

歩道橋のアクティブ、パッシブコントロール

横川英彰¹ 塩尻弘雄²

¹正会員 工修 オイレス工業株式会社 第二事業部 支承設計部 (〒105-8586 東京都 港区芝大門 1-3-2)

²正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

歩道橋の使用性向上のために取付けたアクティブ制振装置、パッシブ制振装置の地震に対しての効果について応答解析による検討を行った。一般的に TMD 等の制振装置は地震時には効果が少なく、しかも地震時に TMD に過大な入力で歩道橋に設置された TMD が破壊されてしまうことが考えられる。ここでは、地震時に TMD を保護する目的で制御を行なった場合についても応答解析による検討を行なう。また、各制振(震)性能に関しては制御パワーで評価を行なった。

Key words: Pedestrian bridges, Footforces, TMD, Active control, LQ control, Direct velocity feed back

1. はじめに

最近、歩道橋の需要そのものは少なくなってきたものの、街のシンボリックな存在や、鉄道を跨ぐの跨線橋としての歩道橋の需要は増えつつある。その中で使用性向上用として TMD が設置された例¹⁾²⁾もあり、制振装置は歩道橋の経済設計を行うために注目されつつある。

また、歩道橋などの比較的軽量の橋梁においては地震に対する影響は少ないとされているが、歩道橋上に設置された TMD は、地震には大きな変位が生じることが考えられる。また、機械的な構造、例えばストッパー等で TMD のストロークを押さえてしまう方法も考えられるが、ストッパーの機構や解除の方法に問題があると思われる。歩道橋上に設置された TMD はあくまでも歩行力の制振目的であり、それを超えるような制御力は考えられていないので、地震外力の制御には不向きであることは容易に考えられる。ここでは、通常時は歩行に対して効果がある TMD(アクティブ TMD)に対して地震応答解析を行ない、歩道橋に対する制振効果、TMD(アクティブ TMD)のストロークについて検討を行なう。次に、地震に対して制振装置を保護するような制御の方法について検討を行なう。

2. 対象歩道橋の構造諸元

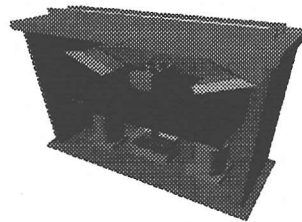
歩道橋は鋼単純梁で、長さは 36.3m、重量は 31.3t である。対象とする歩道橋の諸元を表一に挙げる。

表一 歩道橋の振動特性

振動次数	固有振動数	減衰定数
一次	2.19Hz	0.005
二次	5.35Hz	0.02

3. 設置する TMD について

まず、この歩道橋に設置する TMD を図一に示す。



図一 TMD

この TMD の諸元を表二に示す。この TMD は、板バネと巻きバネで剛性、シリコンオイルで減衰を得ている。また、有効ストロークは片振幅で 10cm 程度である。

表二 TMD の諸元

質量比	最適周波数	最適減衰比
0.0016	2.187Hz	0.024

質量比は非常に小さいが、歩道橋上に設置する事を考慮すると妥当な値であると考えられる。

この値はDen Hartogの定点理論で最適同調、最適減衰を計算した。

4. 歩行外力によるTMDの効果

歩行外力による TMD の効果を調べる。前項で挙げた TMD を実橋に設置して、実験を行った。その結果を図-2に示す。また歩行周期は、132歩/分（共振歩行）である。また、比較は桁 midpoint の加速度で行った。

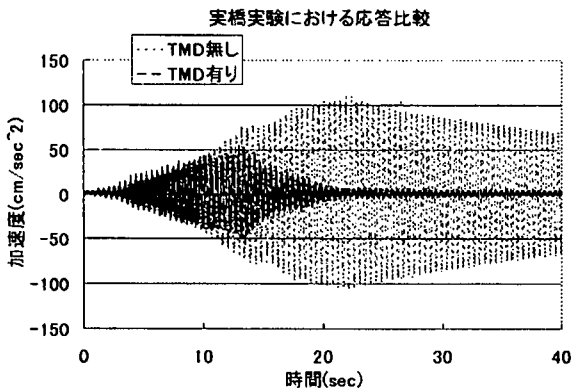


図-2 TMD 有り、無しの比較

応答が半分程度になっており、TMD の効果が認められる。

5. 数値解析的な検討

応答解析を行うにはモデル化が必要である。モデル化には桁のみに注目したモード法を用いて離散化を行った。また、時間積分には Newmark の β 法を用い、時間間隔は 0.01 秒とした。

