

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2003-315204  
(P2003-315204A)

(43) 公開日 平成15年11月6日 (2003.11.6)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テームコード (参考)	
G 0 1 M	7/02	E 0 1 D	1/00	C 2 D 0 5 9
E 0 1 D	1/00	G 0 1 M	7/00	A

審査請求 未請求 請求項の数 4 OL (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2002-125558(P2002-125558)

(22) 出願日 平成14年4月26日 (2002.4.26)

特許法第30条第1項適用申請有り 2001年11月 日本地震工学会発行の「第1回日本地震工学研究発表・討論会梗概集」に発表

(71) 出願人 000173784

財団法人鉄道総合技術研究所  
東京都国分寺市光町2丁目8番地38

(72) 発明者 上半 文昭

東京都国分寺市光町二丁目8番地38 財団法人 鉄道総合技術研究所内

(72) 発明者 目黒 公郎

神奈川県川崎市麻布区金程2-17-7

(74) 代理人 100089635

弁理士 清水 守 (外1名)

Fターム(参考) 2D059 BB37

(54) 【発明の名称】 振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法

(57) 【要約】

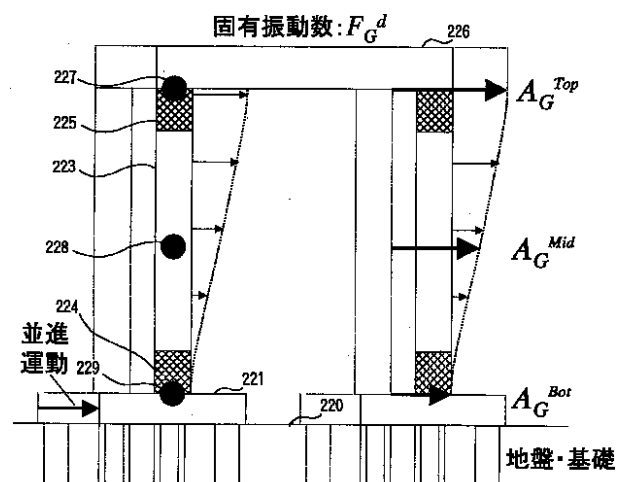
【課題】 地盤・基礎の影響を含むラーメン高架橋の損傷箇所と損傷程度の評価を的確に行うことができる微動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法を提供する。

【解決手段】 地盤及び基礎の影響を含んだ柱の上部、中間部、下部のそれぞれのモード振幅  $A_G^{Top}$ 、 $A_G^{Mid}$  及び  $A_G^{Bot}$  から、データベースによる損傷度判定で用いる  $A^{Top} / A^{Mid}$  を次の式で近似し、  
 $A^{Top} / A^{Mid} = (A_G^{Top} - A_G^{Bot}) / (A_G^{Mid} - A_G^{Bot})$

また、上部構造物のみの固有振動数  $F$ 、地盤・基礎の影響を含んだ全体系の固有振動数  $F_G$ 、損傷後の全体系の固有振動数  $F_G^d$  を用いて損傷後の上部構造物のみの固有振動数  $F^d$  と  $F$  の比を次の式、

$$F^d / F = F_G \cdot F_G^d / \{ F^2 \cdot F_G^2 - (F_G^d)^2 \cdot (F^2 - F_G^2) \}$$

で求めてラーメン高架橋の損傷度を判定する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】(a) ラーメン高架橋の各損傷度に対応する柱端の塑性ヒンジ部の特性を調べ、(b) ラーメン高架橋モデルの柱端に先に求めた種々のヒンジ特性を与えて振動特性の変化を調べ、(c) その結果を、構造物の損傷度と関連する損傷前後の 1 次固有振動数の比 ( $F^d / F$ ) と、柱上下端の損傷度の比と関連する柱上端と中間のモード振幅の比 ( $A^{Top} / A^{Mid}$ ) に基づいてデータベース化し、(d) 損傷前のラーメン高架橋の 1 次固有振動数  $F$  及び振動測定で得た損傷後の 1 次固有振動数  $F^d$  とモード振幅を用いて、前記データベースに基づいてラーメン高架橋の損傷度を判定することを特徴とする

$$A^{Top} / A^{Mid} = (A_G^{Top} - A_G^{Bot}) / (A_G^{Mid} - A_G^{Bot})$$

また、上部構造物のみ の 1 次固有振動数  $F$ 、地盤・基礎の影響を含んだ全体系の 1 次固有振動数  $F_G$ 、損傷後の全体系の 1 次固有振動数  $F_G^d$  を用いて損傷後の上部構

$$F^d / F = F_G \cdot F_G^d / \{ F^2 \cdot F_G^2 - (F_G^d)^2 \cdot (F^2 - F_G^2) \}$$

で求めて用いることを特徴とする振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法。

【請求項 4】 請求項 3 記載の振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法において、更に、前記基礎が損傷

$$F_G^d = (1/2) \cdot \{ K \cdot K_G^d / \{ (K + K_G^d) \cdot M \} \} \dots (C)$$

次いで、下記の式 (D)、式 (E) 及び上記式 (C) か

$$F = (1/2) \cdot (K / M) \dots (D)$$

$$F_G = (1/2) \cdot \{ K \cdot K_G / \{ (K + K_G) \cdot M \} \} \dots (E)$$

であり、これより地盤 - 基礎パネの剛性変化率を下記の

$$K_G^d / K_G = (F_G^d)^2 \cdot (F^2 - F_G^2) / \{ F_G^2 \cdot \{ F^2 - (F_G^d)^2 \} \} \dots (F)$$

より求めて用いることを特徴とする振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、振動、特に微動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】かかる構造物地震損傷度判定方法に関する参考文献としては、以下に開示されるものがあった。

【0003】〔1〕上半文昭、目黒公郎：非線形構造解析による RC 構造物の即時地震損傷度判定法に関する一考察、応用力学論文集、Vol. 3, pp. 621 - 628, 2000. 8

〔2〕上半文昭、目黒公郎：鋼板補強された実大高架橋の損傷度判定に関する基礎的検討、土木学会第 56 回年次学術講演会概要集 (CD-ROM), I - B097, 2001. 10

〔3〕Meguro K. and Tagel-Din H.: A New Efficient Techni

振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法。

【請求項 2】 請求項 1 記載の振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法において、地盤及び基礎の影響を考慮するために、柱の上部、中間部、下部の 3 点で振動を測定することを特徴とする振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法。

【請求項 3】 請求項 2 記載の振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法において、前記地盤及び基礎の影響を含んだ柱の上部、中間部、下部のそれぞれのモード振幅  $A_G^{Top}$ ,  $A_G^{Mid}$  及び  $A_G^{Bot}$  から、前記データベースによる損傷度判定で用いる  $A^{Top} / A^{Mid}$  を次の式 (A) で近似し、

$$\dots (A)$$

造物のみ の 1 次固有振動数  $F^d$  と  $F$  の比を次の式

$$(B)、$$

$$\dots (B)$$

する場合の損傷度を評価するために、健全時の地盤 - 基礎パネの剛性を  $K_G$ 、基礎損傷後の地盤 - 基礎パネの剛性を  $K_G^d$  とすると、基礎損傷後のラーメン高架橋全体系の 1 次固有振動数  $F_G^d$  は、

ら

que for Fracture Analysis of Structures, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, IIS, Univ. of Tokyo, No. 30, pp. 103 - 116, 1997. 3

〔4〕鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書、鉄道総研報告、特別第 4 号、1996. 4

