

TMDを用いた免震建物の
地震時の応答低減効果に関する研究

A Study on the Effect of Reducing the Seismic Response of Base-Isolated Building with TMD

2. 構造 - 2. 振動

免震 TMD 想定外入力
応答変位 ロバスト性 共振

正会員 ○天竺 貴仁* Amano Takahito
正会員 護 雅史** Mori Masafumi
正会員 福和 伸夫*** Fukuwa Nobuo

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震以来、免震建物への需要は高まり、2009年時点において国土交通大臣の許可を得た評定免震建物は1500棟を超えている。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、石巻赤十字病院が、免震構造として性能を十分に発揮し、石巻地区で病院機能を維持することができた唯一の施設として注目を集めた¹⁾。その一方、震源域から300km以上離れた足柄平野内に建設されていた一部の免震戸建住宅において、許容変位量を超える応答変位が生じていた²⁾。また、500km以上離れた大阪府咲洲庁舎においても片振幅が100cmを超えるような応答が生じ、両者は地盤と建物の共振現象と考えられている。2012年3月31日に発表された南海トラフの巨大地震は、震源域が東北地方太平洋沖地震と比較し、都市圏に近いことや、付加体の影響によって震源域から遠いところにも長周期成分を多く含んだ波が到達する可能性があることなどから、東北地方太平洋沖地震と比較し、より多くの免震建物で、応答変位が大きくなる可能性がある。現在免震建物において多く用いられている積層ゴム+履歴型ダンパーによる免震システムでは、免震層の復元力特性がバイリニアのような非線形性状を示すこととなり、免震層を含む建物全体の等価周期は免震層の変位に依存して変化するため、立地地盤と共振するような時間が存在する。そこで、本研究では免震層の復元力を線形とし、地盤との共振を避ける免震システムを想定する。さらに、その風揺れ対策兼地震時の応答低減を目的として、TMDを採用し、TMDによる応答低減効果について検討を行う。

2. 解析モデルと共振曲線

本研究では免震層の復元力特性を線形とするために、天然ゴム系積層ゴム+CLB+オイルダンパーの免震システムを採用し、南海トラフの巨大地震時に大きな揺れが予想される名古屋地区に立地する建物を想定し、解析モデルとする。

名古屋の想定サイトにおける深部地盤の1次卓越周期は3秒程度であるが、寺島らによると同地点でも地震動の到来方向によって卓越周期がばらつくことが知られている³⁾。そのため、地盤との共振を十分に避けるため、TMDを用いない主振動系の固有周期を約5秒、減衰定数30%のモデルを解析対象とする。主振動系にTMDを1基取り付け付けたモデルをモデル1、ロバスト性を高めるためにTMDを2基取り付け付けたモデルをモデル2とする。それらの解析モデル概要を図1に、解析モデルの諸元を表1に示す。TMDの固有周期、減衰定数はDen Hartog・Brockにより誘導される最適同調条件・最適減衰条件式⁴⁾より算出する。超高層建物の風揺れ対策として用いられるTMDの重量比は、通常1%程度であるが、地震時の大きなエネルギーを吸収するために、モデル1では重量比を5%、モデル2では1基あたり2.5%とし、2基合わせた重量比を5%としている。また、図2に共振曲線を示す。共振曲線から、固有振動数付近の応答を、TMDを用いることで、15%程度低減することが可能となる。

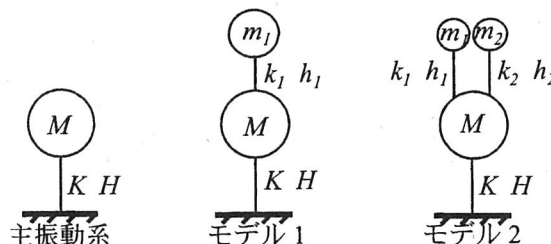


図1 解析モデル概要

表1 解析モデル諸元

主振動系	M [kN]	K [kN/cm]	H [%]
	48000	75.00	30
モデル1	m_1 [kN]	k_1 [kN/cm]	h_1 [%]
	2400	3.36	20
モデル2	m_1 [kN]	k_1 [kN/cm]	h_1 [%]
	1200	1.54	9
	m_2 [kN]	k_2 [kN/cm]	h_2 [%]
	1200	1.92	11

*名古屋大学大学院・大学院生

**名古屋大学減災連携センター・准教授・博士（工学）

***名古屋大学減災連携センター・教授・博士（工学）

*Graduate Student, Nagoya Univ.

