

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6440243号
(P6440243)

(45) 発行日 平成30年12月19日(2018. 12. 19)

(24) 登録日 平成30年11月30日(2018. 11. 30)

| | | | |
|----------------------|------|-------|---|
| (51) Int. Cl. | F 1 | | |
| EO1D 1/00 (2006.01) | EO1D | 1/00 | Z |
| F16F 15/02 (2006.01) | F16F | 15/02 | C |
| F16F 15/04 (2006.01) | F16F | 15/04 | Z |

請求項の数 2 (全 16 頁)

| | | | |
|-----------|------------------------------|-----------|------------------|
| (21) 出願番号 | 特願2014-146974 (P2014-146974) | (73) 特許権者 | 505389695 |
| (22) 出願日 | 平成26年7月17日(2014. 7. 17) | | 首都高速道路株式会社 |
| (65) 公開番号 | 特開2016-23443 (P2016-23443A) | | 東京都千代田区霞が関1-4-1 |
| (43) 公開日 | 平成28年2月8日(2016. 2. 8) | (73) 特許権者 | 000002299 |
| 審査請求日 | 平成29年6月6日(2017. 6. 6) | | 清水建設株式会社 |
| | | | 東京都中央区京橋二丁目16番1号 |
| | | (74) 代理人 | 100064908 |
| | | | 弁理士 志賀 正武 |
| | | (74) 代理人 | 100108578 |
| | | | 弁理士 高橋 詔男 |
| | | (74) 代理人 | 100146835 |
| | | | 弁理士 佐伯 義文 |
| | | (74) 代理人 | 100161506 |
| | | | 弁理士 川渕 健一 |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 橋梁の制振構造の設定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

慣性質量ダンパーとばね部材を直列に連結してなる制振機構を、支承と並列に上部構造と下部構造に連結して設置し、

前記上部構造と前記下部構造が相対的に変位するとともに前記慣性質量ダンパーの錘が回転して慣性質量効果が発揮され、

前記ばね部材によって、前記慣性質量ダンパーと前記ばね部材により定まる前記制振機構の振動数を橋梁の卓越する振動数に同調させるように構成された橋梁の制振構造の最適な諸元を設定する方法であって、

前記慣性質量ダンパーの慣性質量 m_d と減衰係数 c_d 、前記ばね部材の剛性 k_d を下記の式(1)と式(2)で設定し、

且つ、予め橋脚部の総水平剛性 k_1 / 支承の総水平剛性 k_2 をパラメータとして k_d / k_2 と m_d / m_2 の関係、 $h_d (= c_d / 2 \sqrt{m_d k_d})$ と m_d / m_2 の関係を求めておき、

m_d / m_2 を設定するとともに k_d / k_2 と m_d / m_2 の関係、 h_d と m_d / m_2 の関係から最適な k_d と h_d を求め、前記最適な k_d と h_d と式(1)と式(2)から最適な m_d と c_d を求めることを特徴とする橋梁の制振構造の設定方法。

【数 1】

$$\psi_d = (0.1 \sim 0.5) m_2 \quad (1)$$

【数 2】

$$c_d = 2h_d \sqrt{\psi_d k_d} \quad (2)$$

【請求項 2】

請求項 1 記載の橋梁の制振構造の設定方法において、
 支承と並列に上部構造と下部構造に連結して他の制振ダンパーが設置され、
 前記制振ダンパーの減衰係数 c' が下記の式 (3) を満足するように構成されているこ
 とを特徴とする橋梁の制振構造の設定方法。

【数 3】

$$c' \leq \sqrt{\frac{m_2 (k_1 + k_2) (k_1 + 2k_2)}{2k_1}} \quad (3)$$

ここで、 m_2 は橋桁質量（多径間の場合は一体化された橋桁の総重量）、 k_1 は橋脚部
 の総水平剛性、 k_2 は支承の総水平剛性である。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、橋梁の制振構造の設定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、橋梁技術の進歩に伴い、振動、騒音の減少、走行性の向上に有効な多径間連続桁
 橋が数多く設計、施工されている。また、橋梁規模の大型化に伴って、上部構造（桁、床
 版などの上部工）の地震時慣性力を下部構造（橋脚、橋台などの下部工）に分配する構造
 が多く採用されている。例えば、下部構造と上部構造の間の支承部にゴム支承を用い、こ
 のゴム支承の水平剛性（せん断剛性）を調整することにより、下部構造に作用する地震時
 慣性力を任意に調整、配分できるようにした構造が多く採用されている。

【0003】

一方、ゴム支承は、従来のピン支承よりはるかに水平剛性が小さく変形能力が大きい
 が、LRB（鉛プラグ入り積層ゴム）や高減衰ゴム支承のような免震装置と比較すると減衰
 が数分の 1 程度しかなく変形能力も小さい。このため、設計時に想定された地震時慣性力
 を上回る過大な地震力が作用すると、支承部や下部構造に損傷が生じるおそれがある。特
 に、阪神大震災や東日本大震災を受け、設計用地震動が見直されて入力地震力が増大して
 おり、これに伴い、長周期地震動への対応など既存インフラの耐震性向上技術の開発が急
 務とされている。

【0004】

そして、従来建物などに適用されてきた免震技術や制振技術を橋梁の耐震性能を向上さ
 せる技術手法として採用することが提案、検討されている（例えば、特許文献 1、特許文
 献 2、特許文献 3、特許文献 4、特許文献 5 参照）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2009-228296号公報

【特許文献2】特開2006-9503号公報

【特許文献3】特開平7-317822号公報

【特許文献4】特許第3046192号公報

【特許文献5】特開2004-332478号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

まず、免震構造は、固有周期を長周期化することで免震対象の構造物の応答が小さくなる場合に有効である。これに対し、橋梁の免震化においては、橋梁の変形を抑えることが必要であり、建築用と比較してせん断剛性Gが3～4倍程度の大きな積層ゴム支承を使用することになる。このため、固有周期が2秒程度となり、効果的に長周期化を図ることができず、特に地盤条件が悪い場合や長周期地震動の対応が求められる場合には、十分な免震効果が発揮されにくく、その適用が困難になる。さらに、既存橋梁を免震化する場合には、高コスト、施工時に橋梁を利用できなくなるなどの課題もある。

