

長柱構造の動的座屈現象と動的座屈固有値解析の有効性に関する検討

九州大学大学院工学府 学生会員 ○上村 龍成 九州大学大学院工学府 学生会員 川崎 啓史
(株)構造計画研究所 正会員 為広 尚起 九州大学工学研究院 フェロー 大塚 久哲

1. 目的

1995 年に発生した兵庫県南部地震を契機に道路橋示方書¹⁾が改定され、地震時に複雑な挙動を示す長大橋やアーチ橋は動的応答解析による照査や設計が必要になった。しかし、地震時座屈等の構造不安定に関しては十分な知見や研究は蓄積されておらず、地震時に複雑な挙動を示す構造物に対して耐震設計上の検討が不十分である現状である。

筆者らは動的挙動中の構造不安定について、複合非線形動的解析中に時々刻々増分形式の座屈固有値解析（以下を動的座屈固有値解析）を行い、得られた座屈固有値から座屈の発生や座屈に対する危険性について定量的評価を行うことを提案してきた²⁾。この提案手法は既存構造物に対して座屈危険度の評価や座屈性能向上策のための効果的な解析手法となることを見込まれる。本研究では提案手法の有効性を更に確認するため、4 本脚給水塔を模擬した 4 本柱供試体を用いて振動台実験と非線形動的解析および動的座屈固有値解析を行った。

2. 実験

2-1. 供試体概要

実験では、4 本の長柱の上に錘収納箱を有する供試体を用意した。柱は鋼管を用い、長さを 1000mm とした（写真-1）。錘収納箱に重ね入れる錘プレートとして 9.8N/枚のものを 5 枚、49N/枚のものを 3 枚、117.6N/枚のものを 12 枚設備した。また、材料試験結果から、今回用いた鋼管の降伏ひずみは 1739μ 、弾性係数は $1.779 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ であった。

2-2. 実験手法

加振方向は水平 1 方向加振であり、入力波は図-1 に示すように 1 周期ごとに加速度が増加する増幅波を用いている。増加量は 22.6gal/周期である。最大加速度以降は増加量と同程度に加速度を減させ、最終的には 0 となる。この供試体の鋼管柱の 4 面にひずみゲージを貼付し、それぞれのひずみを測定した。

2-3. 実験結果

図-2 に、実験から得られた鋼管柱の加振方向の曲げひずみの時刻歴、軸ひずみの時刻歴を示す。軸ひずみは 4 枚の数値を平均した値を表している。軸ひずみは途中で振幅が正負対称ではなくなり、ひずみがマイナス方向に偏在していく。そこで、図-2 には振幅中心の変化を併記した。

振動中に倒壊するような現象は発生しなかったが、図-2 に示す軸ひずみの振幅中心の時刻歴を見ると、単軸水平方向加振にも関わらず 7 秒付近で軸ひずみの応答変化（残留ひずみの発生）が生じ始めていることが分かる。この時刻において曲げによるひずみは降伏ひずみ以下であり、鋼管柱は弾性範囲内にあるにも関わらず残留軸ひずみが蓄積し始めていることが分かる。この理由については、後に考察する。

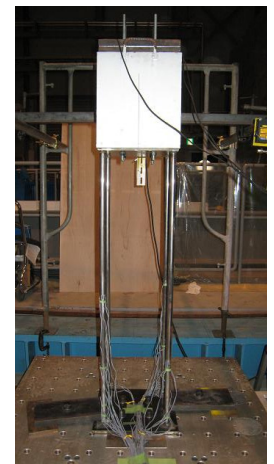


写真-1 実験供試体

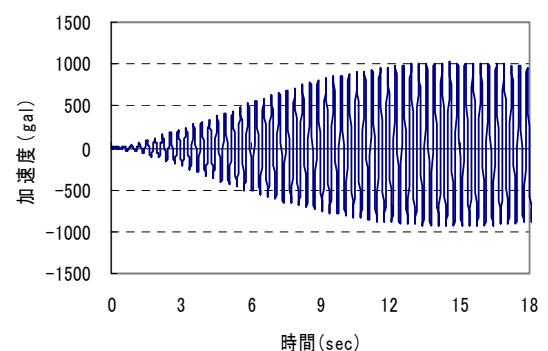


図-1 入力波

3. 解析

3-1. 解析手法

解析モデルは図-3 に示すように 3 次元骨組モデルとした。錘収納箱の要素は剛部材としており、錘の質量及び重量は 4 辺の節点に振り分けている。解析条件を表-3 に示す。また、実験モデルには多少の初期不整があると考え

えられるが、一般的な解析モデルにおいてそこまで考慮することは難しいため、偏心は考慮していない。

3-2.複合非線形動的解析結果

ここでは複合非線形動的解析を用いて、実験をトレースした結果を記す。図-4 に軸ひずみの時刻歴波形の比較を示す。この結果からわかるように、本解析では、実験で生じた軸ひずみの応答変化を予測することができていない。本供試体の場合、解析上の変位モードと座屈モードはほぼ同じであり、複合非線形動的解析の変位モードのみを見ても動的挙動中の不安定挙動を見逃す可能性がある。