**Assoc. Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng

*** Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng

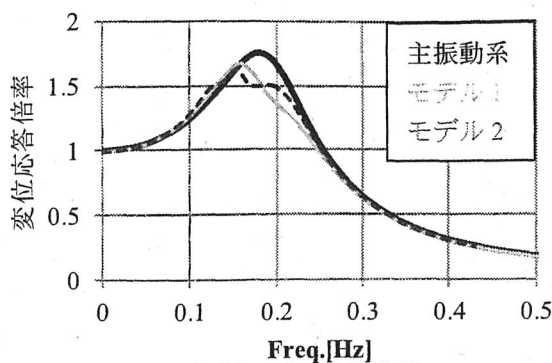


図2 解析モデル共振曲線

3. 応答解析に用いた入力地震動

入力地震動には長周期成分が卓越する地震動として、内閣府中央防災会議より2012年3月31日に発表された南海トラフの巨大地震での震源域を用いて作成された、名古屋地区における模擬地震動を入力波として用いる。前述の通り、名古屋の想定サイトにおける深部地盤の1次卓越周期は3秒程度である。そこで、解析モデルが十分共振するよう、南海トラフの巨大地震における模擬地震動の5%擬似速度応答スペクトルの卓越周期が5秒となるようチューニングを行う。その際、入力エネルギーが一定となるよう、速度を保存してチューニングを行う。また、TMDによる応答低減効果の地震動の違いによる比較を行うために、パルス波を含む地震動として1995年兵庫県南部地震時に、神戸海洋気象台で観測された地震動、JMA 神戸波を用いる。その際も前述の通り、JMA 神戸波の5%擬似速度応答スペクトルの卓越周期が5秒となるよう速度を一定とし、チューニングを行う。これにより、パルス波を含む地震動に対する、TMDによる応答低減効果について、検証する。図3に入力地震動の加速度波形を示し、図4に5%擬似速度応答スペクトルを示す。図3より、南海トラフの巨大地震での模擬地震動とJMA 神戸波では継続時間が全く異なることが分かる。また図4より、周期5秒における両者の応答値は同程度である。

4. 解析結果

免震層の応答層間変位について応答解析結果を図5、6、7に示し、免震層の最大層間変位とTMD層の最大層間変位を表2に示す。

図5、6から、南海トラフの巨大地震での模擬地震動のような長周期成分が卓越し、解析モデルが十分に共振するような入力に対しては、TMDを取り付けたことにより、大変位時において、応答を低減できている。しかし、免震層の変位が小振幅の状態では応答がさほど低減されていない。表2から、免震層の最大層間応答変位は、TMDを用いることで、10%から20%程度低減されていること

