

実時間ハイブリッド実験による構造物の保有性能評価

EVALUATION OF DYNAMIC PERFORMANCE OF STRUCTURE USING REAL-TIME HYBRID EXPERIMENTAL SYSTEM

井面仁志*・堀内俊秀**・白木渡***・堂垣正博****・保田敬一*****

Hitoshi INOMO, Toshihide HORIUCHI, Wataru SHIRAKI, Masahiro DOGAKI and Keiichi YASUDA

*工博 香川大学助教授 工学部信頼性情報システム工学科(〒761-0396 高松市林町 2217-20)

**香川大学大学院 工学研究科信頼性情報システム工学専攻

***工博 香川大学教授 工学部信頼性情報システム工学科

****工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科

*****工博 (株)NEWJEC

The design method of the structure has shifted to the design method of the performance check system that clarifies the performance of the structure as shown in ISO2394. After a big earthquake that hit Kobe City, checking systems of the seismic restoring horizontal force method and time history response analysis, etc. are proposed as an earthquake resistant performance checking system. However, the vibration experiment that uses an actual structure is impossible though it is necessary to confirmed whether the designed structure satisfies the required performance. Especially, there are a lot of problems in the real-time vibration analysis. In this paper, it proposes the performance evaluation method of the structure by a real-time hybrid experiment.

Key Words: real-time hybrid experiment, performance evaluation method, vibration experiment

1. はじめに

世界的な傾向として、構造物の設計法は、その構造物の性能を明確にする性能照査型の設計法へ移行してきている。日本においても阪神大震災以降、耐震性能照査法として地震時保有水平耐力による照査や時刻歴応答解析などによる照査法が提案されている¹⁾。

しかし、設計された構造物が、本当に要求性能を満足しているかの確認するためには、実物大の振動実験を行う必要があるが、実際の構造物を用いた振動実験は一般的に困難である。特に、実時間での振動解析は多くの問題が存在する。

そこで、本研究では、性能評価上重要な部分のみ振動実験を行い、他の部分は数値モデル解析を行う実時間ハイブリッド実験システムによる構造物の保有性能評価法について検討する。

2. 実時間ハイブリッド実験システム

ここでは、本研究で用いる日立製作所製の实時間ハイブリッド実験システム²⁾について説明する。

2.1 概要

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には、実時間ハイブリッド実験(以下、「ハイブリッド実験」と呼ぶ)と実時間ハイブリッドシミュレーション(以下、「シミュレー

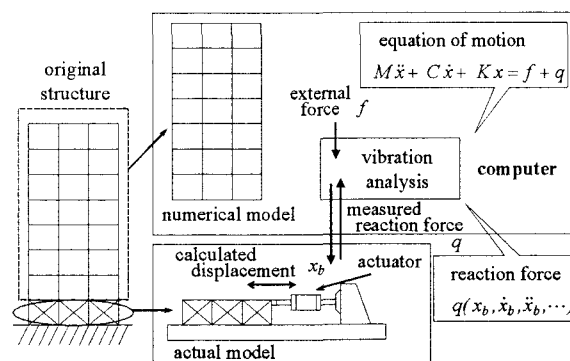


図-1 実時間ハイブリッド実験システムの概念図

ション」と呼ぶ)の二つの手法がある。

ハイブリッド実験とは、評価対象となる構造物の振動応答上重要な部分は実モデルとして実際に加振実験を行い、他の部分は数値モデルとして計算機を用いて解析する実験手法である。

シミュレーションとは、ハイブリッド実験で実モデル、および実際の加振機を用いて実験していた部分を、計算機で模擬するシミュレーション手法である。

数値モデルの運動方程式を式(1)に示す。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f + q \quad (1)$$

ここに、 M 、 C 、 K をそれぞれ数値モデルの質量、減衰、剛性マトリックス、 x を数値モデルの基礎に対する

相対変位ベクトル, f を地震などによる外力ベクトル, q を数値モデルと実モデルの境界点に発生する力(以下, 反力と呼ぶ)のベクトルとする. 反力 q は境界点 b の変位 x_b を用いて形式的に表すと式(2)となる.

$$q = q(x_b, \dot{x}_b, \ddot{x}_b, \dots) \quad (2)$$

加振実験により計測した反力 q を用い, 式(1)により微小時間 Δt 後の振動応答を計算し, 境界点 x_b を加振機により実モデルに加え, この変形に対する反力 q を計測する. 以上を繰り返し実施することにより, 構造物全体の振動応答が評価できる. システムの流れを図-2に示す.

