

鋼構造骨組の地震応答シミュレーション

Response Simulation of Steel Framed Structures during Earthquakes

大井 謙 一*

Kenichi OHI

大地震の際に構造物がどのように揺れ、どのように壊れてゆくかを調べるために、振動台実験・オンライン応答実験・数値解析などの手法がある。鋼構造骨組を対象として行った実験例・解析例を紹介しながら、これらのシミュレーション手法の耐震工学上の意義について解説する。

1. 耐震設計と地震応答シミュレーション

現在、建築構造物の耐震設計は2段構えで行うことが常識となっている。まず1番目は、建物がある使用期間中に少なくとも1回は遭遇すると予想されるような中程度の大きさの地震動を対象とするもので、骨組が弾性範囲に留まり、変形も建物の機能に支障のない範囲に納まるように設計することになっている。設計において構造物に生じさせたくない構造物のギリギリの状態のことを「限界状態 (リミットステート)」と呼ぶが、1番目の場合には、建物の機能・使用性 (サービサビリティ) を問題にしているので、「使用限界状態設計」と呼んでいる。

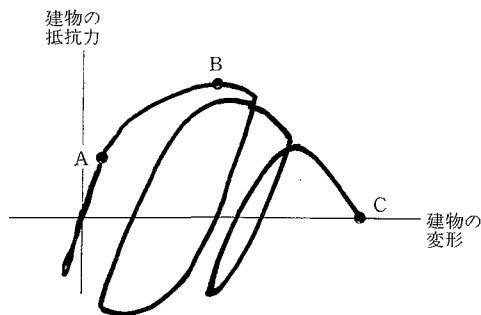
2番目は、建物の使用期間中に発生する確率は小さいが、発生しうる工学的に最大級の地震動を対象とするもので、これに対しては骨組の塑性化は許すが倒壊しないように設計し、人命や財産の損失を防ごうとするものである。これを「終局限界状態設計」と呼んでいる。

このような限界状態設計を行うには、まず、設計対象

とする地震動がどのようなものであるか (①荷重の評価)、次に、地震時に建物がどのように揺れ、どのような状態になるか (②荷重効果の評価)、最後に、設計した骨組がそのような状態に耐えうるか (③抵抗能力の評価と④限界状態のチェック)、を調べる必要がある。ここで解説する地震応答シミュレーションは②の荷重効果の評価を目的とするものである。すなわち、与えられた地震動のもとで、建物がどのように揺れどのように壊れてゆくかを予測する問題である。

2. 数値シミュレーションと実験シミュレーション

まず地震応答の数値シミュレーションの基本的な概念について述べる。平屋建ての骨組が一方向の水平地震動を受けるとき、屋根の地面に対する水平相対変位 x は



中小地震 → A点が限界
大地震・極限地震 → B～C点が限界

図1 耐震終局限界状態

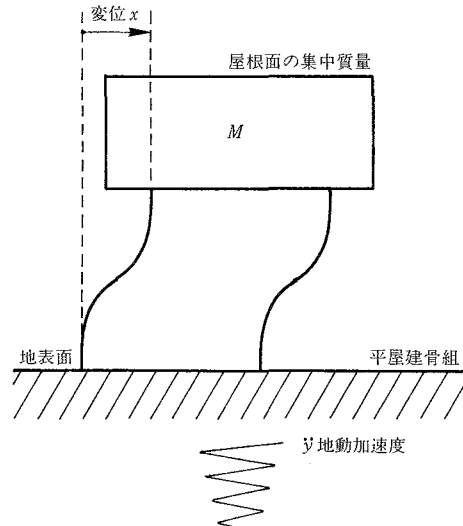


図2 平屋建物の地震応答シミュレーション

*東京大学生産技術研究所 第5部

ニュートンの運動法則により次の微分方程式を満足する。

$$M\ddot{x} + f = -M\ddot{y} \quad (1)$$

ここで、 M ：屋根面に集中すると仮定した質量

\ddot{y} ：地表面加速度

f は慣性力に抵抗する力で、広義の復元力と呼ばれている力である。構造物が弾性範囲にあり変位も微小である場合には、次のようなVoigt型の線形復元力が仮定される場合が多い。