〔5〕鈴木武夫：振動による橋脚の健全性の判定法、土木学会第 6 回年次学術講演会概要、p. 18, 1950

〔6〕西村昭彦：ラーメン高架橋の健全度評価法の研究、鉄道総研報告、Vol. 4, No. 9, 1990. 9

〔7〕中村豊：総合地震防災システムの研究、土木学会論文集、No. 531 / I - 34, pp. 1 - 33, 1996. 1

〔8〕鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説、耐震設計、丸善、1999

本願発明者らは、振動測定で構造物の地震時損傷度を精度良く検査できる方法を開発することを目的として、鉄

道RCラーメン高架橋の損傷挙動の非線形構造解析に取り組んできた(参考文献〔1〕,〔2〕)。また、新しい非線形構造解析手法である応用要素法(Applied Element Method, AEM)(参考文献〔3〕)で、構造物の損傷による固有振動数変化を崩壊レベルに至るまで解析できることを確かめ、構造物の損傷を固有振動数の低下から検出する検査法の判定基準作成に役立てられることを示した。ここでは、次の段階として、より詳細で簡易な検査法の開発に取り組んでいる。

【0004】兵庫県南部地震以降、せん断破壊先行型(参考文献〔4〕)の高架橋柱は鋼板巻き立てにより補強された。そのため既存の高架橋柱の大半が曲げ破壊先行型(参考文献〔4〕)となっており、地震時の損傷は柱端部に集中するものと予想される。この柱端部の損傷度を柱の上下端別々に且つ精度良く検査できるようになれば、最小限の応急復旧工事(部分的な補強・補修)の計画設定や、復旧工事後の施工不良箇所の検出等が可能になる。そこで、非線形構造解析で作成した判定基準と振動測定を利用したラーメン高架橋の柱上下端の損傷度判定方法を開発する。

【0005】主な対象となる新幹線ラーメン高架橋は、図1に示すように、標準化されており、上部構造の種類が少ないので、上部構造のみの損傷度判定基準は高架橋のタイプ毎に作成可能である。図1(a)は新幹線ラーメン高架橋の縦断面図、図1(b)はその横断面図である。

【0006】図1において、101は地盤、102はラーメン高架橋柱、103は桁部である。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、種々の地盤および基礎までを考慮すると、構造の種類は格段に増加する。そこで、地盤および基礎の影響をうまく取り除く方法を考え、上部構造のみの判定基準を用いて、地盤および基礎を伴った高架橋の損傷度を判定できる方法を開発する。

【0008】損傷度の検出には、鉄道分野で古くから研究されてきた(参考文献〔5〕)振動測定による構造物検査法(参考文献〔6〕,〔7〕)を利用する。特に、

$$A_{Top} / A_{Mid} = (A_{G Top} - A_{G Bot}) / (A_{G Mid} - A_{G Bot})$$

...(A)

また、上部構造のみの固有振動数 $F$ 、地盤・基礎の影響を含んだ全体系の1次固有振動数 $F_G$ 、損傷後の全体

$$F^d / F = F_G \cdot F_G^d / \{ F^2 \cdot F_G^2 - (F_G^d)^2 \cdot (F^2 - F_G^2) \}$$

...(B)

で求めて用いることを特徴とする。

【0013】〔4〕上記〔3〕記載の振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法において、更に、基礎が損傷する場合の損傷度を評価するために、健全時の地盤 -

$$F_G^d = (1/2) \{ K \cdot K_G^d / \{ (K + K_G^d) \cdot M \} \} \dots (C)$$

次いで、下記の式(D)、式(E)及び上記(C)から

検査をより簡単にするために、構造物の加振を必要としない微動(常時の微小な地盤震動)測定を利用する。鉄道ではこれまでの経験から現場技術者が構造物の固有振動数や振動モード形状についての知識を有しており、振動測定を利用した構造物検査法をよく理解しているが、微動の利用技術の開発は歴史が浅く、その有効性(特に振幅情報の利用)を疑問視する技術者が多い。そこで、振動、特に微動測定による構造物検査の模型実験を行い、本発明の有効性を確かめる。

【0009】本発明は、上記状況に鑑みて、地盤・基礎の影響を含むラーメン高架橋の損傷箇所と損傷程度の評価を的確に行うことができる振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法を提供することを目的とする。

【0010】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記目的を達成するために、

〔1〕振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法において、ラーメン高架橋の各損傷度に対応する柱端の塑性ヒンジ部の特性を調べ、ラーメン高架橋モデルの柱端に先に求めた種々のヒンジ特性を与えて振動特性の変化を調べ、その結果を、構造物の損傷度と関連する損傷前後の1次固有振動数の比( $F^d / F$ )と、柱上下端の損傷度の比と関連する柱上端と中間のモード振幅の比( $A_{Top} / A_{Mid}$ )に基づいてデータベース化し、損傷前のラーメン高架橋の1次固有振動数 $F$ 及び振動測定で得た損傷後の1次固有振動数 $F^d$ とモード振幅を用いて、前記データベースに基づいてラーメン高架橋の損傷度を判定することを特徴とする。

【0011】〔2〕上記〔1〕記載の振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法において、地盤及び基礎の影響を考慮するために、柱の上部、中間部、下部の3点で振動を測定することを特徴とする。

【0012】〔3〕上記〔2〕記載の振動測定を利用した構造物地震損傷度判定方法において、前記地盤及び基礎の影響を含んだ柱の上部、中間部、下部のそれぞれのモード振幅 $A_{G Top}$ 、 $A_{G Mid}$ 及び $A_{G Bot}$ から、前記データベースによる損傷度判定で用いる $A_{Top} / A_{Mid}$ を次の式(A)で近似し、

系の1次固有振動数 $F_G^d$ を用いて損傷後の上部構造のみの1次固有振動数 $F^d$ と $F$ の比を次の式(B)、

基礎パネの剛性を $K_G$ 、基礎損傷後の地盤・基礎パネの剛性を $K_G^d$ とすると、基礎損傷後のラーメン高架橋全体系の1次固有振動数 $F_G^d$ は、

$$F = (1/2) \cdot (K/M) \quad \dots (D)$$

$$F_G = (1/2) \cdot [K \cdot K_G / \{(K + K_G) \cdot M\}] \quad \dots (E)$$

であり、これより地盤 - 基礎パネの剛性変化率を下記の式 (F)

$$K_G^d / K_G = (F_G^d)^2 \cdot (F^2 - F_G^2) / [F_G^2 \cdot \{F^2 - (F_G^d)^2\}] \quad \dots (F)$$

より求めて用いることを特徴とする。

#### 【0014】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態を図面を参照しながら詳細に説明する。

【0015】以下では、まず、提案する損傷度検査方法の一連の流れを数値解析による検証を交えて説明する。次に、フレーム構造模型の微動測定実験を行い、微動測定による構造物の振動特性の同定精度とその手法の妥当性について説明する。

#### 【0016】(1) 損傷度判定基準の作成

##### (a) 柱端部の塑性ヒンジ特性の解析

地震直後に効率良く損傷度検査を行うために、非線形構造解析で事前に損傷度の判定基準を作成する。

【0017】まず、対象とする鉄道RCラーメン高架橋の柱端部に生じる塑性ヒンジ部の損傷度毎の剛性を求める。鉄道ではRC部材の損傷レベル(以下、損傷度)を図2(a)のように定義している(参考文献[8])。