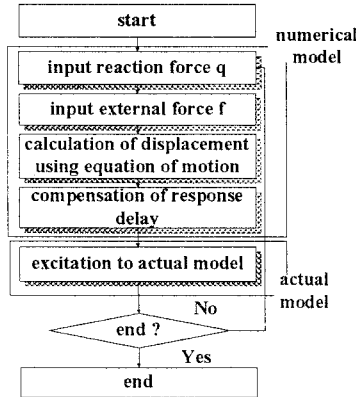


図-2 システムの流れ

このシステムでは, 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.

2.2 振動解析のアルゴリズム

図-1 中の計算機で式(1)の運動方程式を解くためにアルゴリズムとして, 中央差分法³⁾を用いる.

ある時刻 t_i において式(1)を式(3)と表す. また, 添字 i は時刻 t_i の値であることを示す.

$$M\ddot{x}_i + C\dot{x}_i + Kx_i = f_i + q_i \quad (3)$$

中央差分法では, 時間刻み Δt ごとの振動応答を算出する. そのため, 時刻 $t_{i-1} = t_i - \Delta t$ から時刻 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ の間で加速度が一定であると仮定する. この仮定の下では, 時刻 t_i の加速度, および速度は, 式(4), 式(5)となる.

$$\ddot{x}_i = \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (4)$$

$$\dot{x}_i = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\Delta t} \quad (5)$$

式(4), 式(5)を式(3)に代入し, x_{i+1} について解くと式(6)が得られる.

$$x_{i+1} = \left(M + \frac{\Delta t}{2} C \right)^{-1} \left\{ 2Mx_i + \left(-M + \frac{\Delta t}{2} C \right) x_{i-1} + (p_i + q_i - Kx_i) \Delta t^2 \right\} \quad (6)$$

式(6)からわかるように, 時刻 t_i において既知のデータから時刻 t_{i+1} の変位を算出できるのが, 本手法の特長である.

荷重 q_i を計算しながら振動計算をし, 加振機を制御しなければならない実時間ハイブリッド実験システムに有効な手法である. 反面, 時刻 t_i の加速度, 速度の算出には, 式(4), 式(5)を用いるので, 時刻 t_{i+1} の変位を求めた後に初めて値が定まる. すなわち, 加速度と速度の算出は, 1ステップ遅れることになる.

2.3 加振機応答遅れ補償

ここでは大形構造物の耐震試験によく使用される加振力の大きい油圧加振機を使用した例を用いて, 加振機応答遅れ補償の方法について説明する⁴⁾. 油圧加振機の動特性は地震応答評価上に必要な振動数範囲では, 加振機応答遅れ時間が存在するが, その加振機応答遅れ時間は, 振動数や振幅などにより多少変化する. 油圧加振機を用いたハイブリッド実験の装置は, この特徴を考慮して構成する必要がある.

加振機応答遅れの影響を考えるために, 図-3に示す一自由度系のハイブリッド実験を考える.

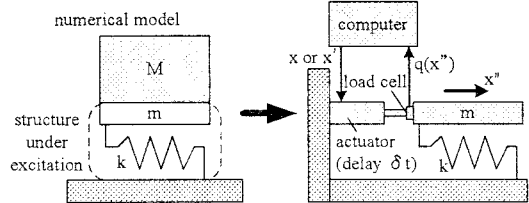


図-3 一自由度系に対するハイブリッド実験

図-3 中の x は計算機で計算された応答変位(計算値), x' は後述する手法により予測された応答変位(予測値), x'' は加振機により実際に構造物に負荷された変位(実現値)をそれぞれ表す.

