

## ランダム外力を受ける 2 層鉄骨架構の設計点探索実験

Experimental Design Point Search on 2-Story Steel Frames Subjected to Random Loads

森 洋一\*・大井 謙一\*・嶋 脇 與 助\*・大塚 日出夫\*

Youchi MORI, Kenichi OHI, Yosuke SHIMAWAKI and Hideo OTSUKA

## 1. はじめに

荷重の不確定性を合理的に考慮する事は構造設計における重要な問題である。一方、構造物に対する要求性能はますます多様化し、従来の構造安全性・使用性といった基本的な設計目標のほか、復旧可能性、継続使用性、様々な損傷制御なども考慮されることがある。そのため解析結果に基づく単純なクライテリアでは、ある限界状態に達したかどうかを判断するのが難しくなり、構造物の実挙動の観察に基づく実証的な性能評価ツールが必要と考えられる。本稿では、数値応答解析と載荷実験とを結合させたオンライン応答実験手法を拡張し、近似信頼性解析における設計点探索解析とコンピュータ制御載荷実験とを結合させる事により、不確定外力を受ける試験構造物に対する適応載荷実験システムを開発し、塑性崩壊機構形成を対象とした設計点探索実験を行う。

## 2. 設計点探索方法

1次信頼性解析 (FORM) による設計点の決定には、次の最適化問題を解く。

$$\text{Minimize } \|u\| \quad \text{subject to } G(u) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\{u\}$  は互いに相関の無い基本ランダム変数で、平均 0、単位標準偏差をもつように標準化されており、不確定荷重のパラメータから構成されるものとする。 $G(\ )$  は、構造物の状態が許容できる時正の値、許容できない時負の値を取るような限界状態関数である。この問題を解くことによって得られる設計点  $\{u^*\}$  は限界状態面上で最も高い確率密度を持つ点になる。

通常の解析では限界状態関数として何らかの関数を具体

的に与えておくと、これに対して本稿の基本的提案は、限界状態関数を陽に与えるのではなく、同時に行われる載荷実験情報から限界状態関数値の評価を行う。各載荷時点までに得られている実験情報から、限界状態関数の構成ならびに関数値の評価を行って設計点が予測され、その設計点に向かうように試験構造物に載荷が行われる。

## 3. 鋼構造 2 層骨組の設計点探索実験

## 3.1 試験体計画

試験構造物は 2 層 1 スパン 1 構面のラーメン骨組で、図 1 に示すように全ての部材に H-125 × 125 × 5.5 × 9 を弱軸曲げがかかるように組立てたものである。鋼材は JIS SS 400 を使用し、その機械的性質は表 1 に示す。柱梁接合部ではカバープレートとスプライスプレートを通じて柱・梁のフランジの両側から高力ボルトで緊結されており、この部分は剛域とみなされる。この試験構造物は図 2 に示すように 3 つの崩壊機構形成が可能であり、それぞれ 1 層局所層崩壊、2 層局所層崩壊、2 階梁端部の降伏により起

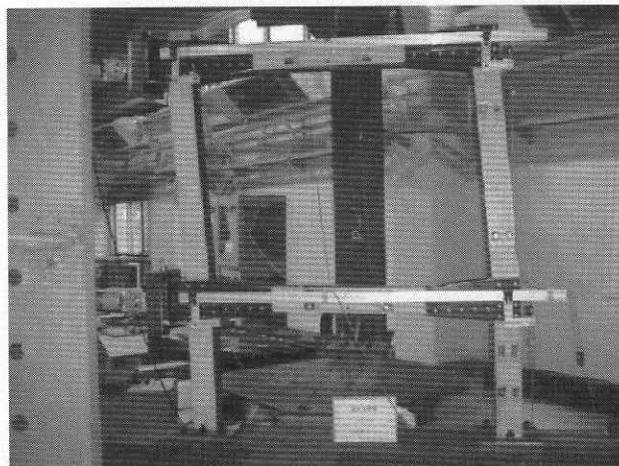


写真 1 実験中の試験体

\*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

研究速報

る全体崩壊機構である。図2において、原点に対して点対称な3対の崩壊面の内部が塑性崩壊に対する安全領域を表している。

3.2 載荷方法, 載荷条件

不確定水平力は、電気制御油圧式アクチュエータで各層の梁材芯レベルに加えられるものとし、以下に述べるランダム荷重モデルに基づく設計荷重状況を目指して目標荷重が与えられるが、試験体の安定性を考慮し、2階の試験機は荷重制御、R階の試験機は変位制御として、目標荷重値を実現した。

