

実時間ハイブリッド実験システムを用いた 構造物の保有性能評価に関する基礎的研究

香川大学工学部 正会員 ○白木 渡
香川大学工学部 正会員 井面 仁志
関西大学工学部 正会員 堂垣 正博
(株)ゼットシステム 非会員 堀内 俊秀

1 はじめに

1994年のノースリッジ地震、1995年の兵庫県南部地震をきっかけとして、技術的に素人である構造物の所有者や利用者への説明責任が、設計者も含めて構造物を造る側に強く求められるようになった。このような背景から、国際的に見て構造物の設計に関わる技術基準は、従来の仕様規定の記述から性能に基づく規定への変換が急務になってきている。

性能設計において重要なことは、設計された構造物がその要求性能（目標性能）を満足しているかどうか、すなわち保有性能を確保しているかどうか確認することである。しかし、現在、著者の知る限り、性能設計法によって設計された構造物が要求性能を保有しているかを証明する有効な方法がない。

そこで、本研究では、実時間ハイブリッド実験システムおよび信頼性理論を用いた構造物の保有性能評価手法を提案し、その有効性を示す。

2 実時間ハイブリッド実験システム

実時間ハイブリッド実験システムの概念図を図1に示す。実時間ハイブリッド実験システムとは、評価対象構造物の振動応答上重要な部分は実モデルもしくは数値モデルとして加振実験を行い、他の部分は数値モデルとしてコンピュータへ入力する実験手法である。この実験手法では、加振機応答遅れ時間分だけ先の振動応答を予測し、加振機への加振信号とする補償方法により、実時間化を実現している。また、予測時間を適宜修正することにより、実験精度を向上させている¹⁾。

加振部を実モデルとして扱う手法をハイブリッド実験と呼び、加振部を数値モデルとして扱う手法をハイブリッドシミュレーションと呼ぶ。

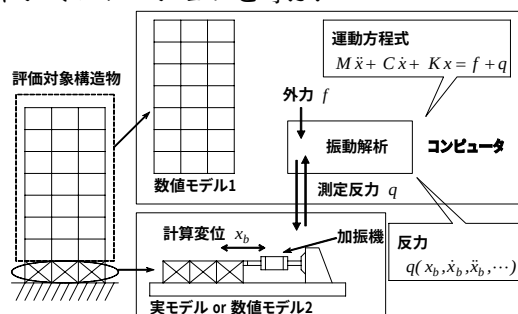


図1 実時間ハイブリッド実験システムの概念図

3 実時間ハイブリッド実験システムを用いた構造物の 振動実験

実時間ハイブリッド実験システムの適用性を確認するため、正弦波および地震波を用いて振動実験を実施する。評価対象モデルは、単柱の一自由度一質点系モデルとする。

構造解析ソフト SAP2000、ハイブリッドシミュレーション、ハイブリッド実験を実施した。実物大の構造物に対する振動実験結果と比較を行いシステムの適用性を確認するべきであるが、システム環境の整備不足のため、本研究では SAP2000 による結果を比較対象とする。SAP2000 による応答変位に対するハイブリッドシミュレーション結果とハイブリッド実験結果の誤差を表1に示す。

表1 応答変位に対する誤差推定

	ハイブリッドシミュレーション		ハイブリッド実験
	正弦波	地震波	
平均二乗誤差	0.55	2.48	7.06
最大変位の相対誤差	-0.75	2.30	18.6

(単位: %)

最大変位が2mmと小さいため、18.6%の誤差は0.4mm以下と小さい。表1より、ハイブリッドシミュレーションおよびハイブリッド実験による構造物の振動解析の適用性が確認できた。

4 保有性能評価手法の提案

提案する保有性能評価手法のフローを図2に示す。フローの説明について以下に示す。

(a) 加振波形作成

任意の確率分布による定常もしくは非定常確率過程を用いて加振波形のサンプルを作成する。

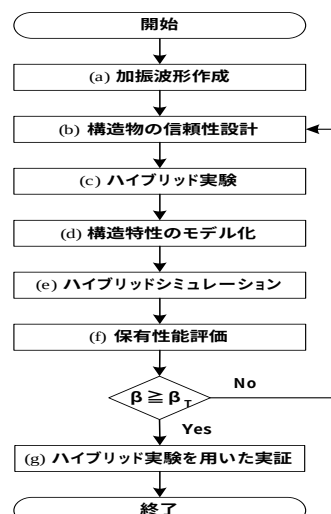


図2 保有性能評価のフロー

キーワード 実時間、ハイブリッド実験、保有性能評価

連絡先 〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20 香川大学工学部信頼性情報システム工学科 TEL087-864-2243