【0007】

一方、制振構造は、橋梁の下部構造と上部構造の間に制振ダンパーを追加設置し、減衰性能を付与することにより、比較的容易に且つ低コストで応答を低減することができる。橋梁の耐震性能を向上させることができる。

しかしながら、地震時に下部構造が変形することによって制振ダンパーの効きが悪くなる問題があり、逆に、ダンパー性能を増大して支承部の変形を抑制すると下部構造のせん断力や上部構造の加速度が大幅に増加してしまうという不都合が生じる。

【0008】

本発明は、上記事情に鑑み、制振によって確實且つ効果的に橋梁の耐震性能を向上させることを可能にする橋梁の制振構造の設定方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記の目的を達するために、この発明は以下の手段を提供している。

【0010】

本発明の橋梁の制振構造の設定方法は、慣性質量ダンパーとばね部材を直列に連結してなる制振機構を、支承と並列に上部構造と下部構造に連結して設置し、前記上部構造と前記下部構造が相対的に変位するとともに前記慣性質量ダンパーの錘が回転して慣性質量効果が発揮され、前記ばね部材によって、前記慣性質量ダンパーと前記ばね部材により定まる前記制振機構の振動数を橋梁の卓越する振動数に同調させるように構成された橋梁の制振構造の最適な諸元を設定する方法であって、前記慣性質量ダンパーの慣性質量 m_d と減衰係数 c_d 、前記ばね部材の剛性 k_d を下記の式(1)と式(2)で設定し、且つ、予め橋脚部の総水平剛性 k_1 / 支承の総水平剛性 k_2 をパラメータとして k_d / k_2 と m_d / m_2 の関係、 $h_d (= c_d / 2 \sqrt{m_d k_d})$ と m_d / m_2 の関係を求めておき、 k_d / m_2 を設定するとともに k_d / k_2 と m_d / m_2 の関係、 h_d と m_d / m_2 の関係から最適な k_d と h_d を求め、前記最適な k_d と h_d と式(1)と式(2)から最適な m_d と c_d を求めることを特徴とする。

【0011】

【数1】

$$\psi_d = (0.1 \sim 0.5) m_2 \quad (1)$$

【0012】

【数 2】

$$c_d = 2h_d \sqrt{\psi_d k_d} \quad (2)$$

【0013】

本発明の橋梁の制振構造の設定方法は、支承と並列に上部構造と下部構造に連結して他の制振ダンパーが設置され、前記制振ダンパーの減衰係数 c' が下記の式(3)を満足するように構成されていてもよい。

【0014】

【数 3】

$$c' \leq \sqrt{\frac{m_2 (k_1 + k_2)(k_1 + 2k_2)}{2k_1}} \quad (3)$$

ここで、 m_2 は橋桁質量（多径間の場合は一体化された橋桁の総重量）、 k_1 は橋脚部の総水平剛性、 k_2 は支承の総水平剛性である。

【発明の効果】

【0016】

本発明の橋梁の制振構造の設定方法においては、慣性質量ダンパーとばね部材を直列に連結してなる制振機構を支承部に並列に設置することにより、地震などによって上部構造と下部構造が相対的に変位するとともに慣性質量ダンパーによる慣性質量効果を発揮させることができる。また、ばね部材によって制振機構の振動数を橋梁の卓越する振動数（例えば橋梁の1次固有振動数）に同調させることで、橋梁の卓越する振動数近傍の振動に対して効果的に慣性質量効果を発揮させることができる。

【0017】

そして、制振機構が同調型であり、橋梁の卓越する振動数近傍の共振振動数近傍のみで慣性質量効果が発揮されるため、支承部の変位と上部構造（桁部）の加速度を同時に低減できる。また、支承部の水平変位を効果的に抑制できる。

【0018】

さらに、地震時などにおいて下部構造に作用するせん断力は概ね上部構造の質量と加速度を乗じたものになるため、橋脚部の曲げモーメントや基礎に作用する力、すなわち下部構造に作用する力も低減することが可能になる。

【0019】

また、共振振動数近傍のみで効くため、従来のオイルダンパーなどの制振装置のように高振動数域で負担力が増大するおそれがない。また、ばね部材によって制振機構の効きを調整できるため、ダンパー反力によって躯体（上部構造、下部構造）が損傷することも防止できる。

【0020】

これにより、本発明の橋梁の制振構造の設定方法を備えることで、既存橋梁の橋脚部や杭の耐力が小さく、制振しない場合に大きな損傷を生じていた部位の応答を大幅に低減することができ、地震などによる損傷を防止（軽減）することが可能になる。また、特に、杭のように改修工事によっても補強が困難な杭などの部材の耐力を増大させることなく耐震性能を向上させることができ、耐震の余裕度を向上させることが可能になる。

【0021】

また、本発明の橋梁の制振構造の設定方法においては、上記の橋梁の制振構造の作用効果に加え、「 ψ_d / m_2 の範囲」、「 k_d / k_2 と ψ_d / m_2 の関係」、「 h_d と ψ_d / m_2 の関係」から、 ψ_d / m_2 を設定すれば他の最適な諸元を簡便に求めることができ、

10

20

30

40

50

同調型制振機構を実現するための実用的な方法を提供することができる。また、 d/m_2 を大きくすれば応答低減効果は増大するが、制振機構の反力も増加することから、桁梁や橋脚の耐力を考慮しながら適切な値に設定することができる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造(a)及びこの振動解析モデル(b)を示す図である。

【図2】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造の慣性質量ダンパーの一例を示す断面図である。

【図3】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造を設けた橋梁の耐震性能を確認するシミュレーションを行う際に用いた振動解析モデルを示す橋梁の側面図(a)、床伏図(b)、(b)のX1-X1線矢視図(c)である。

【図4】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造の設定方法で用いる k_d/k_2 と d/m_2 の関係の一例を示す図である。

【図5】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造の設定方法で用いる h_d と d/m_2 の関係の一例を示す図である。

【図6】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造を設けた橋梁の耐震性能を確認するために行ったシミュレーションの結果であり、加振振動数比と加速度応答倍率の関係を示す図である。

【図7】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造を設けた橋梁の耐震性能を確認するために行ったシミュレーションの結果であり、加振振動数比と反力応答倍率の関係を示す図である。