ランダム荷重モデルは二つの確定荷重モードのランダム

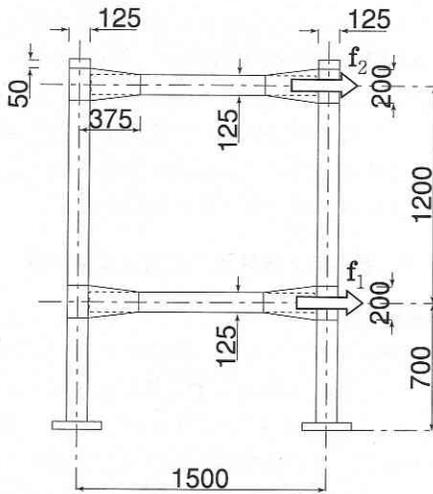


図1 試験体全体図

表1 鋼材の機械的性質

降伏応力度	引張強さ	破断伸び率
370N/mm <sup>2</sup>	490N/mm <sup>2</sup>	29%

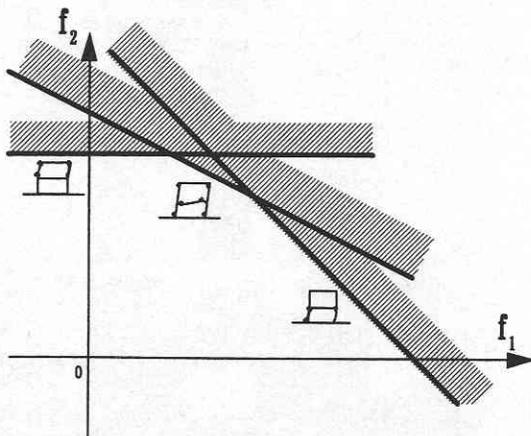


図2 試験構造物の崩壊機構

線形結合により表される。ここでは弾性地震荷重効果を想定し、次のように弾性振動の古典的規準モードに基づいて基本荷重モードを設定した。

$$\{x\} = [\phi_1, \phi_2] |q| = [\Phi] |q| \dots \dots \dots (2)$$

$$\{f\} = [\psi_1, \psi_2] |r| = [\Psi] |r| \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\{d\}$   $\{f\}$  は通常座標の変位と力、 $\{q\}$   $\{r\}$  はモード座標の変位と力、 $\{\phi_j\}$  はj次の刺激関数ベクトル、 $[\Psi] = [\Phi]^T$  の関係を持っている。質量マトリクスに関するモードの直交性を考慮すると  $\{\psi_j\}$  は  $[m] \{\phi_j\} / m_j^*$  で与えられる。 $(m_j^*$  はj次の有効質量)

本実験においては、ランダム荷重ベクトルは  $\{f\} = r_1 \{\psi_1\} + r_2 \{\psi_2\}$  で与えられる。 $r_1, r_2$  はランダム変数で、 $\{\psi_1\} \{\psi_2\}$  は決定している基本荷重モードである。表2に示すように、 $r_1, r_2$  の平均は0とし、標準偏差は1次モードが卓越する場合と2次モードもかなり混入する場合の2ケースの実験を行った。

3.3 限界状態と探索アルゴリズム

本実験の限界状態は崩壊機構の形成とする。理論塑性解析では生じる崩壊機構に応じて、限界状態関数は以下のように記す事が出来る。

$$G(\{u\}) = \{\Delta\theta_p\}^T \{M_p\} - \{\Delta x_p\}^T \{p\} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\{\Delta x_p\}$  は塑性変位増分、 $\{\Delta\theta_p\}$  は塑性ヒンジ回転増分である。

実験前には構造物の崩壊機構の形は未知であるが、載荷実験中に測定される節点変位増分の塑性成分を、その時点で形成されようとしている崩壊機構の形とみなして探索を行う。この情報だけでは限界状態面の位置を予測することはできないが、図3で示すように設計点の存在する方向を

表2 設計点探索実験ケース

	case(1)	case(2)
$\{\psi_1\}$	[ 0.204 0.796 ]	
$\{\psi_2\}$	[ 1.345 -0.345 ]	
$E[r_1], E[r_2]$	0.0	
$\sigma_1 / \sigma_2$	3.0	1.0
実験システムに認識された崩壊機構	2層局所層崩壊	2層局所層崩壊
	↓	↓
	全体崩壊	全体崩壊
	↓	↓
	2層局所層崩壊	1層局所層崩壊

