

制震装置適用による実既設橋梁の耐震補強に関する検討
 Examination on the Seismic Retrofit of an Actual Bridge
 by Applying the Seismic Control Device

榎木 博¹⁾、香川 正臣²⁾、金子 誉³⁾、勝川 藤太⁴⁾、
 鈴木 猛康⁵⁾、井澤 衛⁶⁾、利根川 太郎⁷⁾

Hiroshi ENOKI¹⁾, Masaomi KAGAWA²⁾, Isao KANEKO³⁾, Touta KATSUKAWA⁴⁾,
 Takeyasu SUZUKI⁵⁾, Mamoru IZAWA⁶⁾ and Taro TONEGAWA⁷⁾

- 1) マツダ(株) プラント技術部 第1プラント技術グループ 主任
 Assistant Manager, Plant Eng. Group No.1, Plant Eng. Dept., Mazda Motor Corporation.
- 2) マツダ(株) プラント技術部 第1プラント技術グループ
 Plant Eng. Group No.1, Plant Eng. Dept., Mazda Motor Corporation.
- 3) (株)熊谷組 技術研究所 土木耐震研究グループ 副長 工修
 Deputy Manager, Earthq. Eng. Res. Group, Tech. Res. & Develop. Inst., Kumagai Gumi Co., Ltd., M. Eng.
- 4) (株)熊谷組 技術研究所 土木耐震研究グループ 工修
 Earthq. Eng. Res. Group, Tech. Res. & Develop. Inst., Kumagai Gumi Co., Ltd., M. Eng.
- 5) (株)熊谷組 技術研究所 土木耐震研究グループ 課長 工博
 Manager, Earthq. Eng. Res. Group, Tech. Res. & Develop. Inst., Kumagai Gumi Co., Ltd., Dr. Eng.
- 6) 住友金属工業(株) 土木・橋梁技術部 東京橋梁設計室 室長 工修
 Manager, Bridge Design Sect., Civil Eng. & Bridge Tech. Dept., Sumitomo Metal Industries, Ltd., M. Eng.
- 7) 住友金属工業(株) 土木・橋梁技術部 東京橋梁設計室 工修
 Bridge Design Sect., Civil Eng. & Bridge Tech. Dept., Sumitomo Metal Industries, Ltd., M. Eng.

要約

大地震が発生した後、早期に工場生産を再開するためには被災施設の復旧活動が肝要であり、構内幹線道路に架かる橋梁が復旧活動に使用可能であることが不可欠である。本稿では、工場内の既設道路橋を検討対象として、まず当該地域の地震活動度に基づいて入力地震動の設定について考察し、次に当該橋梁の2層式RCラーメン橋脚の地震時保有耐力の検討をした。さらに、当該橋梁の耐震補強を目的とした制震装置の適用について、地震応答解析により検討した結果、制震装置の適用が有効であることが確認された。

SUMMARY

In order to restart manufacturing activity as soon as possible after a large earthquake occurs, damaged facility should be recovered in a short period. Thus, it is essential that bridges running through a automobile manufacturing plant should be remained usable for such a activity. This paper presents an examination on the seismicity of the area at which the plant locates, focusing on the input earthquake motion required to check the earthquake resistibility of the bridge constructed over 30 years ago. Then, bearing capacity to seismic lateral load of the bridge pier of reinforced concrete viaduct was analyzed. Finally, earthquake response analyses were conducted on the case that the seismic control device is applied to the bridge deck for the purpose of seismic retrofit of the bridge pier. As a result, it was shown that the application of seismic control device is very effective.

1. はじめに

大地震が発生すれば、生産工場は何らかの被害を被り、場合によっては生産ラインを一時的に停止せざるを得ないことが想定される。地震後できる限り早期に施設を復旧させ、生産を再開するためには、主幹道路が健全で復旧活動に使用可能であるとともに、電気、ガス、水道、通信等のインフラ設備が使

用可能であることが不可欠である。したがって、構内あるいは工場と外部との連絡のための橋梁は、被災すればそれ自体の復旧に多大な時間を要するため、生産ラインの復旧にとって致命的となる。また橋梁は、工場生産に不可欠な上記インフラ設備を添架している。したがって、このような橋梁を最も重要なライフラインと位置づけ、地震による損傷レベルを一定範囲内

