

特集 7
研究速報

多構面筋かい付き立体骨組の部分構造ハイブリッド地震応答実験

Substructuring Hybrid Earthquake Response Tests on Multi-bay Braced Space Frames

林 暁光*・大井 謙一*・高梨 晃一*・原田 和明**
李 昇宰*・嶋 脇 與助*・近藤 日出夫*

Xiaoguang LIN, Kenichi OHI, Koichi TAKANASHI, Kazuaki HARADA,
Seung-Jae LEE, Yosuke SHIMAWAKI and Hideo KONDO

1. はじめに

火力発電所建屋などのエネルギー関連基幹施設では、筋かい等の耐震要素が構面間で遍在することが多く、また床を介した慣性力の伝達に関しても、吹き抜け・梁抜けなどの影響でいわゆる剛床仮定が成立しない場合が多く、構造解析を複雑にしている。鉄骨軸組筋かい部材については、座屈、座屈後の耐力・剛性低下、弛緩などの影響で、鉄骨ラーメン部材の呈する紡錘形の履歴挙動と異なり、複雑な履歴挙動を呈する。

このような骨組構造の地震時における構造挙動を把握するために通常コンピューターによる数値解析が用いられるが、弾塑性域の復元力特性を表現する数式モデルを与えれば、骨組の応答を計算することができる。しかしながら、数値解析の結果が数式モデルの妥当性に大きく左右されるので、実験による検討が望まれる。

実験の手段としては、振動台実験のほか、コンピューターと載荷装置を連携したオンライン地震応答実験がある。しかし、火力発電所などのプラント建屋は大規模であるため、実大模型実験で架構の全体挙動を調べることがきわめて困難である。ここでは、筋かいの遍在、その配置による偏心、床の非剛床性などを考慮した多構面骨組モデルに対して、部分構造法をオンライン応答実験法に組み込んだハイブリッド地震応答実験という手法を用いて弾塑性地震応答シミュレーションを行う。本論では、この多構面筋かい付き立体骨組のハイブリッド地震応答実験システムおよび実験結果について報告する。

2. 実験概要

実験に使用する多構面立体骨組モデルは、図1で示すように4つの構面と3つのせん断床によって構成されており、4構面のうちの2面がそれぞれ2本の筋かいによって補強される。筋かい配置の偏心を考慮して、筋かいが片側配置(第1・第2構面)される偏心率の大きいモデルと、1つおきに(第1・第3構面)配置される偏心率の小さいモデル、および両妻面に(第1・第4構面)配置される対称モデルの計3種類を設定した。

せん断床の剛性については、剛床と柔床の2種類を考慮し、柔床の場合の床剛性は1つの構面に配置される2本の筋かい材の初期水平弾性剛性と等しくなるように決めている。また、剛床は非対称モデルのみ対象とするので、合計5つの実験ケースとなる。

ハイブリッド地震応答実験では、まずこの立体骨組モデルに対して、図2で示しているように4つの構面と3つの床の計7つの部分構造に分解する。それから、さらに1つの筋かい付き構面に対して2つの筋かいと1つのラーメン