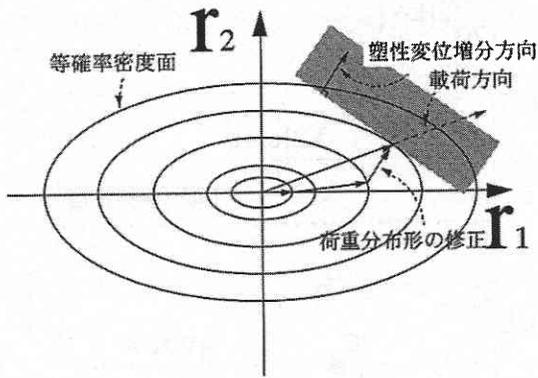
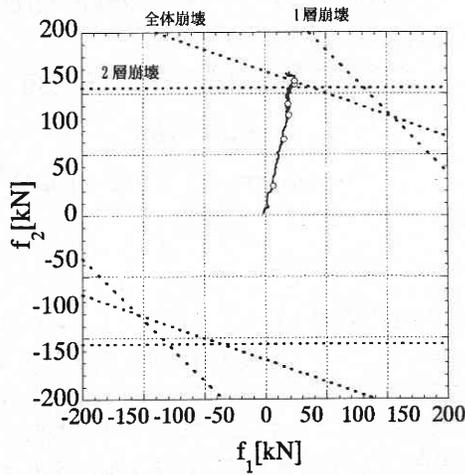


図3 荷重分布形の修正方法

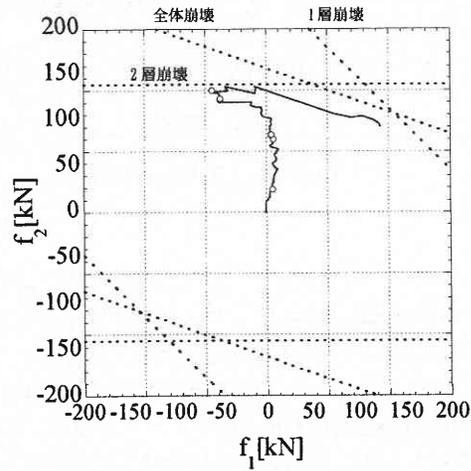
予測できるので、荷重方向を修正する。実験開始時には1次の荷重モードのみを用いるが、僅かでも塑性変形が観測された時点で上記の方法により荷重荷重分布が修正されることになる。

4. 実験結果

図4, 5は軸をそれぞれ各階の復元力 $f$ , それをモード座標系に変換した $r$ で実験の軌跡を示したもので、(a)で1次モードが卓越する場合、(b)で2次モードが卓越する場合をそれぞれ示している。図6(a)は1次モードが卓越する場合、図6(b)は2次モードが卓越する場合について、設計点探索実験中の2階・R階位置の塑性変位増分比

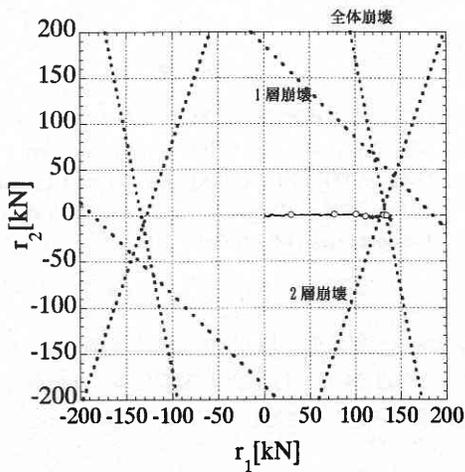


(a) case(1) 1次モード卓越

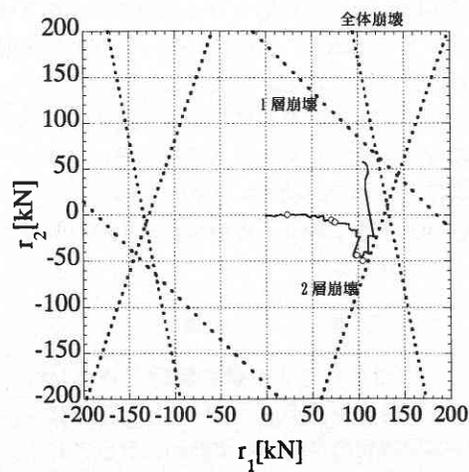


(b) case(2) 2次モード卓越

図4 荷重進行図 (f空間)



(a) case(1) 1次モード卓越



(b) case(2) 2次モード卓越

図5 荷重進行図 (r空間)

