

特集 「自然災害にそなえる」

制震装置の橋梁への適用性に関する検証

野村 敏雄 岡野 素之
松田 隆

Study on Applicability of Energy Absorbing Device to Bridge

Toshio Nomura Motoyuki Okano
Takashi Matsuda

Abstract

Seismic design of structures in civil engineering is changing to the capacity based method, and this has led to proposals for adoption of high-strength materials and new devices. At the same time, limitations in investment in infrastructure require reduction of construction costs. This paper describes the introduction into a continuous prestressed concrete bridge of a device that absorbs and dissipates earthquake energy. It describes the passive control design for the bridge to reduce the pier section and thus reduce construction cost. A brake-damper was used as a passive control device, and an experiment was performed to confirm its dynamic capacity under large deformation and a dynamic analysis was carried out. The following results were obtained. 1) The hysteretic capacity of the brake-damper subjected to large deformation was obtained as expected. 2) Use of the device made it possible to reduce the pier sections by 30-40%. 3) The brake-damper enabled larger cost reductions than the base-isolated device.

概 要

近年、土木構造物の耐震設計は性能照査型設計法に移りつつあり、従来は一般に活用されてこなかった高強度材料や新構造を用いた橋梁の提案が可能になってきている。また、公共事業への建設投資の縮減からコストダウンによる建設費の抑制が求められている。そこで、本研究では地震による振動エネルギーを吸収・消散する部材を構造に取り入れ、地震時の損傷を制御する制震設計を橋梁に適用することにより、橋脚断面のスリム化やコスト低減を図ることを検討した。橋梁でも適用可能な制振装置として摩擦ダンパーに着目し、大振幅を想定したダンパーの動的性能確認実験およびPCラーメン橋に対して動的解析を行った。検討の結果、以下のことが確認された。1) 大振幅においてもダンパーは想定した履歴性能を得ることができた。2) PCラーメン橋では橋脚断面を60～70%に低減することが可能であった。3) PCラーメン橋では免震装置と比較して大幅なコスト縮減が可能である。

1. はじめに

近年、土木構造物の耐震設計は性能照査型設計法に移りつつあり、従来は一般に活用されてこなかった高強度材料や新構造を用いた橋梁の提案が可能になってきている。また、公共事業への建設投資の縮減からコストダウンによる建設費の抑制が求められており、橋梁分野においては構造断面の縮小による建設材料の数量低減が1つの方策として考えられる。特に断面諸量が地震時応答によって決定される橋梁下部工では、地震力の低減が重要な要素となるので、従来の道路橋などでは免震設計が多く採用されている。しかし、変位が過大となり桁遊間が大きくなることや地盤や下部構造の影響で長周期となる橋梁では適用が困難などの問題があった。

そこで、最近では地震による振動エネルギーを吸収・消散する部材を構造に取り入れ、地震時の損傷を制御する制震設計に関する研究が盛んに行われている。葛西ら¹⁾は連続高架橋に対して制震ブレースと呼ばれる部材を桁と橋脚間に設置し、応答低減効果を検討しており、本田

ら²⁾はビンガム流体を用いた制振装置を耐震補強に適用している。また、広瀬ら³⁾は制震ダンパーによる応答低減効果と構造断面の縮小化を検討している。

本研究では制震設計による建設部材のコスト低耐震性能の向上を目標に、建築分野では適用実績のある摩擦減衰型の制振装置⁴⁾に着目し、これを大ストローク化することにより、PCラーメン橋への適用性を検討した。

2. 制振装置の動的性能確認実験

2.1 制震装置（ブレーキダンパー）

ブレーキダンパー（以下、BDと略記す。）は、鋼材間にステンレス材とブレーキ材を一對として挟み込み、両者間の滑りによる摩擦力を減衰力として利用した摩擦履歴型ダンパーである。接合には、皿バネを介した高力ボルトを用い、締め付け力を常に一定に保持することにより、安定した履歴ループを描くことが可能である。BDの構造をFig. 1に示す。

2.2 動的性能確認実験

BDの動的性能を確認するため、動的加力実験を実施した。試験体に用いたBDの性能をTable 1に、試験体設置状況をPhoto 1にそれぞれ示す。加振は、正弦波加振とし、加振周期を0.2~4.0秒の間で、振幅を±10mm~±390mmの間で変化させた。正弦波の波数は、8波とし、目標変位に向かって徐々に振幅を増大し、4波目と5波目に目標変位に達し、その後、徐々に振幅を減少させた。