【図8】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造を設けた橋梁の耐震性能を確認するために行ったシミュレーションの結果であり、加振振動数比と変位応答倍率の関係を示す図である。

【図9】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造を設けた橋梁の耐震性能を確認するために行ったシミュレーションの結果であり、加振振動数比と変位応答倍率(制振構造を備えたケースのみ)の関係を示す図である。

【図10】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造を設けた橋梁の耐震性能を確認するシミュレーションで用いた入力地震動の波形を示す図である。

【図11】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造を設けた橋梁の耐震性能を確認するために行ったシミュレーションの結果であり、橋桁部の時刻歴加速度応答波形を示す図である。

【図12】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造を設けた橋梁の耐震性能を確認するために行ったシミュレーションの結果であり、支承部の時刻歴変位応答波形を示す図である。

【図13】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造を設けた橋梁の耐震性能を確認するために行ったシミュレーションの結果であり、橋脚部の時刻歴せん断力応答波形を示す図である。

【図14】本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造を設けた橋梁の耐震性能を確認するために行ったシミュレーションの結果であり、橋脚頂部の時刻歴加速度応答波形を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0023】

以下、図1から図14を参照し、本発明の一実施形態に係る橋梁の制振構造及び橋梁の制振構造の設定方法について説明する。

【0024】

本実施形態の橋梁の制振構造Aは、図1に示すように、例えば多径間連続桁形式の高架橋などの橋梁の制振構造であり、橋梁1の下部構造3と上部構造2の間に制振機構Bを設置して構成されている。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 5 】

また、本実施形態の制振機構 B は、慣性質量ダンパー 4 とばね部材 5 を直列に連結して構成されており、支承部（支承 6）と並列配置されるように、例えば一端を上部構造 2 の橋桁に、他端を下部構造 3 の橋脚頂部（又は橋台頂部）に連結して配設されている。

【 0 0 2 6 】

さらに、上部構造 2 と下部構造 3 が相対的に変位するとともに慣性質量ダンパー 4 の錘が回転して慣性質量効果が発揮され、ばね部材 5 によって、慣性質量ダンパー 4 とばね部材 5 とにより定まる振動数を橋梁 1 の卓越する振動数（例えば、1 次固有振動数）に同調させて構成されている。

【 0 0 2 7 】

すなわち、本実施形態の橋梁の制振機構 A においては、制振機構 B として主系の慣性質量ダンパー（慣性質量機構）4 と付加振動系のばね部材（直列ばね）5 を設け、慣性質量ダンパー 4 とばね部材 5 から定まる固有の振動数に同調するように、バネ値（慣性質量とばね部材の値）が設定されている。

【 0 0 2 8 】

ここで、本実施形態の制振機構 B の一例を図 2 に示す。

この制振機構 B は、回転慣性質量機構（慣性質量ダンパー 4）B 1 と付加ばね機構（ばね部材 5）B 2 を備えるとともに、回転慣性質量機構 B 1 と付加ばね機構 B 2 を直列に連結配置して構成されている。

【 0 0 2 9 】

回転慣性質量機構 B 1 は、中心軸線 O 1 を制振機構 B の軸線 O 1 と同軸上に配して設けられたボールねじ 1 0 と、ボールねじ 1 0 に螺着して配設されたボールナット 1 1 と、ボールナット 1 1 に取り付けられ、ボールナット 1 1 の回転に従動して回転する回転錘 1 2 とを備えて構成されている。

【 0 0 3 0 】

ボールねじ 1 0 は、その一端 1 0 a に、橋梁 1 の上部構造 2 又は下部構造 3 に接続するためのボールジョイントやクレビスなどの連結部材 1 3 が取り付けられている。

【 0 0 3 1 】

また、ボールねじ 1 0 に螺着したボールナット 1 1 は、軸受け 1 4 に支持されている。軸受け 1 4 は、軸線 O 1 周りに回転不能に且つ軸線 O 1 方向に移動不能に固設される円環状の外輪 1 4 a と、外輪 1 4 a の内孔内に配されて軸線 O 1 周りに回転可能に支持された円環状の内輪 1 4 b とを備えて形成されている。そして、ボールねじ 1 0 が軸受け 1 4 の内輪 1 4 b の中心孔に挿通して配設されるとともに、ボールナット 1 1 が軸受け 1 4 の内輪 1 4 b に固設されている。これにより、ボールナット 1 1 は、軸線 O 1 周りに回転可能に、且つ軸線 O 1 方向に移動不能に配設されている。

【 0 0 3 2 】

さらに、ボールナット 1 1 に回転錘 1 2 が一体に固定して設けられている。回転錘 1 2 は例えば略円筒状に形成され、ボールねじ 1 0 を内部に挿通し、ボールねじ 1 0 と互いの軸線 O 1 を同軸上に配した状態でボールナット 1 1 に固着して配設されている。

【 0 0 3 3 】

一方、付加ばね機構 B 2 は、円筒状に形成された外筒 1 5 と、外筒 1 5 よりも外径が小の円筒状に形成され、外筒 1 5 の内部に互いの軸線 O 1 を同軸上に配して設けられた内筒 1 6 と、外筒 1 5 と内筒 1 6 の間に配設された付加ばね（ばね部材）5 とを備えて構成されている。

【 0 0 3 4 】

外筒 1 5 は、所定長さの高軸剛性かつ高曲げ剛性の中空円筒体であって、その他端（図中左側の端部）1 5 a に内部を閉塞させるように円板状の接続板 1 7 が固着され、この接続板 1 7 に、制振機構 B の他端を、橋梁 1 の下部構造 3 又は上部構造 2 に接続するためのボールジョイントやクレビスなどの連結部材 1 8 が取り付けられている。また、外筒 1 5 の一端側（図中右側の端部）1 5 b には、内筒 1 6 を挿通させる挿通孔を中心に貫通形成

10

20

30

40

50

した円環状の支持板 19 が内部を閉塞させるように固着されている。

【0035】

また、外筒 15 には、一端 15 b 側に、支持板 19 に固着して設けられ、外筒 15 を内筒 16 に対して軸線 O1 方向に案内して相対的に進退させるためのリニアガイド 20 が設けられている。さらに、外筒 15 には、他端 15 a 側に、内面から径方向内側に突出し、他端 15 a から軸線 O1 方向一端 15 b 側に向けて延びる凸部 21 が設けられている。また、この凸部 21 は、制振機構 B のストローク量に応じた軸線 O1 方向の長さ寸法で形成されている。