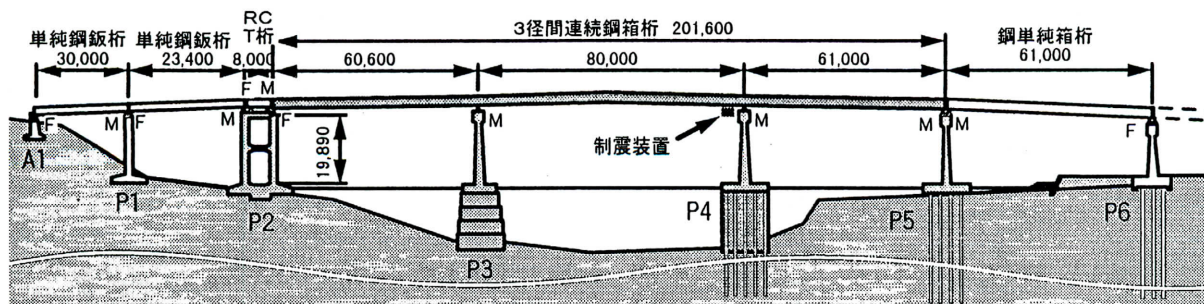


図-1 T橋梁側面図

Fig. 1 Side View of the Bridge to be analyzed.

にとどめるように設計しておく必要がある。

本稿は、マツダ本社工場内に架けられているT橋梁を対象として、レベル2地震動の設定、橋脚の地震時保有水平耐力の照査および耐震補強の計画立案のために検討した制震装置の適用について述べるものである。

これらの検討は、基本的には道路橋示方書¹⁾に準拠して行っている。まず最初に、T橋梁の耐震性検討に際して、当該地域の地震活動度と橋梁の重要度を考慮し、入力地震動を設定している。次に、固定橋脚の地震時保有水平耐力の照査を行うが、当該橋脚は2層式RCラーメン橋脚であり、照査方法が上記示方書に規定されていないため、ここでは田崎ら²⁾の研究を参考にして橋脚の耐震性を照査している。最後に、てこを利用して制震効果を高めたTMD型制震装置^{3, 4)}を本橋梁の耐震補強に適用したケースについて、非線形地震応答解析によって検討を実施した結果について報告する。

2. 地震活動度と橋梁の重要度に基づく入力地震動の設定

T橋梁はマツダ本社工場の本社地区と宇品地区を連絡する主幹道路にあり、資材や製品の搬入、搬出はもちろんのこと、蒸気、ガス、水道、電気、通信等を添架する重要なライフラインを形成している。大地震が発生すれば、その規模に応じて何らかの施設被害を受けることが想定されるが、その際は短時間で震後復旧を図って、できる限り早期に操業を再開させることが肝要であり、そのためには本橋梁が、地震後使用可能であることが不可欠と言える。

T橋梁の所在する広島県南部は、南海トラフに沿って発生するマグニチュード8クラスの巨大地震(南海地震)や、震源を瀬戸内海海底の比較的深い位置とするマグニチュード7強の地震の他、県西部の五日市断層や広島平野北部に位置する枝断層の影響を受ける⁵⁾。南海地震は、規模は巨大であるが、震央距離が大きいので、県南部に与える影響は決して大きくはない。一方、伊予・安芸地震(1857, $M=7\frac{1}{4}$)、芸予地震(1905, $M=7\frac{1}{4}$)等の瀬戸内を震源とする地震は、震央距離は小さいが、比較的震源が深く、同じ震央距離の地震と比較すれば地震動は小さい。また、五日市断層はCクラスの活断層であり、地震活動度は低く歴史上の被害地震は記録されていない。このように広島県南部の地震活動度は比較的低いことが知られている。