2.3 実験結果

Fig. 2に周期2秒の場合における荷重~変位の履歴ループを示す。履歴ループは、最大振幅100mm程度までは、矩形形状となる。しかし、最大振幅が200mm以上では、減衰力が変位0mm付近で小さくなる、いわゆる瓢箪型の履歴性状を示した。この傾向は他の周期の場合も概ね同様の傾向である。

2.3.1 摩擦係数の周期依存性 Fig. 3に摩擦係数と周期との関係を、得られたデータから求めた近似直線とともに示す。多少のばらつきはあるものの、周期依存性あまりなく摩擦係数は0.3程度である。

2.3.2 摩擦係数の振幅依存性 Fig. 4に摩擦係数と振幅との関係を、得られたデータから近似した二次曲線とともに示す。摩擦係数は振幅とともに変化し、振幅依存性が認められる。ただし、振幅が大きくなるのに従い摩擦係数は減少するが、実験範囲では一定値に近づく傾向が見られる。設計では想定する変位振幅によっては摩擦係数を低下させることが必要と考えられる。

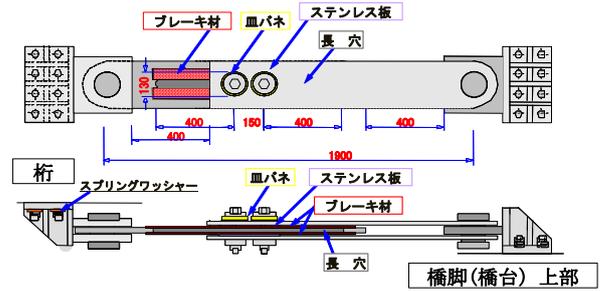


Fig. 1 ブレーキダンパーの構造
Basic Composition of Brake Damper

Table 1 試験体仕様
Mechanical Properties

減衰力	200kN
ストローク	±390mm
ボルト軸力	95.5kN
ボルト本数	3本
せん断面数	2面



Photo 1 試験体設置状況
Element Test

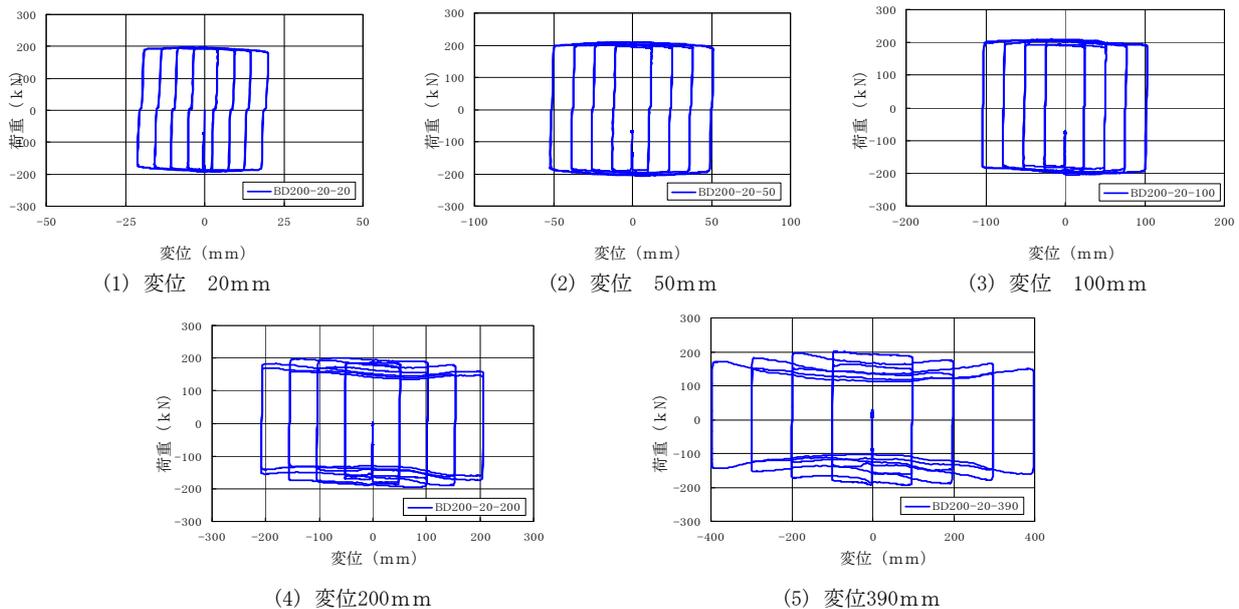


Fig. 2 履歴性状 (周期 2 秒)
Relation between Frictional Force and Transformation

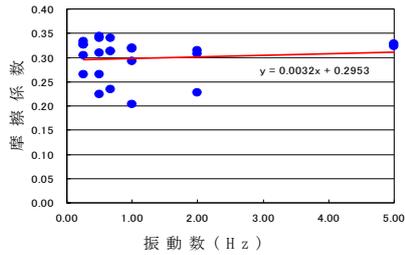


Fig. 3 摩擦係数と振動数の関係