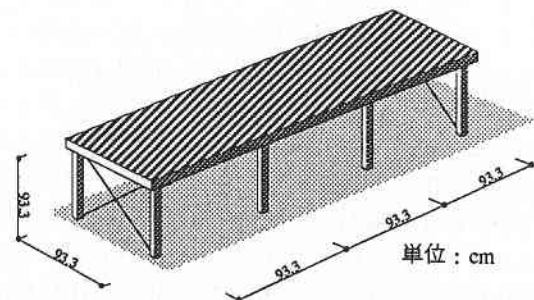


図1 多構面立体骨組モデル

*東京大学生産技術研究所 第5部

**東京電力(株)(民間等との共同研究員)

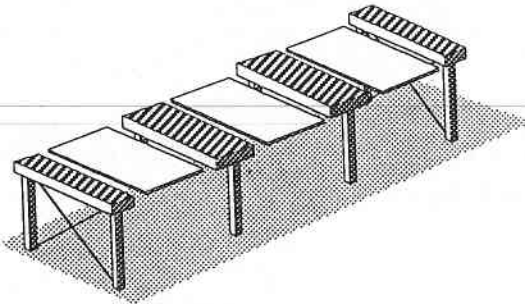


図2 部分構造への分解

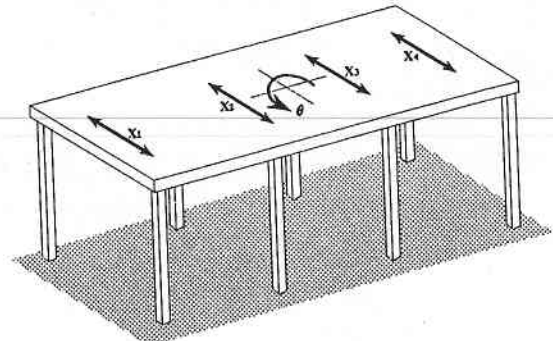


図4 5自由度立体振動モデル

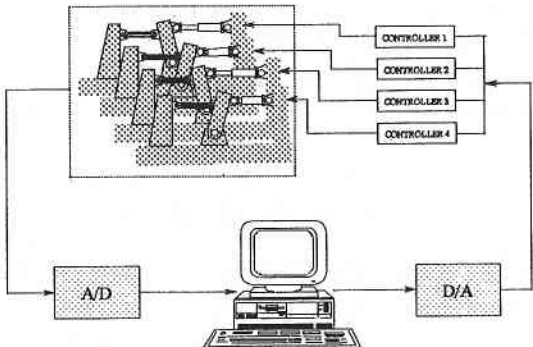


図3 多構面ハイブリッド地震応答実験システム

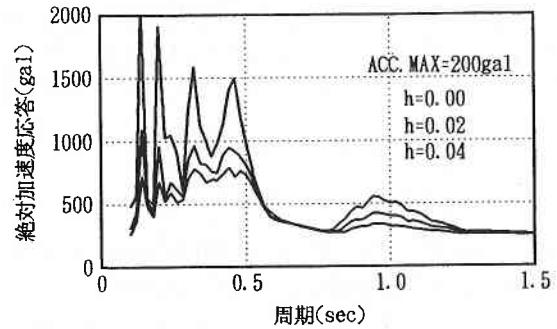


図5 八戸(EW)補正地震波の応答スペクトル

表1 試験骨組の諸元

部材長 (cm)	断面積 (cm ²)	降伏応力 (ton/cm ²)	断面2次モーメント (cm ⁴)	細長比 λc	処女座屈荷重 (ton)	ブレース1対の水平剛性 (ton/cm)	座屈後安定耐力 (ton)	ブレース1対の水平耐力 (ton)
132.0	3.69	3.1	2.31	2.0	2.29	58.70	0.87	8.71

対引張りブレースのフレーム分担率	フレームの実際分担率	フレームの水平耐力 Fy (ton)	フレームの水平剛性 K ₁ , K ₂ , K ₃	フレーム最大耐力 (ton)	総質量 (ton)	周期 (sec)	P-Δ 効果無視時の周期
0.5	0.48	4.04	6.50, 0.03K ₁ , 0.0	1.3 Fy	218.8	0.25	0.248 sec

の計3つの部分に分離する。この分解した骨組構造モデルにおいて、筋かい付き構面のラーメン部分、ラーメン構造、構面間の床バネの挙動については、復元力特性モデルを仮定し、仮想構造部分としてコンピュータ内でシミュレートする。筋かい材のみを抽出し、全体解析と並行して載荷実験を行う。筋かいの非対称配置の場合には4本の筋かいを試験体として同時載荷するが、筋かいが両妻面に配置される場合には、モデルの対称性から1つの実験につき2本の筋かいを試験体として同時載荷する。実測から得られる復元力特性を全体系の地震応答解析にフィードバックさせて、応答計算を行う。図3はこの多構面ハイブリッド地震応答実験のシステム構成を示している。