Fig.1にT橋梁の一般図を示す。本橋は、昭和40年に竣工し

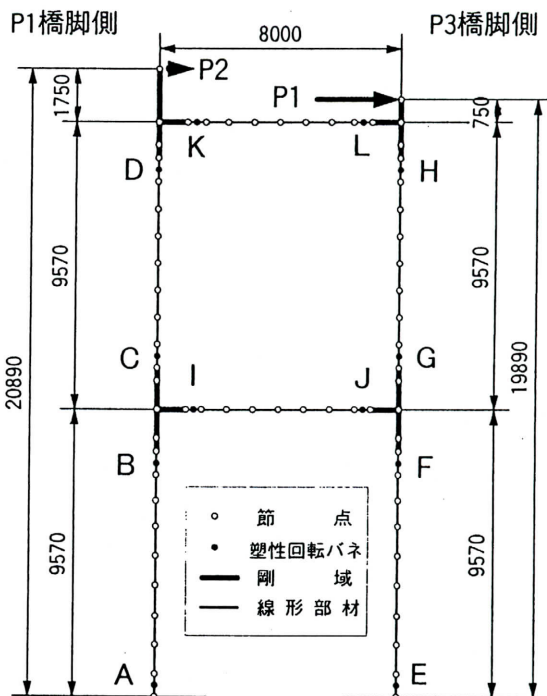


図-2 静的非線形解析に用いた骨組モデル

Fig. 2 Frame Model used for Static Nonlinear Analysis.

た3径間連続鋼箱桁橋であり、そのうち固定端であるP2橋脚は2層式ラーメン構造となっている。阪神大震災の被害を教訓として、平成8年度の道路橋示方書¹⁾では、鉄筋コンクリートラーメン橋脚の保有水平耐力の照査が導入された。この示方書では、門型ラーメンについては規定されているが、2層式ラーメン橋脚に関しては、「別途検討するのが望ましい」とされているのみである。そこで、田崎ら²⁾の研究を参考に、2層式ラーメン橋脚の地震時保有水平耐力を求めることとした。このような橋脚の特殊性とともに、制震装置を用いた耐震補強を計画したことから、さらに非線形地震応答解析を実施することにした。

地震応答解析では、検討の対象とする地震動を設定する必要がある。上記のように広島県西部の地震活動度は比較的低く、何千年に一度発生する直下型地震による入力地震動を対象にすることは現実的とは言えない。しかし、瀬戸内海ではM7クラスの地震が比較的短周期で発生しており、このタイプの

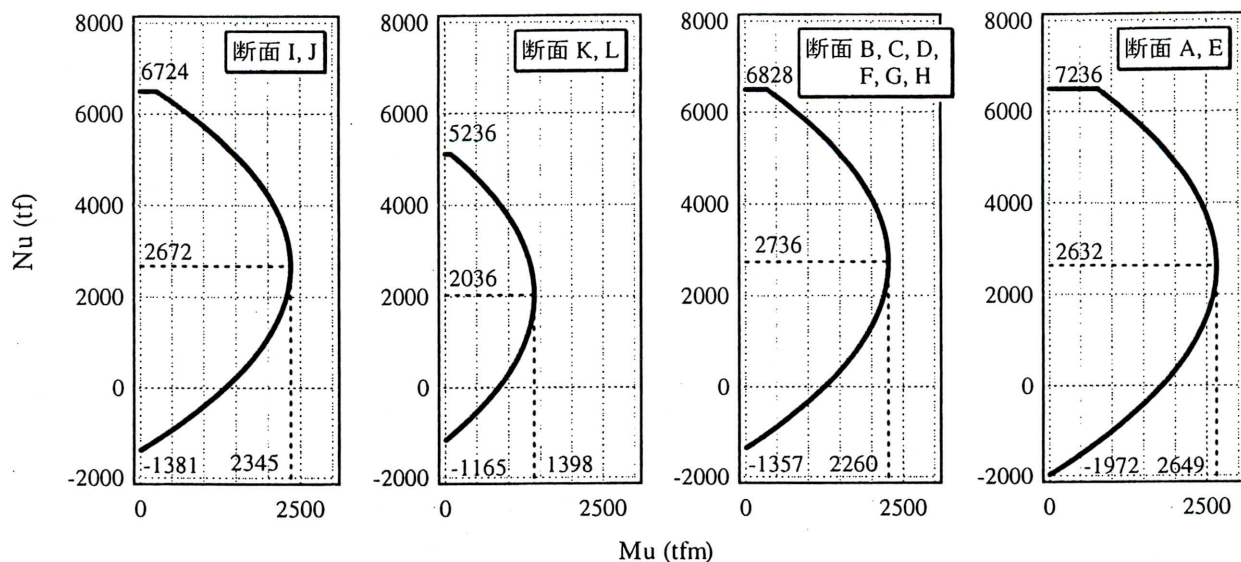


図-3 各塑性回転バネの軸力-終局曲げモーメント相関関係

Fig. 3 Relationship between Axial Force and Ultimate Capacity of Bending Moment at each Plastic Hinge.