実験と、応答解析を比較した結果を図-3に示す。なお、外力には測定した歩行力を入力した。

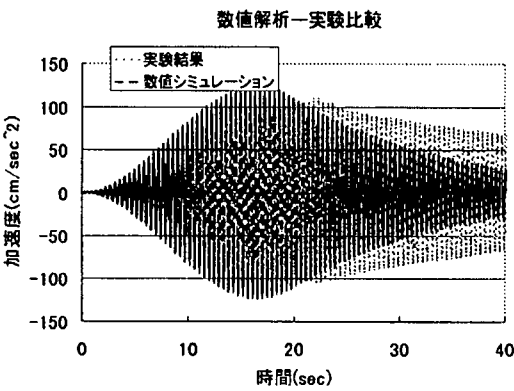


図-3 実験、応答解析の比較

数値解析の方が、やや応答が大きく、振動の減衰す

る速度も速いが、安全率と考えた場合、この値は妥当な値であると考えられる。

6. 地震応答解析について

まず、地震に関する応答解析を行う。ここでは、道路協会より配布されているプレート地震型で1種地盤を用い、橋梁の動的解析同様に変位最大応答の3波平均で評価を行う。またTMDに関しても同様にTMD最大応答の3波平均で評価を行う。

応答解析のパターンとしては以下の2つを挙げる。

- (1) TMD 無しの場合
- (2) TMD 設置の場合

応答解析の結果を表-3、表-4に示す。また、時刻歴の例を図-4に示す。

表-3 TMD 無しの場合の3波平均 (単位 cm)

	1波目	2波目	3波目	3波平均
桁変位	11.286	9.894	6.505	9.228

表-4 TMD 設置の場合の3波平均 (単位 cm)

	1波目	2波目	3波目	3波平均
桁変位	7.100	6.275	6.600	6.659
TMD変位	87.948	60.987	56.607	68.514

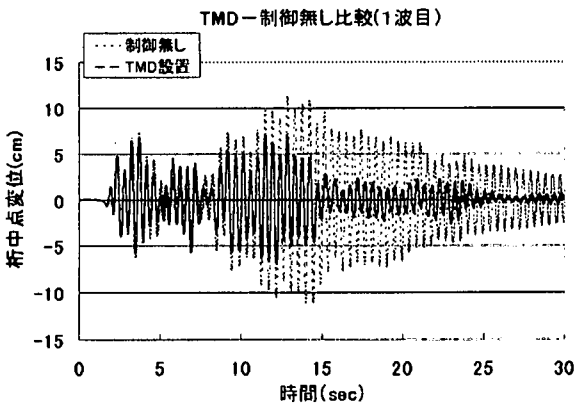


図-4 桁 midpoint 地震応答変位の比較

表-3、表-4より、TMD を用いれば応答変位は大体のところ低減されることが分かるが、TMD の変位に関して注目すると3波平均でも 68.5cm と非常に大きな値になっている。

この TMD の最大ストロークが 10cm であるので、地震に対して、制振効果が有るにしても現実的な値ではないことが分かる。また、この変位では TMD を設置して地震が起こると TMD だけではなく、歩道橋自体も何らかの損傷を受ける可能性を示唆している。

7. アクティブコントロール

地震に対してアクティブコントロールを行うには相当なパワーを必要とする。

ここでは、歩行者を対象としていた制御で地震波を入力した場合の変位応答、また、そこで入力されるエネルギーについての検討を行う。

制御理論としては、LQR 制御理論（最適レギュレータ理論）を用いる。LQR 制御理論では、2つのパラメータ Q , r の値を変化させることにより応答の低減を行うが、 Q は1次モードの速度と変位の重みを1000 とし、 $r=0.01$ とする。また、制御装置には前述の TMD に簡単なアクチュエータを取付けたものを想定し、以降これをアクティブ TMD と呼ぶ。