ここでは簡単のため $m = 0$ とし, 実験対象の剛性が k であり加振機応答遅れ時間が δt の場合は, その剛性に式(7)で示す負の減衰係数 c_{eq} が加わったものと等価となる.

$$c_{eq} = -k\delta t \quad (7)$$

従って, 実時間の実験を行うためには, 何らかの方法でこの負の減衰を除去する必要がある.

2.3.1 遅れ補償手法

遅れ補償手法の全体の模式図を図-4に示す. 加振機応答遅れ時間先の変位を予測する部分と, 予測のためのパラメータを振動条件に合わせて修正する部分とからなる. 予測部分は, 振動応答計算によって求めたその時刻に実現すべき変位値(計算値)と過去の計算値から加振機応答遅れ時間分だけ先の変位値(予測値)を予測し, 加振機の入力信号とするものである. これにより, 予測された時間だけ加振機で応答が遅れるので, 実現したい時刻に実現したい変位が実現できる.

2.3.2 予測手法

予測式として, 過去の計算値を n 次関数にあてはめ, 加振機応答遅れ時間先の変位値を外挿して求める式(8)を用いる. 外挿の概念図を図-5に示す.

$$x' = \sum_{j=0}^n a_j x_j \quad (8)$$

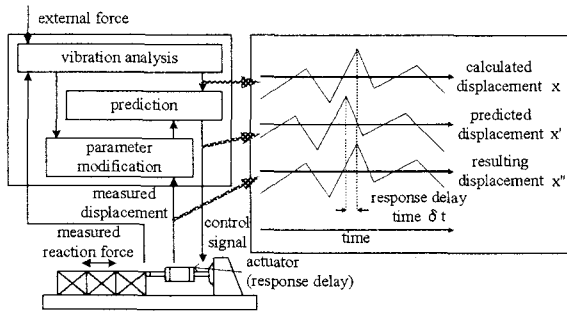


図-4 遅れ補償手法の模式図

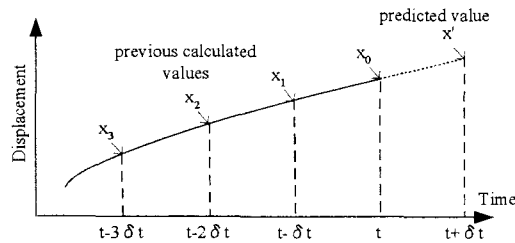


図-5 外挿の概念図

ただし、 x' は予測値、 n は予測の次数、 x_0 は現時刻の計算値、 x_j は現時刻よりも $(\alpha \times j)$ 前の計算値であり、 α は加振機応答遅れ時間、 a_j は予測次数により定まる定数で、表-1 にその値を示す。

表-1 予測定数 a_j

order n	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
0	1	-	-	-	-
1	2	-1	-	-	-
2	3	-3	1	-	-
3	4	-6	4	-1	-
4	5	-10	10	-5	1

(1) 供試体の剛性の影響

ハイブリッド実験に用いる供試体の剛性が k 、振動応答の計算値が円振動数 ω の正弦波の場合を考える。加振機応答遅れ時間 α を考えると、計測され振動応答解析に使用される反力 q は、予測の誤差により加振機で実現される変位 x'' と計算変位 x の間に位相差と振幅の変動が発生するために本来の $-kx$ とは異なり、式(9)となる。

$$q = -(k^*x + c^*\dot{x}) \quad (9)$$

ただし、 k^* 、 c^* はそれぞれ見かけ上の剛性、減衰係数ある。無次元量 $\omega\delta t$ の関数で表すと式(10)、式(11)の通りである。

$$\frac{k^*}{k} = \sum_{j=0}^n a_j \cos\{(j+1) \times \omega\delta t\} \quad (10)$$

