

パルス地動入力に対するTMDの最適同調条件

五十嵐 晃¹・家村 浩和²・米津 和哉³

¹正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³学生員 京都大学大学院修士課程 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

直下型地震に見られるようなパルス状の入力に対しては、通常同調質量ダンパ (TMD) では大きな応答低減効果は期待できないとされている。その一方で質量比を大きくするとその制振効果をあげることができることもよく知られている。本研究は、構造物の一部を補助質量として利用した場合も含めて、入力をパルスとして考えた場合の制震装置の各種パラメータの最適値・同調条件を明らかにするとともに、TMDによりパルス型の地動に対して効果を発揮するための補助質量の大きさと応答制御能力の対応関係の検討を行った。

Key Words : Tuned Mass Damper, Optimal Tuning parameter, Pulse excitation

1. はじめに

大規模地震の震源断層の近傍においては、少数 (1 ~ 2 波) の非常に大きなエネルギーを持つパルス状の地震動が発生し、これが構造物に大きな損傷を与えると考えられている。これまで大地震による構造物の応答を制御することにより損傷を最小限に留めることを目的として、各種の制震装置が提案され、研究されている。パッシブ型の制振装置として、マスの周期を構造物の周期に同調させた同調質量ダンパ (TMD) があるが、直下型地震に見られるようなパルス状の大レベル入力に対する制振装置としての大きな応答低減効果は期待できないとされている。その一方で、質量比を大きくするとその制振効果をあげることができることは指摘されている¹⁾が、大地震対策に用いるためには、調和地盤振動や定常不規則強制振動などの入力に対しては減衰比、振動数の最適同調条件が理論的に定式化されている²⁾ものの、パルス状の入力に対する応答や最適性については明らかにされていないという問題を解決する必要がある。本研究は、入力をパルスとして考えた場合の制震装置の各種パラメータの最適値・同調条件を明らかにするとともに、TMDによりパルス型の地動に対して効果を発揮するための補助質量の大きさと応答制御能力の対応関係の検討を行った。

をパラメータとする三角形パルスにモデル化する。解析モデルは、線形 1 自由度系の構造物に補助質量型制震装置を備えたものを想定し、図 2 に示したように全体としては線形 2 自由度系とする。

