

構造物の動的座屈評価に関する研究

九州大学大学院工学研究院
九州大学大学院
(株) 構造計画研究所

フェロー
学生会員
正会員

大塚久哲
藤井義法
為広尚起

1. 目的

アーチ橋などの長大橋梁が地震の作用を受けて動的な挙動をする場合、部材の細長比が大きく、かつスレンダーな構造形式であるため、動的挙動中の座屈が懸念される。ここでは地震時の座屈現象を動的座屈と呼ぶことにするが、こうした場合の構造物の座屈安全性を評価する方法として、著者らは時刻歴応答解析中のタイムステップごとに固有値解析を挿入する解析手法¹⁾（以下、動的座屈固有値解析という）を提案した。本文は斜材を有する多層ラーメン構造物の振動台加振実験を行い、動的座屈現象を観察した後、提案解析手法との比較を行い、本手法の妥当性について考察したものである。

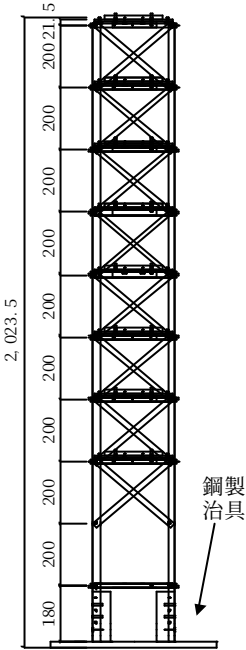
2. 実験概要 2.1 実験供試体

図－1 に本実験に用いた供試体を示す。供試体の寸法は高さが約 2000mm、幅が約 200mm である。表－1 に示す材料を用い、部材の接合部をすべて呼び径 5 mm のボルト接合とした。斜材、水平材はそれぞれボルト間を 1 部材で繋ぎ、鉛直材は通し材である。供試体を振動台に固定するため基部に鋼製の治具を設置し、供試体と治具、治具と振動台をそれぞれボルトで固定した。また、供試体のねじれ防止のためと基部応答軸力を増加させるために鋼製の水平プレート層ごとに設置し、その上に錘を置いた。供試体は鉛直材の座屈が生じるように試行錯誤的に何体か製作し最終的に 1 層目の階高を他の 2 倍とし、1 層目の斜材は上半分に配置した。供試体の全重量は846Nである。

2.2 計測項目および計測位置

加速度計は加震方向に頂部から 1 パネル置きに基部まで計 6 個設置した。また加震直角方向は、供試体頂部にのみ 1 個設置した。ひずみゲージの貼付位置を図－2 に示す。基部 2 パネルの斜材の表裏に 1 枚ずつ計 32 枚と 4 本の鉛直材に貼った。ひずみの計測には動ひずみ計を用い、時間間隔 0.002 秒で計測した。

2.3 入力波 図－3 に振動台に入力した波形を示す。波形入力方向は水平 1 方向である。15 秒で約 0.5G に達する 3 Hz の増幅波を使用している。



図－1. 実験供試体

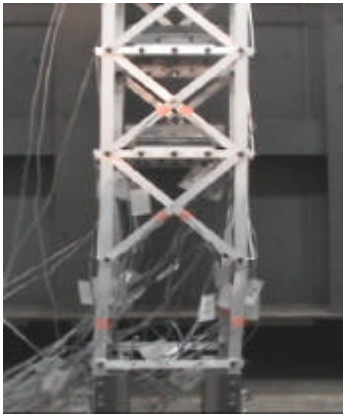
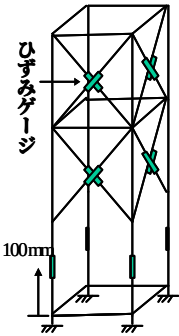


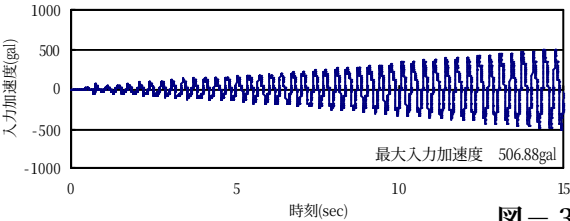
写真-1
鉛直材のは
らみだし
(加振開始
後14.00秒)

	材料	断面形状	部材寸法 (mm)
鉛直材	アルミ	等辺山形	1×19×1967.5
水平材	アルミ	胴形	5×15×215
斜材	アルミ	胴形	2×15×297.8
水平プレート	鋼	8角形	6×120×217
錘	鋼	胴形	44×155×155
ボルト	鋼	-	M5
ボルト (治具固定用)	鋼	-	M20

表－1. 使用材料



図－2. ひずみ
ゲージ位置



図－3 入力波形



写真-2 供試
体の崩壊

キーワード：

連絡先：〒 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学大学院建設デザイン部門 TEL&FAX：092-642-3266