【0036】

内筒 16 は、所定長さの高軸剛性かつ高曲げ剛性の中空円筒体であって、支持板 19 の挿通孔に他端 16 a 側から挿通して外筒 15 内に配設され、一端 16 b 側を外筒 15 から外側に配して設けられている。また、このとき、内筒 16 は、その一端 16 b を、ボールねじ 10 を回転可能に軸支する軸受け 14 の外輪 14 a に固着し、内輪 14 b の内孔と互いの軸線 O1 が同軸上に配されるようにして設けられている。さらに、内筒 16 は、他端 16 a と外筒 15 の他端 15 a に固着された接続板 17 との軸線 O1 方向の間に所定の間隔（制振機構のストローク量を規定する間隔）を設けて外筒 15 内に配設されている。

【0037】

また、内筒 16 には、外筒 15 の支持板 19 から外側に延設された一端 16 b 側に、径方向外側に突出し、軸線 O1 方向に延び、リニアガイド 20 が係合して外筒 15 を内筒 16 に対して軸線 O1 方向に案内し相対回転せずに進退させるためのリニアガイドレール 22 が設けられている。さらに、内筒 16 には、その他端 16 a に、内筒 16 の外径よりも大きく、外筒 15 の内径よりも小さい直径を有する円板状の係止板 23 が固着されている。

【0038】

内筒 16 の他端 16 a 側には、内筒 16 の外径と略等しい内径を備え、外筒 15 の内径よりも僅かに小さい外径を備えて略円環状に形成されたストローク規定板 24 が、その中心孔に内筒 16 の他端 16 a 側を挿通して取り付けられている。このストローク規定板 24 は、外筒 15 の内面に当接する外周ローラー 24 a と、内筒 16 の外面に当接する内周ローラー 24 b を備えている。そして、ストローク規定板 24 は、これらローラー 24 a、24 b によって外筒 15 と内筒 16 のそれぞれに対し、相対的に軸線 O1 方向に進退自在に設けられている。また、このとき、ストローク規定板 24 は、外筒 15 の凸部 21 の軸線 O1 方向一端に当接することで、外筒 15 に対し、さらなる軸線 O1 方向他端 15 a 側への移動が規制され、内筒 16 の係止板 23 に当接することで、内筒 16 に対し、さらなる軸線 O1 方向他端 16 a 側への相対移動が規制されている。

【0039】

付加ばね機構 B 2 のばね部材（付加ばね）5 は、内筒 16 の外面と外筒 15 の内面の間、且つストローク規定板 24 と支持板 19 の軸線 O1 方向の間に設けられている。本実施形態において、ばね部材 5 は、複数枚の皿バネが直列に重ねられた 1 組の皿バネ群を複数組軸線 O1 方向に並設して構成されている。なお、図 2 では軸線 O1 方向中間部分のばね部材 5 を省略して図示している。

【0040】

これにより、ばね部材 5 による付勢力でストローク規定板 24 に軸線 O1 方向他端側に押圧する力が作用し、通常時には、この付勢力を受けたストローク規定板 24 が凸部 21 に当接してそれ以上軸線 O1 方向他端側に移動しないように設けられている。また、この状態で、ストローク規定板 24 に内筒 16 に設けられた係止板 23 が当接する。

【0041】

そして、内筒 16 に対して外筒 15 が軸線 O1 方向一端側に相対変位する際には、すなわち、制振機構 B に圧縮側の力が作用した際には、凸部 21 にストローク規定板 24 が押圧され、これとともに内筒 16 に対してストローク規定板 24 が軸線 O1 方向一端側に相対変位し、ばね部材 5 が縮む。また、内筒 16 に対して外筒 15 が軸線 O1 方向他端側に

相対変位する際には、すなわち、制振機構 B に引張側の力が作用した際には、係止板 2 3 にストローク規定板 2 4 が押圧され、これとともに外筒 1 5 に対してストローク規定板 2 4 が軸線 O 1 方向一端側に相対変位し、ばね部材 5 が縮む。

【 0 0 4 2 】

なお、ストローク規定板 2 4 や支持板 1 9 のばね部材 5 と当接する面や、外筒 1 5 の内面、内筒 1 6 の外面に硬質ゴム等の緩衝材を取り付け、付加ばね機構 B 2 の動作時に騒音（機械音）が発生したり、摩耗が生じることを防止することが好ましい。

【 0 0 4 3 】

そして、地震などが発生し、橋梁 1 に振動エネルギーが作用して下部構造 3 と上部構造 2 に相対的な変位が生じると（入力されると）、この変位差に応じて回転慣性質量機構（慣性質量ダンパー 4）B 1 のボールねじ 1 0 が軸線 O 1 方向に進退し、軸受け 1 4 の内輪 1 4 b に支持されたボールナット 1 1 が回転するとともに回転錘 1 2 が回転する。これにより、回転錘 1 2 の実際の質量の数千倍もの慣性質量効果が得られ、オイルダンパーなどの従来の制振装置を設置した場合と比較し、応答変位が大幅に低減することになる。

【 0 0 4 4 】

また、制振機構 B に圧縮側の力が作用し、付加ばね機構 B 2 の内筒 1 6 に対して外筒 1 5 が軸線 O 1 方向一端側に相対変位する際には、凸部 2 1 にストローク規定板 2 4 が押圧され、これとともに内筒 1 6 に対してストローク規定板 2 4 が軸線 O 1 方向一端側に相対変位し、ばね部材 5 が縮む。また、制振機構 B に引張側の力が作用し、内筒 1 6 に対して外筒 1 5 が軸線 O 1 方向他端側に相対変位する際には、係止板 2 3 にストローク規定板 2 4 が押圧され、これとともに外筒 1 5 に対してストローク規定板 2 4 が軸線 O 1 方向一端側に相対変位し、ばね部材 5 が縮む。

【 0 0 4 5 】

そして、このばね部材 5 の伸縮によって、回転慣性質量機構（慣性質量ダンパー 4）B 1 と付加ばね機構（ばね部材 5）B 2 とにより定まる振動数を橋梁 1 の卓越する振動数（例えば 1 次固有振動数）に同調させるようにする。