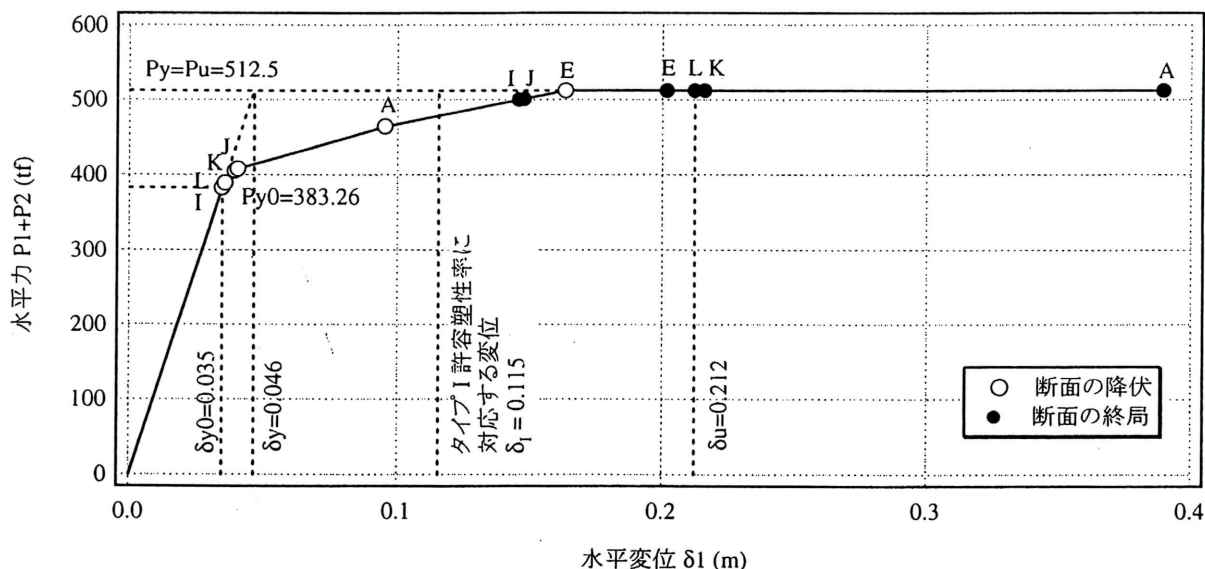


図-4 P2橋脚の水平力-水平変位関係

Fig. 4 Relationship between Lateral Force and Lateral Displacement for a Rahmen-typed Pier of Viaduct.

海洋型の規模の大きな地震が、対象橋梁に近い海底で発生することは想定しておく必要がある。そこで、T橋梁の耐震検討では、道路橋示方書において地震時保有水平耐力法による耐震設計結果の照査に用いる地震入力(L2地震動)のタイプIに基づいて行うこととした。

3. 2層式RCラーメン橋脚の地震時保有耐力

(1) P2橋脚の概要

T橋梁の3径間連続鋼箱桁部の固定端であるP2橋脚は、4本柱の2層式RC立体ラーメン構造である。橋軸方向についてみると、重量1810tfの鋼箱桁の慣性力をP3側上層梁で受け、P2橋脚上にのる重量150tfのRC-T桁の慣性力をP1側上層

梁で受ける。また、本橋脚は花崗岩(I種地盤)に直接基礎で支持されている。

(2) 解析モデル

対象橋脚は橋軸方向には同一ラーメンが2列あると見なせるので、1列だけを取り出して検討を行った。解析に用いた骨組モデルをFig.2に示す。水平力P1、P2を受けたときに、図のA～Lの位置で大きな曲げモーメントが生じ、隅角部で塑性化する可能性があるため、そこに軸力変動を考慮できる完全弾塑性型の曲げモーメント-曲率関係をもつ塑性回転バネを設けた。ここで、塑性ヒンジ長は田崎ら²⁾の方法によって算出し、塑性回転バネの曲げモーメント-曲率関係と軸力-終局曲げモーメント相関関係、弾性部材の剛性、剛域の設け方等につい