$$\frac{c^*\omega}{k} = -\sum_{j=0}^n a_j \sin\{(j+1) \times \omega\delta t\} \quad (11)$$

c^* は $\omega\delta t$ がある限界値を超えると負となり振動計算が発

散するので、これが現状の補償手法の適用限界の一つとなっている。三次関数を用いた予測(3次予測)を用い、 ω を見かけ上の剛性の変動を考慮して算出される構造物の最大固有円振動数とすると、 $\omega\delta t = 1.571$ が限界値である。3次予測の場合の (k^*/k) と $(c^*\omega/k)$ を図-6 に示す。以下、この限界を「剛性に関する限界」と呼ぶ。

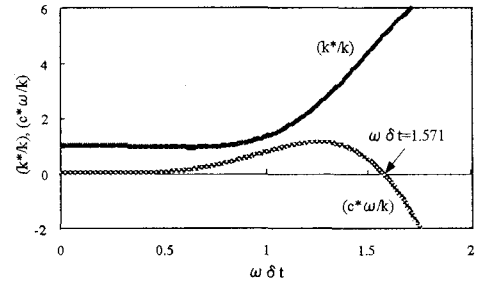


図-6 予測手法による見かけ上の剛性と減衰

(2) 供試体の質量の影響

供試体の質量に関するハイブリッド実験の安定性と精度について検討する必要がある。図-3 において $k = 0$ とすると、取り扱う運動方程式は式(12)となる。

$$M\ddot{x} = f + q = f - m\ddot{x}'' \quad (12)$$

式(12)をラプラス変換すると式(13)となる。

$$MXs^2 = F - mX''s^2 = F - mHXs^2 \quad (13)$$

ただし、 s はラプラス変換子、大文字は小文字のラプラス変換である。 X'' は X に遅れ補償処理をし、その結果として加振機により実現される変位なので、これらの処理の伝達関数を H とし、 $X'' = HX$ と表した。以上の関係は図-7 に示すブロック線図で示すことができる。

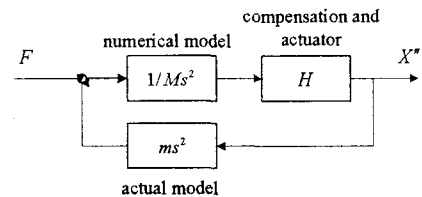


図-7 質量を考慮したハイブリッド実験のブロック線図

このシステムが安定であるためには、一巡伝達関数 Δ のゲインが 1 未満であることが必要である。 Δ は式(14)と書け、満たす条件は式(15)となる。

$$\Delta = \frac{m}{M}H \quad (14)$$

$$\frac{m}{M} < \frac{1}{|H|} \quad (15)$$

すなわち、数値モデルの質量 M に対する供試体の持つ質量 m の比(以下、質量比 μ と呼ぶ)がある値を超えると試験処理が不安定になる。補償処理によるゲインの増幅がない理想の場合、すなわち、 $|H| = 1$ のときには、その限界値は 1 である。また、式(8)の予測式を用いた場合、加振機に遅れ時間があると考えると、 $|H|$ の最大値は係数

a_j の絶対値の総和となるので、現状の 3 次予測補償では表-1 より 1/15 となる。従って、現状の手法では供試体の質量を小さくする工夫が必要である。なお、この結果は数値モデルと補償処理 H によって決まるものであり、数値解析のアルゴリズムには左右されない。以下、この限界を「質量に関する限界」と呼ぶ。