【 0 0 4 6 】

また、回転慣性質量機構 B 1 はボールねじ機構等によって両端に作用する相対変位で錘 1 2 を回転させることにより錘質量の数千倍もの大きな慣性質量効果が得られるもので、作用する相対加速度に比例した反力が得られる。このため、橋梁 1 の上部構造 2 の温度による伸縮（低速）にはほとんど反力を生じさせずに追従することになる。

【 0 0 4 7 】

次に、図 1（a）、図 3（a）、図 3（b）、図 3（c）に示すように、本実施形態の制振機構 B は、前述した通り、橋梁 1 の下部構造（橋脚頂部など）3 と上部構造（橋桁など）2 との間に、慣性質量ダンパー 4 とばね部材 5 を直列に連結した形で設置される。

【 0 0 4 8 】

この振動モデルは図 1（b）のようになり、慣性質量 m_d と減衰係数 c_d を並列にし、ばね部材 5 をこれと直列するばね部材 5 の剛性 k_d としてモデル化される。そして、慣性質量 m_d と直列ばね k_d とにより定まる振動数を橋梁 1 の 1 次固有振動数に同調するように設定して同調型制振機構とする。

【 0 0 4 9 】

ここで、本実施形態の橋梁の制振構造 A の設定方法においては、橋桁質量（多径間の場合は一体化された橋桁の総重量）を m_2 、橋脚頂部の質量（橋脚が複数の場合はその総合計）を m_1 、支承の総水平剛性を k_2 、橋脚部の総水平剛性を k_1 とし、慣性質量ダンパー 4 の慣性質量 m_d と減衰係数 c_d 、ばね部材 5 の剛性 k_d を次の式（4）、式（5）で設定する。

また、予め、 k_d / k_2 と m_d / m_2 の関係、 h_d と m_d / m_2 の関係を図 4、図 5 のように求めておく。

【 0 0 5 0 】

10

20

30

40

50

【数 4】

$$\psi_d = (0.1 \sim 0.5)m_2 \quad (4)$$

【数 5】

$$c_d = 2h_d \sqrt{\psi_d k_d} \quad (5)$$

k_d 、 h_d については図 4、図 5 によって設定する。

【0051】

なお、ここでは、下部構造 3 となる橋脚部の構造減衰を 1 次固有振動数に対して 5 % とし、支承部の減衰については無視する。また、これらの値は一体化した橋桁部分にとりつく諸元の合計値であり、このダンパー諸元は小さすぎると応答低減効果がなく、大きすぎると支承剛性を高めた（ピン支承にした）のと同様で変形を抑制できるが応答低減効果が得られなくなる。これを考慮して、上記範囲のように諸元が設定される。

【0052】

次に、上記の振動モデルを用いて本実施形態の橋梁の制振構造 A を設けた場合の橋梁 1 の耐震性能をシミュレーションした結果（試設計）について説明する。

【0053】

本シミュレーションでは、制振機構 B を設けない非制振の Case 1 と、慣性質量ダンパー 4 とばね部材 5 を直列に連結してなる制振機構 B を設けた Case 2（本実施形態の橋梁の制振構造 A）の 2 ケースについてシミュレーションを行い、互いのシミュレーション結果を比較した。

【0054】

また、制振対象として 3 径間の橋梁 1 をモデル化した。この橋梁 1 の諸元は、路面を含む橋桁部質量 $m_2 = 1578 \text{ ton}$ 、橋脚部質量 $m_1 = 319 \text{ ton}$ 、支承部剛性 $k_2 = 73.5 \text{ kN/mm}$ 、下部工剛性（下部構造の剛性） $k_1 = 477 \text{ kN/mm}$ とした。これにより、 $m_1/m_2 = 0.2$ 、 $k_1/k_2 = 6.5$ となる。

また、制振機構 B の慣性質量は $m_d = 442 \text{ ton}$ とした。

【0055】

そして、上記のように各諸元、ひいては $m_d/m_2 = 0.28$ 、 $k_1/k_2 = 6.5$ を決めると、図 4 と図 5 から $k_d/k_2 = 0.45$ 、 $h_d = 0.29$ を得ることができる。これにより、 $k_d = 0.45 k_2 = 33.1 \text{ kN/mm}$ 、 $c_d = 2.22 \text{ kN} \cdot \text{sec/mm} = 22.2 \text{ kN/kine}$ となる。

【0056】

次に、周波数伝達関数を用い、本実施形態の制振機構 B の有無（Case 1、Case 2）による振動特性の違いを周波数領域で検討した結果について説明する。

【0057】

ここで、橋脚部の有効質量 m_1 、橋桁部の質量 m_2 、各質点の全体変位 x_i 、各層の剛性 k_i 、2 層目に設ける慣性質量 m_d 、付加減衰 c_d 、直列ばね（ばね部材） k_d 、入力加速度（地表面加速度） x_0 （上に・・・）とし、下記の式（6）のように設定すれば、加速度応答倍率は、下記の式（7）で求めることができる。なお、 i は虚数（ $i = \sqrt{-1}$ ）、 ω は加振角振動数（ $\omega = 2\pi f$ （ f は加振振動数））であり、 ω_{01} は第 1 層目の質量 m_1 と剛性 k_1 により定まる角振動数、 ω_{02} は第 2 層目の質量 m_2 と剛性 k_2 により定まる角振動数である。

【0058】

10

20

30

40

【数 6】

$$\bar{m} = \frac{m_1}{m_2}, \quad \bar{k} = \frac{k_1}{k_2}, \quad \bar{\psi}_d = \frac{\psi_d}{m_2}, \quad \omega_{01}^2 = \frac{k_1}{m_1}, \quad \omega_{02}^2 = \frac{k_2}{m_2},$$

$$\xi = \frac{\omega}{\omega_{02}}, \quad h_d = \frac{c_d}{2\psi_d\omega_{02}}, \quad \bar{c}_d = \frac{c_d}{\sqrt{m_2k_2}} \quad (6)$$