Relation between Frictional Coefficient and Frequency

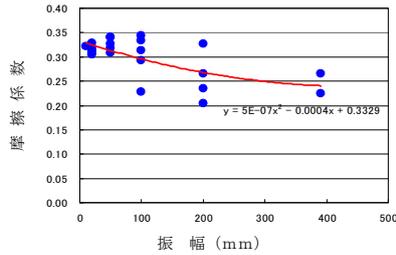


Fig. 4 摩擦係数と振幅の関係
Relation between Frictional Coefficient and Transformation

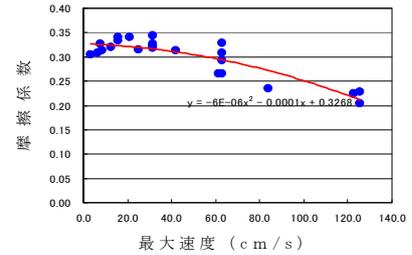


Fig. 5 摩擦係数と最大速度の関係
Relation between Frictional Coefficient and Transformation

2.3.3 摩擦係数の速度依存性 Fig. 5に摩擦係数と最大速度との関係を、得られたデータから近似した二次曲線とともに示す。摩擦係数は振動速度にも依存しており、最大速度が大きくなるに従い、摩擦係数は減少する特に高速度領域ではその傾向が顕著となる結果となっている。

3. PCラーメン橋への適用

3.1 検討対象橋梁

制震装置が地震動を吸収することにより、下部工である橋脚および基礎への入力が増加し、その結果、下部工の断面寸法および鉄筋量を低減することができると考えられる。

検討対象としたPCラーメン橋は、Fig. 6に示す3径間連続PC箱桁橋で、原設計は、道路橋示方書・同解説V耐震設計編に基づき、L1地震時に対し許容応力度設計法が、L2地震時に対し保有水平耐力法が適用されている。この橋梁の両端部である、A1およびA2橋台部と桁端部との間に橋軸方向および橋軸直角方向に対する制震装置を取付けた場合の応答を照査し、橋脚(P1, P2)の断面および鉄筋量を低減する試みを実施した。Fig. 7に原設計での橋脚断面配筋図を示す。ただし、上部工断面については、PC鋼材の配置等の施工条件から断面が決定されているため、原設計と同じ断面とした。Table 2に設計条件および使用材料の一覧を示す。