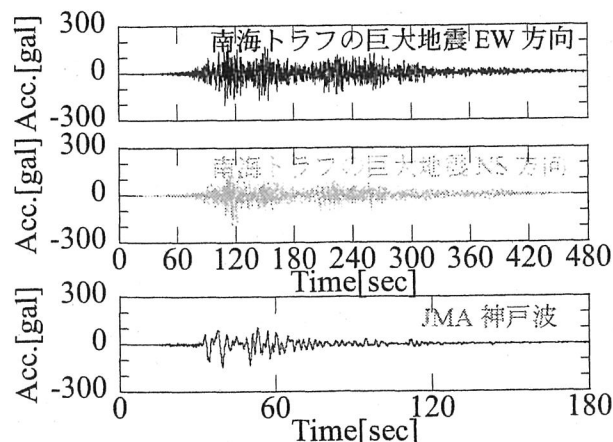


図3 入力地震動加速度波形

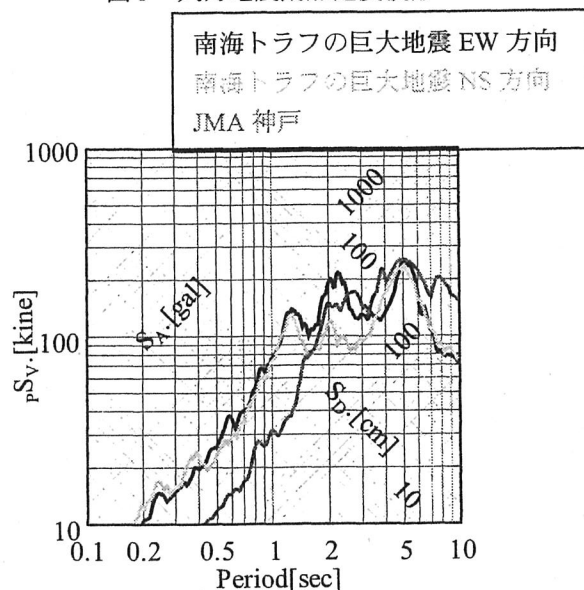
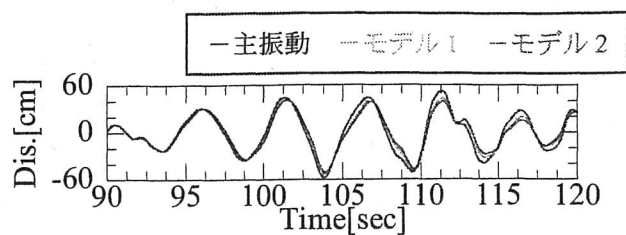


図4 入力地震動の5%擬似速度応答スペクトル

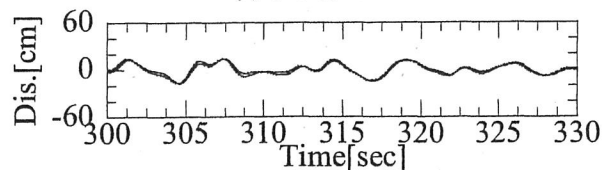
が分かる。また、TMDを2基用いた方が応答低減効果は大きい。これにより、地震動のような非定常な入力に対しては、ロバスト性の高い方が応答低減効果は高いことが分かる。

一方、図7より、JMA 神戸波のようなパルス波を含む地震動に対しては、TMDの応答低減効果は5%から10%で、TMDはパルス波のような入力に対しては応答低減効果が小さいことが分かる。

南海トラフの巨大地震での模擬地震動を入力波として用いた際のTMDの応答層間変位は、モデル2ではモデル1に対して2倍近くのオーダーとなった。これはTMDを2基にした分、質量が小さくなり剛性を小さくしなければ主振動系にチューニングできなかったためと考えられる。しかし、どちらのモデルにおいても、TMDの応答層間変位が免震層の応答層間変位の2倍以上の応答となり、非常に大きな値を示した。

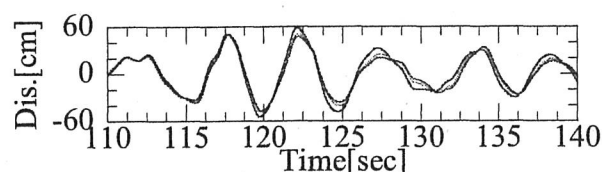


(a) 大変位時

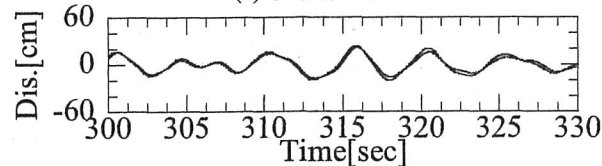


(b) 小変位時

図5 南海トラフの巨大地震EW方向入力時
免震層応答変位波形



(a) 大変位時



(b) 小変位時

図6 南海トラフの巨大地震NS方向入力時
免震層応答変位波形

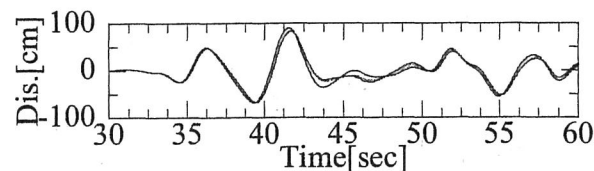


図7 JMA 神戸波入力時
免震層応答変位波形

表2 最大応答層間変位の比較

モデル	応答層間 変位[cm]	南海トラフ 地震EW	南海トラフ 地震NS	JMA神戸波
主振動系	免震層	57.7	58.9	90.2
モデル1	免震層	52.7	51.0	84.5
	TMD	125.0	127.4	185.5
モデル2	免震層	50.4	50.3	82.3
	TMD1	221.3	208.2	272.2
	TMD2	175.2	180.8	226.5