2.3.3 予測手法の改良⁹⁾

現状の手法では、質量比 μ が 1/15 と質量に関する限界がかなり小さいため、この限界を拡大する手法について説明する。

質量に関する安定限界を拡大するためには、予測式の係数の絶対和を小さくする必要がある。そのための一手段が、式(8)による予測に使用するデータ x_j の時間間隔を加振機応答遅れ時間 δt よりも大きくすることである。すなわち、現時刻から $(\alpha \times \delta t) \times j$ だけさかのぼった計算値 x_j を用いて、 δt あとの変位 x' を予測する(以下、これを「改良手法」と呼ぶ)。3 次予測の場合、予測式は式(16)となる。

$$\begin{aligned} x' = x_0 & \left\{ \left(\frac{1}{6} \right) \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \left(2 + \frac{1}{\alpha} \right) \left(3 + \frac{1}{\alpha} \right) \right\} \\ & + x_1 \left\{ - \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(2 + \frac{1}{\alpha} \right) \left(3 + \frac{1}{\alpha} \right) \right\} \\ & + x_2 \left\{ \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \left(3 + \frac{1}{\alpha} \right) \right\} \\ & + x_3 \left\{ - \left(\frac{1}{6} \right) \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \left(2 + \frac{1}{\alpha} \right) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、 α を「予測時間比」と呼び、 $\alpha = \Delta t / \delta t$ である。従って、ゲインの最大値 $|H|_{\max}$ は式(17)で表される。

$$|H|_{\max} = \frac{1}{6} \left\{ 8 \left(\frac{1}{\alpha} \right)^3 + 36 \left(\frac{1}{\alpha} \right)^2 + 40 \left(\frac{1}{\alpha} \right) + 6 \right\} \quad (17)$$

安定限界である質量比 $\mu_{cr} = 1/|H|_{\max}$ を図示すると図-8 となり、予測時間比 α を大きくすると μ_{cr} が大きくなり質量に関する限界が拡大し、 $\alpha \rightarrow \infty$ では理想の状態である $\mu_{cr} = 1$ となることがわかる。

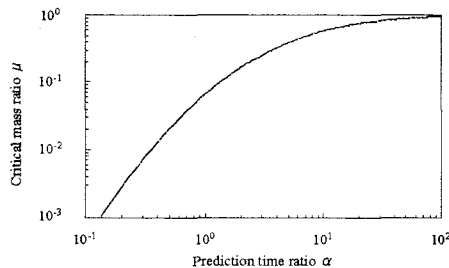


図-8 改良手法による質量に関する安定限界

しかし、 $\alpha > 1$ とすることは、現状手法よりさらに過去のデータを用いて予測することになるので、剛性に関する限界が悪化する。式(16)による改良手法についても式(9)と同様に見かけ上の負荷減衰 c^* と剛性の変動 k^* を求

めてみる。一例として $\alpha = 1.5$ の場合を従来式である $\alpha = 1$ と比較したのが図-9 である。 c^* が負となる $\omega \delta t$

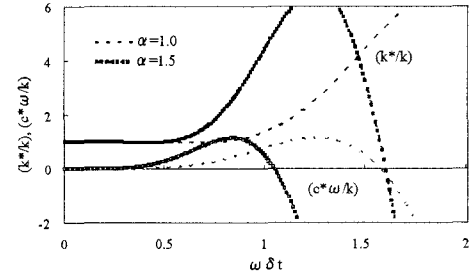


図-9 改良手法による見かけ上の剛性と減衰 (以下、 $(\omega \delta t)_{cr}$ と記述する) が安定限界であるが、 $(\omega \delta t)_{cr}$ が小さくなり剛性に関する安定限界が悪化している。なお、補償の誤差によって、剛性に変動も生じ $\omega \delta t$ が大きい領域では、見かけ上現れる固有振動数が本来の固有振動数より高くなる。安定限界を考える場合にはこの現象も考慮する必要がある。この影響を最も受けるのは、一自由度系において供試体に剛性のみ期待する場合で、見かけ上の固有振動数は剛性の平方根に比例する。剛性と質量に関する安定基準の関係を図-10 に示す。

