

地震時におけるパラメトリック励振の発生に関する基礎的検討

九州大学大学院 学生員 ○清水 晋作 九州大学大学院 フェロー 大塚 久哲
九州大学大学院 正会員 宮森 保紀 構造計画研究所 正会員 為広 尚起

1. はじめに

構造物、または構造部材に周期的変動軸力が作用する場合、面外の振動が増幅する動的不安定現象が発生する¹⁾。この現象はパラメトリック励振といい、特に変動軸力の振動数と固有振動数の比が2:1のときを主不安定領域、1:1のときを副不安定領域と呼ぶ。近年の橋梁の耐震設計では、地震動や構造物の動的な特性を考慮することが重要視されており、また地震時の座屈判定法についても提案がなされている²⁾。しかしながら、パラメトリック励振などの動的不安定現象に対する安全性評価は十分に行われていない。そこで、本研究では地震時のパラメトリック励振の発生の可能性を確認するための基礎的な検討として、単柱に対する振動実験と幾何学的非線形性を考慮した動的解析を行った。

2. 実験

供試体として長方形断面を有する鋼製単柱を用い、下端を固定し上端をヒンジとするモデルA、両端をヒンジとするモデルBの異なる境界条件を有するモデルで実験を実施した。ヒンジ部分は供試体にボールベアリングを取り付け、支持鋼板にくぼみを設けて支持した。モデルA、Bの実験供試体概要を図-1、供試体の諸元を表-1に示す。これらの供試体に対し、アクチュエータで周期的変動軸力を作用させる。各ケースにおいて最大軸力を変化させ、パラメトリック励振の主・副不安定領域を考慮し供試体の上端に固有振動数の2倍、1倍の振動数を有するサイン波状の軸力をそれぞれ入力する。モデルAの実験ケースを表-2、モデルBの実験ケースを表-3に示す。異なる大きさの軸力を作用させ影響を調べるが、軸力により固有振動数が変化するため、まず sweep 波を供試体に入力し、パラメトリック励振が発生した時の卓越振動数をその荷重下での固有振動数としてサイン波の加振振動数を決定した。モデルAに sweep 波を入力した結果の一例として、最大軸力 0.4kN の場合の供試体中央部の軸直角方向応答変位を図-2に示す。入力した軸力の振動数の推移を上軸に示す。6秒、25秒前後でパラメトリック励振が発生しており、6秒前後が副不安定領域、25秒前後が主不安定領域である。図-2では、副不安定領域が4.5～6Hz、主不安定領域が10～12Hzでパラメトリック励振が発生しており、作用させる sweep 波の軸力が大きいほど、パラメトリック励振が発生する振動数の範囲が拡大することが確認できた。

3. 幾何学的非線形性を考慮した時刻歴応答解析

供試体をはり要素としてモデル化し、実験同様に周期的変動軸力を入力して時刻歴応答解析を行う。解析も実験同様のモデルに対して行うが、解析モデルの要素数は40要素に分割し、治具の剛性を考慮してモデルAの固定部には回転バネを用いた。また、実験供試体の初期たわみを事前に測定し解析に導入した。固有振動解析の結果を表-1に示す。

実験同様、モデルAには表-2、モデルBには表-3の軸力を入力して幾何学的非線形性と材料非線形性を考慮した動的複合非線形解析を行った。動的解析は汎用構造解析コードRESP-Tを使用した³⁾。数値積分法はNewmark β 法 ($\beta = 1/4$) を用い、積分時間間隔を0.0002秒とした。

幾何学的非線形性を考慮することで、軸力が幾何剛性に反映される。変動軸力が作用することで剛性が周期的に変化し、パラメトリック励振が解析で考慮できる。

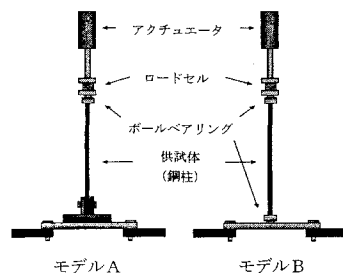


図-1 供試体概要

表-1 供試体諸元

	モデルA	モデルB
両端の固定条件	固定×ヒンジ	ヒンジ×ヒンジ
鋼材寸法(mm)	4.5×38×1400	
ボールベアリング高さ(mm)	40	
固有振動数(Hz)	実験 7.14 解析 7.14	実験 4.39 解析 4.78

表-2 実験・解析ケース(モデルA)

case	軸力振幅 (kN)	座屈荷重に 対する倍率	加振振動数(Hz)		目標不安 定領域
			実験	解析	
1	0.06	0.1	14.31	14.31	主
2	0.06	0.1	7.16	7.16	副
3	0.2	0.3	13.45	13.45	主
4	0.2	0.3	6.73	6.73	副
5	0.3	0.5	12.20	12.20	主
6	0.3	0.5	6.10	6.10	副
7	0.4	0.7	11.17	11.17	主
8	0.4	0.7	5.58	5.58	副
9	0.5	0.85	10.07	10.07	主
10	0.5	0.85	5.04	5.04	副

表-3 実験・解析ケース(モデルB)

case	軸力振幅 (kN)	座屈荷重に 対する倍率	加振振動数(Hz)		目標不安 定領域
			実験	解析	
1	0.05	0.35	7.66	8.21	主
2	0.05	0.35	3.83	4.11	副
3	0.08	0.50	7.26	8.20	主
4	0.08	0.50	3.63	4.10	副
5	0.15	0.75	6.40	7.04	主
6	0.15	0.75	3.20	3.62	副
7	0.2	0.95	5.35	5.87	主
8	0.2	0.95	2.68	2.94	副