試験体については、SS400級鋼材を用いてH形断面の筋かい材を製作した。表1は筋かい試験体および仮定され

た骨組モデルの諸パラメータを示している。筋かい材およびフレームの分担率については、フレーム部分の終局耐力が引張筋かいのみを有効としたときの骨組全体の終局耐力に占める割合 $\sum F_f / (\sum F_f + \sum F_{bt})$ を0.5と仮定しているが、圧縮筋かいが若干寄与するので、実験の分担率 $\sum F_f / (\sum F_f + \sum F_{bt} + \sum F_{bc})$ は表1に示すように、若干小さくなる。

また、弾性1次固有周期が0.25秒となるように総慣性質量を決めている(後述するように、地震波の時間軸を圧縮するので0.5秒の系に相当する)。ここで、床に対する各構面の分担面積を考慮して、両妻面の質量をそれぞれ総慣性質量の1/6、その他の構面の質量を総慣性質量の1/3と設定している。

多構面骨組モデルに対して、図4で示しているように4

の構面変位自由度に床剛体回転の自由度を加え、計 5 自由度の立体振動モデルとして扱う。振動方程式を次式のよ
うにまとめることができる。

$$\left. \begin{aligned} [M] \{\ddot{x}\} + [K_{xx}] \{x\} + [K_{x\theta}] \theta + \{F_f\} + \{F_b\} + \{F_{x\phi\delta}\} \\ = -[M] \{\ddot{y}\} \\ \text{Im} \ddot{\theta} + [K_{\theta x}] \{x\} + K_{\theta\theta} \theta = 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、

$\{F_f\}$: 仮想フレームの復元力

$\{F_b\}$: プレスの反力による水平復元力

$\{F_{x\phi\delta}\}$: P-Δ 効果による力

$$[K_{xx}] = \begin{bmatrix} k_A & -k_A & 0 & 0 \\ -k_A & k_A+k_B & -k_B & 0 \\ 0 & -k_B & k_B+k_C & -k_C \\ 0 & 0 & -k_C & k_C \end{bmatrix}$$

$$[K_{x\theta}] = \begin{bmatrix} k_A \cdot s_A \\ k_B \cdot s_B - k_A \cdot s_A \\ k_C \cdot s_C - k_B \cdot s_B \\ -k_C \cdot s_C \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix}, \quad \{F_{x\phi\delta}\} = \begin{bmatrix} -m_1 g / h_1 \\ -m_2 g / h_2 \\ -m_3 g / h_3 \\ -m_4 g / h_4 \end{bmatrix}$$

$$K_{\theta\theta} = k_A \cdot s_A^2 + k_B \cdot s_B^2 + k_C \cdot s_C^2$$

$$[K_{\theta x}] = [k_A \cdot s_A \quad k_B \cdot s_B - k_A \cdot s_A \quad k_C \cdot s_C - k_B \cdot s_B \quad -k_C \cdot s_C]$$

上記の振動方程式において、筋かいの復元力履歴特性は
載荷実験によって計測されるが、仮想ラーメン部分の復元
力特性には、移動スケルトンがバイリニアで、履歴部分が
Ramberg-Osgood 曲線になるスケルトンシフトモデル (文
献¹⁾) を仮定した。せん断床は弾性要素としてバネ定数を
 k_A, k_B, k_C としている。入力地震波は、1968年十勝沖地
震八戸 EW 成分の継続時間10秒間の記録の時間軸を2分
の1に圧縮した波形を用いた。これは製作した筋かい試験
体に対応する階高が現実的な骨組寸法の約4分の1程度で
あることを考慮した措置である。使用した八戸 (EW) 補
正地震波の応答スペクトルを図5に示している。

応答解析の数値積分には中央差分法を利用している。地
震応答シミュレーションの手順としては、たとえば i ス
テップでは、まず前ステップの応答計算で得られた当ス
テップの変位 $\{x\}^i$ から各筋かいの変位を計算し、この値
をコンピュータよりコントローラに送り込み、載荷実験の