Table 1 Results of Judgement on Failure Mode of the Pier.
表-1 P2橋脚の破壊モードの判定結果

塑性 ヒンジ	せん断耐力 (tf)		作用せん断力 S_i (tf)	破壊形態の判定結果	
	$P_{si}(c_c=0.6)$	$P_{so}(c_c=1.0)$			
A	258.7	311.3	193.2	$S_i < P_{si}$	せん断破壊型
E	258.7	311.3	317.9	$S_i > P_{so} \rightarrow$	
I	540.9	586.4	436.0	$S_i < P_{si}$	
J	536.9	591.1	504.7	$S_i < P_{si}$	
K	435.2	480.3	196.9	$S_i < P_{si}$	
L	361.2	404.3	340.6	$S_i < P_{si}$	

ては道路橋示方書にしたがって設定した。各塑性回転バネの軸力-終局曲げモーメント相関関係をFig.3に示す。

(3) P2橋脚の水平力-変位関係

Fig.2 に示した骨組モデルにおいて、左右の橋軸直角方向上層梁の上面位置、すなわち固定支承の底面位置に水平荷重P1、P2を漸増させていき、RCラーメン橋脚全体の保有耐力と変形性能の検討を行った。ここで、P1とP2の比は、それぞれの桁重量の比(905tf : 75tf)を保つようにしている。

このようにして得られたP2橋脚の水平力-水平変位関係をFig.4に示す。図の縦軸には水平力P1、P2の和Pをとり、横軸はP1作用位置の水平変位 δ_1 をとっている。水平荷重を漸増させていくと、図中に○印で示したように、塑性回転バネが梁両端部(I→L→K→J)、柱基部(A→E)の順に塑性化し、塑性ヒンジが6個生じた後は水平耐力が一定となり、Fig.4 はこのようなメカニズムによって説明される。

さらに、道路橋示方書にしたがって、各塑性ヒンジ位置の回転角が終局塑性回転角に達するときの変位を求め、Fig.4 中に●印で示した。本橋脚の場合は、圧縮側柱の橋脚基部が塑性化する前に中層梁の両端部(I→J)が終局に達し、水平耐力一定のメカニズム状態になった後は、圧縮側柱基部(E)、上層梁両端部(L→K)、引張側柱基部(A)の順に終局状態に達する。

(4) P2橋脚の地震時保有水平耐力

2層式RCラーメン橋脚の終局変位 δ_u は、田崎ら²⁾の提案にしたがい、6個の塑性ヒンジのうち4個目が終局に達したときの水平変位と定義する。本橋脚の場合は、Fig.4 に示したとおり、 $\delta_u = 0.212m$ である。

Table 1 は、ラーメン橋脚が終局耐力に達したときに、各塑性ヒンジに作用するせん断力と、それぞれの断面のせん断耐力を比較したものである。圧縮側の下層柱(断面E)における比較から、本橋脚の破壊形態はせん断破壊型と判定される。ここでは詳述しないが、地震時保有水平耐力がないと判定され、下層柱に対するせん断補強が必要な結果となった。

以下は、下層柱のせん断補強を前提とし、破壊形態が曲げ破壊型となったものとして耐力照査を進めた結果である。Table 2 に示すとおり、静的な検討によると、本橋脚は地震時保有水平耐力があるとの判定結果が得られた。なお、タイプI地震動に対する許容塑性率 μ_a に相当する水平変位(以下、許容変位という)は $\delta_l = \mu_a \delta_y = 0.115m$ として Fig.4 に示してい

Table 2 Results of Judgement on Bearing Capacity of the Pier.

表-2 P2橋脚の地震時保有水平耐力の照査結果

地震動タイプ	タイプ I
地盤種別	I 種地盤
固有周期 T	0.67 sec
許容塑性率 μ_a	2.49
地域別補正係数 c_z	0.85
設計水平震度の標準値 k_{hco}	0.70
設計水平震度 k_{hc}	0.60
等価水平震度 k_{he}	0.30
等価重量 W	1247.4 tf
地震力 $k_{he} \cdot W$	424.1 tf
地震時保有水平耐力 P_a	512.5 tf
判定	$P_a > k_{he} \cdot W$ (O.K.)