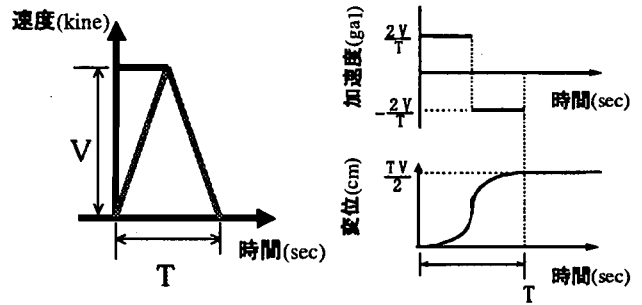


図-1 入力パルス

2. パルス入力に対する最適同調条件の解析

(1) 入力と構造系のモデル化

単一の大振幅の速度パルス波によって構造物の損傷が決定されるような場合を想定して、入力地震動の速度波形を図 1 に示すように、作用時間 T 、速度振幅 V

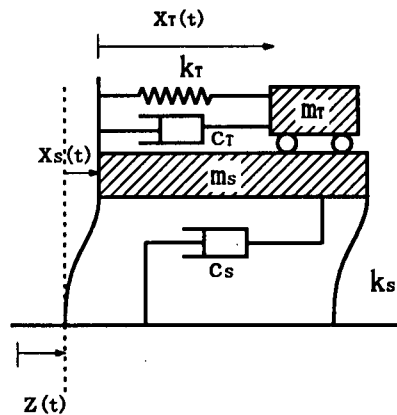


図-2 解析モデル

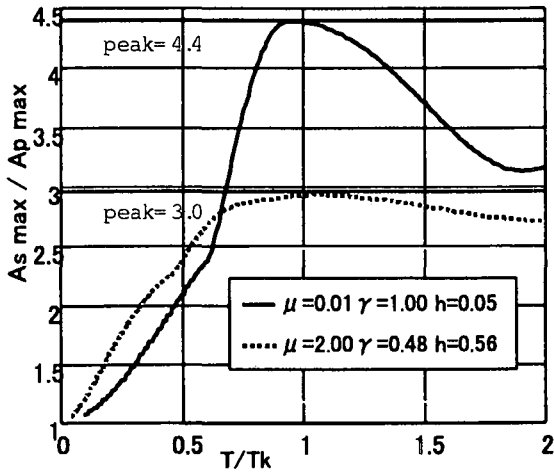


図-3 絶対加速度パルス応答スペクトル

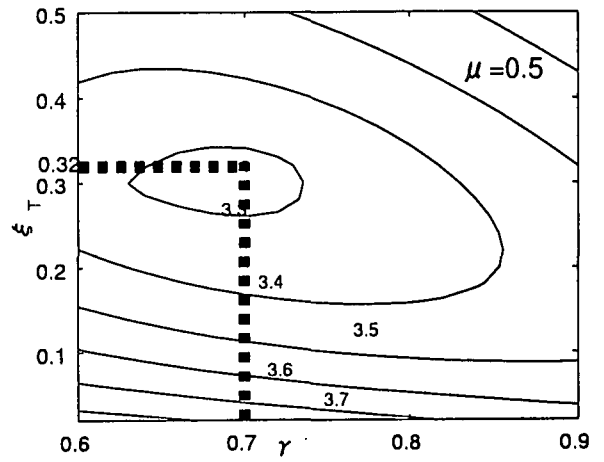


図-4 絶対加速度パルス応答スペクトルの最大値の等高線図

(2) パルス応答スペクトル

任意の時間幅のパルスに対する構造物の応答を調べるため、パルスの作用時間 T が変化した場合の最大応答値の変化を表示するパルス応答スペクトルを用いる。縦軸を A_{Smax} (構造物の最大加速度応答) / A_{Pmax} (パルスの最大加速度) で無次元化、横軸を T (パルスの作用時間) / T_k (構造物の1次モード固有周期) で無次元化しプロットしたものを構造物の絶対加速度パルス応答スペクトルと呼ぶこととし、同様に V_{Smax} (最大速度応答) / V (パルスの最大速度) を縦軸にとったものを速度パルス応答スペクトルと呼ぶ。図3に絶対加速度パルス応答スペクトルの例を示す。

(3) 最適同調条件

調和外力や不規則入力に対しては、最適同調比、最適減衰比が理論的に導かれているが、その値がパルス入力に対しても最適同調条件であることは保証されない。パルスに対する最適同調条件は別に存在するものと考えられる。そこで構造物の絶対加速度最小化基準および構造物の絶対速度最小化基準の2つの最適化基準を提案する。

a) 構造物の絶対加速度最小化基準

図3に現れているように、特定の質量比 μ を与えた時に、 (γ, ξ_T) の組み合わせにより得られたパルス応答スペクトルはあるパルス作用時間の場合にピークがあらわれる。このパルス応答の最大値を (γ, ξ_T) に対応させて等高線図の形で表示した例を図4に示す。この図に見られるように、パルス応答値を最も小さくする (γ, ξ_T) の組み合わせが存在することから、これを探索して求め、最適同調条件とするものである。

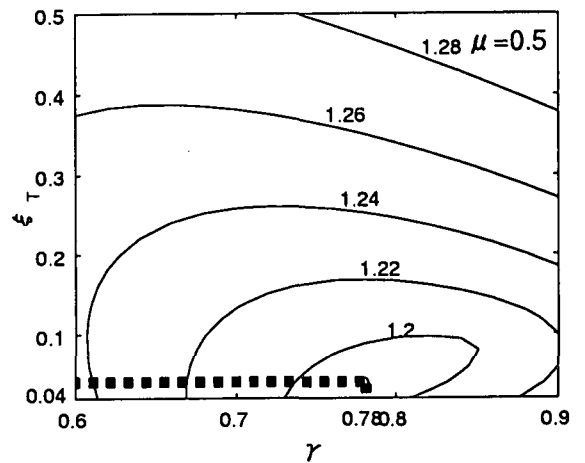


図-5 絶対速度パルス応答スペクトルの最大値の等高線図

b) 構造物の絶対速度最小化基準

最大絶対加速度最小化基準と同様の手順で構造物の絶対速度パルス応答スペクトルを描き、その最大値を最小にする (γ, ξ_T) の組み合わせを求め最適同調条件とするものである。図5にその例を示す。

パルス応答スペクトルを用いた基準においてスペクトルのピークを最小化ということは、不確定なパルス幅のうち、構造系にとって最も不利となる、最も危険な場合についての応答の低減に着目していることに相当する。

3. 解析結果

(1) 最適同調条件の計算結果

質量比 μ と最適同調比 γ 、質量比 μ と最適減衰比 ξ_T の関係を図6(a)、(b)に示す。質量比が0.5を超えるような場合、どの基準においても同調比は質量比が増加す