目標変位としてアクチュエータを制御する。制御が完了し
たら、アクチュエータのロードセルから荷重を読み取り、
 i ステップの筋かい復元力 $\{F_b\}^i$ に変換する。これによ
って、 i ステップにおける中央差分法の数値計算条件がそ
うなので、 $\{x\}^{i+1}$ を求め、 $(i+1)$ ステップへ進めること
ができる。上記の手順を繰り返すことによって、この多構面
立体骨組モデルのハイブリッド地震応答実験を遂行させる。

3. 実験結果

実験結果を示すグラフの中の点線は数式モデルによる純
粋数値解析の結果を示すものである。この純粋数値解析で
は、筋かいの復元力特性に若林らの提案による復元力特性
モデルを適用しており、その以外の解析条件はハイブリッ
ド地震応答実験と同じである。また、実験と純粋解析とも
地震入力レベルを200 gal としている。

載荷実験によって測定された筋かいの復元力履歴特性を
図6で示している。各実験では処女座屈荷重の大きさが一
致しておらず、そのばらつきが大きい。予測値より2倍以

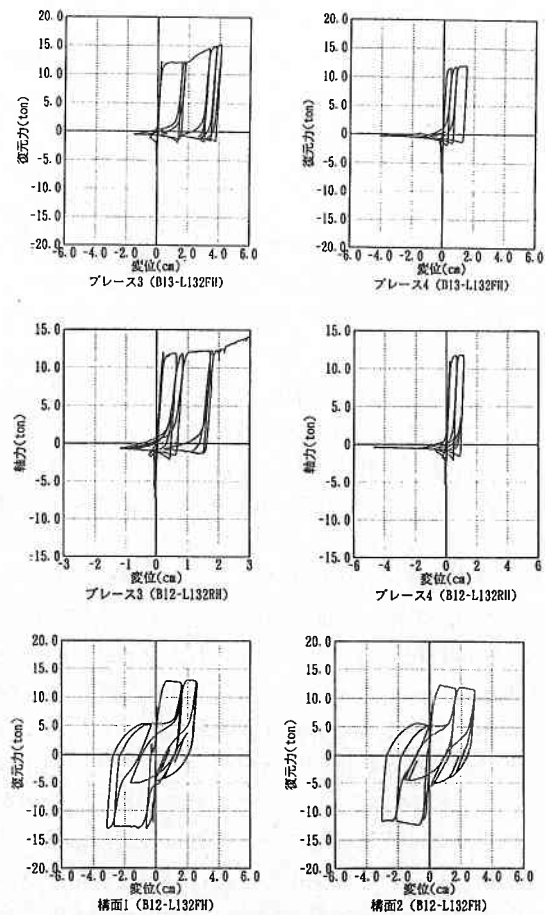


図6 地震応答実験時の筋かい実測復元力履歴特性

研 究 速 報

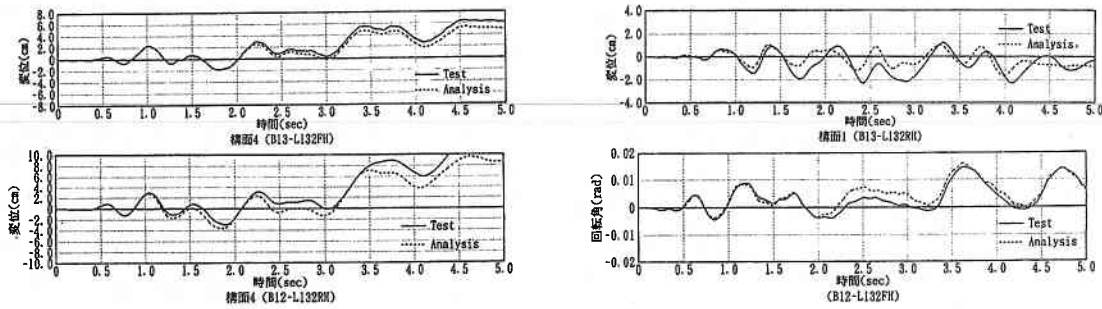


図 7 変位の時刻歴応答

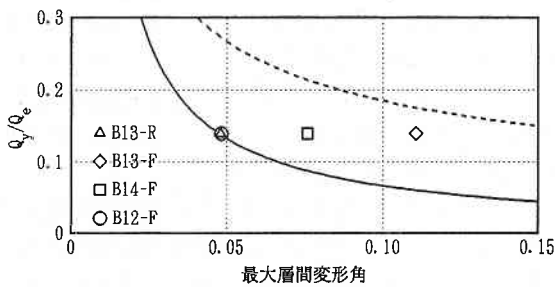


図 8 弾塑性系の応答値による弾性系応答値の予測

上大きくなっているケースも現れている。ひずみ硬化はほぼ降伏ひずみの10倍のひずみ量に達してから始まり、筋かひの素材実験と一致している。

図 7 で示している構面変位時刻歴応答では、解析と実験の応答波形が相似形状となっているが、塑性化してから、ひずみ硬化の影響で実験モデルの抵抗能力が上昇していくにもかかわらず、実験のほうの応答が解析より除々に大きくなっていく。このことの原因については、筋かひ材座屈後の耐力の評価にあると考えられる。実測による筋かひ材復元力履歴特性では、座屈後の復元力の劣化が著しく、座屈後から引張側に戻るときの軸力上昇はしばらくごく低い上昇率で進む。これに対して、数式モデルでの評価は過大評価となっている。同図の B12-R では筋かひ配置の偏心率がもっとも大きい剛床モデルの倒壊までの応答を示している。倒壊は筋かひの配置されていない構面 3 から始まり、変位が 7 cm 直前、層間変形角に変換すると、約 1/13 rad から構面の抵抗能力を失い、せん断床を通じて隣接の筋かひ配置構面 2 へ荷重を伝える。このケースでは純粋解析の結果は倒壊まで至っておらず、実験との差が生じている。

