
極軟鋼利用すべり式免震装置の動的応答特性

Dynamic Response of Sliding Isolation System Using Low Yield Strength Steel

長町 賢 (Ken Nagamachi) 小池 武 (Takeshi Koike) 脇長 正 (Tadashi Wakinaga) 西村 宣男 (Nobuo Nishimura)

要旨：

極軟鋼ダンパーを使用した鋼製の免震装置を提案する。当システムは、極軟鋼製であることから大変形・大反力に対する耐力に優れており、レベル 2 相当の内陸直下型、プレート境界型地震波に対して有効な免震効果が得られることを期待して考案したものである。本稿では、この装置の免震効果を明らかにするため、免震支承を有する橋梁システムの地震応答解析を行い、本装置の有用性について検証した。

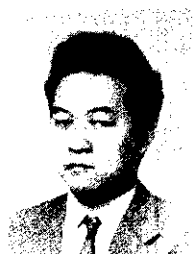
Synopsis：

A seismic isolation system is proposed for bridge structures. The isolating device is composed of sliding equipment, installed between upper and lower bridge components, and a function of hysteretic steel damper is carried out with the loss of torsional energy of steel cylinder whose yield strength is very low. Numerical analysis is utilized to obtain the optimal design parameters of the isolating system for a 3-span urban highway bridge structure.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Dynamic Response of Sliding Isolation System Using Low Yield Strength Steel



長町 賢
Ken Nagamachi
橋梁・鉄構事業部 橋梁・鋼構造技術部企画開発室



小池 武
Takeshi Koike
エンジニアリング事業本部 エネルギー・水道事業部 エネルギー・水道技術部パイプライン技術室 主査(部長)・工博



脇長 正
Tadashi Wakinaga
橋梁・鉄構事業部 橋梁・鋼構造技術部企画開発室 主査(掛長)



西村 宣男
Nobuo Nishimura
大阪大学 工学部土木工学科 教授・工博

要旨

極軟鋼ダンパーを使用した鋼製の免震装置を提案する。当システムは、極軟鋼製であることから大変形・大反力に対する耐力に優れており、レベル2相当の内陸直下型、プレート境界型地震波に対して有効な免震効果が得られることを期待して考案したものである。本稿では、この装置の免震効果を明らかにするため、免震支承を有する橋梁システムの地震応答解析を行い、本装置の有用性について検証した。

Synopsis:

A seismic isolation system is proposed for bridge structures. The isolating device is composed of sliding equipment, installed between upper and lower bridge components, and a function of hysteretic steel damper is carried out with the loss of torsional energy of steel cylinder whose yield strength is very low. Numerical analysis is utilized to obtain the optimal design parameters of the isolating system for a 3-span urban highway bridge structure.

- (2) 橋梁を橋脚、桁部を各1自由度の2質点系にモデル化し、地震応答解析を行なうことで免震装置の応答特性を明確化
- (3) すべり式免震装置の固有周期と極軟鋼ダンパーの剛性に関する最適仕様の決定
- (4) 実橋モデルに対する地震応答解析

1 はじめに

兵庫県南部地震以降、既設橋梁の耐震補強が数多く実施されている。その中で免震工法は構造物振動特性の長周期化と高減衰化により地震力を低減できることから、耐震性を向上させる有効な工法の一つとなっている。具体的に橋梁に適用する場合、制動荷重、風荷重や通常(レベル1)の地震荷重に関しては、免震装置部で必要ならずは発生しないが、レベル2の内陸直下型、プレート境界型といった大地震に対しては大きなずれが発生するため、下部工の負担を軽減できるだけの免震効果が必要であり、上部工に関しても隣接桁に衝突しない程度に桁の変位が抑えられる減衰効果が必要となる。本研究では極軟鋼を利用したすべり式免震システムの動的挙動を把握するために以下の検討を実施した。

(1) 本免震装置の復元力特性の定式化

2 免震支承の復元力特性

2.1 免震システムのメカニズムと機器構成

免震システムの機器配置は、Fig. 1に示すように上部工に球形の上巻、下部工に皿形の下巻を配置し、上・下部工間に極軟鋼を用い

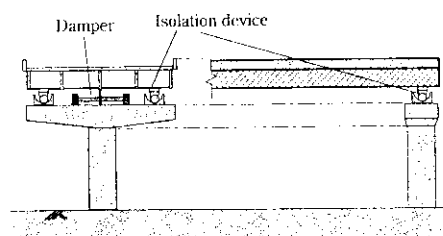


Fig. 1 Isolation system using low yield strength steel

* 平成9年10月21日原稿受付

た減衰装置を配した構造となっている。この免震システムは地震が発生すると免震沓を介して上部工が滑ることから支承の非線形復元力特性が得られ、生じた上・下部工間の相対変位を極軟鋼鋼管がねじり変形によりエネルギーを吸収し、減衰する構造となっている。なお、各装置の免震沓は支承部に、極軟鋼ダンパーは橋脚頂部に設置する。

