

(株)熊谷組技術研究所 正会員 金子 誉, 勝川 藤太  
吉谷 進治, 鈴木 猛康

1. はじめに

筆者らは、橋梁の制震装置としてTMDをベースに制御力の増幅を図ったパワフルTMDを開発している。これは、橋台に支点をとった「てこ」を介してTMDと橋桁を連結し、桁端の相対変位を利用してTMDを強制的に大きく揺らし、てこの作用によってTMDの制御力を増幅させるものである。これまで、動作原理の考案、動力学モデルの定式化、最適調整法の提示、および地震応答解析による制震効果の概略検討を行ってきた<sup>1)</sup>。本報告は、動力学モデルの検証と制震効果の確認を目的として行った模型振動台実験について述べるものである。

2. 実験の概要

表-1に実験の相似率、表-2に模型諸元（設計値）、図-1に実験模型を示す。主構造（橋梁）の模型は、コンクリート版とゴム支承とで1自由度振動系としている。パワフルTMDは、質量比を $\mu=0.043$ 、てこのアーム比を $\alpha=2$ とし、最適調整となるように設計した。模型製作上問題となったのはTMD重錘部の摩擦であり、ラジアルベアリングにより転がり支持と直動案内を行わせた。

加振はパワフルTMDが有効な水平1方向（図-1でコンクリート版の長手方向）に行い、加振波には表-3に示す強震記録4波を用いた。実験ケースは、地震波毎にパワフルTMDによる制震と無制震の2ケースとした。

計測は加速度4点と相対変位3ヶ所であり、計測器の配置は図-1に示した通りである。

3. 実験値と解析値の比較

各実験ケースについて、振動台上で計測された加速度を入力波とし、表-2に示した設計値を用いて地震応答解析を行った。ここで、運動方程式は、主構造とTMD重錘の2自由度振動系について与えられている<sup>1)</sup>。実験値と解析値の最大値の比較を表-

表-1 実験の相似率（主構造諸元の比較）

	相似率	実構造物	実験模型
重量 W	1 / 1,300	7,500 tf	5.75 tf
剛性 K	1 / 600	16,000 tf/m	27.2 tf/m
周期 T	2 / 3	1.4 sec	0.923 sec

表-2 模型諸元（設計値）

	主構造	TMD*	反力フレーム**	備考
重量	$W_s = 5.75 \text{ tf}$ (コンクリート版)	$W_T = 0.25 \text{ tf}$ (鋼塊)	$W_{T'} = 0.065 \text{ tf}$ (軽みぞ形鋼)	* $\mu = 0.043$ ** $\mu' = 0.011$
剛性	$K_s = 27.2 \text{ tf/m}$ (ゴム支承)	$K_T = 0.611 \text{ tf/m}$ (コイルバネ)	$K_{T'} = 0.307 \text{ tf/m}$ (コイルバネ)	
振動数	$f_s = 1.08 \text{ Hz}$	$f_T = 0.78 \text{ Hz}$	$f_{T'} = 1.08 \text{ Hz}$	* $\nu = 0.72$ ** $\nu' = 1.00$
減衰定数	$h_s = 0.03$ [自由振動実験]	$h_T = 0.32$ (オイルダンパー)	$h_{T'} = 0.01$ [仮定]	
アーム比	$\alpha = 2$			

表-3 加振に用いた地震波

	強震記録名	最大加速度
1	Taft (EW) 1952.7.21	150 gal
2	El Centro (NS) 1940.5.18	150 gal
3	神戸海洋気象台 (NS) 1995.1.17	150 gal
4	神戸大学 (NS) 1995.1.17	50 gal

4に示す。

まず最大加速度についてみると、TMD重錘では実験値と解析値は最大3%の違いで、非常に良く一致している。ところが、コンクリート版と反力フレームではTaft加振時には45%も異なる。この原因については後述する。次に最大変位についてみると、El Centro加振時のコンクリート版で15%違うが、その他は10%以内の誤差である。

図-2は Taft加振時の実験と解析の応答波形を比較して示したものである。実験値の加速度波形をみると、TMD重錘と比べるとコンクリート版と反力フレームでは短周期成分が顕著である。短周期成分は反力フレームの曲げ振動によるものであると考えられ、これは解析では考慮されていない。このことが前述した実験値と解析値の大きな違いの原因と推察される。また、変位波形は長周期