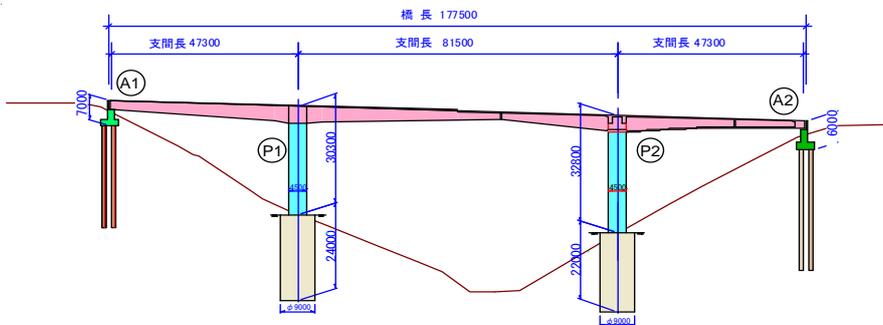


Fig. 6 対象橋梁
General View of Bridge

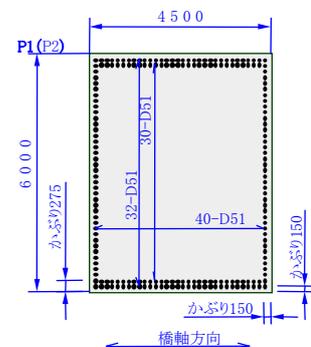


Fig. 7 橋脚断面
Cross Section of Pier

3.2 原設計断面での時刻歴応答解析

3.2.1 解析モデル 解析モデルは、上部構造および橋脚、橋台からなる構造全体系を骨組構造にモデル化した。Fig. 8に橋軸方向の解析モデルを示す。なお、上部工は線形はりモデルに、橋脚は塑性ヒンジ部をM-θパネモデル（履歴は武田モデル）で、その他を非線形はりモデルに、地盤を橋脚下端部に集中バネとしてそれぞれモデル化した。

また、A1, A2橋台に設置されるゴム支承は、橋軸方向に支承ばねとして、橋軸直角方向に固定としてモデル化した。

3.2.2 解析方法 解析は、汎用3次元動的解析プログラムTDAPⅢを使用した。入力地震動は、道路橋示方書・同解説V耐震設計編に示されるレベルⅡ地震動のタイプⅠおよびタイプⅡ地震動（Ⅱ種地盤用）をそれぞれ3波用いた。

3.2.3 解析結果 解析結果の一覧(3波平均)をTable 3に示す。また、橋脚の橋軸方向の応答例として、タイプⅡ地震動の一波を入力した場合のP1橋脚下端部の塑性ヒンジとその直上の一般部の応答履歴をFig. 9に示す。なお、図中には、道路橋示方書で規定される許容回転角および許容曲率も併せて示す。本橋梁では、塑性ヒンジ部直上の一般部での応答が許容値に近い応答となっている。

Table 2 設計条件
Design Condition

上部構造		下部構造	
形式	PC3径間連続 ラーメン箱桁橋	橋脚	RC柱式橋脚 (充実断面)
橋長(m)	177.5	橋台	逆T式橋台
支間(m)	47.3+81.5+47.3	基礎	深礎杭
使用材料	コンクリート： $\sigma_{ck}=40\text{N}/\text{mm}^2$ 鉄筋：SD345 PC鋼材： SWPR7B(12S12.7)	使用材料	コンクリート： $\sigma_{ck}=40\text{N}/\text{mm}^2$ 鉄筋：SD345

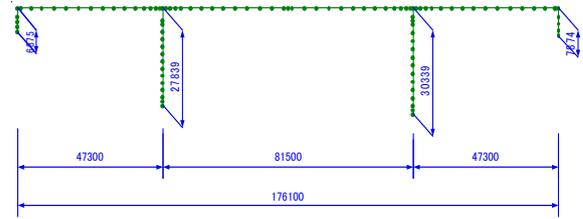


Fig. 8 解析モデル (橋軸方向)
Analytical Model

Table 3 解析結果一覧 (現設計断面)
Analytical Results (Present Design)

	L2地震動	橋脚	一般部 ($\times 10^{-4}/\text{m}$)		塑性ヒンジ部 ($\times 10^{-3}/\text{rad}$)		支承変形量(m)		
			応答曲率	許容曲率	応答回転角	許容回転角	A1	A2	許容変形量
橋軸方向	タイプ I	P 1	6.14	8.10	1.87	5.09	0.13	—	0.275
		P 2	5.79	8.12	1.66	5.05	—	0.13	0.275
	タイプ II	P 1	7.25	8.11	9.36	16.3	0.29	—	0.275
		P 2	7.23	8.13	8.42	16.0	—	0.29	0.275
橋軸直角方向	タイプ I	P 1	3.65	5.78	1.28	7.58	—	—	Fix
		P 2	4.06	5.80	1.41	7.46	—	—	Fix
	タイプ II	P 1	5.54	5.78	6.89	29.3	—	—	Fix
		P 2	5.80	5.80	7.72	28.6	—	—	Fix