【0018】図2は部材の損傷度の定義を示す図であり、図2(a)は部材の荷重 - 変位関係と損傷度、図2(b)は荷重 - 変位関係を求める実験の模式図である。

【0019】図2(b)において、201はラーメン高架橋柱の基礎部、202はラーメン高架橋柱、203はそのラーメン高架橋柱202の塑性ヒンジ部であり、対象とする柱断面の非線形構造解析(正負交番載荷解析またはプッシュオーバー解析)を行って、各損傷度に対応する塑性ヒンジ部203の剛性を求める。

#### 【0020】(b) パラメータスタディによる損傷度判定基準の作成

次に、柱上下端に先に調べた各損傷度に対応する塑性ヒンジ部203が生じた際の振動特性の変化に関するパラメータスタディを行い、その結果をデータベース化して損傷度の判定基準を作成する。なお、損傷度判定基準は上部構造物のみ(高架橋が剛な基礎に固定された状態)を対象として作成する。

【0021】図3は損傷した高架橋の変形を示す図、図4は地盤および基礎上の高架橋の変形を示す図である。

【0022】図3において、210は剛な基礎、211は剛な基礎210上に固定されたフーチング、212はラーメン高架橋柱、213、214は柱端部(塑性ヒンジ部)、215は桁部である。なお、216は高架橋柱の上端に配置されたセンサ、217は高架橋柱の中央部に配置されたセンサである。

【0023】また、図4において、220は地盤・基礎、221はその地盤・基礎220に配置されたフーチング、223はラーメン高架橋柱、224、225は柱

端部(塑性ヒンジ部)、226は桁部である。なお、227は高架橋柱の上端に配置されたセンサ、228は高架橋柱の中央部に配置されたセンサ、229は高架橋柱の下端に配置されたセンサである。

【0024】これらの図に示すように、ラーメン高架橋柱212、223の数値モデルの柱端部(塑性ヒンジ部)213、214、224、225に各損傷度に対応する剛性を代入して振動特性の変化を調べる。損傷度判定の指標として高架橋の健全時の1次固有振動数Fに対する損傷後の高架橋の1次固有振動数 $F^d$ の比である「固有振動数変化率( $F^d / F$ )」と、図3に示す柱上端のモード振幅 $A^{Top}$ と柱中央部のモード振幅 $A^{Mid}$ の比である「上部/中央部振幅比( $A^{Top} / A^{Mid}$ )」を用いることにする。固有振動数変化率は高架橋全体系の損傷度と関係する指標である。上部/中央部振幅比は柱上下端の損傷程度の比と関係がある指標として用いるものであり、1次振動モード形状を考慮すれば、上下端の損傷度が等しい時に「=2」、下端に比べて上端の損傷が大きい場合には「>2」、逆の場合は「<2」の値を示すことが分かる(後述の図15参照)。少ない振動測定点で1次振動モード形状を捉え、且つ柱上下端のどちらの被害が大きいのかを直感的にイメージできるよう工夫した指標である。

#### 【0025】(2) 損傷度評価のための振動測定

地盤および基礎の影響も含んだ実構造物の損傷度評価を行うための振動測定方法を説明する。振動測定は、健全時の固有振動数 $F_G$ (添字Gは地盤および基礎の影響を含んでいることを意味する)を得るための事前測定と、地震や復旧工事等の事後測定の2度行う。事前測定は高架橋の1次固有振動数のみが分かれば良いので高架橋上の1点の振動測定を行い、そのフーリエスペクトルの卓越振動数を固有振動数 $F_G$ とする。この固有振動数 $F_G$ は地盤および基礎の影響を含むので高架橋の上部構造のみの固有振動数Fより低い値を示す。なお、新幹線高架橋の上部構造のみの固有振動数Fは数値解析でほぼ正確な値を計算できることを確認している。事後測定では、図4に示すように、高架橋柱の上端、中央および下端にそれぞれセンサ227、228、229を配置して振動を測定する。

【0026】それぞれのセンサ227、228、229で記録された微動のフーリエスペクトルのピーク値をモード振幅 $A_G^{Top}$ 、 $A_G^{Mid}$ および $A_G^{Bot}$ とする。上端のセンサ227で記録された微動のフーリエスペクトルの卓越振動数を高架橋の損傷後の1次固有振動数 $F_G^d$ (添字dは損傷後の値であることを示す)とする。

## 【0027】(3) 損傷度評価指標の算出法

測定結果から地盤および基礎の影響を取り除き、高架橋の上部構造のみを対象として作成した損傷度判定基準に対応する損傷度評価指標を算出する。

## 【0028】地盤 - 基礎バネの回転成分の影響を無視す

$$A_{Top} / A_{Mid} = (A_{G Top} - A_{G Bot}) / (A_{G Mid} - A_{G Bot})$$

... (1)

地盤および基礎を伴う高架橋を、水平地盤バネ  $K_G$  を伴った剛性が  $K$  (損傷後は  $K^d$  とする) で質量が  $M$  の1自由度系(図5)にモデル化すれば、上部構造のみの固有振動数  $F$ 、地盤 - 基礎の影響を含んだ全体系の固有振動

$$F = (1/2) (K/M) \quad \dots (2)$$

$$F_G = (1/2) [K \cdot K_G / \{(K + K_G) \cdot M\}] \quad \dots (3)$$

$$F_G^d = (1/2) [K^d \cdot K_G / \{(K^d + K_G) \cdot M\}] \quad \dots (4)$$

損傷後の高架橋の振動系から地盤 - 基礎バネの影響を取り除けるとすれば、その固有振動数  $F^d$  は次式で求めら

$$F^d = (1/2) (K^d / M) \quad \dots (5)$$

式(2)~(5)を整理すれば、損傷度判定基準に照合する指標である固有振動数変化率  $F^d / F$  が式(5)のように求められる。 $F$  は計算で、 $F_G$  と  $F_G^d$  は振動測

$$F^d / F = F_G \cdot F_G^d / [F^2 \cdot F_G^2 - (F_G^d)^2 \cdot (F^2 - F_G^2)] \quad \dots (6)$$

次に、基礎が損傷する場合の損傷評価について説明する。(4) 基礎が損傷する場合の損傷評価上記においては基礎の損傷は考慮しなかった。上部構造がスレンダーな鉄道RCラーメン高架橋では振動による基礎の被害はほとんど発生しないが、軟弱地盤上の高架橋では地震時の液状化や側方流動等が原因となって基礎に損傷が集中

$$F_G^d = (1/2) [K \cdot K_G^d / \{(K + K_G^d) \cdot M\}] \quad \dots (7)$$

式(2)、(3)および(7)から地盤 - 基礎バネの剛性変化率  $K_G^d / K_G$  が次のように求められる。

$$K_G^d / K_G = (F_G^d)^2 \cdot (F^2 - F_G^2) / [F_G^2 \cdot \{F^2 - (F_G^d)^2\}] \quad \dots (8)$$

この剛性変化率  $K_G^d / K_G$  と基礎の損傷度を関連付ければ基礎の損傷度を判定できる。

## (5) 数値解析による検証

## (a) 概要

線路に直交する断面が図6のような形状を持つ、地盤(N値20程度を想定)および杭基礎を伴った鉄道RCラーメン高架橋の数値モデルの解析例を用いて、本発明による損傷度判定の流れを説明する。

【0034】図6において、240は地盤・基礎、241は上部構造としてのラーメン高架橋柱、242、243は塑性ヒンジ部、244は桁部である。

【0035】数値モデルの材料のヤング率は、コンクリートが28.0GPa、鉄筋が200GPaである。梁部は剛体でその質量は160tである。地盤および基礎の詳細は省略するが、解析によれば上部構造のみの卓越振動数  $F$  が4.0Hzであったのに対して、 $F_G$  が3.3Hzに低下した。