【数 7】

10

$$\frac{\ddot{X}_2}{\ddot{X}_0} = \frac{X_2}{X_0} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & -1 & \xi^2\bar{\psi}_d - i\xi\bar{c}_d \\ \bar{k} & \bar{k} + \bar{k}_d + 1 & -\bar{k}_d \\ 0 & -\bar{k}_d & -\xi^2\bar{\psi}_d + \bar{k}_d + i\xi\bar{c}_d \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\xi^2(1 + \bar{\psi}_d) + 1 + i\xi\bar{c}_d & -1 & \xi^2\bar{\psi}_d - i\xi\bar{c}_d \\ -1 & \bar{k} + \bar{k}_d + 1 & -\bar{k}_d \\ \xi^2\bar{\psi}_d - i\xi\bar{c}_d & -\bar{k}_d & -\xi^2\bar{\psi}_d + \bar{k}_d + i\xi\bar{c}_d \end{vmatrix}} \quad (7)$$

【0059】

図6は、地表面加速度 x_0 （上に「 $\cdot\cdot$ 」）に対する加振角振動数（ x_2 （上に「 $\cdot\cdot$ 」）、 x_1 （上に「 $\cdot\cdot$ 」））の比率を応答倍率として示した結果である。なお、この図6における加振振動数比は $\omega_2 = (k_2/m_2)$ に対する加振角振動数 $\omega = 2\pi f$ （ f は加振振動数）の比率である。

【0060】

この図6、図7から、本実施形態の同調型の制振機構B（Case 2）を設けることにより共振時の応答倍率が大幅に低減することが確認された。また、 $m_2 \gg m_1$ であることから、下部構造3の反力が概ね橋桁部の加速度に比例することになり、且つ下部構造3の反力も同様に低減することが確認された。 30

【0061】

本実施形態の制振機構Aの場合（Case 2）について、当該部より上部にある全質量に加速度を乗じた値に対する当該部の反力の比率を応答倍率とする。制振機構Bの反力応答倍率は（制振機構の反力）/ $m_2 x_0$ （上に「 $\cdot\cdot$ 」）、下部構造3の反力応答倍率は（下部工の反力）/ $(m_1 + m_2) x_0$ （上に「 $\cdot\cdot\cdot$ 」）で表される。

【0062】

そして、図7に示すように、「支承6+制振機構B」及び下部構造3の応答倍率は、概ね加速度応答倍率と同様になることが確認された。また、制振機構Bの応答倍率は共振振動数近傍だけで大きくなることが確認された。 40

これにより、本実施形態の制振機構Bは共振域だけ効いて高振動数域では効かない特徴を有し、この特徴によって従来のオイルダンパー等の制振装置を設置した場合と比較し、負担力が小さくなる。

【0063】

図8は、地表面変位 x_0 に対する各部変位（相対変位 $x_2 - x_1$ 、 $x_1 - x_0$ ）の比率を応答倍率として示した結果である。また、図9は、本実施形態の制振機構Aを備えた場合についてのみ縦軸を拡大して示している。

【0064】

これら図8、図9から、本実施形態の制振機構Bにより共振域での応答倍率が大幅に低し、支承部の変位が抑制されることが確認された。 50

【 0 0 6 5 】

次に、時刻歴解析を用い、制振機構 B の有無 (C a s e 1、C a s e 2) による応答の違いを検討した結果について説明する。

【 0 0 6 6 】

ここでは、公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書に示されたレベル 2 地震動で 2 種地盤に対応する I I - I I - 3 地震波 (最大加速度 7 3 6 g a l) を入力し、時刻歴波形で応答結果を比較した。

なお、この入力地震動の波形は図 1 0 に示す通りである。

【 0 0 6 7 】

図 1 1 は橋桁部の加速度、図 1 2 は支承部の変位、図 1 3 は橋脚部のせん断力、図 1 4 は橋脚頂部の加速度を示している。 10

【 0 0 6 8 】

図 1 1 から、本実施形態の制振機構 B により最大応答加速度が半減するとともに、揺れの継続時間も大幅に低減することが確認された。

【 0 0 6 9 】

図 1 2 から、支承部の変位も制振機構 B により半減し、概ね 2 0 0 m m 程度に収まることが確認された。さらに、変位が 2 0 0 m m 超える回数も制振機構 B により正負各々 7 回から 1 回に減少した。また、制振時のダンパー最大反力は 5 6 9 0 k N (1 台あたり 4 7 4 k N) となり、直列なので慣性質量ダンパー 4 もばね部材 5 も同じとなる。最大変位 (2 2 8 m m) は慣性質量ダンパー 4 が 2 1 0 m m、ばね部材 5 が 1 4 1 m m となり、単純和は支承変位より大きくなることを確認された。制振機構 B を備えた時のダンパー最大反力は直列なので慣性質量ダンパー 4 もばね部材 5 も同じとなる。 20

【 0 0 7 0 】

図 1 3 から、下部工 (橋脚部) に作用するせん断力も制振機構 B により半減し、応力振幅も速やかに減衰することが確認された。これにより、大きな応力を生じる回数が減るので、疲労破壊も生じにくくなることが実証された。

【 0 0 7 1 】

図 1 4 から、橋脚頂部 (支承部下部) の加速度は制振機構 B によりやや低減されるもののその低減効果は顕著ではないことが確認された。これにより、本実施形態の橋脚の制振構造 A は、橋脚頂部の加速度の応答低減を図ることはできないことが確認された。 30

【 0 0 7 2 】

したがって、本実施形態の橋梁の制振構造 A においては、直列に連結した回転慣性質量ダンパー 4 とばね部材 5 を支承部 6 に並列設置するだけで、支承部 6 の水平変位を抑制できるとともに、下部構造 (橋脚部) 3 に作用する力 (せん断力、モーメント) をも低減でき、基礎に作用する地震力も低減することができる。

【 0 0 7 3 】

これにより、既存橋脚部や杭の耐力が小さく、制振しない場合に大きな損傷を生じていた部位における応答が制振により大幅に低減され、損傷を防止または軽減することができる。特に、杭のように改修工事でも補強することが困難な部材の耐力を増大させることなく、耐震性能を向上させることができる。すなわち、耐震余裕度を向上することができる。 40

【 0 0 7 4 】

また、支承部 6 を交換する必要がなく、単に制振機構 B を付加するだけなので、橋梁 1 を工事中も継続使用できる。

【 0 0 7 5 】

さらに、慣性質量ダンパー 4 と直列ばね部材 5 とによる同調型制振機構を用いることで、共振振動数近傍のみ効果的に応答低減することができ、オイルダンパー等の粘性減衰 (従来の制振装置) のように高振動数域で加速度応答が増大することがない。