- ① コンクリート版
- ② ゴム支承
- ③ TMD重錘
- ④ TMDコイルバネ
- ⑤ TMDオイルダンパー
- ⑥ TMDてこ
- ⑦ 反力フレーム
- ⑧ 反力フレームバネ
- ⑨ パワフルTMDてこ
- ⑩ パワフルTMD外部支柱
- ⑪ パワフルTMD内部支柱

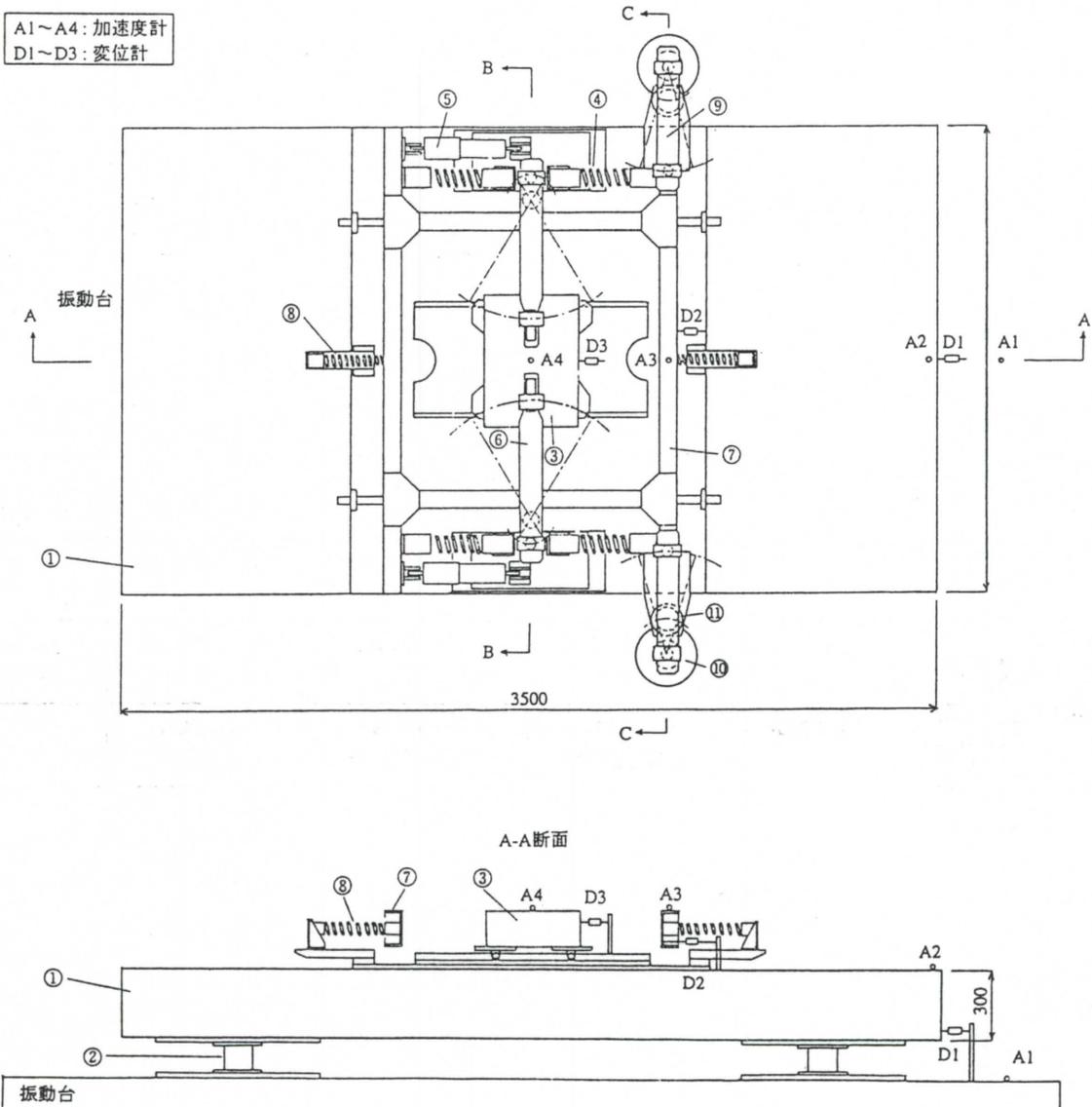
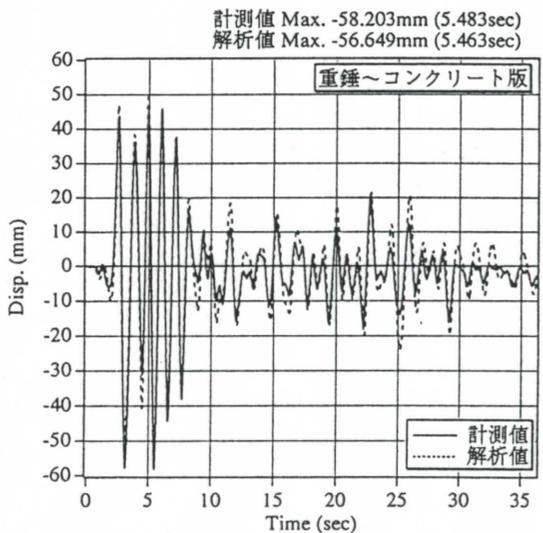