る。

4. 非線形地震応答解析による変形性能の照査と制震装置を用いた耐震補強の検討

(1) 非線形地震応答解析による変形性能の照査

前章で行った静的解析によれば、P2橋脚は下層柱のせん断補強を行えば、曲げ破壊先行型の破壊モードとして地震時保有水平耐力を有する結果となる。本橋脚は、2 層式RCラーメン構造で特殊な形式であることから、さらに非線形地震応答解析を行って、変形性能を照査することとした。

ここでは、変形性能に関する補強の要否を概略検討しておくことを目的としており、解析には Fig.5(a)に示すような簡易なモデルを用いた。P2橋脚と上部構造を1自由度の質点系でモデル化した。その際、橋脚の剛性としては2列あるラーメンの1列分の剛性とし、質量についてもこれに対応して、橋脚が支持する全質量の1/2としてモデル化した。なお、質量の設定に当っては、鋼桁(905tf)、RC-T桁(75tf)および橋脚重量の0.3倍(161tf)を考慮しており、バネの履歴特性は Fig.4 に併記した完全弾塑性型の骨格曲線からなるバイリニア型とした。入力地震動には、L2地震動のタイプ I の I 種地盤用の標準波3波⁶⁾(No. 1~3)を用いた。

地震応答解析から得られた質点の応答変位波形を、Fig. 6

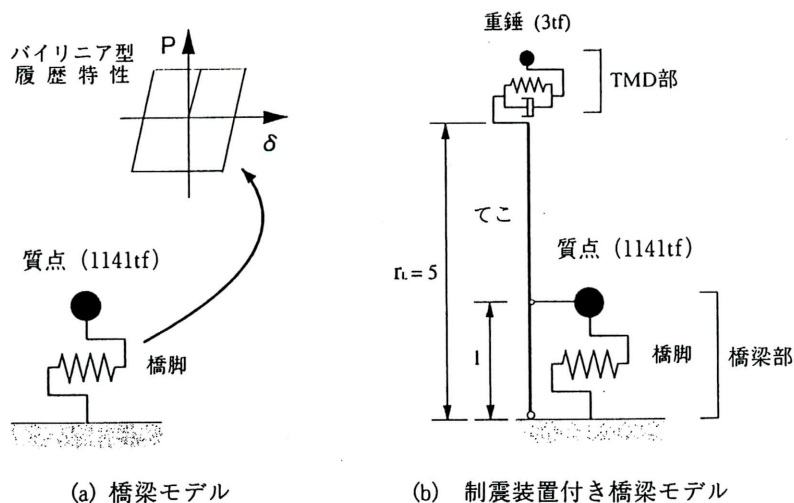


図-5 非線形地震応答解析に用いた解析モデル

Fig. 5 Structural Model for Non-linear Earthquake Response Analyses.