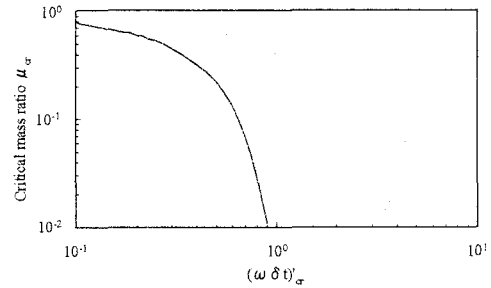


図-10 剛性と質量に関する安定基準の関係
このように、剛性に関する限界と質量に関する限界は、相反する関係にあることが明らかにされている。

2.3.4 予測パラメータ修正手法

予測の高精度化には、振動数や応答遅れ時間に応じて振幅補正量や設定遅れ時間などの予測パラメータの変更の必要がある。修正手法について簡単に説明する。

安定条件を式(18)に示す。

$$0 < \delta \alpha / \Delta \alpha < 2 \quad (18)$$

この比の 3 次予測の場合を式(19)に示す。

$$\delta \alpha / \Delta \alpha = \{ 6 \cos(1 + \alpha)X - 8 \cos(1 + 2\alpha)X + 3 \cos(1 + 3\alpha)X \} / \{ 4 \cos X - 6 \cos(1 + \alpha)X + 4 \cos(1 + 2\alpha)X - \cos(1 + 3\alpha)X \} \quad (19)$$

ただし、 $\omega \delta t = X$ とし、 $\delta \alpha$ は剛性の変動から求めた α の変動量、 $\Delta \alpha$ は負荷減衰から求めた α の変動量である。この比が負の値をとる場合や 2 を超える値をとる場合は、加振機応答遅れ時間が修正のたびに発散する。この手法を用い、予測パラメータを修正することで精度のよい予測ができる。

3. 実時間ハイブリッド実験システムを用いた実験

3.1 目的

この章では、2 章で説明した実時間ハイブリッド実験

システムを用いて線形実験を行い、解析結果と比較することで実時間ハイブリッド実験システムの線形範囲内の適用性を確認することを目的とする。

3.2 ハイブリッド実験を用いた実験例

3.2.1 実験モデル

実験モデルを図-11に示す。

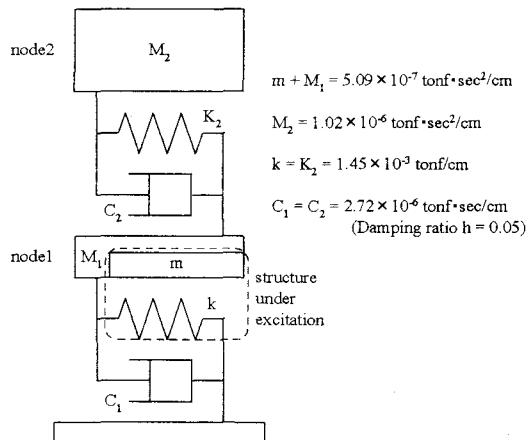


図-11 実験モデル

図-11 のモデルは、質量比 $\mu = 0.2$, $(\omega\delta)'_{cr} = 0.16$ である。ただし、加振機応答遅れ時間は 3msec である。図-10 より、質量に関する限界と剛性に関する限界の制約を満たし、式(19)より修正手法の制約を満たしていることが分かる。

3.2.2 外力

外力波形を図-12に示す。振幅を 50gal, 周波数を 3Hz, 刻み時間を 10msec, 加振時間を 10sec とする。外力は、図-11 の node2 に作用するものとする。