れば、地盤及び基礎の影響を含んだ柱上部、中央部、下部のそれぞれのモード振幅  $A_{G Top}$ 、 $A_{G Mid}$  及び  $A_{G Bot}$  から、損傷度判定基準に照合する指標である上部/中央部振幅比  $A_{Top} / A_{Mid}$  が次のように近似される。

## 【0029】

数  $F_G$ 、損傷後の全体系の固有振動数  $F_G^d$  は次のように求められる。

## 【0030】

れる。

## 【0031】

定結果から得られる。

## 【0032】

する場合がある。上部構造が健全で基礎に被害が集中する場合には、全体系の固有振動数の低下から地盤 - 基礎バネの剛性低下を検出できる。健全時の地盤 - 基礎バネの剛性を  $K_G$ 、基礎損傷後の地盤 - 基礎バネの剛性を  $K_G^d$  とすれば、基礎損傷後の高架橋全体系の1次固有振動数は、

## 【0033】

## 【0036】(b) 柱端部の塑性ヒンジ特性の解析

図7に柱の数値モデルと正負交番載荷シミュレーション結果および数値モデルの1次固有振動数変化率を示す。図7(a)はその柱の正面図、図7(b)はその柱の断面図、図7(c)はその固有振動数変化率、図7(d)はその荷重 - 変位関係を示す図である。

【0037】数値モデルの材料諸元および載荷軸力は高架橋モデルと等しい。図7の正負交番載荷結果の包絡線形状と固有振動数変化率を参考にして損傷度1~4(D1~D4)に対応する柱端部の塑性ヒンジ特性を決定する。

【0038】ここでは、柱の数値モデルの固有振動数変化率がおよそ0.95(D1)、0.8(D2)、0.6(D3)そして0.4(D4)となるヒンジ特性をD1~D4に対応させた。

【0039】(c)パラメータスタディによる損傷度判定基準の作成

高架橋上部構造を図 8 に示す柱上部の回転を拘束した 1 本の RC 柱にモデル化する。固定された下端固定部 251 上の高架橋柱 252 の柱上下端 253, 254 に損傷度 1 ~ 損傷度 4 に対応するヒンジ剛性を代入して解析

し、損傷度判定に用いる指標の変化をまとめたのが表 1 である。

【0040】

【表 1】

		柱上端部の損傷度				
		D1	D2	D3	D4	
柱 下 端 部 の 損 傷 度	D1	$F^d/F$	0.91	0.75	0.59	0.37
		$A^{Top}/A^{Mid}$	2.0	2.4	3.5	8.8
	D2	$F^d/F$	0.75	0.62	0.51	0.35
		$A^{Top}/A^{Mid}$	1.8	2.0	2.7	5.8
	D3	$F^d/F$	0.58	0.51	0.44	0.32
		$A^{Top}/A^{Mid}$	1.4	1.6	2.0	3.7
	D4	$F^d/F$	0.36	0.34	0.32	0.26
		$A^{Top}/A^{Mid}$	1.1	1.2	1.3	2.0

【0041】(d) 数値モデルの損傷度評価指標の算出と損傷度判定

一例として、図 6 の数値モデルの柱上端に D3 相当、下端に D1 相当の塑性ヒンジを与え、本発明の手法で損傷レベルを正しく判定できるかどうかを調べる。

【0042】解析結果によれば、塑性ヒンジを与えた際の固有振動数  $F_G^d$  は 2.2 Hz で、モード振幅は柱上端の  $A_G^{Top}$  を 1 とすれば  $A_G^{Mid}$  が 0.37、 $A_G^{Bot}$  が 0.12 であった。

【0043】式(1)によれば上部/中央部振幅比  $A^{Top}/A^{Mid}$  は 3.5 となる。また、式(6)によれば固有振動数変化率  $F^d/F$  は 0.60 となる。表 1 を図化した図 9(a) と図 9(b) に 2 つの指標(上部/中央部振幅比と固有振動数変化率)を照合し、柱上下端の損傷度を推定する。

【0044】まず、上部/中央部振幅比  $A^{Top}/A^{Mid}$  のグラフから柱の損傷度が上端 D3 - 下端 D1 か、上端 D4 - 下端 D3 の組合せに絞られる。固有振動数変化率  $F^d/F$  のグラフの条件も満たすのは上端 D3 - 下端 D1 の組合せのみとなり、数値モデルの柱上下端の損傷度を正しく判定できた。

【0045】次に、フレーム構造モデルの微動測定実験について説明する。

【0046】(1) 概要

ここでは、鉄道ラーメン高架橋の損傷度評価に微動測定を利用するための基礎的な検討として、小型のフレーム構造モデルの微動測定実験を実施する。

【0047】まず、微動測定による振動モード形状の同定精度を調べた後、提案する損傷度評価手法に対応する各種の実験を行って本発明の手法の妥当性を調べる。

【0048】(2) 実験装置および計測方法

まず、一連の実験で使用するフレーム構造モデルと微動の計測方法について説明する。図 10 にフレーム構造モデルと微動センサ配置を示す。図 10 において、図 10

(a) はその模型の正面模式図、図 10 (b) はその模型の上面模式図、図 10 (c) はその模型の側面模式図

である。

【0049】この図において、300 はフレーム構造模型、301 は基礎部、302 はその基礎部に配置される下部固定用ウェイト、303 はその基礎部 301 に配置される基礎部微動測定センサ、304 は計測用棚、305 はその計測用棚 304 に配置される柱中間部微動測定センサ、306 は桁部、307 はその桁部 306 に配置される桁部微動測定センサ、308 はその桁部 306 に配置される上部ウェイトである。

【0050】このように、フレーム構造模型 300 は鋼製であり、上部ウェイト 308、桁部 306 およびセンサ 307 の合計質量約 25 kg を L 型鋼の柱 4 本で支えた構造である。模型は実験場の床上に設置し、基礎部 301 に約 30 kg の下部固定用ウェイト 302 を配置して基礎部 301 が動かないよう固定する。柱端部と桁部 306 および基礎部 301 は、ボルトと固定金具で結合されており、ボルトの締め方や金具の種類を変更することにより、結合部の剛性を変化させることができる。微動測定センサ 303, 305, 307 は、実際に構造物検査に用いるものと同等の微動計(速度計、固有周期 2.0 sec、水平 1 成分)を用いた。この微動計を基礎部、柱中間部、桁部の 3 箇所に設置し、水平 1 方向の振動を同時測定する。柱中間部微動測定センサ 305 は、図 10 に示す計測用棚 304 上に設置した。計測用棚 304 は、柱の中間部にヒンジ結合されている。計測用棚 304 と柱中間部微動測定センサ 305 の合計質量は約 2.0 kg である。実験に先立って微動センサの特性試験と計測用棚 304 の設置によるフレーム構造模型の 1 次モード振動特性変化の確認試験を実施し、3 つの微動センサが等しい特性を持っていることおよび柱中央部に計測用棚 304 を設置してもフレーム構造模型の 1 次モード振動特性に変化が無いことを確認した。