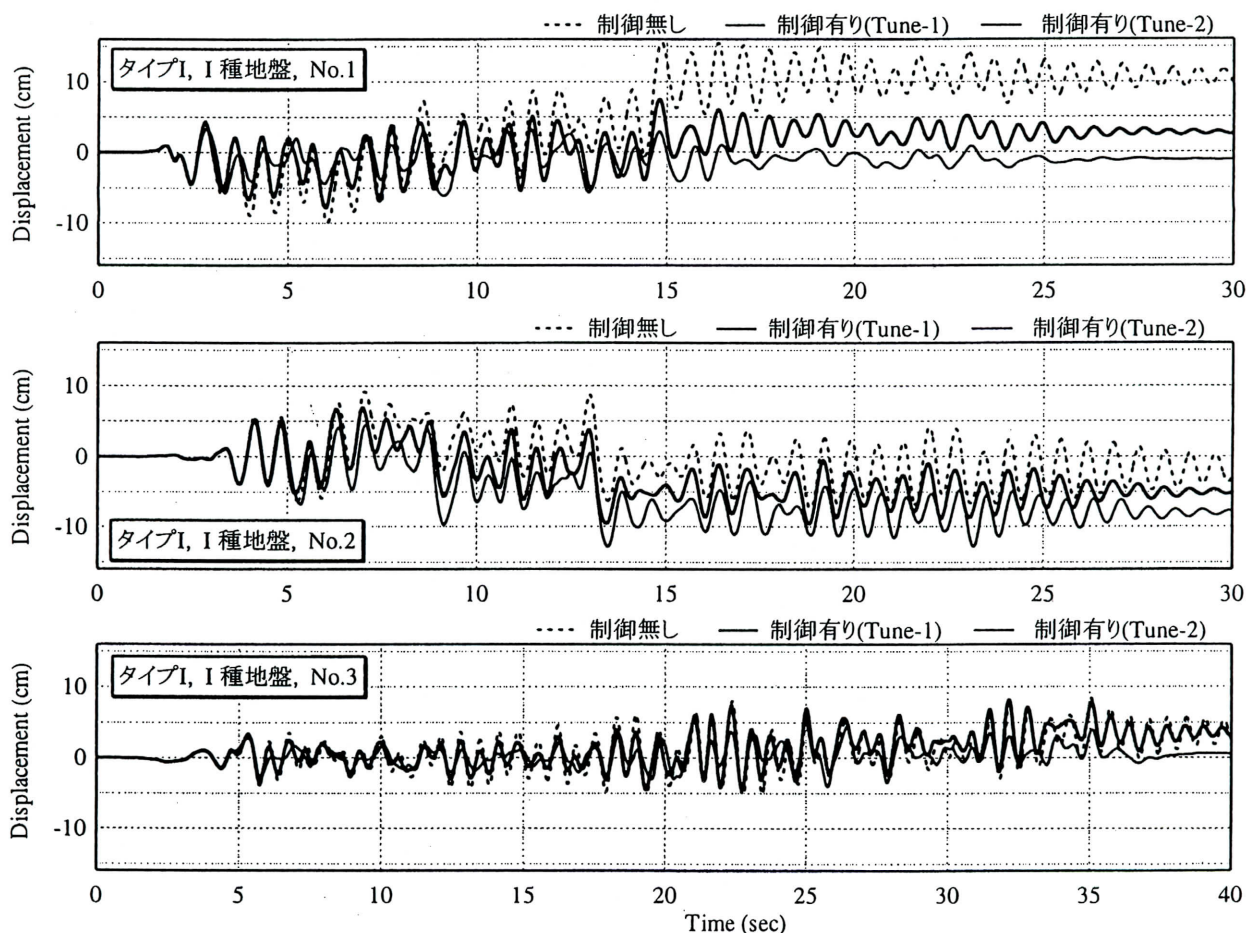


図-6 制震装置の有無と最適調整法の違いによる変位応答波形の比較

Fig.6 Comparison on Time Histories of Displacement of Bridge Deck among Cases with and without Seismic Control.

に点線で示す。入力波No. 2およびNo. 3のケースの応答変位は、全継続時間にわたり許容変位 $\delta_l = 11.5\text{cm}$ を超えることはない。しかし、入力波No. 1のケースについては、15秒以降に何度も δ_l を超えており、しかも δ_l に相当する程度の残留変位が認められる。

以上のように、入力地震動の位相特性によっては、橋梁は大きな変位応答を示すことがあり、橋脚の変形性能に対する補強の必要性が認められた。

(2) 制震装置を用いた耐震補強の検討

これまでの検討結果を考察すると、T橋梁のP2橋脚は静的

解析からは保有耐力や変形性能があると判定され、他方動的解析からは変形性能に問題ありとされるケースがあった。このことは、橋梁に減衰性能を付加して制震する方法が有効であることを示唆していると考えられる。

そこで、てこを利用して制震効果を高めたTMD型制震装置^{3, 4)}(以下、パワフルTMD)を適用したケースを対象として非線形地震応答解析を行い、変形性能に対する補強効果を検討することとした。ここでは、パワフルTMDのてこ比を5、マス重量を鋼箱桁重量(1810tf)の約0.3%(6tf)とし、Fig.1に示したように装置1基をP4橋脚から反力をとるように設置することを想定する。鋼箱桁、RC-T桁、下部構造の3割の重量の合計(2282tf)が、橋梁の1次モードの有効質量に近似できるとすれば、マス重量6tfは橋梁の1次モードに対する質量比として0.26%に相当する。