$$f = c\dot{x} + kx \quad (2)$$

構造物が弾塑性範囲で応答したり、大きく変形して幾何学的非線形が無視できなくなったりすると、復元力 f は x および \dot{x} の非線形関数、それも記憶のある非線形関数となる。地震応答の数値シミュレーションをおこなうときには、この f の時々刻々の値を構造物の数学モデルに立脚して求め、(1)式を数値積分して変位応答(建物のゆれ)を求めるのである。非線形関数 f に直接数学モデルを仮定する場合もあるし、素材レベルでの応力ひずみ関係の数学モデルから出発して f を算定する場合もある。いずれにしても、このような数値シミュレーションの成否は f に関して仮定する数学モデルの妥当性に大きく左右される。

数値シミュレーションでは、コンピュータのメモリの上で仮定の構造物を作って、その揺れをニュートンの運動法則にしたがって計算するのであり、いわば虚構の世界でのお話である。それに対して、構造物の物理的な模型を製作して、その模型に対する実験によって地震応答を調べる実験シミュレーションの方法がある。古くから行われている実験シミュレーションとして、振動台実験がある。これは構造物の縮尺模型を振動台の上に載せ、振動台に地震の際の地面の揺れを再現させて、構造物模型の揺れを実測するという方法である。

また、約15年前に生研で世界に先駆けて開発されたシミュレーション手法¹⁾として、電算機—試験機オンラインシステムによる疑似動的地震応答実験がある。この手法は、(1)式における復元力 f の数学モデルを作らないで、これを数値計算と同時に進行される構造物模型に対する載荷実験から測定するものである。振動台実験では地面(振動台)を動的に動かすのに対して、この実験手法では地面に対する屋根の変位を計算して、この変位を屋根に強制することになる。屋根の変位は運動方程式((1)式)をStep by stepに解くことによって計算されるが、運動方程式に反映する復元力は、時々刻々、実験から測定するのである。通常載荷実験は非常にゆっくりと行われるので、復元力のうちの速度に依存する部分は無視されることになるが、仮定の粘性減衰を付加することで補正したり、最近では実応答速度の5分の1程度の動的載荷実験から復元力を測定することも可能になっている。この実験手法は、いわば実験と解析の中間的な手法であり、振動台実験に比べて比較的容易に実行することができる。たとえば、実大の骨組模型を実験するには、非常に高価で規模の大きな振動台施設が必要となるが、この実験手法では、模型を壊す能力のあるジャッキと小さなコンピュータがあればよい。

構造物の実際の挙動に基づいてシミュレーションを行い恣意的な仮定が少ないという観点、いわば実証性の観点からすると、①振動台実験、②オンライン応答実験、③数値シミュレーション、の順である。ところが、簡単に安価なシミュレーションが行えるという観点からは、①数値シミュレーション、②オンライン応答実験、③振動台実験、と順序が逆になる。特に耐震設計規準策定の

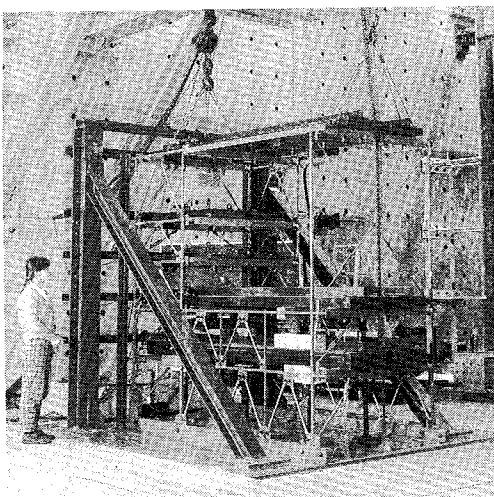


写真1 振動台実験の例 (火力発電所建家)