5. TMDの重量比を変化させた際の応答

前述の通り、Den Hartog・Brockにより誘導される最適同調条件・最適減衰条件は、TMDの重量比のみによって一意に定まり、本研究におけるTMDの重量比は非常に重要なパラメータとなる。そこで、モデル1に関して重量比に関してパラメトリックスタディを行い、重量比の違いによる最大応答値の変化について考察を行う。TMDの固有周期・減衰定数は最適同調条件・最適減衰条件によって定める。免震層の応答層間変位の最大値を、TMDを用いないモデルの最大層間変位で除した値をプロットした図を図8に示す。また、図9に主振動系の応答加速度の最大値を、TMDを用いないモデルでの最大応答加速度で除した値をプロットした図を示す。

どのケースにおいても、TMDの重量比を大きくすることで、応答低減効果の向上が見られる。免震層の応答層間変位に関してはほぼ線形に低下している様子が見えるが、主振動系の応答加速度に関しては、下に凸の形で低下しているように見える。このことから、TMDの重量比を大きくしても、応答加速度の応答低減率の変化率は減少する。

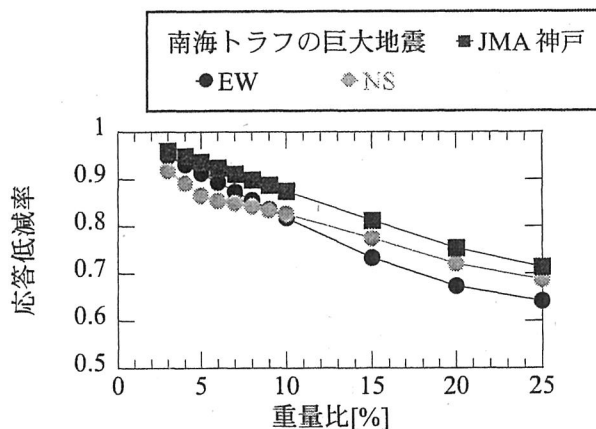


図8 TMD重量の変化による免震層応答
層間変位の応答低減率の変化の様子

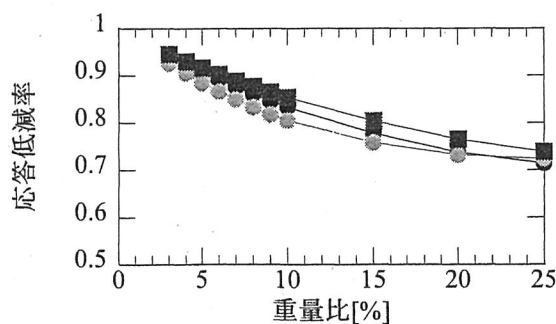


図9 TMD重量の変化による主振動系
応答加速度の応答低減率の変化の様子

6. ストップダンパーを用いた応答解析

TMD は大きく動くことで、TMD に取り付けられた減衰装置によってエネルギーを吸収するが、TMD が変位できる量にも限界がある。そのため、ある一定以上の変位に達したらダンパーが効き、変位を制御するシステムが必要となる。そのようなダンパーをストップダンパーと称し、それを適用した場合の挙動について分析する。解析モデルにはモデル 1 を用い、入力波には南海トラフの巨大地震における模擬地震動の EW 方向を用いる。ストップダンパーはバネ剛性が TMD 層の剛性の 2 倍、減衰 10% となるようダンパー力を与え、TMD の応答層間変位が 80cm になった時点で効くものとする。TMD の応答層間変位を図 10 に示し、免震層の応答層間変位を図 11、主振動系の応答加速度を図 12 に示す。また、その際の最大応答値を表 3 に示す。図 10 から、ストップダンパーを用いることで TMD の応答層間変位を制御することが可能である。ストップダンパーがある場合では、TMD の応答層間変位に制限が生じ、TMD による応答低減効果は減少するが、図 11、表 4 より、免震層の最大層間変位はストップダンパーがある場合でもない場合とほぼ変わらず、ストップダンパーによる免震層の応答層間変位に及ぼす影響は少ないと考えられる。また、図 12 からストップダンパーがある場合でも、応答加速度はストップダンパーがない場合と同じである。ストップダンパーが効くことで衝撃が加わるが、TMD 層がフィルターの役割をし、主振動系には衝撃が加わらないことが分かる。