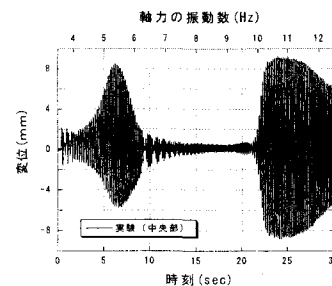


図-2 時刻歴応答変位

4. 実験と解析の結果

結果の一例として、モデルAにおいて座屈荷重の0.85 倍の軸力が作用するcase9、モデルBにおいて0.95 倍が作用するcase7の供試体中央部の時刻歴応答変位をそれぞれ図-3、図-4に示す。実験・解析ともに加振直後から変位が急激に増幅し定常状態となっている。図-3では実験値と解析値の振幅がほぼ一致しているが、図-4では実験の振幅が解析の約3割となった。モデルA、Bの各加振ケースについて供試体中央部における変位の最大振幅を図-5、図-6に示す。図-5において、case3では実験でパラメトリック励振が発生しなかったために顕著な差が生じたものの、最大軸力に比例して応答が大きくなる傾向は一致している。図-6では、全てのケースで解析値が実験値を大きく上回っている。この傾向は実験における載荷軸力が原因と考えられる。モデルAのcase8、モデルBのcase7の実験におけるロードセルで得られた荷重の時刻歴を図-7、図-8に示す。図-7では、目標とする軸力がサイン状に作用しているが、図-8では加振直後は目標とする荷重が得られているものの、その後振幅が減少し定常状態となっている。これはパラメトリック励振が発生することで完全に拘束されていない支持部で変位が生じ、アクチュエータで正確な荷重制御が行われなくなることが原因だと考えられる。この傾向は、モデルBの全てのケースで確認できた。このため、モデルBでは解析と比較し、小さい応答を示している。

各ケースにおいて図-5、図-6の解析値に対する実験値の倍率を図-9、10に示す。図-9のcase1については、実験・解析ともにパラメトリック励振が発生していないためグラフは省略した。図-9では、軸力が大きいほど実験値と解析値の差が小さくなっていることが確認できる。これは荷重が大きいとパラメトリック励振が発生する加振振動数の範囲が広がり、微小な条件

の違いの影響が少なくなり、実験と解析の整合性が高くなるためだと考えられる。図-10では全てのケースで1を下回っており、実験値と解析値の差が顕著に生じた。これは、前述のようにモデルBではアクチュエータが正確な荷重制御ができず、入力軸力が小さくなったことが原因と考えられる。なお、本研究の解析と実験においては、いずれのケースにおいても供試体の応力-ひずみ関係は弾性範囲内であった。

5. まとめ

従来、耐震設計において認識されていない振動問題であるパラメトリック励振について、実験と幾何学的非線形性を考慮した解析により基礎的な検討を行った。解析と実験の比較から、モデルAでは軸力が大きい範囲で同程度の応答変位が得られた。モデルBでは定量的な評価には課題が残るものの、パラメトリック励振の発生そのものは確認できた。本研究のモデルは土木構造物の部材として、一般的な境界条件を有するため、このようなモデルに対してパラメトリック励振の発生が実験と解析の両方で確認できたことは有益と思われる。今後、アーチ橋などの実構造物に地震波を入力しパラメトリック励振が発生するか、発生するならばどの程度問題となるか検討を行っていく予定である。

参考文献 1) Bolotin, V. V.: 弾性系の動的安定, コロナ社, 1972. 2) 為広尚起, 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講演論文集, pp99-104, 2002. 3) 構造計画研究所: RESP-T理論マニュアル, 2000.

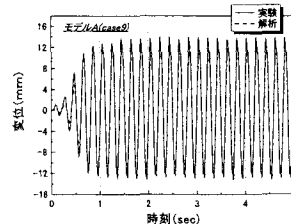


図-3 時刻歴応答変位
(モデルA・case9)

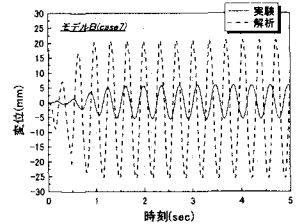


図-4 時刻歴応答変位
(モデルB・case7)

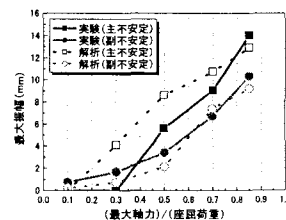


図-5 最大振幅 (モデルA)

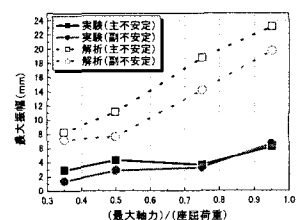


図-6 最大振幅 (モデルB)

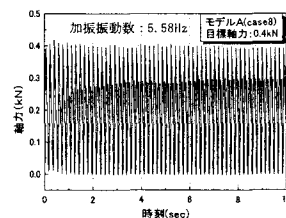


図-7 荷重の時刻歴
(モデルA・case8)

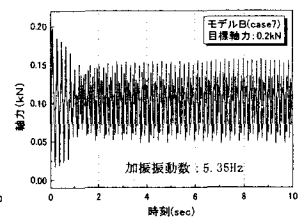


図-8 荷重の時刻歴
(モデルB・case7)

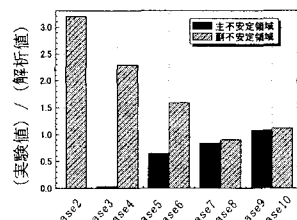


図-9 実験値に対する
解析値の倍率 (モデルA)

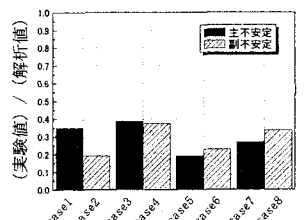


図-10 実験値に対する
解析値の倍率 (モデルB)