【 0 0 7 6 】

また、高振動数成分が含まれなくなることで、制振機構 B の反力 (負担力) が従来の制 50

振装置よりも小さくなったにも関わらず、大きな応答低減効果を発揮できる。特に、築年数の古い橋梁においては桁梁の断面性能が小さく、制振装置の反力に対し桁の耐力が不足する場合もあり、反力が小さくても制振効果の高い本実施形態の橋梁の制振構造 A を採用することで好適に耐震性能を向上させることが可能になる。

【0077】

さらに、制振機構 B を支承部 6 に並列配置するだけの比較的簡単な作業なので、施工に当たり特別な技能は必要とされず、新築だけでなく既存橋梁 1 の制震改修にも適用できる。

【0078】

また、本実施形態の橋梁の制振構造の設定方法においては、上記の橋梁の制振構造 A の作用効果に加え、「 d/m_2 の範囲」、「 k_d/k_2 と d/m_2 の関係」、「 h_d と d/m_2 の関係」から、 d/m_2 を設定すれば他の最適な諸元を簡便に求めることができ、同調型制振機構を実現するための実用的な方法を提供することができる。さらに、 d/m_2 を大きくすれば応答低減効果は増大するが、制振機構 B の反力も増加することから、桁や橋脚の耐力を考慮しながら適切な値に設定することができる。

【0079】

以上、本発明に係る橋梁の制振構造及び橋梁の制振構造の設定方法の一実施形態について説明したが、本発明は上記の一実施形態に限定されるものではなく、その趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更可能である。

【0080】

例えば、本実施形態では、慣性質量ダンパー 4 とばね部材 5 を直列に連結してなる制振機構 B のみを備えて制振構造 A が構成されているものとしたが、慣性質量ダンパー 4 とばね部材 5 を直列に連結してなる制振機構 B だけでなく、橋梁 1 の上部構造 2 と下部構造 3 の間に他の制振装置（他の制振ダンパー）を付加して橋梁の制振構造 A が構成されていてもよい。他の制振装置としては例えばオイルダンパーやピンガムダンパー、その他の粘性系ダンパーなどが挙げられ、このような制振装置を付加することにより支承部 6 の変位量を低減し、さらに耐震性を向上させることができる。

【0081】

但し、付加する制振装置（制振ダンパー）が過大だと支承部の変位は低減できるが下部構造（橋脚部）の応答が増大するため、付加する制振装置の減衰係数 c' に次の式（8）で示される制約条件をつけることが望ましい。

【0082】

【数 8】

$$c' \leq \sqrt{\frac{m_2(k_1 + k_2)(k_1 + 2k_2)}{2k_1}} \quad (8)$$

【0083】

また、想定外の入力地震動に対するフェールセーフ機構として、慣性質量ダンパー 4 は例えば回転錘 1 2 とボールねじ機構を摩擦材を介して接合するなどし、伝達トルクを頭打ちする過負荷防止機構を備えて構成することが好ましい。さらに、オイルダンパーはピストンにリリース弁を設け、シリンダー内の過大な圧力上昇を抑制する過負荷防止機構を備えることが好ましい。

【符号の説明】

【0084】

- 1 橋梁
- 2 上部構造
- 3 下部構造
- 4 慣性質量ダンパー
- 5 ばね部材

10

20

30

40

50

- 6 支承（支承部）
- 10 ボールねじ
- 11 ボールナット
- 12 回転錘（錘）
- 13 連結部材
- 14 軸受け
- 15 外筒
- 16 内筒
- 17 接続板
- 18 連結部材
- 19 支持板
- 20 リニアガイド
- 21 凸部
- 22 リニアガイドレール
- 23 係止板
- 24 ストローク規定板
- A 橋梁の制振構造
- B 制振機構
- B1 回転慣性質量機構
- B2 付加ばね機構
- O1 制振機構の軸線

10

20

【図1】

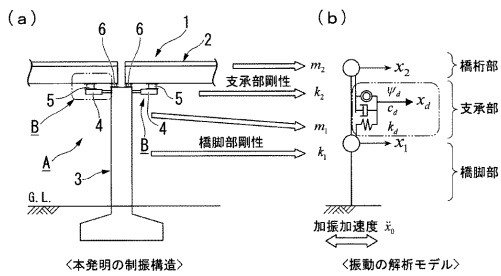


図1

【図2】

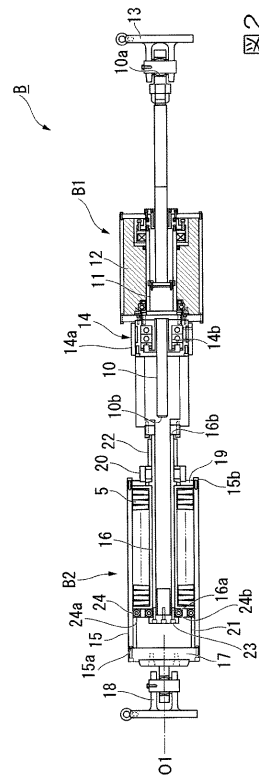
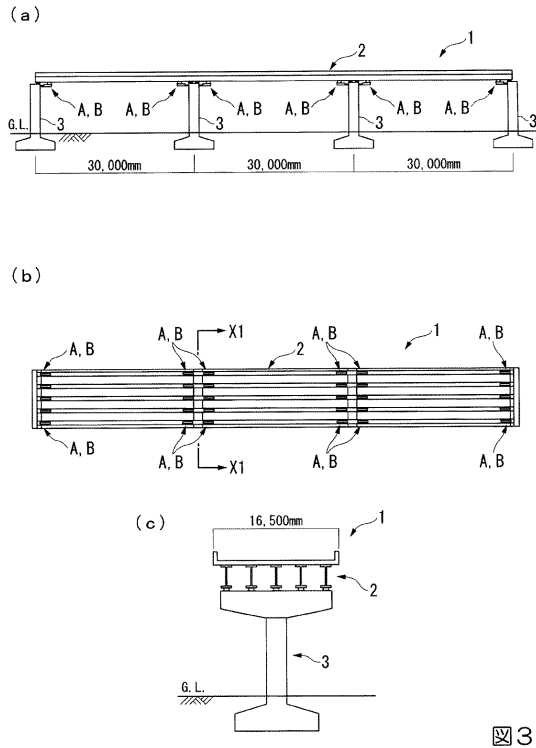
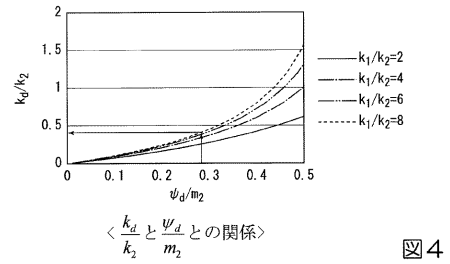