2.2 免震支承の復元力特性

免震システムを Fig. 2 の 2 質点系モデルで示すと、免震沓の復元力 F は上部工の重量に対する水平成分 X で式 (1)、変位は式 (2) で与えられる。

$$F = Mg \cos \theta \sin \theta \quad (1)$$

$$X = R \sin \theta \quad (2)$$

ここで M は上部工の質量、 g は重力加速度、 R は免震沓の半径、 θ は上部工の下部工に対する偏角角度である。したがって、免震沓の剛性 K_s は式 (3) で表される。ただし上沓、下沓間の摩擦力は無視している。

$$K_s = \frac{\partial F}{\partial X} = \frac{\partial F}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{Mg \cos^2 \theta - \sin^2 \theta}{R \cos \theta} = \frac{Mg}{R} f(\theta) \quad (3)$$

$f(\theta)$ は θ の関数である。

また極軟鋼ダンパーの復元力は、鋼管に作用するねじりせん断力に対し、鋼管に発生するせん断応力 τ を用いて式 (4) で求められ、せん断ひずみは式 (5) で与えられる。

$$F = \tau \frac{\pi d^2 l}{2r} \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{d}{2lr} X \quad (5)$$

せん断応力、ひずみはせん断弾性係数 G により、 $\tau = G\gamma$ で関係付

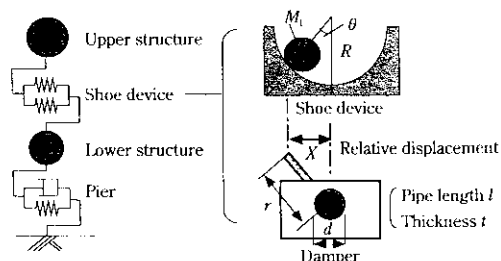


Fig. 2 Two-degree of freedom system for a bridge structure with isolating device

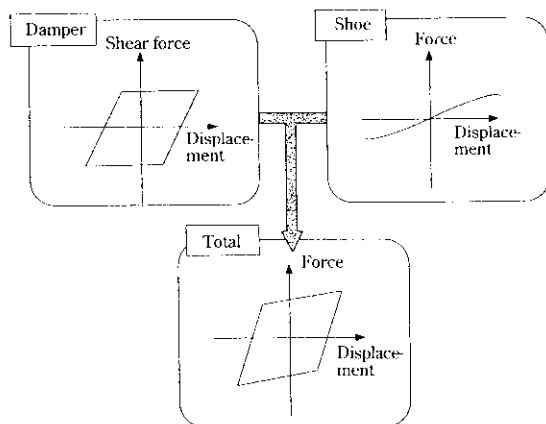


Fig. 3 Hysteretic loop of isolation system

けられることから、式 (6) が得られ、極軟鋼ダンパーの剛性 K_d は式 (7) で表せる。

$$F = \frac{Gd^3\pi t}{4lr^2} x \quad (6)$$

$$K_d = \frac{Gd^3\pi t}{4lr^2} \quad (7)$$

ここに d は鋼管径、 t は板厚、 r はアーム長、 l は管長である。

以上から免震システムの復元力特性は Fig. 3 のように表せる。

3 免震支承の応答特性

3.1 地震応答スペクトル

地震波の応答特性を調べるために、減衰定数 5% の加速度応答スペクトルを求めた。なお解析に用いた地震波はレベル 1、レベル 2 に対応した代表的地震波として Table 1 の地震波を用いた。この解析結果を Fig. 4 に示す。解析で取り上げた地震波の特徴を見ると、神戸海洋気象台 NS 地震波は 0.05~1.6 s の周期で、レベル 2 地震波は 1.6 s 以上で最も応答スペクトルが大きくなっており、内陸直下型地震である神戸 NS 海洋気象台地震波は低周期の応答成分が多く、プレート境界型地震であるレベル 2 地震波は長周期の応答成分が多いことがわかる。十勝沖八戸地震、レベル 1 地震については、前出の 2 地震波と比較すると応答スペクトル自体は小さいが、プレート境界型地震波の特徴である長周期成分が比較的大きくなっていることがわかる。