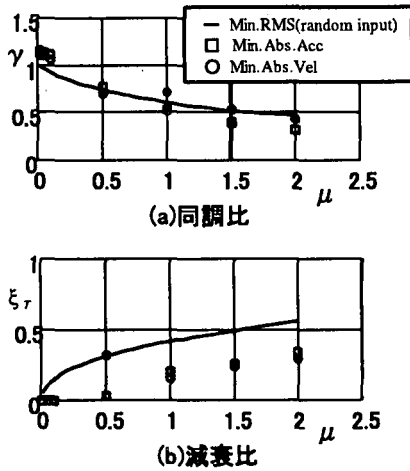


図-6 最適同調条件の計算結果

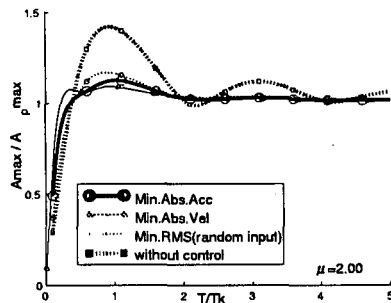


図-7 構造物の絶対加速度パルス応答スペクトル

るにつれて減少する傾向が見られ、従来より知られている不規則入力に対する最小応答分散に基づく同調条件の変化とおおむね同じである。これに対し、減衰比においては、最大絶対加速度最小化と最大絶対速度最小化による値が応答分散最小化による値より著しく小さくなるという違いが現われている。

(2) パルス応答スペクトルによる比較

質量比が 2.0 の場合の構造物の絶対加速度による比較を図 7 に、構造物の絶対速度による比較を図 8 に、補助質量の構造物からの相対変位を図 9 に示す。また質量比が 0.5 の場合の構造物の絶対加速度による比較を図 10 に、構造物の絶対速度による比較を図 11 に示す。このように質量比を大きく設定した場合、加速度基準、速度基準ともに最大応答の低減効果が見られた。ただしパルスの時間幅比が 0.5 以下のパルスに対しては応答が増加した。また補助質量の構造物からの最大相対変位が、加速度基準、速度基準ともに増大することに留意する必要がある。

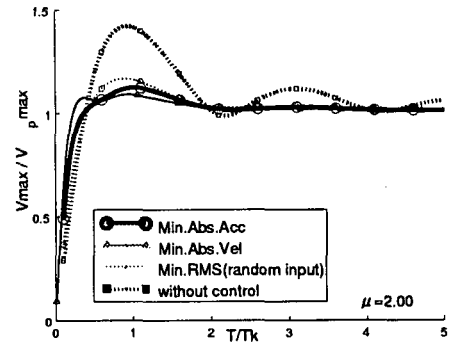


図-8 構造物の絶対速度パルス応答スペクトル

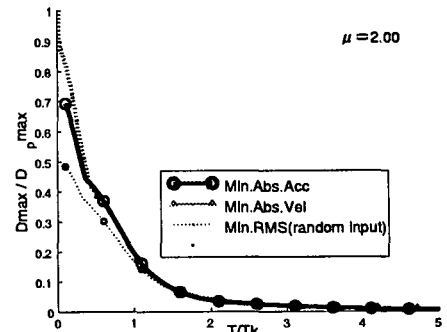


図-9 補助質量の構造物からの相対変位パルス応答スペクトル

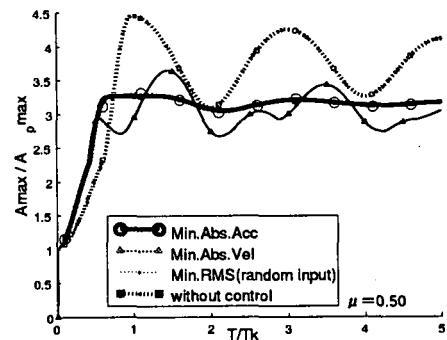


図-10 構造物の絶対加速度パルス応答スペクトル

(3) 地震応答時刻歴

前節で求めた同調条件の実地震動に対する有効性を調べるため、神戸波入力を用いた時刻歴応答解析を行った。代表的な結果を図 12～図 15 に示す。質量比は 2.0 とし、構造系の 1 次モード固有周期 T_k を 0.5(sec) に選んでいる。加速度基準による最適値を用いた場合は、応答分散最小化基準による最適値を用いた場合と比較して、構造物の絶対加速度、絶対速度においては大きな差異は認められなかったが、構造物の相対変位においてはおよそ 20% 応答の低減が認められた。速度基準による最適値を用いた場合は、同じく応答分散最小化基