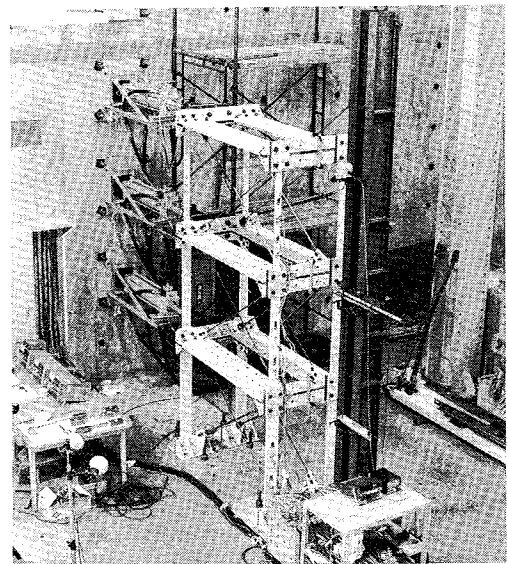


写真2 オンライン応答実験の例 (3層筋かい付骨組)

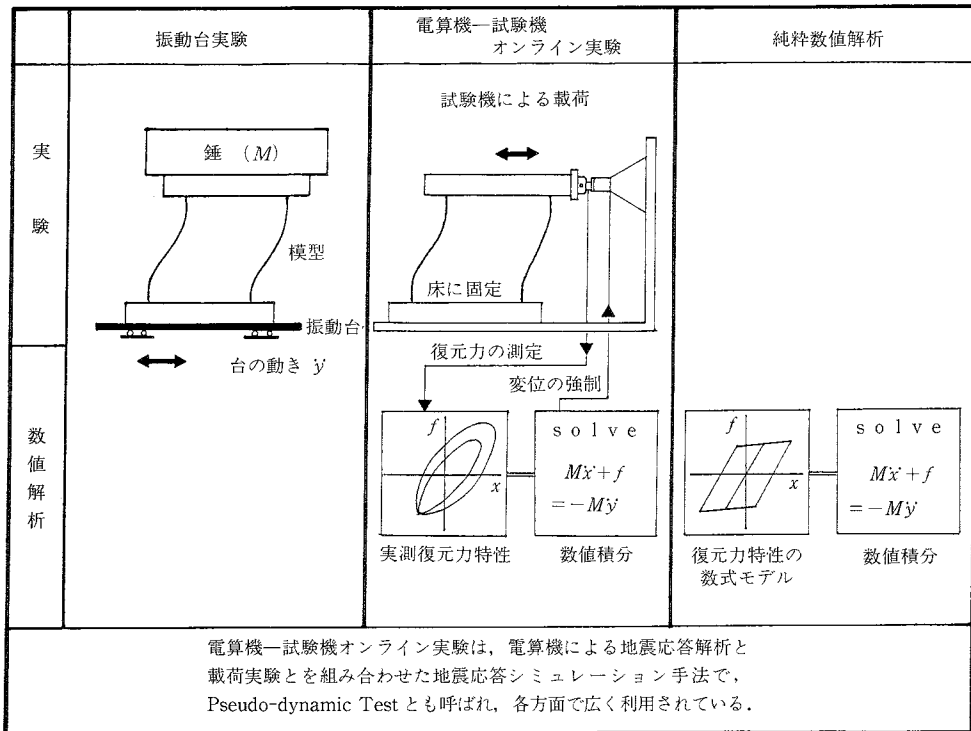


図 3 地震応答シミュレーションの比較

問題では、地震入力に大きな不確定性があり、設計される構造物も多種多様であるので、広範なパラメータにたいして数多くのシミュレーションを行わないと意味のある知見が得られない場合がある。このような点からは数値シミュレーションが絶対有利なのであるが、肝心の構造物の数学モデルがいい加減でシミュレーション結果に信頼がおけないのではどうしようもない。賢明な方法としては、比較的少数の実験シミュレーション結果と比較することによって、ある程度数学モデルの妥当性を検証してから、広範なパラメータに対して数値シミュレーションを行うことである。

