

骨組構造物の動的座屈評価に関する実験的研究

九州大学大学院工学府

学生員 藤井 義法

九州大学大学院工学研究院

フェロー 大塚 久哲

(株)構造計画研究所

正会員 為廣 尚紀

九州大学大学院工学研究院

正会員 矢葺 亘

1. はじめに

大規模橋梁の地震時座屈に対する危険性を評価する方法として、一般に座屈固有値解析や幾何学的非線形を考慮した時刻歴応答解析などが行われる。しかし、前者では地震荷重分布を与える場合に動的解析結果をフィードバックすることが望ましく、後者では動的不安定にならない場合にどの程度の座屈余裕度を持っていたかを定量的に知ることが出来ないという問題点がある。そこで著者の一部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方法(以下、動的座屈固有値解析という。)を提案している¹⁾。この方法により、地震荷重による応力・変形状態を考慮した、座屈に対する安全性を定量的に評価することができると考えている。本研究では、その適用性を明らかにするため、トラス構造物の振動台座屈実験を行った。

2. 実験概要

図-1に本実験に用いた供試体を示す。予め行った座屈固有値解析と動的座屈固有値解析により、座屈部材は基部斜材と考えられる。表-1に示す材料を用い、部材の接合点はすべてボルト接合とした。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、供試体と治具と振動台をボルトで固定した。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水平プレート(鋼製)をパネルごとに設置し、その上に錘を置いた。加速度計は頂部から1パネルおきに基部まで計6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パネル分の斜材に16箇所と鉛直材2箇所アングルの両辺の表裏にそれぞれ1枚ずつ貼った。

解析モデルは、図-3に示す3次元骨組モデルである。部材はすべて梁要素でモデル化し、接合部はボルト軸周りの回転を自由とした。

時刻歴応答解析における数値積分法にはNewmark β 法($\beta=1/4$)を用い、積分時間間隔を0.001秒とした。動的座屈固有値解析の計算時間間隔も同様に0.001秒とした。減衰マトリクスは歪みエネルギー比例型のモード減衰を算出し、卓越するモードにおけるレーリー型の減衰マトリクスを使用した。ここでは、振動台入力波が5Hzであることから、供試体1次の振動数と入力波の振動数を使用した。動的座屈固有値解析入力波を図-4に示す。振動数5Hzの増幅波で2秒間で1000galに達するものとし、水平1方向に入力した。なお、部材はすべて線形として解析した。

3. 動的座屈解析結果

解析により想定された供試体の固有振動数は9.70Hzであり、自由振動試験から得られた固有振動数の8.67Hzと異なっていたので、その原因を基部ボルトの固定条件の不完全さと考え、図-3に見られるようにバネ定数

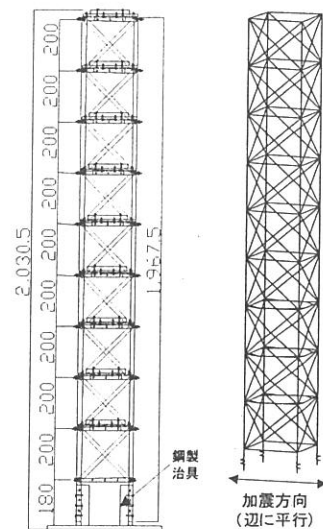


図-1 供試体図

図-3 解析モデル

表-1 使用材料

	使用材料	断面形状	部材寸法(mm)
鉛直材	アルミ	等辺山形	1×19×1927.5
水平材	アルミ	矩形	5×15×215
斜材	アルミ	矩形	2×15×297.8
水平プレート	鋼	8角形	6×120×217
錘	鋼	矩形	16×155×155
ボルト	鋼	-	M4
ボルト (治具固定用)	鋼	-	M20

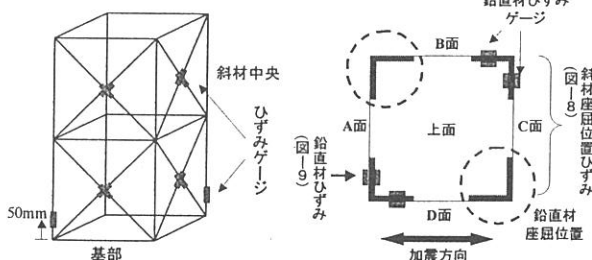


図-2 ひずみゲージ位置と実験結果概要

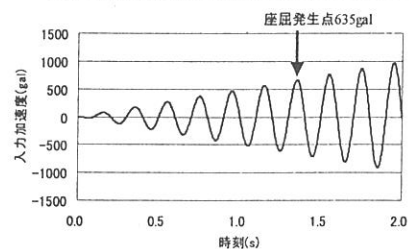


図-4 動的座屈解析入力波(供試体製作前)

22. 4kN/mmの鉛直ばねを設置した。これにより固有振動数は8.67Hzとなり実験値と一致している。この補正後に再度、座屈固有値解析と動的座屈固有値解析を行った。