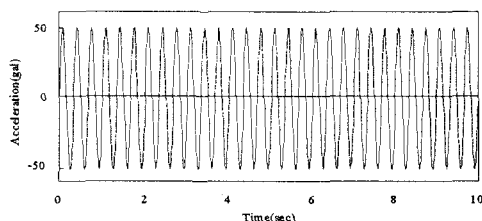


図-12 外力波形

3.2.3 結果

図-11 のモデルに図-12 の外力が作用するハイブリッド実験の node1 の変位に関する結果を図-13, node2 の変位に関する結果を図-14に示す。

ここで、実験結果と比較する解析結果というのは、構造解析ソフト SAP2000 を用いて出力した結果である。本来、対象構造物全体に対して、振動実験をした結果と比

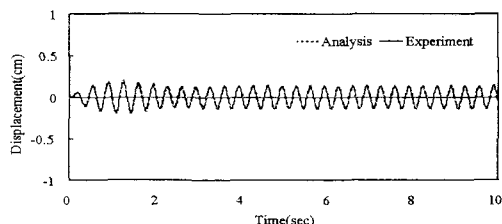


図-13 ハイブリッド実験による node1 の変位

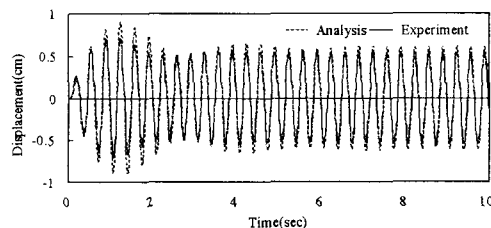


図-14 ハイブリッド実験による node2 の変位

較することが正しい確認方法であるが、今回は線形振動実験ということもあり、数値計算と比較することにした。

3.2.4 考察

図-13 の結果から明らかなように、node1 の変位は解析結果と一致した。また、図-14 より、node2 の変位は多少の誤差はあるものの、解析結果とほぼ一致したと言える。つまり、ハイブリッド実験を用いた線形範囲内での実験に対して、ハイブリッド実験の適用性が確認できた。

3.3 シミュレーションを用いた実験例

3.3.1 実験モデル

実験モデルを図-11 とする。

3.3.2 外力

外力波形を図-12 とし、図-11 の node2 に作用するものとする。

3.3.3 結果

図-11 のモデル、図-12 の外力に対するシミュレーションの node1 に関する結果を図-15, node2 に関する結果を図-16 とする。ただし、比較する解析結果は、ハイブリッド実験の時と同様、構造解析ソフト SAP2000 を用いている。

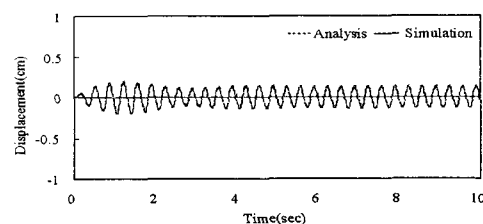


図-15 シミュレーションによる node1 の変位

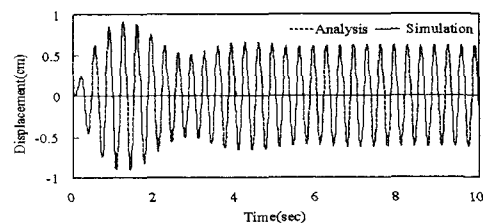


図-16 シミュレーションによる node2 の変位

3.3.4 考察

図-15 と図-16 より、node1 と node2 の変位に関する実験結果は、解析結果と一致した。これにより、シミュレーションを用いた線形範囲内での実験に対して、適用性が確認できた。