3.3 制震化の検討

ここでは、原設計の橋脚断面から制震装置(ブレーキ・ダンパー)を付与することによる断面寸法の低減効果について検討する。

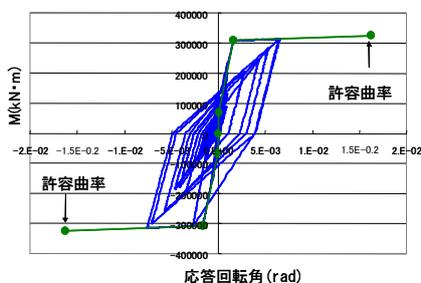
Fig. 10にBDのモデルを示す。モデル化は、非線形バイリニアモデルとし、降伏変位は1.0mm(一定)とし、降伏荷重は、減衰力によって決めることとした。

最適な断面寸法とBDの減衰力は、繰返し解析により決定した。得られた最適断面・配筋図をFig. 11に断面低減効果の一覧をTable 4にそれぞれ示す。検討の結果、橋軸方向および橋軸直角方向それぞれに、減衰力が950kN, 450kNのBDを取付けることにより、原設計の断面に対して、

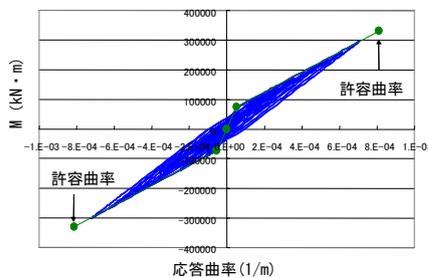
断面寸法および主鉄筋量を60~70%程度に低減することができた。照査結果(3波平均)をTable 5に、橋脚およびBDの応答例としてタイプII地震動の1波を入力した場合の橋軸方向の応答履歴をFig. 12に示す。なお、ここで決定した最適断面で、L1地震時および張出し架設時において、それぞれ作用断面力が許容応力度以内であることを確認した。

3.4 免震化の検討

前節で示した制震装置による効果と比較するため、原設計での支承条件を免震支承とした場合の断面低減効果について検討する。



(a) 塑性ヒンジ部



(b) 一般部

Fig. 9 橋脚の応答(加速度波形II-II-2)
Response of Pier

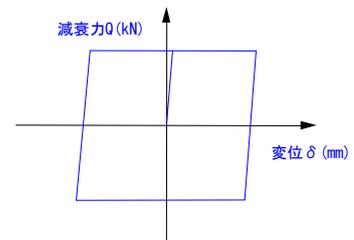


Fig. 10 ブレーキダンパーのモデル化
Model of Restoring Characteristics for Brake Damper

Table 4 断面低減効果
Effect of Section Decrease

断面(mm)		P 1 橋脚			P 2 橋脚		
		原設計	変更後	比率 ²⁾	原設計	変更後	比率
断面(mm)		6000×4500	5400×3200	0.64	6000×4500	5400×3600	0.72
主鉄筋量	橋軸方向	40-D51	36-D51	0.90	40-D51	36-D51	0.90
	橋軸直角方向 ¹⁾	32-D51 30-D51	21-D51 19-D51	0.65	32-D51 30-D51	24-D51 22-D51	0.74

¹⁾ 橋軸直角方向は2段配筋 ²⁾ 比率は、原設計に対する変更後の断面積比を示す。

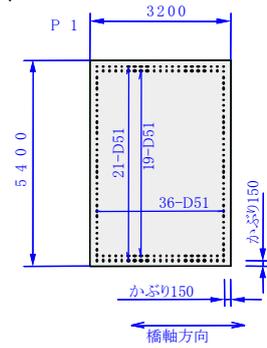


Fig. 11 制震化後の断面
Cross Section of Pier
with Brake Damper

Table 5 解析結果一覧 (制震橋梁断面)
Analytical Results (Energy Absorbing Device)