【0051】(3) 微動測定による振動モードの同定微動の振幅情報の精度検証を目的として、微動測定結果からフレーム構造模型の振動モードの推定を試みる。

【0052】図 11 は柱の上下端の結合の態様を示す図

であり、振動モードの推定対象として、柱の上下端ともほぼ剛結状態〔図11(a)〕とした「上下端剛結モデル」と、柱下端は剛結のまま柱上端を図11(b)のヒンジ状態とした「上端ヒンジ-下端剛結モデル」を作製した。フレーム構造モデルの1次振動モード形状を調べるために、計測用棚304の設置高さを200mm~1,000mmまで100mm刻みで変化させて微動計測を行った。各センサで82sec間(時間刻み0.01sec)微動を同時記録した。記録波形の中でノイズの影響が少ない20.48secの部分を選び出してフ

$$A_h = (A_{Mid} - A_{Bot}) / (A_{Top} - A_{Bot}) \quad \dots (9)$$

計測および波形処理の一例として、「上下端剛結モデル」で計測用棚304を柱中央部(高さ600mm)に設置した際の微動波形、フーリエスペクトルを図12に示す。図12(a)は図10(a)に示したモデルの正面模式図、図12(b)はそのセンサによる微動波形、図12(c)はそのフーリエスペクトルを示す図である。

【0054】ここで、柱中央部の正規化振幅は、 $(2.1 - 0.1) / (4.1 - 0.1) = 0.5$ となる。同様の手法で柱各部の正規化振幅を求め、フレーム構造モデルの振動モード形状を推定した。その結果を理論解と比較して図13に示す。

【0055】この図13から、微動測定でフレーム構造モデルの1次振動モード形状を十分な精度で把握可能であることが分かる。

【0056】(4)柱上下端の損傷による振動特性の変化(上部構造)

前記した損傷度判定の考え方に関する実験を行う。ここではフレーム構造モデルの固有振動数とモード形状(柱上端部/柱中央部のモード振幅比)が、柱上下端の剛性変

ーリエ変換し、バンド幅0.4HzのParzenウィンドウで平滑化して各微動記録のフーリエスペクトルを求めた。桁部306、計測用棚304および基礎部301のフーリエスペクトルのピーク値をそれぞれ $A_{Top}$ 、 $A_{Mid}$ および $A_{Bot}$ (微動によるわずかな並進成分)とし、モデルの並進運動を除いて桁部306の振幅が1となるよう正規化した場合の計測用棚304設置高さの振幅 $A_h$ を式(9)で求める。

【0053】

化によって解析結果どおりに変化し、且つその変化を微動測定で正しく把握できることを確かめる。

【0057】フレーム構造モデルの柱上下端の結合部を図14に示す剛性の異なる3種の結合状態(a)~(c)に変化させ、その際の1次固有振動数 $F^d$ と上部/中央部振幅比 $A_{Top} / A_{Mid}$ を調べる。図14(d)は実験モデル、図14(e)は数値モデルを示している。

【0058】まず、実験との比較を目的として実施した柱上下端結合部の剛性変化による固有振動数とモード振幅比の変化に関する応用要素法シミュレーションの結果を示す。各部の剛性と質量を実際のフレーム構造モデルと等しくした数値モデル〔図14(e)〕を作製し、柱端部の剛性を3通りに変化させて指標の変化を調べた。なお、結合状態(a)~(c)の結合部の剛性値は解析的に求めることが難しかったので実験的に求めた値を使用した。解析結果を表2に示す。

【0059】

【表2】

		柱上端の結合部			
		(a)無損傷	(b)損傷小	(c)損傷大	
柱 下 端 の 結 合 部	(a) 無損傷	$F^d$	4.2	3.7	3.0
		$A^{Top}/A^{Mid}$	2.0	2.2	2.6
	(b) 損傷小	$F^d$	3.7	3.3	2.7
		$A^{Top}/A^{Mid}$	1.8	2.0	2.3
	(c) 損傷大	$F^d$	3.0	2.7	2.2
		$A^{Top}/A^{Mid}$	1.6	1.8	2.0

【0060】また、図15に数値モデルの1次振動モード形状の変化を示す。柱上端部/柱中央部のモード振幅比が、柱上下端の損傷度が等しい時には「=2.0」で、柱上端部の損傷が大きいたときには「>2.0」、基礎部の損傷の方が大きいときには「<2.0」となる指

標であることが分かる。

【0061】次に、実験から得られた指標の変化を表3に示す。

【0062】

【表3】

		柱上端の結合部			
		(a)無損傷	(b)損傷小	(c)損傷大	
柱下端の結合部	(a)無損傷	$F^d$	4.2	3.7	3.0
		$A^{Top}/A^{Mid}$	2.0	2.2	2.5
	(b)損傷小	$F^d$	3.7	3.3	2.7
		$A^{Top}/A^{Mid}$	1.8	2.1	2.3
	(c)損傷大	$F^d$	3.1	2.7	1.9
		$A^{Top}/A^{Mid}$	1.6	1.8	2.0

【0063】計測用棚304は柱中央(高さ600m)に設置されており、微動の計測・処理方法は上記(3)と同様で、柱上端部/柱中央部のモード振幅比は式(9)の逆数となる。解析と実験の結果はよく一致しており、柱上下端のヒンジ特性の変化によるフレーム構造の振動特性の変化を微動測定で把握可能であることが分かる。

【0064】(5)地盤および基礎パネの影響の除去前記した地盤および基礎パネの影響の除去方法に関する実験を行う。

【0065】図16に示す地盤-基礎パネ用のゴム支承

311を付加したフレーム構造模型の測定結果から本発明の手法でゴム支承の影響を除去し、表3と同様の結果を導けるかどうか確かめる。結合部の設定、微動センサの設置場所および波形の計測処理方法はこれまでと同様である。表4に地盤-基礎パネを伴ったフレーム構造模型の1次固有振動数 $F_G^d$ 、式(6)で変換した $F^d$ および式(1)で計算した柱上部/柱中央部のモード振幅比 $A^{Top}/A^{Mid}$ を示す〔上部構造のみの固有振動数 $F$ は上記(4)の実験結果(4.2Hz)を用いた〕。

【0066】

【表4】

		柱上端の結合部			
		(a)無損傷	(b)損傷小	(c)損傷大	
柱下端の結合部	(a)無損傷	$F_G^d$	3.4	3.1	2.8
		$F^d$	4.2	3.7	3.2
		$A^{Top}/A^{Mid}$	2.0	2.1	2.4
	(b)損傷小	$F_G^d$	3.1	2.9	2.5
		$F^d$	3.6	3.4	2.8
		$A^{Top}/A^{Mid}$	1.8	1.9	2.2
	(c)損傷大	$F_G^d$	2.7	2.5	1.8
		$F^d$	3.0	2.7	1.9
		$A^{Top}/A^{Mid}$	1.7	1.8	2.0

【0067】表4と表2の $F$ の値は良く一致しており、提案する固有振動数の変換手法が有効であることが分かる。柱上部/柱中央部のモード振幅比も実用上問題無い程度の精度を持っているものと考えられる。

【0068】(6)基礎の損傷評価前記した地盤-基礎パネの剛性変化率算出法に関する実験を行う。

【0069】図17に示す地盤-基礎パネの剛性が異なる5種類のフレーム構造模型を用いて、これまでと同様の計測を実施した。

【0070】この図17に示すように、モデルの地盤-基礎パネ311は、同一のゴム層を図17(a)が0

層、図17(b)が1層、図17(c)が2層、図17(d)が3層、そして図17(e)が4層を直列に重ねたものであり、図17(a)が剛な基礎上の健全な高架橋(1次固有振動数 $F$ )、図17(b)が地盤-基礎パネを伴う健全な高架橋(1次固有振動数 $F_G$ )であると見なす。図17(c)~(e)が上部構造は健全だが地盤-基礎パネの剛性が低下した高架橋(固有振動数 $F_G^d$ )であると見なして、式(8)で地盤-基礎パネの剛性変化率を算出した。表5に各モデルの微動測定による1次固有振動数と式(8)による剛性変化率を示す。

