫県南部沖地震)を入力したときのM- $\phi$ 曲線で、左側橋脚中間部の要素5におけるものである。橋脚基部(要素9)においてはモデル1,2ともに同様な塑性化を見せているが、橋脚中央部および下部(要素5,7)においては塑性化によるエネルギー吸収率がモデル1の方が小さく塑性化の程度が小さいと考えられる。

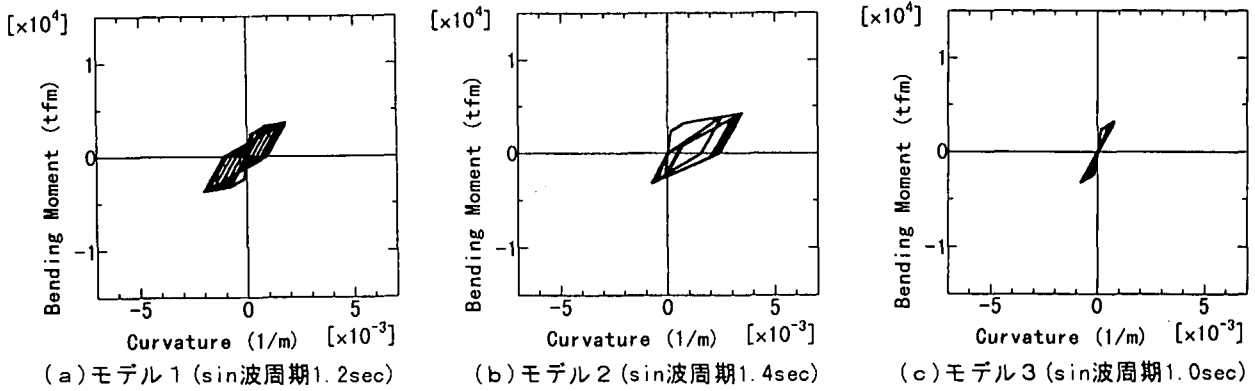


図-7 M-φ曲線(橋脚基部要素9)

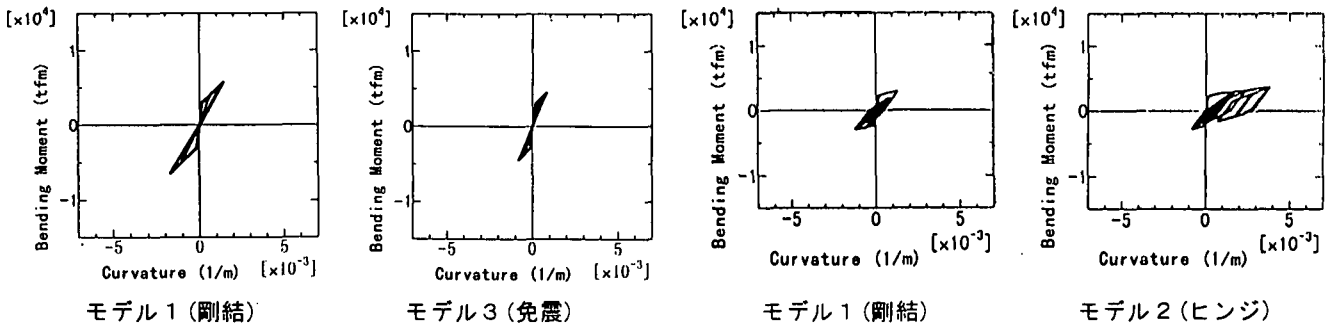


図-8 M-φ曲線(橋脚上部要素3、sin波周期1.0sec)

図-9 M-φ曲線(橋脚中部要素5、神戸EW地震波)

#### 4. 結論

- (1) 中間支点部を剛結合とヒンジ結合とした場合では水平1次の固有周期には大きな変化はなかった。また、剛結合における端支点部を免震構造としても免震効果による固有周期の長周期化は見られず、逆に端支点を固定することから固有周期が短くなった。
- (2) 位相平面の比較から、ヒンジ結合の場合は振動初期において片側に大きく変形して塑性化し、その後中心から5 cm程度ずれたところで定常な挙動となる。剛結合および免震の場合は線形な挙動を示している。
- (3) 加振周期と絶対応答変位の応答スペクトルにおける周期1.0, 1.2, 1.4secの結果から絶対変位において次の関係があり [ ヒンジ>剛結>免震 ] 剛結合にすること及び端支点部に免震構造を設けることで制振効果が現れることが判る。

(4) 橋脚基部の曲げモーメント-曲率曲線では剛結モデルとヒンジモデルを比較すると、塑性化を示す曲線形状や大きさは同じであるが、塑性化を受ける振動周期の範囲は剛結モデルの方が狭い。また、端支点部に免震要素を設けたモデルでは免震構造により橋脚基部を弾性範囲内に抑える効果が見られ、さらに橋脚上部においても曲げモーメントの低減が見られる。

#### 参考文献

- 1) 大島、三上、小倉、佐藤：段落とし部を有するRC橋脚の強震時非線形挙動とエネルギー分布、構造工学論文集、Vol. 41A、pp745-754、1995
- 2) 青地、松井、大島、三上、山崎：免震支承を用いた連続橋の振動軽減効果の検討、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、第I部、pp70-71、1996. 9

### IMPROVEMENT OF EARTHQUAKE RESISTANCE OF CONTINUOUS BRIDGE BY USING RIGID CONNECTION BETWEEN GIRDER AND PIER AND ISOLATOR ON ABUTMENT

Toshiyuki OSHIMA, Tomoyuki YAMAZAKI, Toshiyasu INOUE, Iwao OSHIMA,  
Takahide SATO and Masaru KOBAYASHI

Improvement of earthquake resistance of continuous bridge is analyzed by applying the rigid connection between steel girder and pier and isolators on both abutments. Nonlinear dynamic response is obtained on total system of bridge, pier and basement taking nonlinear behavior of moment-curvature relationship of pier into account.