	L 2 地震動	橋脚	一般部(×10 ⁻³ /m)		塑性ヒンジ部(×10 ⁻³ rad)		支承変形量(m)		
			応答曲率	許容曲率	応答回転角	許容回転角	A1	A2	許容変形量
橋軸方向	タイプ I	P 1	7.14	11.5	1.42	3.29	0.117	—	0.275
		P 2	6.60	10.2	1.48	3.28	—	0.116	0.275
	タイプ II	P 1	9.96	11.5	7.91	8.45	0.275	—	0.275
		P 2	8.70	10.2	7.36	8.40	—	0.273	0.275
橋軸直角方向	タイプ I	P 1	6.03	6.86	3.36	4.02	0.087	—	0.275
		P 2	5.96	6.74	3.12	4.15	—	0.134	0.275
	タイプ II	P 1	6.83	6.86	11.7	12.4	0.205	—	0.275
		P 2	6.72	6.74	10.7	13.1	—	0.272	0.275

制震装置による断面低減効果と同一の効果を得られるように免震支承の大きさを決定した。この免震支承の諸元をTable 6 に、非線形バイリニアモデルをFig. 13 にそれぞれ示す。また、この場合の時刻歴応答解析による照査結果(3波平均)をTable 7 に、橋脚および免震支承の応答例としてタイプ II 地震動の1波を入力した場合の橋軸方向の応答履歴をFig. 14 に示す。

制震装置を取付けた場合と免震支承とした場合に、同一の断面低減効果を見込むために必要な支承の大きさを比較すると、それぞれ B600mm×W600mm×H110mm, B1500mm×W1500mm×H174mmとなる。

免震支承の場合、Fig. 14に示すように履歴ループが平行四辺形状となるため、エネルギー吸収効率が、ほぼ長方形となるBDより悪くなることから、支承の大きさが

過大となると考えられる。

制震化と免震化における概略の設置コストを試算すると、制震化の反力分散支承およびBDでは、免震化の免震支承4基の場合と比較して、約1/6のコストで断面の低減が可能となる。

4. まとめ

橋梁の耐震性向上や建設コスト、耐震補強などの維持管理コストの削減を目指して、制震装置の橋梁への適用性を検討した。

(1) 大振幅ブレーキ・ダンパーの性能で、大規模地震時に中規模の橋梁に必要となる最大ストローク±400mm程度までの動的性能を確認した。

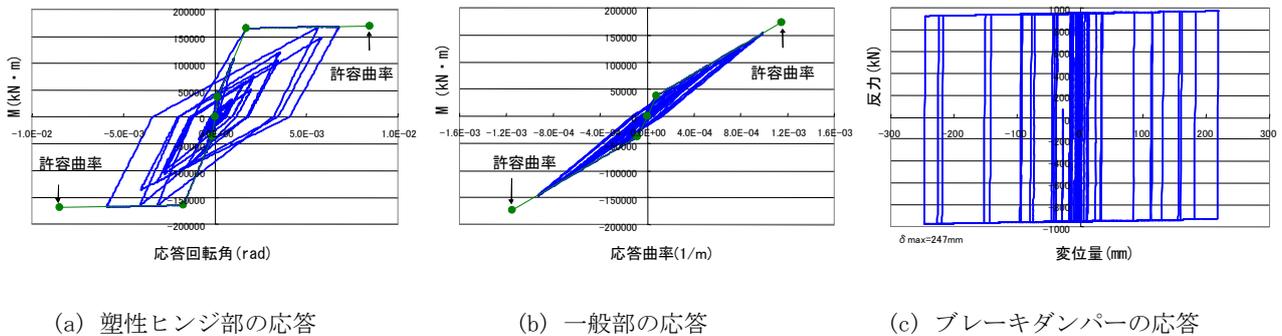


Fig. 12 橋脚の応答 (制震橋梁, 加速度波形 II-II-2)
Response of Pier (Energy Absorbing Device)

Table 6 免震支承の諸元
Isolation Bearings

		A 1 橋台側	A 2 橋台側
ゴム	断面 (mm)	1500×1500	1500×1500
	総厚さ (mm)	174	174
	せん断弾性係数 (N/mm ²)	1.0	1.0
	せん断ひずみ (%)	12.6	14.4
鉛	個数	4	4
	直径 (mm)	270	270
最大せん断力 (kN)		1110	1270
降伏せん断力 (kN)		690	790
1次剛性 (kN/mm)		125	126
2次剛性 (kN/mm)		19.3	19.4