3. 鋼構造骨組の地震応答実験²⁾と地震応答解析

図 4 の (1) には、著者らの研究室で数年来実行した鋼構造骨組模型に対する地震応答実験シミュレーションで観察された履歴曲線 (地震中の復元力 f と変位 x との関係) を表したものである。

図 4 の (2) には、実験履歴曲線のある数学モデルで近似して、その数学モデルに実験で観察された変位履歴を先験的に与えて履歴曲線を描いたものである。使用したモデルは図 5 に示すような 4 要素並列型バネであり、4 種類のバネ (2 個の完全弾塑性バネ、弾性バネ、スリップ型バネ) の同一変位履歴に対する復元力の和で履歴曲線を近似したものである。(1) と (2) とを比較すると、

ある程度満足のゆくモデリングが行われたような錯覚を受ける。実際一昔前までは、なんらかの数学モデルに立脚した構造解析で、この程度実験結果を近似できると大きな成功を感じたものである。

図 4 の (3) は、これらの数学モデルを数値シミュレーションに使用した結果を示したものである。これらの数学モデルの多くは数値シミュレーションに使っても良好な予測精度を有しているが、なかには僅かなモデリング誤差が引金となって大きな予測誤差を生じる場合があることがわかる。これは、弾塑性地震応答の予測の問題には、モデリング誤差に非常に鋭敏な部分があることを意味しており、この方面の研究者は常にこの事実を念頭においておく必要がある。

図 6 は、鋼構造骨組の終局限界状態設計に関係のあると思われるいくつかの応答量について、上記の数値シミュレーション結果と実験結果の比をプロットしたものである。全般的に、骨組の履歴吸収エネルギーや復元力の劣化が生じない場合の最大変形量などは簡単なモデルでも良好に予測できるが、残留変形量や復元力の劣化を伴う場合の最大変形量などは予測精度が悪いという傾向がある。特に履歴吸収エネルギーの予測精度が驚異的に良好であることがわかり、精密な弾塑性挙動の数学モデルが確立していない間は、履歴吸収エネルギーに基づいた終局限界状態設計が有用なものとなるであろう³⁾。