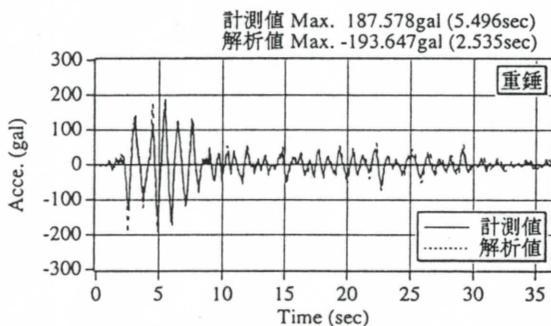
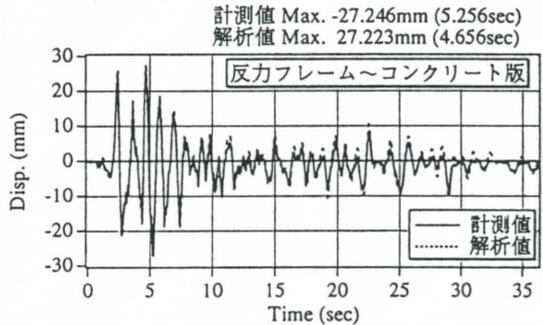
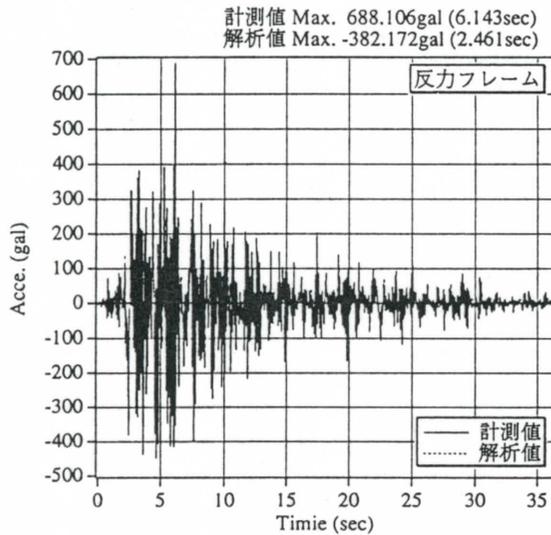
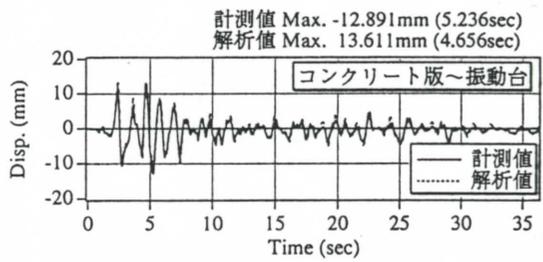
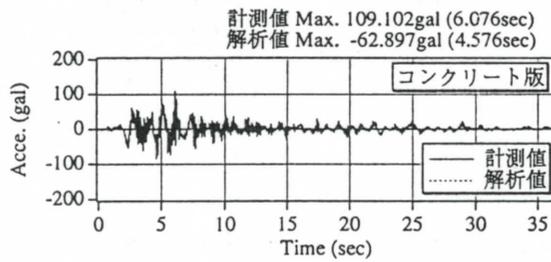


図-1 実験模型および計測器配置

表-4 実験と解析の最大応答値の比較 (解析値/実験値)