2. 4 実験における供試体の挙動

供試体は入力加速度の増大と共に水平変位が増大して、全体としては横揺れを呈するが、鉛直材（柱部材）は図-4に示すように軸方向ひずみが正負交番して現出し、左側柱と右側柱で逆位相となっており、基本的に軸力部材である。入力加速度の増加と共に1層目の柱は写真-1に示すように、14秒前から斜材取り付け位置を腹として水平方向にはらみだし、この後、左側柱の斜材取り付け位置上方約5cmの位置で局部座屈が生じて、最終的に写真-2に示すように崩壊した。

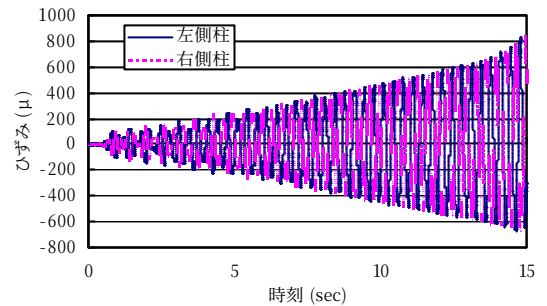


図-4 鉛直材の応答軸ひずみの時刻歴

3. 動的座屈解析

3. 1 解析モデルと解析手法

供試体の各部材について、水平材・斜材はボルト接合間を1部材としてトラスでモデル化し、鉛直部材は梁柱として層間を6部材に分割してモデル化した。ボルト接合を最初はヒンジとしたが、実験と解析値の加速度応答倍率が大幅の異なることから、便宜的に斜材と水平材のヤング率を、解析から得られる応答加速度の分布が実験値に近づくまで低減させた。結果的には、両部材のヤング率を16%まで低減し、応答倍率の差を5%以下に押さえた。このモデルを用いて、幾何学的非線形と材料非線形を考慮した複合非線形時刻歴応答解析を行いながら、各時間刻みごとに式(1)に示す座屈固有値解析を行った。このとき、鉛直材の軸力と曲げモーメントの相関曲線（両者間を直線近似）を考慮して解析を行った。部材の材料非線形モデルはバイリニアとした。降伏モーメントは引張試験から得られた降伏ひずみを基に算出し、2次剛性倍率を0.001とした。なお、時刻歴応答解析における数値積分法はNewmarkの β 法（ $\beta = 1/4$ ）を用い、積分時間間隔を0.001秒とした。減衰マトリクスはレーリー型とし、部材の減衰定数は0.02とした。

$$(K_t + l \Delta K_G)u = 0 \quad \dots(1)$$

K_t : 前ステップ平衡状態の接線剛性マトリクス

ΔK_G : 現ステップの増分応力による

幾何剛性マトリクスの増分係数

u : 固有モードベクトル

l : 座屈固有値

$\lambda = 0.0$ が前ステップの状態、 $\lambda = 1.0$ が現ステップの状態を表し、 λ が1.0より大きければ大きいほど安全であることを表す。座屈固有値の時刻歴を入力加速度と照らし合わせて見ることで、安全性の余裕度を定量的に把握することができる。

3. 2 解析結果

図-5に、MN相関を考慮した動的座屈固有値の時刻歴、および図-6に一つの鉛直材の曲げモーメントの時刻歴を示す。点線は相関を考慮しない場合の降伏モーメントを示す。曲げモーメントによる非線形化が時刻8秒付近から発生し、10秒付近まで危険性が増加するものの、12.5秒付近まで安定域に向かいその後、13.3秒で不安定になっている。解析により得られる座屈モードを図-7に示す。これは写真-1で示した実験における柱部材のはらみだしと対応している。また、図-4の柱部材の軸方向ひずみから、実験で軸ひずみが急激に増大し始める時刻と解析による座屈判定の時刻がほぼ一致していることも確認される。これらより、本手法によって非線形に入る構造系における動的座屈の発生時刻を推定できると言えよう。

参考文献

- 1) 為廣尚起・大塚久哲: 動的複合非線形解析による長大アーチ橋の座屈照査方法に関する考察, 第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム論文集, pp.99-104, 2002年1月

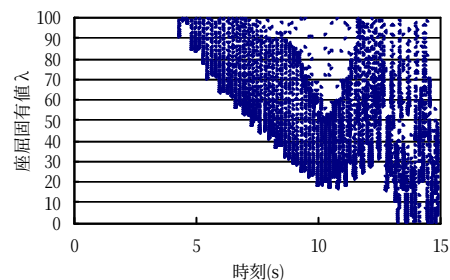


図-5 動的座屈固有値の時刻歴

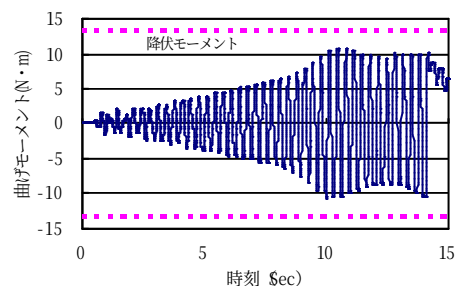


図-6 鉛直材の曲げMの時刻歴

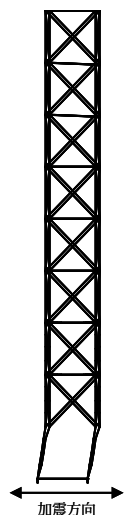


図-7 座屈モード