動的座屈固有値λの説明

動的座屈固有値λは、以下の式で表される。

$$([Kt] + \lambda[\Delta Kg])\{u\} = \{0\}$$

[Kt]: 前ステップの平衡状態における要素剛性マトリックス

λ: 前ステップから現ステップの応力増分に対する倍率

[ΔKg]: 現ステップの応力増分(または断面力)による幾何剛性マトリックスの増分係数

{u}: 固有モードベクトル

従ってλ=0.0が前ステップの状態、λ=1.0が現ステップの状態を表し、λ≤1.0となる場合に前ステップから現ステップの間で座屈が生じたことになる。またλが1.0より大きければ大きいほど安全であることを示し、これにより安全性の余裕度を定量的に把握することができる。

図-5は動的座屈固有値解析から得られた座屈固有値の時刻歴を示す。入力加速度レベルが大きくなるにつれ座屈固有値は小さくなり、1.341秒時に座屈固有値0.3461となり1.0を下回ったことから座屈が発生したと判断される。図-6にこの時刻での座屈モードを示す。基部斜材の座屈が見られる。

4. 動的座屈実験結果

解析では2.0秒の入力波に対し座屈判定を行ったが、振動台に実際に入力する波形は振幅の増幅幅を小さくすべきと判断して、振動数をそのままに30秒間で1000gal達するように引き伸ばした。図-7は振動台に入力した加速度である。

図-8に基部斜材ひずみの時刻歴(実験値)を示す。12秒付近からひずみが負側(圧縮側)で斜材が座屈点に達し、この点から部材が急激に曲がり、ひずみゲージ貼付側が引張側となり正側のひずみが大幅に増大している、この時の入力加速度は約400galである。2.0秒間の解析から想定される1.341秒における入力加速度635galと比較すると、入力加速度レベルがかなり小さい段階で座屈が発生していることが分かる。座屈は基部斜材の8部材すべてにおいて確認されている。動的座屈解析から算定される斜材の座屈発生時のひずみは1点鎖線で示す約160μであり、座屈発生点はほぼその値となっている。

図-9に基部鉛直材ひずみの時刻歴を示す。鉛直材の座屈はひずみゲージを取り付けた部材ではないが、入力加速度が776galに達した時点で鉛直材に座屈が生じたことが分かる。図-10に鉛直材の座屈開始時および座屈後の写真を示す。解析によると鉛直材の座屈は想定されておらず、実験で観察されたのは片側のアングルフランジからの変形が先行するというものであった。座屈開始時の写真において、点線(直線)と鉛直材を比較して分かるように、鉛直材に僅かにたわみが生じている。なお、座屈が生じたあと鉛直材に亀裂が生じて終局状態に達した。

5. まとめ

本実験により、動的な座屈現象をある程度捉えることができた。今後は解析と実験の詳細な比較・検討を行うとともに部材配置を変更した構造で実験を行い、本ソフトウェアの適用可能性についてさらに検討する予定である。

- 参考文献 1) 為廣尚紀, 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講演論文集, 2002年1月
2) V. V. ボロチン: 非保存的弾性安定問題, V培館, 1977年11月

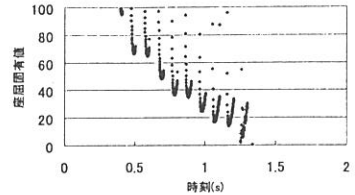


図-5 動的座屈固有値の時刻歴



図-6 動的座屈固有値解析座屈モード
1.341秒時(基部拡大)

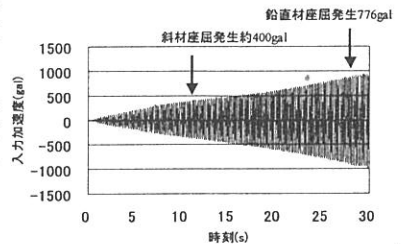


図-7 振動台入力波

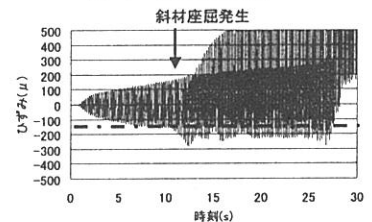


図-8 基部斜材ひずみの時刻歴

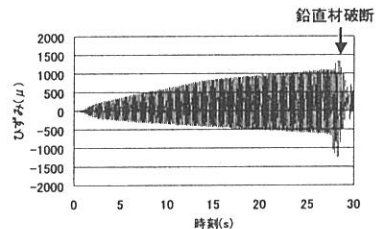


図-9 基部鉛直材ひずみの時刻歴

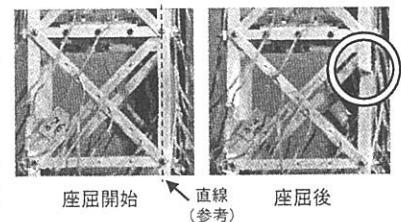


図-10 基部鉛直材の座屈