また、応答評価に関しても前項同様に3波の最大応答の平均を行う。

パワーの考え方として+側は歩道橋にエネルギーを与える側、-側はアクティブ TMD をコントロールする側のパワーとして考えることができる。

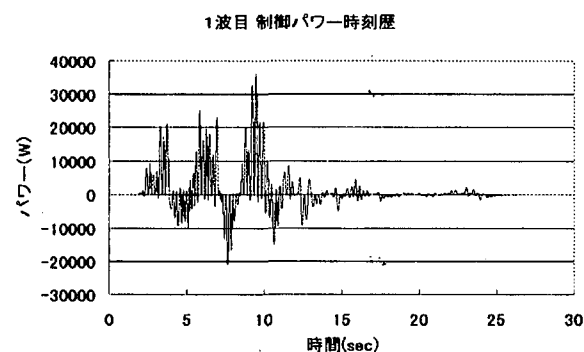
応答解析を行った結果を表—5に、そこで制御に使用されたパワーを表—6に示す。また、使用パワーの時刻歴を図—5に示す。

	1波目	2波目	3波目	3波平均
桁変位	6.756	5.652	6.462	6.290
TMD変位	182.396	102.285	152.370	145.684

表—5 LQR コントロールを行った場合の応答

表—6 使用パワー (W)

	1波目	2波目	3波目	3波平均
+側エネルギー	36036.9	14868.6	29900.5	26935.3
-側エネルギー	20923.9	8079.6	14261.3	14421.6



地震時に LQ コントロールを行った場合、桁の変位はさほど TMD と変化が無いが、アクティブ TMD には3波の平均でも145cm と過大な変位が起こっている

ことが分かる。これはパワーの上限が無い場合であるが、実際の歩道橋などに設置される TMD では振幅の上限が大きくても 10cm 程度であり、ありえないことである。また、パワーに関しても3波平均すると+側で 27kW、-側で 14kW という大変大きなパワーを要することが分かる。つまり、地震時に関しては、歩行力制御用の制御則では到底間に合うレベルではないことが分かる。

8. 制振装置保護用の制御

前項の結果より地震時にアクティブコントロールやパッシブコントロールを用いて対象構造物を制御しようすると過大な変位、過大な制御パワーが必要ことが分かった。しかし、コントロールの機能が有るのであれば、制振装置のみを制御することも可能であると考えられる。つまり、対象構造物の制御と、アクティブ TMD のストロークの抑制はトレードオフの関係にあることを利用すれば制振装置の保護も可能であると考えられ、応答解析を行った。

(1) 制御方式

制御方式として、以下の3つを挙げる。

1. LQR コントロールでアクティブ TMD のみを制御対象としたもの（TMD の速度、変位に重み 1000 を与える場合）
2. LQR コントロールでアクティブ TMD と歩道橋の1次モードを制御対象としたもの（アクティブ TMD の速度、変位に重み 1000 を歩道橋の1次モードにも速度、変位に 1000 の重みを与える場合）
3. アクティブ TMD の速度をフィードバックした DVFB 制御。（アクティブ TMD の応答速度に-1000 を乗じてそれを力としてアクティブ TMD に与えた場合）

(2) 応答評価について

応答評価は地震波3波による変位応答の最大値の平均、アクティブ TMD のストロークの3波平均、また制御パワーに関しても3波平均を評価の基準とする。

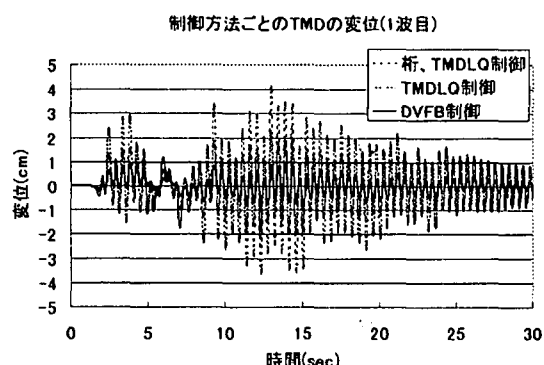
それらの結果を表—6、表—7、制御方法ごとにアクティブ TMD の変位を図—6に示す。