3.2 地震応答解析

都市内高速道路の橋脚 (Table 2) を例にして Fig. 2 の 2 質点系モデルに免震装置を適用した場合の地震応答解析を行った。地震応答解析の計算手法は線形加速度法を用い、入力地震の加速度に対する

Table 1 Earthquake data

Earthquake	Characteristic value
Hyougo-ken Nanbu Earthquake (Kobe NS)	Active fault type (Level 2)
Tokachi-oki Hachinohe Earthquake	A plate tectonics type (Level 2)
Level 1	Design of specifications for highway bridge in Japan: standard earthquake
Level 2	Road bridge isolation manual: standard acceleration wave

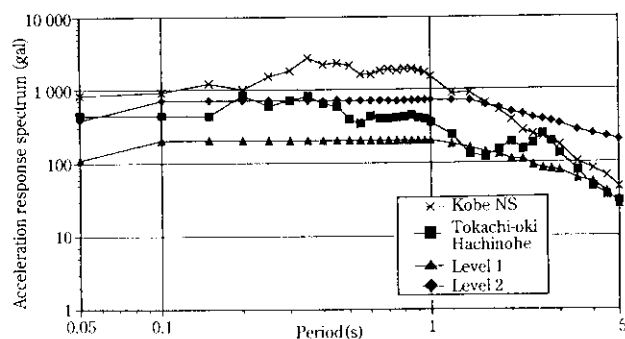


Fig. 4 Acceleration response spectrum

Table 2 Structural model

Element	Item	Value
Upper structure	Weight (N)	1.2×10^7
	Stiffness (N/cm)	7.4×10^5
Lower structure	Weight (N)	7.4×10^5
	Stiffness (N/cm)	3.5×10^5
Isolation shoe	Damping factor	0.02
	Radius (cm)	100
Damper	Radius of pipe (cm)	55
	Thickness (cm)	3.5
	Arm length (cm)	200
	Pipe length (cm)	150

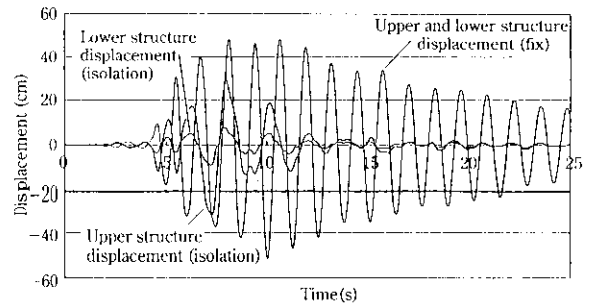


Fig. 5 Seismic responses of bridge structural elements

各質点の加速度、速度、変位を非線形連続方程式から求めた。すべり式免震装置を取り付けた場合と否を剛結に結合した場合の神戸海洋気象台 NS 地震波に対する上・下部工変位の時刻歴応答解析の結果を Fig. 5 に示す。免震装置を設置した場合は、剛結否を設置した場合と比較すると、下部工の応答値が最大 80% も低減している。

また上部工についても免震装置を設置した場合の方が、剛結否より早く減衰しており、免震装置として十分な性能を有していることがわかる。

次に異なる地震波に対する免震効果を検証するために地震による応答変位と、免震装置の固有周期の解析を実施する。応答変位を抑えることで下部工の破壊を防ぎ、免震装置の固有周期が地震波の固有周期と離れていることで構造物の共振を防ぐことが検証できることから、Table 1 の地震波に対して、すべり式免震装置および、剛結否を設置した場合についてそれぞれ上・下部工の最大応答変位と周波数応答関数を求めた。解析結果を Fig. 6, 7 に示す。すべり式免震

装置を設置した場合、下部工はどの地震波に対しても免震装置を設置しない場合と比較すると、設置した場合の方が応答変位が小さくなっており、免震効果が確認できる。また周波数応答関数についても免震装置の固有振動数は剛結否に対し、長周期側にシフトしていることから共振しにくい構造であり、免震特性を発揮していることが分かる。上部工については、レベル 2 の地震波に対して免震装置を設置した方が剛結否より変位が大きくなっている。これは長周期成分の卓越する地震波に対して本免震装置の固有周期長周期化性能は十分でないことを示しており、応答値を低減するには減衰性能を大きくする必要があることを示唆している。実際、免震装置の設置数を増やすと上部工の応答変位は減少し、下部工の応答変位はやや増加する。レベル 2 の地震波で剛結否より応答変位を少なくするには、この装置を 8 箇所以上設置する必要があるが、設置個数の決定にあたっては下部工の応答変位も含めた検討が必要であり、これは 4.2 で行うことにする。