【0071】

【表5】

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
固有振動数 (Hz)	4.1	3.9	3.7	3.4	3.3
剛性変化率	—	1.0	0.52	0.33	0.25

【0072】図17(c)~(e)の地盤-基礎パネ剛性がおよそ $1/2 \sim 1/4$ に低下していることを正しく検出しており、剛性変化率の算定法も有効であると考えられる。

【0073】なお、上記実施例では、印加する振動には、微動を用いたが、微動、衝撃振動、車両走行振動、起振器による振動、地震動などを用いるようにしてもよい。



【0074】また、本発明は、測定点を増やすだけで、同様の手法およびモデルを用いて2層以上の多層構造物にも適用できる。

【0075】なお、本発明は上記実施例に限定されるものではなく、本発明の趣旨に基づいて種々の変形が可能であり、これらを本発明の範囲から排除するものではない。

【0076】

【発明の効果】以上、詳細に述べたように、本発明によれば、次のような効果を奏することができる。

(A) 高架橋の損傷度を柱上下端別々に、かつ詳細に判定することができる。

【0077】したがって、柱上下端別々に最適な復旧対策を実施でき、復旧に要する時間や経費の最適化が可能である。

(B) 地盤および基礎の影響を簡単に考慮することができる。

(C) 基礎の損傷(地盤・基礎パネの剛性低下)を検出することができる。

(D) 鋼板で補強されて内部コンクリートが目視できない構造物も検査することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】主な対象となる新幹線ラーメン高架橋の模式図である。

【図2】鉄道における部材の損傷度の定義を示す図である。

【図3】損傷した高架橋の変形を示す図である。

【図4】地盤および基礎上の高架橋の変形を示す図である。

【図5】地盤および基礎を伴う高架橋の単純化したモデルを示す図である。

【図6】地盤および基礎を伴うラーメン高架橋の線路に直交する断面の数値モデルである。

【図7】柱の数値モデルと正負交番載荷シミュレーション結果および数値モデルの1次固有振動数変化率を示す図である。

【図8】高架橋上部構造を柱上部の回転を拘束した1本のRC柱にモデル化した図である。

【図9】2つの指標を照合し、推定される柱上下端の損傷度の特性図である。

【図10】フレーム構造モデルと微動センサ配置を示す模式図である。

【図11】柱の上下端の結合の態様を示す図である。

【図12】上下端剛結モデルで計測用柵を柱中央部(高

さ600mm)に設置した際の微動波形、フーリエスペクトルを示す図である。

【図13】柱各部の正規化振幅を求め、フレーム構造モデルの振動モード形状を推定した結果を理論解と比較して示す図である。

【図14】フレーム構造モデル、柱上下端の3種の結合状態、フレーム構造モデルの数値モデルを示す図である。

【図15】数値モデルの1次振動モード形状の変化を示す図である。

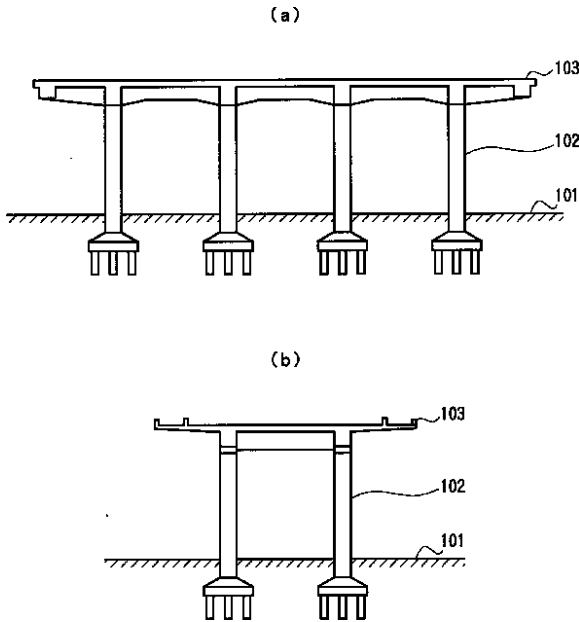
【図16】地盤・基礎パネ用のゴム支承を付加したフレーム構造モデルを示す図である。

【図17】地盤・基礎パネの剛性が異なる5種類のフレーム構造モデルを示す図である。

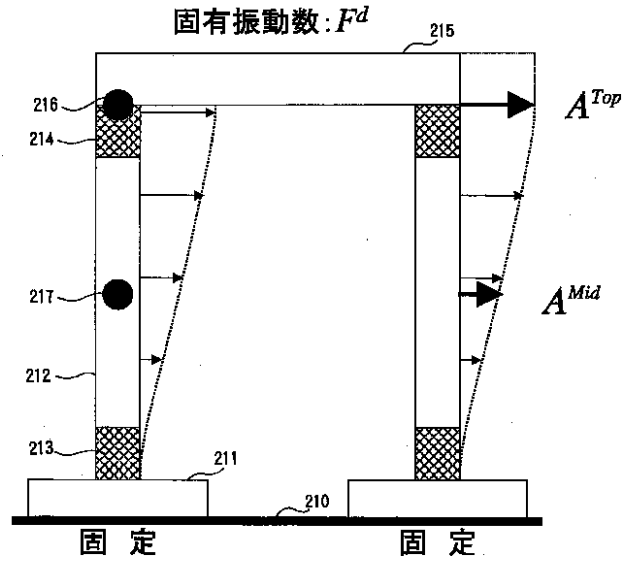
【符号の説明】

101	地盤
102, 202, 212, 223	ラーメン高架橋柱
103, 215, 226, 244, 306	桁部
201	ラーメン高架橋柱の基礎部
203, 242, 243	塑性ヒンジ部
210	剛な基礎
211, 221	フーチング
211	基礎上に固定された基礎部
213, 214, 224, 225	柱端部(塑性ヒンジ部)
216, 227	高架橋柱の上端に配置されたセンサ
217, 228	高架橋柱の中央部に配置されたセンサ
220, 240	地盤・基礎
229	高架橋柱の下端に配置されたセンサ
241	上部構造としてのラーメン高架橋
251	下端固定部
252	高架橋
253	柱上端
254	柱下端
300	フレーム構造モデル
301	基礎部
302	下部固定用ウェイト
303	基礎部微動測定センサ
304	計測用柵
305	柱中間部微動測定センサ
307	桁部微動測定センサ
308	上部ウェイト
311	地盤・基礎パネ用のゴム支承