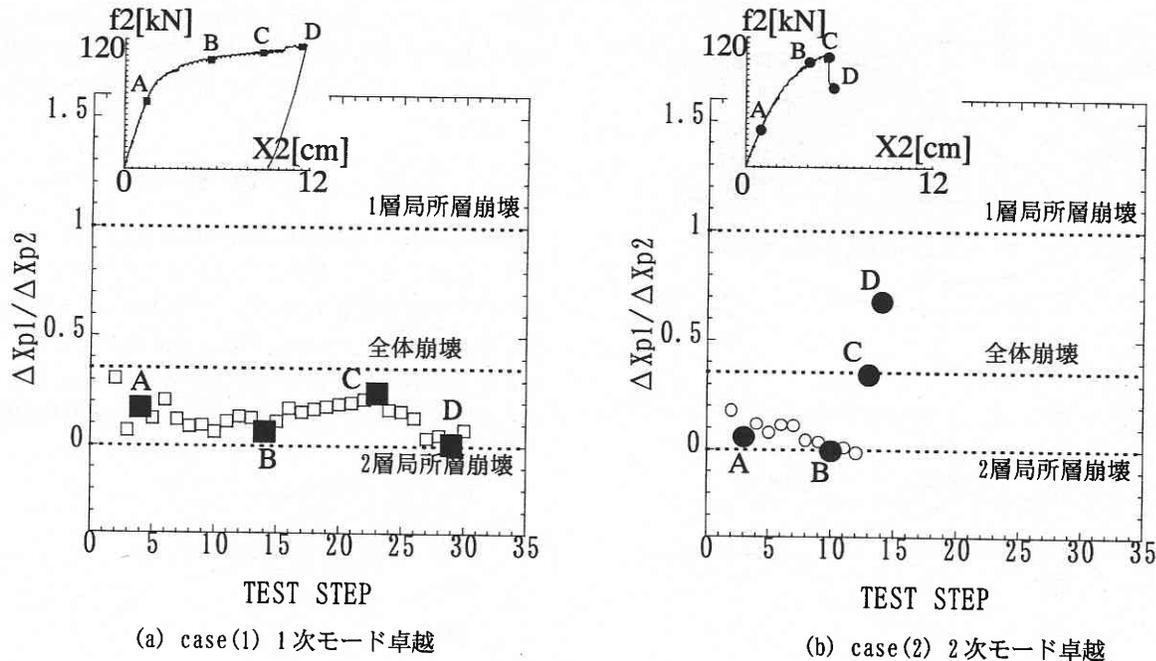


図6 塑性変位増分図

(実験システムが認識した値)と、単純塑性理論(非硬化)による崩壊機構形の塑性変位増分比を点線で示している。1次モードが卓越するcase(1)の場合、2層局所層崩壊と全体崩壊との中間的な崩壊形を実験システムが認識していることが観察されたが、荷重分布形はほぼ1次モードを維持していた。1次と2次の荷重形の標準偏差が等しく、2次モードが卓越しているといえるcase(2)では、弾性域の初期段階では1次の荷重形が支配的であったが、2層の柱の降伏後は実験システムが構造物の現在の状況を2層局所層崩壊に近い形で認識し、2次荷重モードの寄与を増やした。さらに降伏の進んだ後、歪硬化により第2層の柱の抵抗が増し、その結果第1層の柱が降伏を開始し、第1層の塑性変位増分が増加し始め、システムはそれに応じて1層局所層崩壊に近い形で認識し、荷重分布形を大きく変化した。図6(b)でも2層局所層崩壊から1層局所層崩壊へ向かったことが分かる。

5. ま と め

FORMを用いた設計点探索を載荷実験と結合した。このハイブリッド設計点探索手法においては、限界状態関数の値や構成は実構造物の挙動から実験的に評価される。限

界状態を崩壊機構の形成とした、ランダムな水平力を受ける実験を行い、その結果から、特に振動の高次モード成分が無視できない時には考慮すべき荷重分布形は構造物の崩壊形に依存することを示している。等価静的な性能評価として固定した荷重分布形でpush overする場合があるが、これに対して本実験システムは実構造物の挙動を観測しながら荷重分布形を適応的に変更して実験を行うことができる。

(2001年9月7日受理)

参 考 文 献

- 1) 大井, 方: 載荷実験併用によるハイブリッド設計点探索, 日本建築学会学術講演梗概集(九州) B-1, pp. 13-14, 1998. 9.
- 2) OHI, FANG, SHIMAWAKI: An Adaptive Loading System for Hybrid Design Point Search on Steel Frames Subjected to Random Loads, ERS Bulletin, 2001.

謝 辞

本研究の一部は平成13年度科学研究費補助金基盤研究(B)展開No. 13555154「設計点探索と載荷実験とを結合した実証的構造性能評価システムの開発」の助成を受けた。