		Taft	El Centro	神戸海洋気象台	神戸大学
加速度	コンクリート版	0.576	0.678	0.713	1.078
	反力フレーム	0.555	1.031	1.009	0.796
	TMD 重 錘	1.032	0.987	1.004	1.010
相対変位	振動台 ~コンクリート版	1.056	1.145	0.904	0.970
	コンクリート版 ~反力フレーム	0.999	1.063	0.916	0.971
	コンクリート版 ~TMD重錘	0.973	0.935	0.908	0.884



(a) 加速度波形

(b) 相対変位波形

図-2 実験と解析の波形の比較 (Taft EW)

成分からのみなり、解析値と実験値は良く一致しているといえる。

このように、解析で考慮していない反力フレームの曲げ振動成分を除いて考えれば、解析値は実験値を良くシミュレートしているといえる。

#### 4. パワフルTMDによる制震効果

表-5は、パワフルTMDおよび在来TMDを用いた場合のコンクリート版の変位と、無制震の場合の変位の比を示したものである。ここで、パワフルTMDは実験値であるが、在来TMDは同じ質量比を想定した場合の解析値である。パワフルTMDによる変位低減効果は30～60%程度であり、在来TMDが0～30%であることと比較すれば、より大きな制震効果が得られている。

また、表-6はパワフルTMDの重錘のストロークを在来TMDを基準として相対的に示したもので、在来TMDが有効に作動しなかった El Centro 加振の場合を除き、パワフルTMDでは在来TMD以上のストロークは要求されない結果となっている。

図-3に、神戸海洋気象台波加振時のコンクリート版の変位波形を示す。無制震と在来TMDのケースは5秒付近で最大値を示しているのに対し、パワフルTMDでは1周期前の4秒付近で既に最大値を迎えており、より早い時点から制震効果が発揮されていることがわかる。

#### 5. まとめ

パワフルTMDの模型振動台実験を行い、以下の結果を得た。

- ① 文献1)で定式化したパワフルTMDの動力学モデルが検証された。
- ② 設計で期待する性能を有する装置が製作可能であることが、縮小モデルのレベルで確認できた。
- ③ 質量比が4.3%、てこのアーム比が2であるパワフルTMDを用いたとき、主構造物の変位低減効果は地震波により違うものの、およそ30～60%程度であった。
- ④ パワフルTMDの重錘に要求されるストロークは、在来TMDの場合と同じ長さで足りる。

6. おわりに 本研究は、建設省土木研究所、(財)土木研究センターおよび民間19社による共同研究「高減衰材料を用いた長大橋の免震技術の開発」の一環として行ったものである。

参考文献 1) 金子, 他: 相対変位利用型減衰装置の考案, 第9回日本地震工学シンポジウム, 1994

表-5 コンクリート版の最大変位 (無制震時の変位で基準化)

	Taft	El Centro	神戸海洋気象台	神戸大学
パワフルTMD	0.498	0.691	0.366	0.463
在来TMD	0.876	1.052	0.668	0.699

表-5 TMD重錘のストローク (在来TMDで基準化)

	Taft	El Centro	神戸海洋気象台	神戸大学
パワフルTMD	0.869	1.550	0.835	1.003

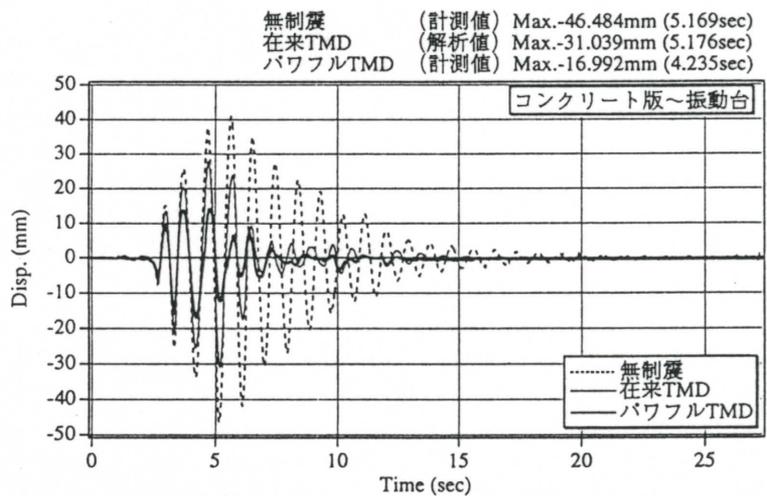


図-3 制震方法による変位波形の違い (神戸海洋気象台)