表—6 最大応答変位 (cm)

		1波目	2波目	3波目	3波平均
TMDの変位	桁を含むLQ	4.168	3.954	2.574	3.565
	TMDのみLQ	2.291	2.168	1.410	1.956
	DVFB	0.908	0.959	0.672	0.847
桁の変位	桁を含むLQ	10.861	9.543	6.325	8.910
	TMDのみLQ	10.973	9.631	6.384	8.996
	DVFB	11.043	9.685	6.421	9.050

表—7 最大パワー (W)

		1波目	2波目	3波目	3波平均
+側パワー	桁を含むLQ	0.685	0.411	0.209	0.435
	TMDのみLQ	3.378	2.493	1.156	2.342
	DVFB	0.427	0.362	0.138	0.309
-側パワー	桁を含むLQ	479.205	411.222	172.184	354.204
	TMDのみLQ	268.613	222.242	92.778	194.544
	DVFB	113.143	87.928	38.633	79.901



図—6 各制御における TMD の変位

(3) 考察

表—6、表—7、図—6より、LQR 制御で桁にも重みをかけた場合、ストロークが増大するが、桁の変位に着目するとストロークの割にはアクティブ TMD のみに重みをかけた制御と大差が無い。また、制御エネルギーに着目すると、一側のパワーが卓越していることより、アクティブ TMD がよく制御されていることが分かる。次に DVFB 制御と他の比較をすると、LQR 制御とは全く性状が異なる。DVFB 制御にすることによりアクティブ TMD を過減衰に見せかけている事が分かる。また、過減衰にすることにより、桁に固定されたような挙動を示し、制御パワーも他の LQR 制御とは違いかなり小さな値を示す。

解析をおこなった3パターンについてみると、桁の変位では、非制御時とそれほど変わりの無い値であり、アクティブ TMD が制御されていることが分かる。またアクティブ TMD のストロークを見てもせいぜい大きくても 4 cm であり、歩行者の制御時と比較してもストロークはそれほど変わりが無い。また、パワーを見ても歩道橋の地震外力による制御

パワーの 1/100 程度であり現実的なパワーであると考えられる。

9. まとめ

1. 歩道橋用の TMD を製作し、歩行者に対しては効果があることを確認した。
2. 歩道橋のモデル化を行い、数値解析と実験の比較を行い、応答がやや大きいのが、数値解析の妥当性を確認した。
3. 歩道橋上に歩行者用の TMD を設置した場合の地震応答解析を行い、設計値の 5 倍から 9 倍位の変位が発生することが確認された。
4. 歩道橋にアクティブ TMD を設置した場合の応答解析を行い、歩道橋の変位は低減可能であるが、制御力、アクティブ TMD のストロークが現実的な値にならないことを確認した。
5. アクティブ TMD を地震時にストロークを小さくする方向で制御を行った場合、エネルギーも現実的な値になることが確認され、制振装置保護の制御の可能性があることが確認した。

謝辞：運輸省 第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 菅 崇氏（元 日本大学 大学院 理工学研究科）の修士論文を多数参考にさせていただいた。

参考文献

- 1) 岩田ら：東静岡駅南北通路自由通路橋の免震構造 「橋梁と地下構造物の免震・制震」講習会 土木学会 1999
- 2) 横谷ら：同調質量ダンパーを用いた歩道橋の制振 橋梁振動コロキウム '97 論文集 土木学会 1997
- 3) 岡林、藤野、川谷、山口：橋桁振動の低減による交通環境振動制御 第3回振動制御コロキウム PART A 構造物の振動制御(3) 土木学会 1995
- 3) 小堀鐸二：制震構造 鹿島出版会 1993
- 4) 大崎順彦：建築振動理論 彰国社 1996