—ストップダンパー有 —ストップダンパー無

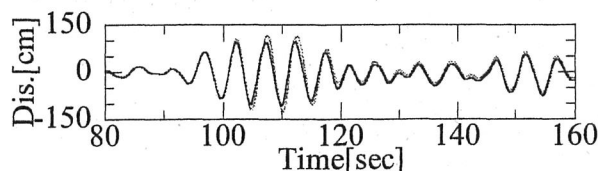


図 10 TMD 層応答層間変位波形

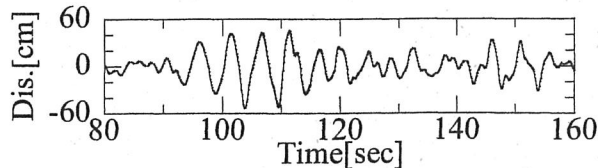


図 11 免震層応答層間変位波形

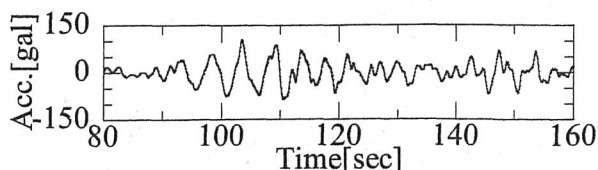


図 12 主振動系加速度波形

表 3 最大応答値の比較

ストップダンパー	TMD層応答層間変位 [cm]	免震層応答層間変位 [cm]	主振動系応答加速度 [gal]
有	98.8	53.3	105.0
無	125.0	52.7	105.0

7. まとめ

TMD を免震建物の地震時の応答低減のために用いた建物モデルについて応答解析を行った。以下に得られ知見を示す。

- ・TMD を用いることで、主振動系が共振するような入力に対して応答低減効果が認められた
- ・地震動のような非定常な入力に対しては、ロバスト性の高いモデル 2 の方が応答低減効果は高かったが、TMD の応答層間変位が非常に大きくなった
- ・モデル 1 においても TMD の応答層間変位は非常に大きく免震層の変位の 2 倍以上となった
- ・パルス波を含む地震動に対しては、応答低減効果が共振するような入力地震動と比較し小さかった
- ・TMD の重量比を大きくすることで、免震層の応答層間変位・主振動系の応答加速度ともに応答低減効果の向上が見られたが、応答加速度に関しては TMD 重量を一定以上大きくしても応答低減率はほぼ変わらない
- ・ストップダンパーを用いても、免震層の応答層間変位の最大値はほぼ変わらず、ストップダンパーが免震層の応答層間変位へ及ぼす影響は少ない
- ・ストップダンパーが効くことで衝撃が加わるが、TMD 層がフィルターのような役割を果たし主振動系に大きな衝撃は加わらない

入力レベルが非常に大きい地震動に対しては、TMD 重量が大きい方が応答低減効果は大きかったが、今後は入力レベルを小さくした際の TMD の重量比が及ぼす影響についての検討を行うことが必要である。また、ストップダンパーのパラメータについてもより詳細な検討を行うことが必要である。

【参考文献】

- 1) 日本免震構造協会: <http://www.jssi.or.jp/>
- 2) 田中ほか: 2011 年東北地方太平洋沖地震において足柄平野に建つ免震住宅で観測された応答変位と H/V スペクトルの関係, 日本建築学会東海支部研究報告集 (50), 2-構造, p.341~344, 2012
- 3) 寺島ほか: 堆積盆地における地盤と超高層建物との共振現象に関する研究 その 1 大阪平野の地盤周期の分析と強震動予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, p.151~152, 2012
- 4) 背戸一登: 動吸振器とその応用, コロナ社, 2010