数値解析モデルをFig.5(b)に示すが、これはFig.5(a)の橋梁モデルにパワフルTMDを表現する要素を取付けたものであり、てこの反力を取るP4橋脚の剛性は無視している。なお、非線形挙動を示す橋脚のどの変形状態に対して装置を最適調整すると有効かを検討するために、橋脚の剛性としてFig.4の初期剛性を採用して最適調整を行ったケース(Tune-1)と、5個目の塑性ヒンジが断面Aに生じたときの割線剛性を採用したケース(Tune-2)の2ケースについて解析を実施した。

Fig.6には、前述の制御なしの応答変位波形と、最適調整法の異なる2種類のパワフルTMDを採用した2ケースの応答変位波形を比較して示している。まず、入力波No. 1についてみると、制御なしのケースでは応答変位が許容変位 $\delta_l = 11.5\text{cm}$ を超えていたが、制震した2つのケースではいずれも、応答変位が許容変位以下に低減されている。次に、入力波No. 2についてみると、ケース tune-1 では13秒以降に応答変位が負側にかたより、制御なしケースで許容変位を満足していたものが、制震することで逆に許容変位を超える結果となっている。一方、ケース tune-2 では5cm程度の残留変位が生じるものの、応答変位が許容変位を満足しており、制御なしのケースと比較すると、1波1波の変位振幅を大きく低減していることがみてとれる。最後に、入力波No. 3についてみると、そもそも制御なしのケースで応答変位は大きくなく、制震装置を取り付けた2ケースのどちらにも、応答変位に顕著な低減は認められない。標準波3波を入力地震動として用いた非線形地震応答解析の結果をとおしてみると、橋脚に塑性ヒンジが5個生じたときの割線剛性を橋脚の剛性として採用して最適調整した tune-2 のケースのみが、全ての入力地震動に対して橋梁の応答変位を許容変位以下に抑えることができています。

このように、制震装置を適用することによって、2層式RCラー

メン橋脚のじん性補強が可能となることが明らかになったので、より詳細なモデルを用いた地震応答解析を実施し、さらに深く検討を進めてゆく所存である。

5. 結論

本稿では、実橋梁の2層式RCラーメン橋脚の耐震性を評価するとともに、本橋梁の耐震補強方法として制震装置を適用したケースについて、非線形地震応答解析に基づき検討を行った。その結果、2層式ラーメン橋脚は、静的解析では耐力を有する結果となるものの、非線形地震応答解析のタイプI地震動のうちI種地盤No. 1地震動に対しては応答塑性率が許容塑性率を超える結果となり、耐震補強が必要との結果となった。それに対して制震装置としてパッシブタイプであるパワフルTMDを、通常検討で用いるよりも小さな質量比0.3%(重量6tf)のマス、てこ比5で1基設置することにより、応答塑性率は許容値の範囲内となり、地震時安全性の向上が確認された。

従来橋脚の耐震補強としては、鉄板やFRPならびにRCの巻き立てによる靱性の向上が図られてきた。しかし河川横断橋梁のように仮締切を必要とする場合や高橋脚においては、これらの耐震補強よりも制震装置の設置の方が、経済面や工期の点から有利な場合がある。したがって既設橋梁の耐震補強に当たっては、制震装置採用による地震力の低減も、耐震補強の一手法に位置づけられると思われる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1996.12.
- 2) 田崎賢治、運上茂樹、寺山徹：2層式鉄筋コンクリートラーメン橋脚の面内方向の耐震設計、第1回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.115-118、1998.1.
- 3) Kaneko, I., Katsukawa, T., Yoshitani, S. and Suzuki, T.: The Powerful TMD for Bridges Compulsorily Shaken by a Reaction Force from an Abutment, 11WCEE, 1996.6.
- 4) 勝川藤太、金子誉、鈴木猛康：既設橋梁の耐震補強に対する制震装置の適用に関する解析的検討、第24回地震工学研究発表会講演論文集、pp.317-320、1997.7.
- 5) 宇佐美龍男：新編 日本被害地震総覧、東京大学出版会、1996.
- 6) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する参考資料、pp.10-1-4、1997.3.