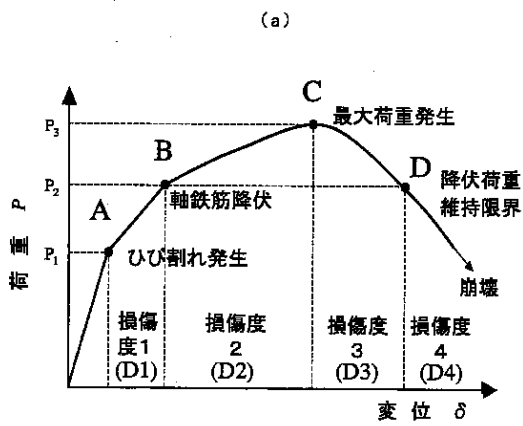
【図1】



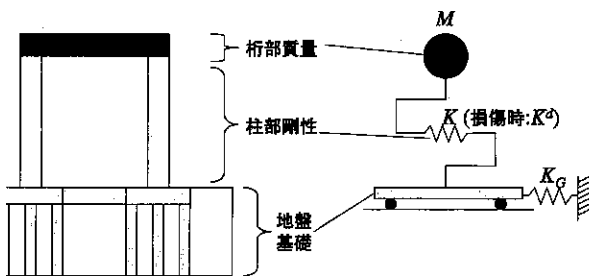
【図3】



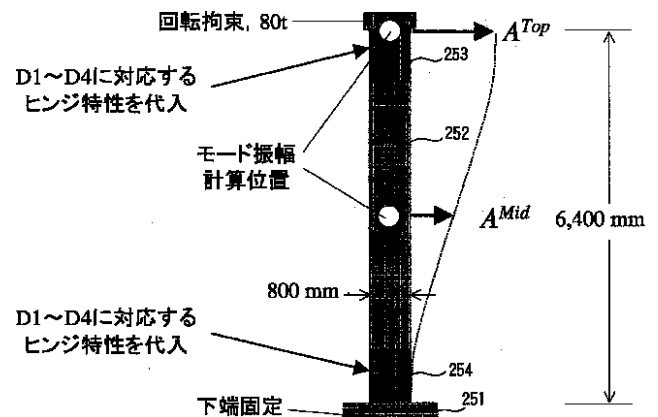
【図2】



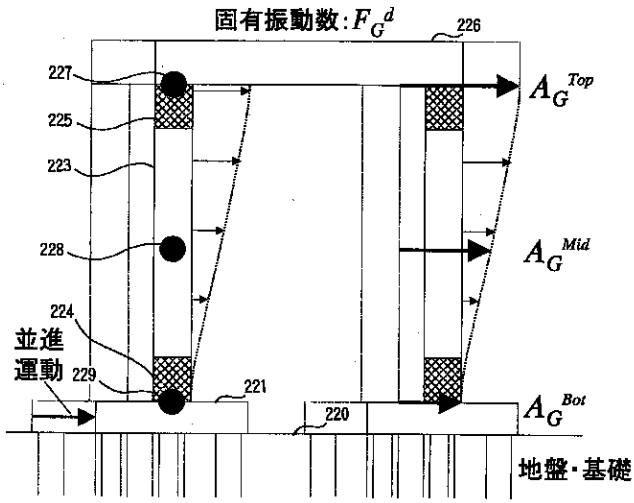
【図5】



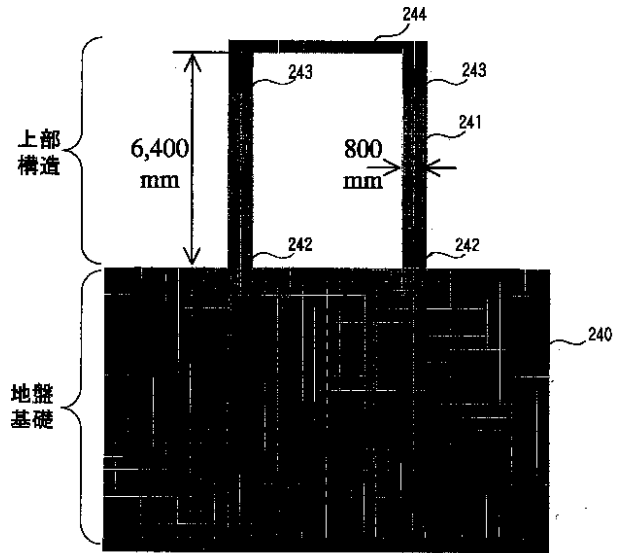
【図8】



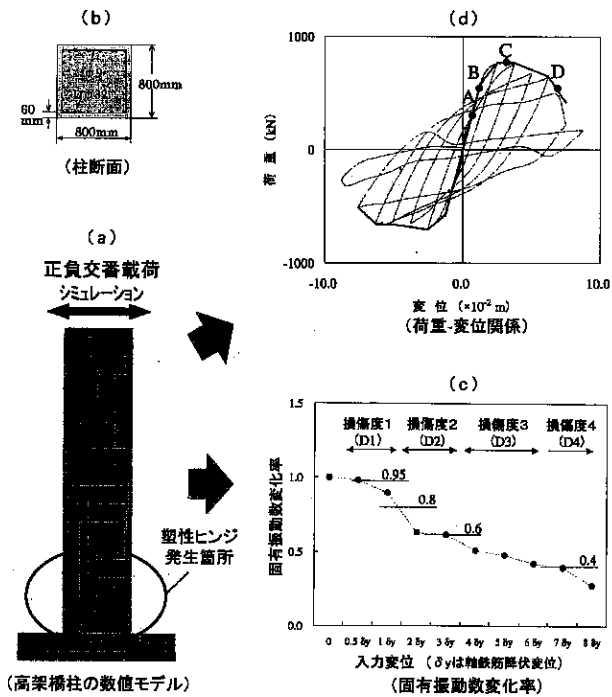
【図4】



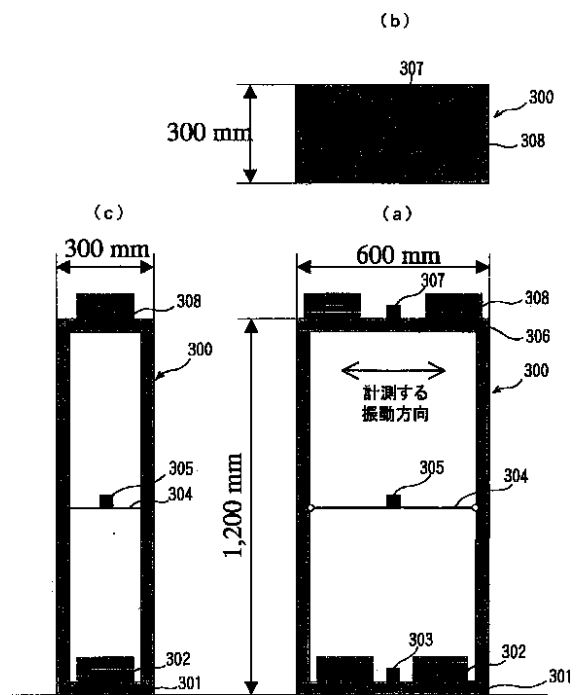
【図6】