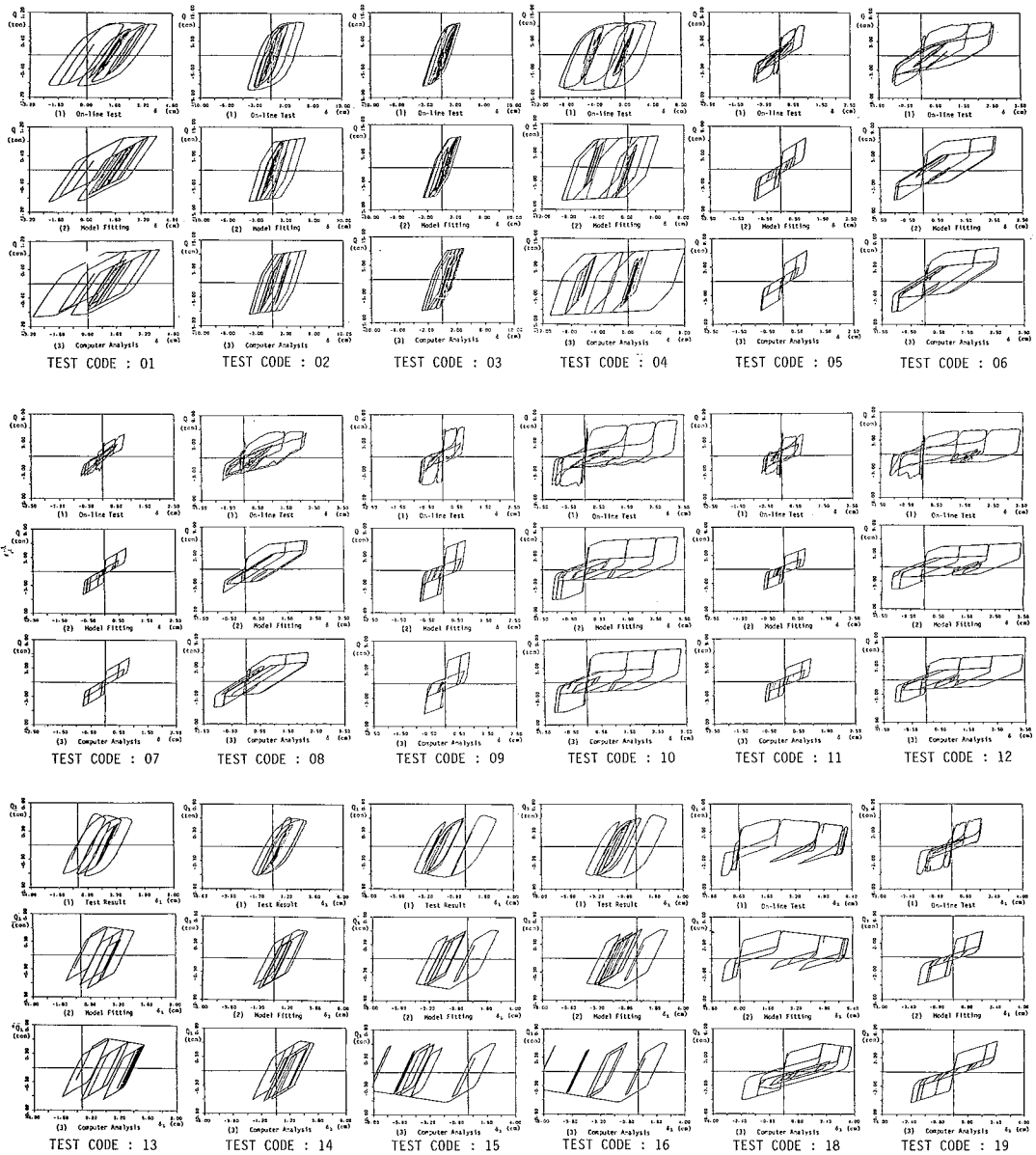


図4 実験履歴曲線・数学モデルによる近似・応答解析

4. 実験シミュレーションの意義

振動台実験やオンライン応答実験などの実証的な地震応答シミュレーション技術は、

- a) 設計構造物の耐震性能の確認、
- b) 数値シミュレーションに用いる数学モデルの妥当性の確認、
- c) 耐震終局限界状態の設定・定量化、

など、構造物の耐震設計や設計規準の策定のため有効に利用することができる。(1988年9月14日受理)

参考文献

- 1) 高梨晃一ほか：電算機一試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析(その1)～(その5)、日本建築学会論文報告集、第229号(1975.3)、第268号(1978.6)、第288号(1980.2)、第291号(1980.5)、第295号(1980.9)。
- 2) 大井謙一、高梨晃一：鋼構造骨組模型の地震応答実験における履歴性状—鋼構造骨組における弾塑性地震応答の予測精度(第1報)—、日本建築学会構造系論文報告集、第373号、1987.3。
- 3) 秋山宏：建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、1980.9。