図2

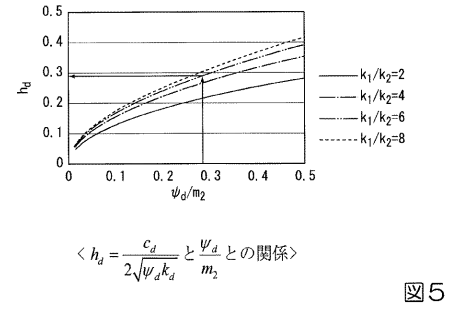
【 図 3 】



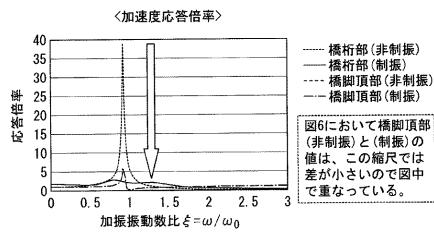
【 図 4 】



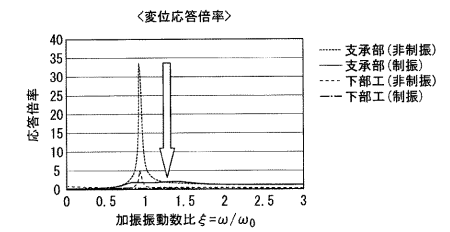
【 図 5 】



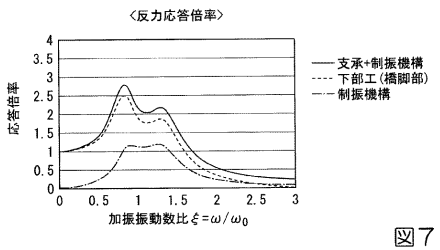
【 図 6 】



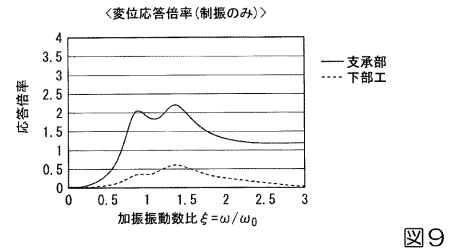
【 図 8 】



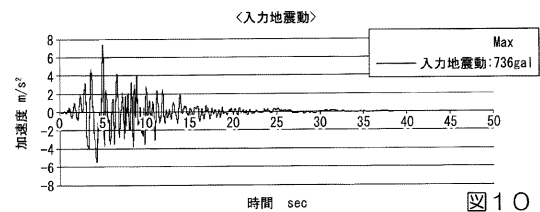
【 図 7 】



【 図 9 】



【 図 10 】



【 図 1 1 】

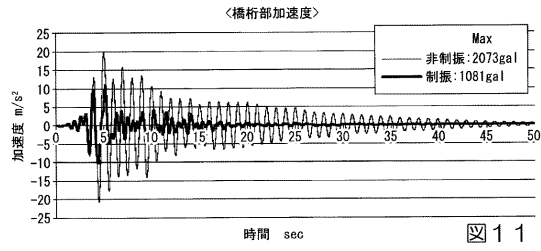


図 1 1

【 図 1 4 】

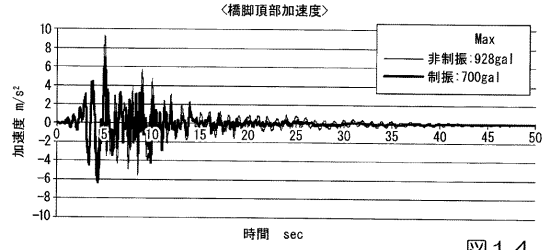


図 1 4

【 図 1 2 】

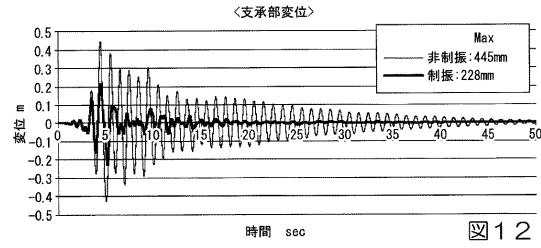


図 1 2

【 図 1 3 】

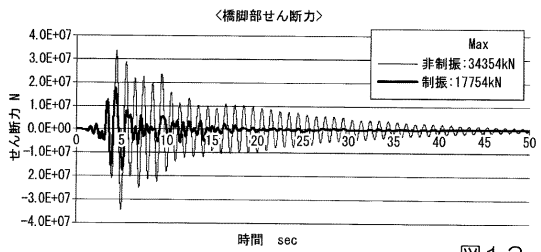


図 1 3

フロントページの続き

- (72)発明者 蔵治 賢太郎
東京都千代田区霞が関1丁目4番1号 首都高速道路株式会社内
- (72)発明者 大西 孝典
東京都千代田区霞が関1丁目4番1号 首都高速道路株式会社内
- (72)発明者 磯田 和彦
東京都中央区京橋二丁目16番1号 清水建設株式会社内
- (72)発明者 若原 敏裕
東京都中央区京橋二丁目16番1号 清水建設株式会社内

審査官 田中 洋介

- (56)参考文献 特開2004-332478(JP,A)
特開2008-101769(JP,A)
特開2008-133947(JP,A)
特開2014-020141(JP,A)
米国特許第06233884(US,B1)
磯田和彦 他, 慣性質量ダンパーを組み込んだ低層集中制震に関する基礎的研究, 日本建築学会
構造系論文集, 2013年 4月, Vol.78 No.686, pp.713-722

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

E01D 1/00 - 24/00
F16F 15/00 - 15/36
JSTPlus / JST7580(JDreamIII)