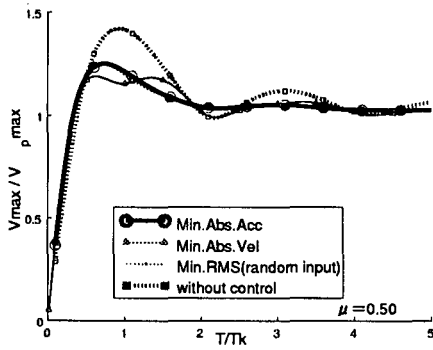


図-11 構造物の絶対速度パルス応答スペクトル

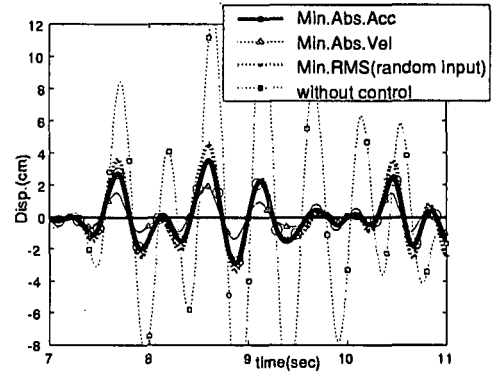


図-14 構造物の相対変位地震応答時刻歴

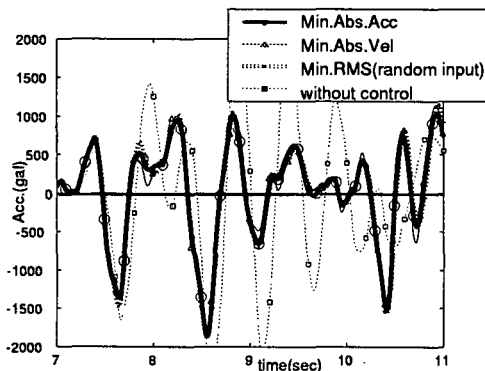


図-12 構造物の絶対加速度地震応答時刻歴

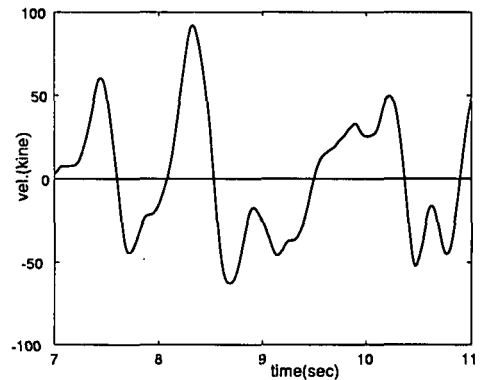


図-15 入力地震動速度波形

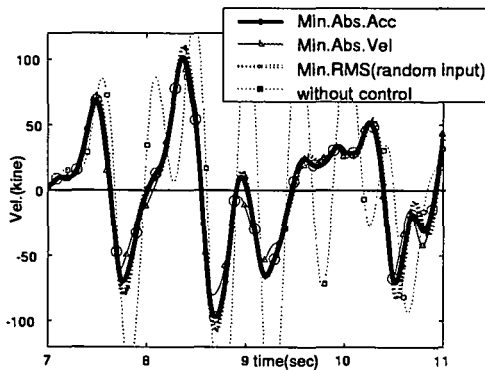


図-13 構造物の絶対速度地震応答時刻歴

準による最適値を用いた場合と比較して、構造物の絶対加速度においては大きな差異は認められなかったが、構造物の絶対速度においておおよそ10%、相対変位においてはおおよそ50% 応答の低減が認められた。特に構造物の相対変位の著しい低減効果が認められることが注目に値する。

4. 結論

入力をパルスとして考えた場合の TMD の各種パラメータの最適値・同調条件を明らかにし、応答制御の

能力の評価を行った。任意の時間幅に対する最も危険側の応答を調べるため、パルス応答スペクトルを用い、その最大値により評価を行った。パルス応答スペクトルの最大値を最小化するようなパラメータ値を数値的に探索して、従来とは異なる同調条件を得た。大きな質量比(0.5～2程度)を確保できれば、これらに基づく TMD は構造物のパルス入力応答の制御に効果をもたらすことがわかった。実際の構造物において0.5を超えるような質量比を確保するためには、構造物を2つの部分に分割し、その一方が TMD における補助質量として機能するように、構造形式を工夫する方法が現実性のある実現法である。本研究の成果を踏まえ地震時性能の高い構造形式の可能性が期待される。

参考文献

- 1) Akira Mita, Maria Q. Feng : Response Control for Tall Buildings Utilizing Mega-Structure Configuration, 第9回日本地震工学シンポジウム, ppE-205-E-210 1994年
- 2) 山口宏樹; 構造振動・制御、共立出版株式会社、1996年

(2001年5月25日受付)