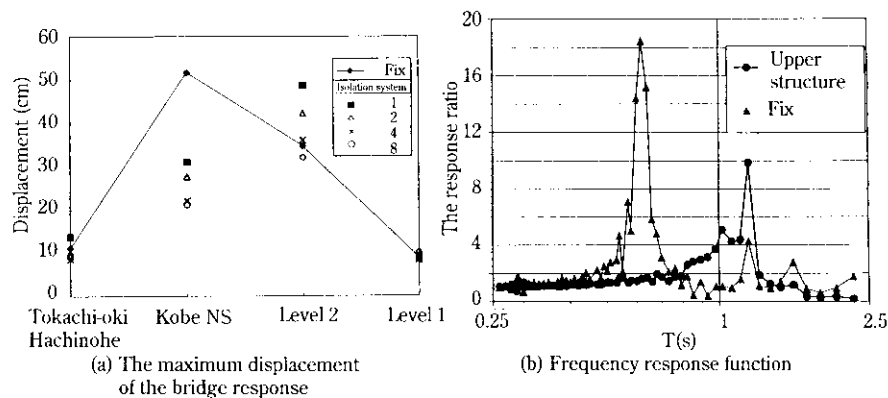


Fig. 6 Comparison of bridge responses (upper structure) with the isolated device and with the fixed connection

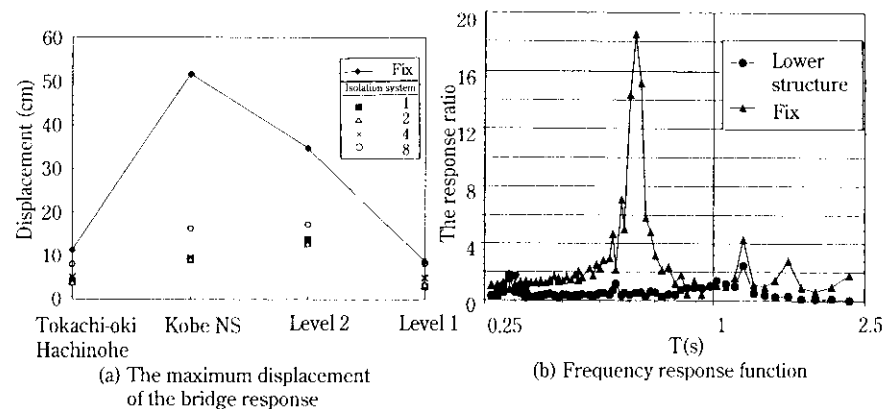


Fig. 7 Comparison of bridge responses (lower structure) with the isolated device and with the fixed connection

4 免震装置の最適化

4.1 最適化基準

免震装置として最も必要な機能は、地震時に生じる下部工の負担を最小に抑える、つまり、入力地震波に対する下部工の応答値を最小にすることである。同時に上部工に関しては、隣接する桁が衝突しない程度に応答変位が抑えられることである。具体的な基準としては、下部工の応答変位は下部工に生じる曲げモーメントが降伏モーメント以下で、かつできるだけその値は小さいことが望ましく、上部工の変位は隣接する桁に衝突しない程度、つまり上下部工の相対変位が 20 cm (30 cm と規定している文献もある) 以下であることが必要である。

4.2 パラメータ解析

4.2.1 免震装置の固有周期と下部工の応答特性

免震装置の応答特性を明らかにするために、免震装置の固有周期 T ((3) 式より算出) をパラメータとして下部工の応答変位を求めた。なお、この解析で用いた地震波は 3 章で比較的大きな応答が得られた神戸海洋気象台 NS 地震波とレベル 2 地震波とした。Fig. 8 の解析結果から地震波の種類に関わらず、免震装置の固有周期が長周期化するにしたがい下部工の応答変位が減少しているのがわかる。これは免震装置と減衰装置を組み合わせることで、減衰装置が塑性化し履歴減衰を生じたためと考えられる。

4.2.2 免震装置の最適仕様

免震装置の半径 R に対する下部工に生じる曲げモーメント比

($M_{\max}/M_y$) の関係を Fig. 9 に示す。なお $M_{\max}$, M_y は各々基部に生じた最大曲げモーメント、降伏曲げモーメントである。神戸海洋気象台 NS、レベル 2 どちらの地震波に対しても、半径 R が 100 cm 以下では半径が大きくなるにつれて曲げモーメント比は小さくなり、 R が 100 cm 以上では曲げモーメント比はそれほど変わらない傾向となっている。免震装置の最適仕様は下部工にかかる負担を最小限に抑え、かつ製作の観点から下向き半径 R は小さい方が望ましいことから、免震装置の最適半径 R を 100 cm とした。