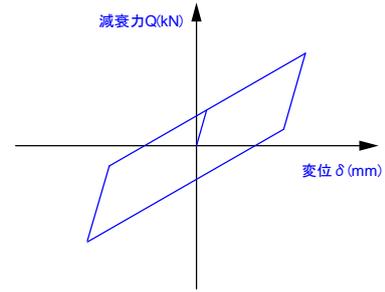


Fig. 13 免震支承のモデル化
Model of Restoring Characteristics for Isolation Bearings

Table 7 動的解析結果一覧 (免震橋梁断面)
Analytical Results (Isolation Bearings)

	L2地震動	橋脚	一般部 (×10 ⁻¹ /m)		塑性ヒンジ部 (×10 ⁻³ rad)		支承変形量 (m)		
			応答曲率	許容曲率	応答回転角	許容回転角	A1	A2	許容変形量
橋軸方向	タイプ I	P 1	5.81	11.49	1.18	3.29	0.08		0.435
		P 2	4.12	10.24	0.94	3.28		0.08	0.435
	タイプ II	P 1	10.6	11.49	8.21	8.45	0.277		0.435
		P 2	9.21	10.24	7.66	8.40		0.274	0.435
橋軸直角方向	タイプ I	P 1	5.98	6.86	3.31	4.02	0.02	—	0.435
		P 2	5.91	6.74	3.19	4.15	—	0.024	0.435
	タイプ II	P 1	6.62	6.86	11.8	12.4	0.049	—	0.435
		P 2	6.55	6.74	10.9	13.1	—	0.054	0.435

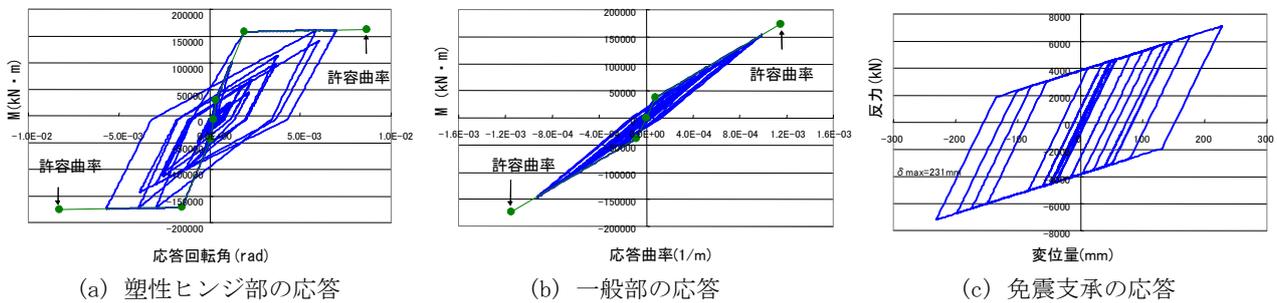


Fig. 14 橋脚の応答 (免震橋梁, 加速度波形 II-II-2)
Response of Pier (Isolation Bearings)

参考文献

本実験の範囲では、振幅100mm程度までは、想定した矩形形状の継続時間内ではストロークが大きくなるともに、履歴ループがやや瓢箪型となることが確認された。
(2) 制震装置のPCラーメン橋への適応性、非線形時刻歴解析を実地し、橋梁の応答等について検討した。
解析の結果、制震設計により橋脚断面を60~70%に低減可能であることが分かった。また、免震設計と比較して大幅なコストダウンが可能であることがわかった。

今後、制震装置の経年劣化対策の確立や、橋梁全体モデルを用いた振動台実験により性能を実証し、実用化を目指す予定である。

- 葛西, 他: 多径間連続高架橋への制震ブレースの導入効果, 構造工学論文集 Vol. 51A, pp. 827-838, 2005. 3
- 本田, 他: 伊弉高架橋の耐震補強工事, 本四技法, Vol. 29, No. 105, pp. 14-22, 2005. 9
- 広瀬, 他: 制震ダンパーを用いた橋の耐震性向上とコスト削減, 土木学会第60回年次学術講演会 I-098, pp. 193-194, 2005. 9
- 佐野, 他: 高力ボルト摩擦接合滑りダンパー (プレーキダンパー) の開発, 大林組技術研究所報, No. 62, pp. 13-20, 2001