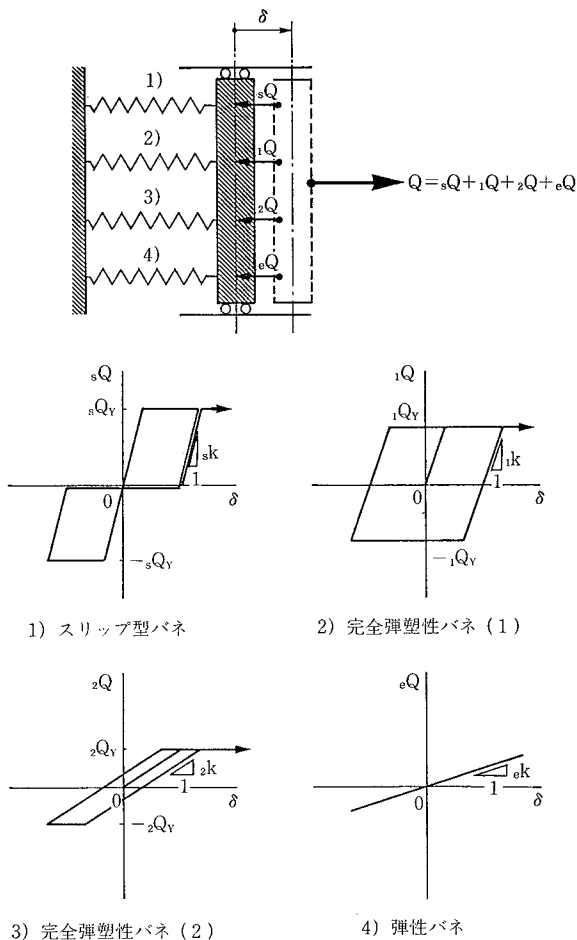
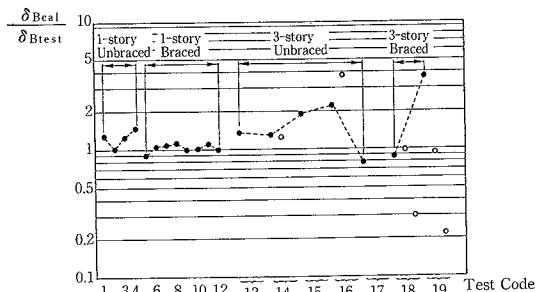
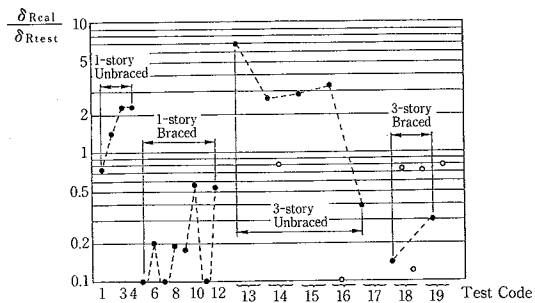


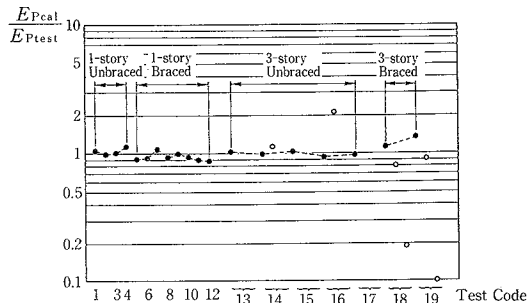
図5 4要素履歴モデル



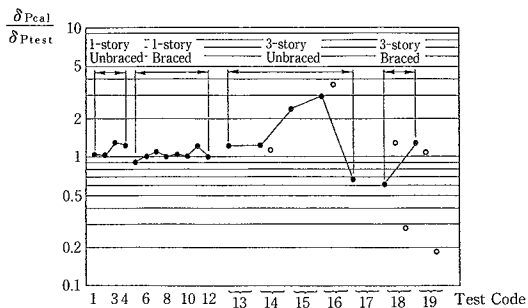
(2) 応答変位の幅
●: 最も応答量の大きな層



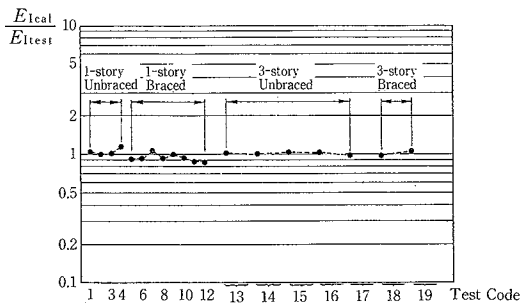
(3) 残留変位
●: 最も応答量の大きな層



(4) 履歴吸収エネルギー(各層)
●: 最も応答量の大きな層



(1) 最大応答変位
●: 最も応答量の大きな層



(5) 履歴吸収エネルギー(全体)

図6 各種応答量の予測

4) 大井謙一, 田中尚, 高梨晃一: 地震動による構造物へのエネルギー入力の統計量予測に関する基礎的考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第347号, 1986. 1.