図 8 は弾塑性系の応答値と弾性系の応答値の関連性を示すもので、縦軸は弾性系としての最大応答せん断力を降伏せん断力で基準化したもので、横軸は弾塑性応答の最大層間変形角としている。図中の点線は見掛けのひずみエネルギー一定説に、実線は最大変位一定説によるものである。

図中のマークは実験における 4 構面の中の最大変位応答を用いてプロットしたもので、倒壊したケース以外はいずれも 2 本の曲線間に入っている。特にケース B12-F と B14-F は最大変位一定説と一致している。

4. ま と め

筋かひの座屈・降伏・弛緩などの非線形効果を載荷実験で取り込みながら、筋かひの偏在・偏心、床の非剛床性を考慮した多構面立体骨組のハイブリッド地震応答シミュレーションを行うシステムを開発し、4 構面骨組モデルの地震応答シミュレーションを実行した。

複数構面の相互作用を考慮した応答実験を、全体モデルの載荷実験に基づいて検討するのは非常に困難であるが、この部分構造実験手法を用いれば比較的簡単に行うことができる。

このような多構面骨組モデルの地震応答においては、構面の変位応答の中で床の剛体回転による変位成分の占める割合が大きく、モデル実験および数式モデル解析では、モデルを立体的に扱う必要がある。

謝 辞

本研究は民間等との共同研究（東京電力）の一環として行われたものである。ここに記して関係各位に謝意を表します。
(1994年 7 月 11 日受理)

参 考 文 献

- 1) 陳, 大井, 高梨: 「3 方向変動荷重を受ける箱形断面鋼柱の弾塑性挙動」, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 447 号 (pp. 139-148), 1993 年 5 月。
- 2) K. Takanashi et al.: Tests of Braced Frames Utilizing Substructuring Technique, U.S.-Japan Seminar on Development and Future Dimensions of Structural Testing Techniques, June 1993.
- 3) 柴田, 中村, 若林: 「鉄骨筋違の履歴特性の定式化—その 1 定式化関数の誘導」, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 316 号, 1982 年 6 月。