3-3.動的座屈固有値解析結果

動的座屈固有値解析が座屈照査に対して有効であるか否かを確認するために解析結果と実験結果を比較検討する。動的座屈固有値解析結果から得られた座屈固有値の時刻歴を図-5 に示す。座屈判定基準は座屈固有値が1以下 ($0 \leq \lambda_b \leq 1$) となった時点である。このケースでは座屈判定基準を下回っており座屈判定が出ていることが分かる。初めて座屈判定が出た時刻は10.37 秒(座屈固有値 0.13)である。また、座屈判定時刻以前に7.5 秒付近で座屈固有値が急激に減少している傾向があるので、この時刻付近で座屈に対しての危険性が高まっていることが分かる。

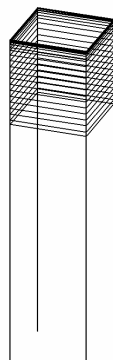


図-3 解析モデル

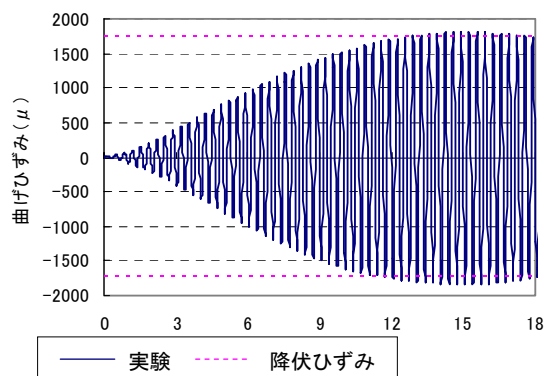
次に実験(図-2)と解析(図-5)を比較する。解析で座屈固有値が急激に減少し始める時刻付近において、実験における軸ひずみの応答変化(残留ひずみの発生)が生じていることが分かる。また、解析で座屈判定時刻以降、実験において残留ひずみの増加傾向が顕著になっていることが分かる。

4.まとめ

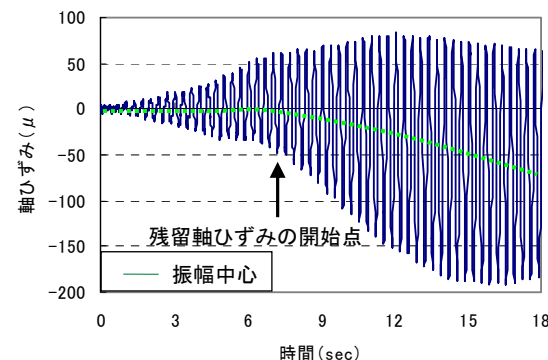
以上の結果より、実験で得られた不安定現象は、複合非線形解析のみでは再現できないこと、動的座屈固有値解析で得られる座屈固有値の急激な変化に対応していることがわかる。よって、動的座屈固有値解析を行うことで、不安定現象の見落としはなくなると考えられる。

5.参考文献

- (1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説/V 耐震設計編，2002.3.
- (2) 大塚久哲，為広尚起：地震時の構造不安定とその照査法，九州大学出版会，2008.



(a) 曲げひずみ



(b) 軸ひずみ

図-2 鋼管材ひずみ時刻歴

表-3 解析条件

解析手法	直接積分法
数値積分手法	ニューマークβ法($\beta=1/4$)
積分時間間隔	0.0001sec
減衰タイプ	Rayleigh減衰
材料非線形特性	鋼管:M-φモデル(バイリニア)
幾何学的非線形	考慮
動的座屈固有値解析の計算時間間隔	0.001sec

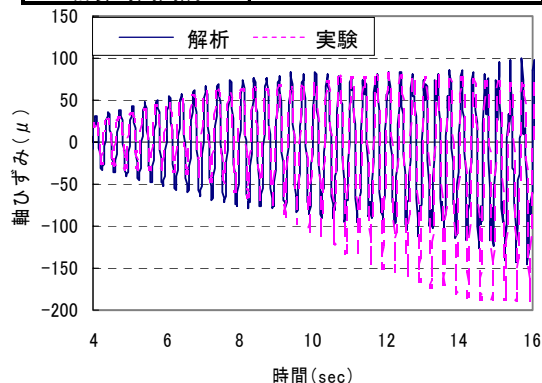


図-4 ひずみ時刻歴比較

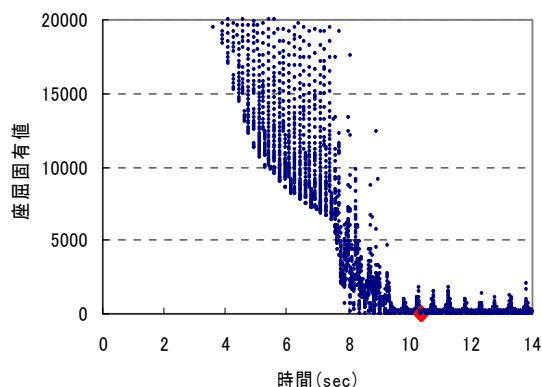


図-5 座屈固有値の時刻歴