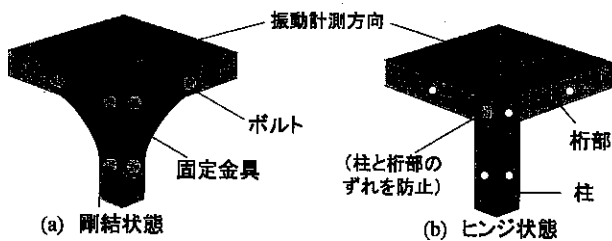
【図7】



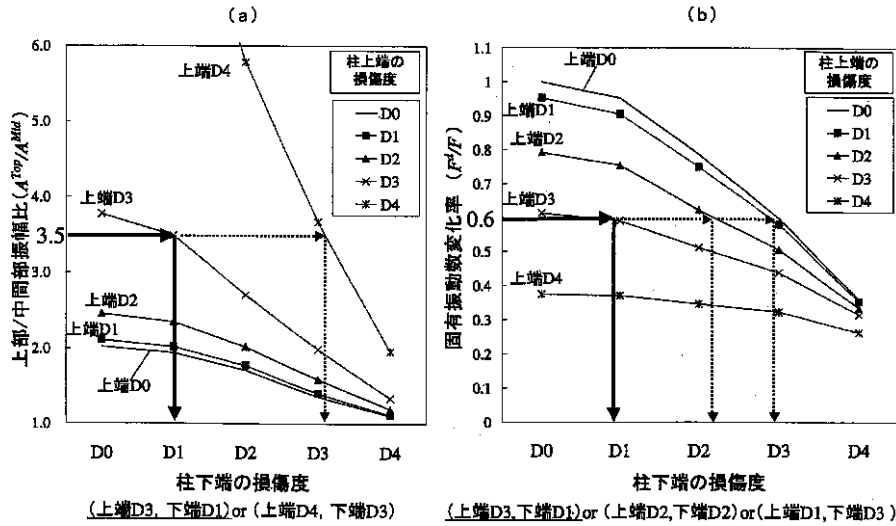
【図10】



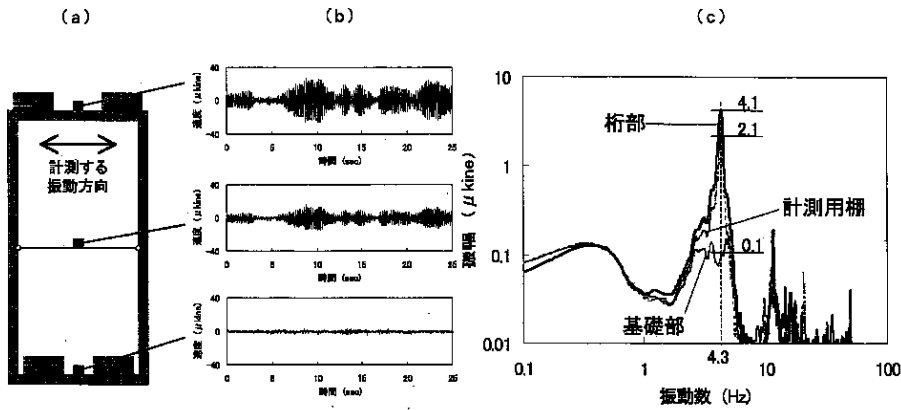
【図11】



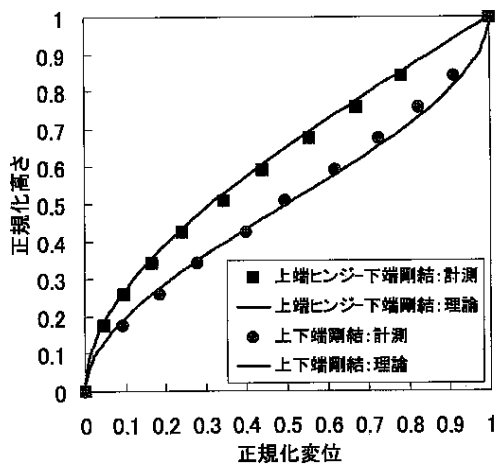
【図9】



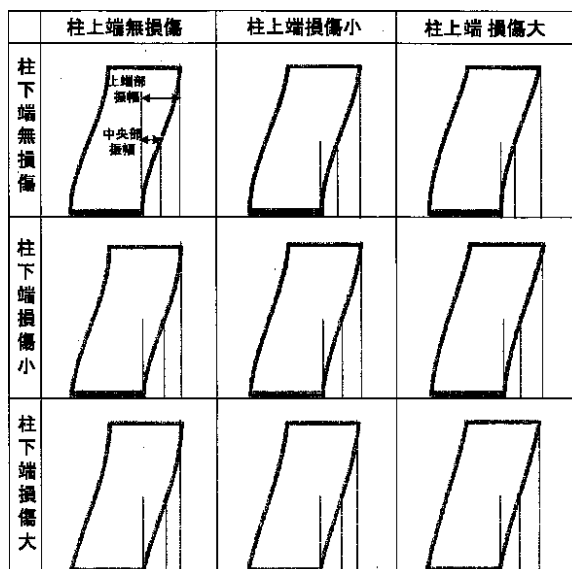
【図12】



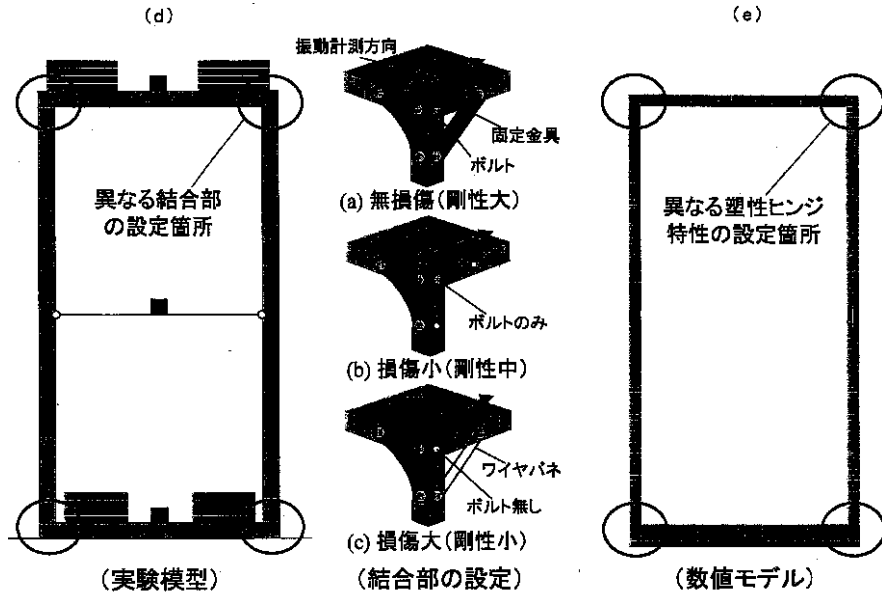
【図13】



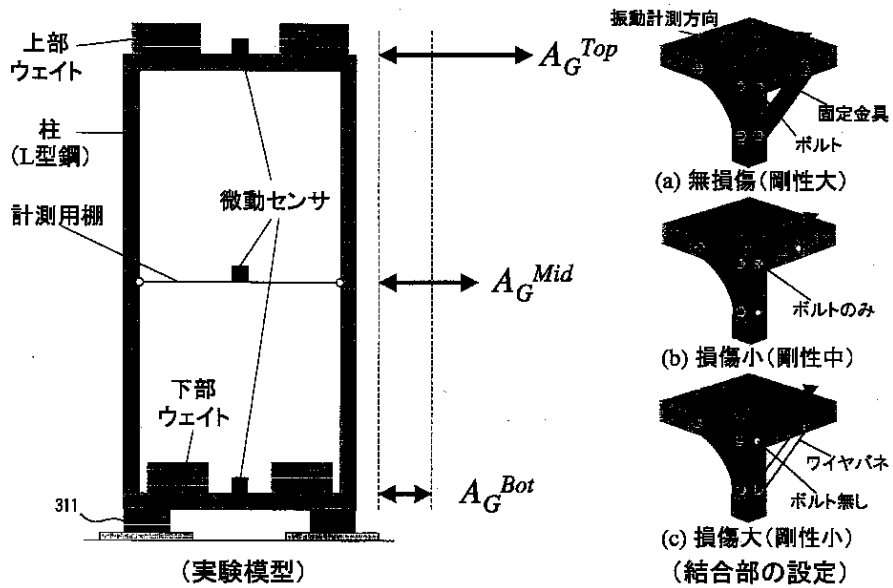
【図15】



【図14】



【図16】



【図17】