(b) 構造物の信頼性設計

構造モデルを曲げ部材とし、(a)で作成した加振波形に対して目標信頼性指標 β_T を保有するように設計する

(c) ハイブリッド実験

(a)で作成したいくつかの加振波形と(b)で設計したモデルを用いてハイブリッド実験を行う。

(d) 構造特性のモデル化

ハイブリッドシミュレーションを実施するため、(c)で得られた実モデルの構造特性をモデル化する。

(e) ハイブリッドシミュレーション

(a)で作成された加振波形、(b)で設計されたモデル、(d)で選ばれた構造特性のモデルを用いてハイブリッドシミュレーションを実施する。

(f) 保有性能評価

(e)で得られたハイブリッドシミュレーション結果から構造モデルの信頼性指標 β を算出し、目標信頼性指標 β_T と比較・検討する。

(g) ハイブリッド実験を用いた実証

設計された構造モデルが本当に要求された目標信頼性指標 β_T を保有しているかどうかハイブリッド実験を実施し、確認する。

次章で、この提案する保有性能評価手法を用いて保有性能の評価を実施する。

5 保有性能評価手法の適用例

提案した保有性能評価手法の有効性を確認するため、短周期地震動および長周期地震動を用いて、正方形断面からなる単柱（片持ち柱）に対する保有性能の評価を行う。

表2に示す特性を有する3種類のホワイトノイズとして、加振波形（地動加速度波形）を作成する。その加振波形の最大加速度を抽出し、最大値分布を作成する。その分布のパラメータを表3に示す。分布1は、振動数が比較的高い短周期地震動の最大値分布である。分布2は、振動数の変化による結果の影響を見るため、分布1に比べ振動数が低く振幅も小さい長周期地震動の最大値分布を有するものとする。分布3は、振幅の変化による結果の影響を見るため、分布2と同じ振動数であるが振幅はより小さい長周期地震動の最大値分布を有するものとする。

まず、分布1の加振波形を受ける構造モデル（単柱）の信頼性設計を実施した。ここで、目標信頼性指標

表2 ホワイトノイズのパラメータ

	短周期地震動 (分布1)	長周期地震動 (分布2) (分布3)	
振動数(上限値)(Hz)	3	1	1
振動数(下限値)(Hz)	-3	-1	-1
パワースペクトル強度(cm^2/sec^3)	1000	1800	800

表3 加振波形の最大値分布

	短周期地震動 (分布1)	長周期地震動 (分布2)	長周期地震動 (分布3)
分布の平均値(gal)	590	403	267
分布の標準偏差(gal)	73.9	70.1	47.8

$\beta_T = 2.0$ とする。その結果、構造モデルの寸法は、幅 4.75cm、板厚 4.75cm、長さ 500cm を得た。このモデルの固有振動数は 0.75Hz である。このモデルを対象として、表2の特性を持つ加振波形を用いたハイブリッドシミュレーションを実施し、保有性能を評価した。その結果を表4に示す。

表4 構造モデルの信頼性指標

	短周期地震動 (分布1)	長周期地震動 (分布2) (分布3)	
目標信頼性指標 (β)	2.0	2.0	2.0
超過確率による信頼性指標 (β)	3.4	1.75	4.25
ハイブリッドシミュレーションによる信頼性指標 (β)	2.5	1.1	1.37

表4の分布1より、ハイブリッドシミュレーションによる信頼性指標 β が 2.5 に収束していることから、分布1に対して構造モデルが目標信頼性指標 β_T を確保していることがわかる。また、確率過程の超過理論により求めた信頼性指標 β_a は 3.4 となり、確率過程の超過の理論を用いても構造モデルが目標信頼性指標 β_T を確保していることがわかる。

また表4の分布2より、ハイブリッドシミュレーションによる信頼性指標 β が 1.1 に収束し、確率過程の超過理論により求めた信頼性指標 β_a は 1.75 となり、分布2に対して構造モデルが目標信頼性指標 β_T を確保していないことがわかる。この理由として、加振波形の振動数が小さくなったことにより共振現象を生じやすく、変位が大きくなったと考えられる。

また表4の分布3より、ハイブリッドシミュレーションによる信頼性指標 β が 1.37 に収束していることから、分布3に対して構造モデルが目標信頼性指標 β_T を確保していることがわかる。確率過程の超過理論により求めた信頼性指標 β_a は 4.25 となる。理論的には振幅を小さくすることにより信頼性指標は向上するため、確率過程の超過理論により求めた信頼性指標 β_a は大きくなる。しかし、加振波形の特性によっては振幅を小さくすることによる影響に比べ、共振現象の影響が大きくなることもあるので注意が必要である。表4の分布3の結果は、その現象を捉えることができていると考えられる。

6 おわりに

本論文では、性能設計された構造物が目標性能を保有していることを評価する方法として、実時間ハイブリッド実験システムと信頼性理論を用いる評価手法を提案した。そして、信頼性設計法によって設計された正方形断面からなる単柱（片持ち柱）に適用して、その評価手法の有効性を示した。

文献

1) Horiuchi, T. and Konno, T. : A New Method for Compensating Actuator Delay in Real-time Hybrid Experiments, Philosophical Trans. Royal Society, 2001.