4.2.3 減衰装置の最適仕様

減衰装置の剛性に対する上・下部工の応答変位の関係を Fig. 10 に示す。なお (6) 式の $d/t/l^2$ をと置き、Table 2 から得られる ξ_0 を ξ_0 、免震装置の半径 R は前節の最適検討の結果から 100 cm とした。解析結果は神戸海洋気象台 NS、レベル 2 どちらの地震波に対しても減衰装置の剛性が高くなるにしたがい下部工は上部工と一体化し、変位量が大きくなり、上・下部工間の相対変位は小さくなっていく。減衰装置の最適仕様は条件から上・下部工の相対変位が 20 cm 以下となるのは、神戸海洋気象台 NS 地震波は ξ/ξ_0 が 2 以上で、レベル 2 地震波は ξ/ξ_0 が 8 以上であることから、この 2 つの結果を満足する条件は ξ/ξ_0 が 8 以上である。この範囲で下部工の応答変位が最も小さいのは ξ/ξ_0 が 8 であり、このときの下部工の変位量は神戸海洋気象台 NS 地震波が 17 cm、レベル 2 地震波が 20 cm となる。ここで、下部工が降伏モーメントに達する時の変位が 48 cm であることから、 $\xi/\xi_0 = 8$ のとき下部工は弾性状態にあることがわかる。よって、最適な減衰装置の剛性は ξ/ξ_0 が 8 となる。なお、 ξ/ξ_0 が 8 の剛性を得るには、この減衰装置を 2 ケ所設置する必要がある。

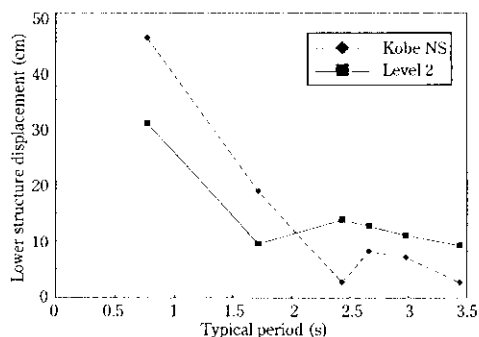


Fig. 8 The relationship between frequency of isolation system and reaction displacement of lower structure

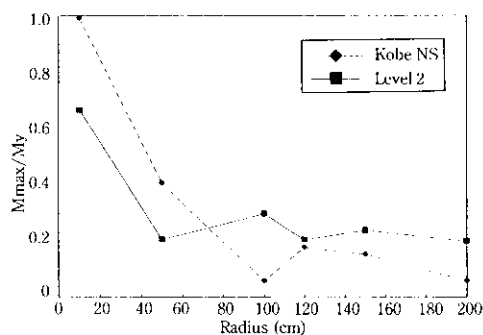


Fig. 9 The relationship between isolation systems radius and bending moment of lower structure

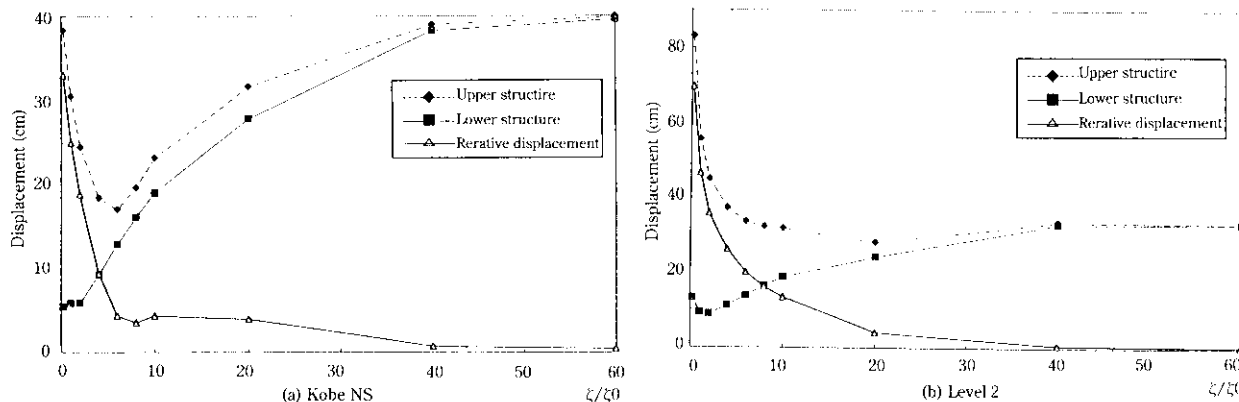


Fig. 10 Structural responses of bridge elements for various isolation systems