3.4 まとめ

この章では、実時間ハイブリッド実験システムを用い

た線形実験に対する適用性を確認した。

今後は、非線形要素の供試体に対するシステムの適用性を確認するとともに、全体を振動実験した結果と比較することで、ハイブリッド実験の適用性を確認する。

4. 保有性能評価法の提案

この章では、実時間ハイブリッド実験システムを用いて、構造物の保有性能を評価する手法を提案する。

保有性能評価法の流れを図-17に示す。以下に、図中の(a)~(g)の評価項目の詳細について述べる。

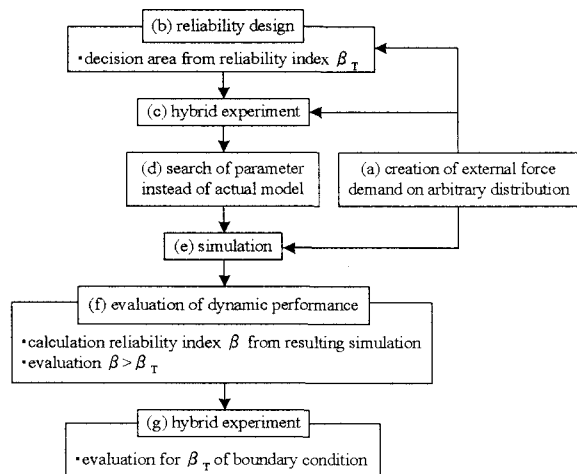


図-17 保有性能評価法の流れ

(a) 外力波形作成

振幅および振動数が任意の分布に依存する外力波形を作成する。図-18に外力波形作成の一例を示す。定常確率過程に振幅包絡線を掛け合わせることで、非定常確率過程の外力波形を作成する。

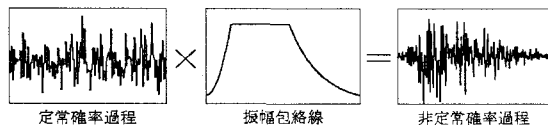


図-18 外力波形作成の一例

(b) 信頼性設計

(a)で作成した外力波形が構造物に作用するものとして、目標信頼性指標 β_T を確保するように供試体の曲げ部材を設計する。信頼性設計された供試体のモデルを作成する。

(c) 供試体の特性を知るためのハイブリッド実験

(a)で作成された外力波形の数波と(b)で設計された供試体を用いて、ハイブリッド実験を行う。この実験の目的は、供試体の持つ非線形要素特性を知ることである。

(d) 供試体の特性パラメータの決定

(c)で非線形要素特性が既知となったため、非線形要素特性も模擬できるシミュレーションに必要なパラメータを求める。非線形モデルとしては、バイリニアモデル、トリリニアモデル、ランベルグ・オズグッドモデルのいずれかのモデルを用いる。

(e) シミュレーション

(a)で作成した外力波形と(d)で求めた非線形モデルのパラメータを用いて、シミュレーションを行う。ここで提案する方法では、実モデルの非線形特性をシミュレーションに反映しているので、実モデル実験と同等の精度の実験が、シミュレーションにより簡単に数多くの実験が実施できるのが特長である。

(f) 保有性能評価

(e)のシミュレーション結果からモデルの持っている β を算出する。その β と目標信頼性指標 β_T を比較・評価することで、このモデルの保有性能(目標信頼性指標 β_T)を評価する。

(g) ハイブリッド実験を用いた実証

(e)でそのモデルが目標信頼性指標 β_T を保有していたと評価されれば、本当にそのモデルがその信頼性を保有しているかどうかを、ハイブリッド実験を用いて実証する。方法としては、シミュレーションで用いた外力波形の内、目標性能の限界に近い状態になった外力波形を選んでハイブリッド実験を行って、供試体の性能を検証する。

5. おわりに

本研究では、実時間ハイブリッド実験システムの詳細な説明、およびこのシステムの整合性の確認と併せて、このシステムを用いた保有性能評価法を提案した。

現段階では、線形の供試体に対する適用性を確認したに過ぎないが、今後は、非線形の供試体に対する適用性を確認し、提案した保有性能評価法を用いたハイブリッド実験を行う予定にしている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，丸善，2003.5.
- 2) 堀内敏彦，今野隆雄：加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発(第3報，非線形系構造物の実験への適用)，日本機械学会論文集，No.97-0363，日本機械学会，1998.1.
- 3) 小林寛，田村敬一：地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験，第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，d-4，土木学会，2000.3.
- 4) 堀内敏彦，中川正紀，菅野正治，今野隆雄：加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発(第1報，補償方法と1自由度系の実験への適用)，日本機械学会論文集，No.94-0932，日本機械学会，1995.4.
- 5) 堀内敏彦，今野隆雄：加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発(第5報，加振機遅れ補償手法の改良)，日本機械学会論文集，No.00-0425，日本機械学会，2001.3.
- 6) 理論地震動研究会：地震動・その合成と波形処理・，鹿島出版会，1997.5.