

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	2047 E-ディフェンス震動台実験結果に基づくせん断モデルの作成(構造)
Title	
著者(和文)	須賀 貴之, 佐藤 大樹, 大内 隼人, 北村春幸, 長江拓也
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 81, No. 0,
Citation(English)	, Vol. 81, No. 0,
発行日 / Pub. date	2011, 2
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110008730287

E-ディフェンス震動台実験結果に基づくせん断モデルの作成

構造一振動

高層建物 震動台実験 数値解析
長周期地震動 鋼構造 エネルギー法

1. はじめに

東海・東南海・南海地震等の M8 クラスの巨大海溝型地震が近い将来発生すると予想されており、大都市に林立する超高層建物は、長周期地震動を受け、長時間にわたって強く共振する可能性が指摘されている。対策が急がれる超高層建物であるが、建設が始まって以来、巨大地震を経験していないことから、実際の被害を把握出来ずに建設されてきた経緯がある。社会の中核を担う超高層建물에被害が発生すれば、その影響は甚大であり、被害を受けてからの対策では遅く、最新の知見に基づいた被害予測と事前の対策が喫緊の課題であると言える。

長周期地震動により超高層建物に入力エネルギーは、これまでの設計に用いられてきた標準波より大きい値となる可能性が示唆されており、2007年3月、E-ディフェンスにて行われた実大実験¹⁾では、長周期地震動である名古屋三の丸波によって試験体に入力されるエネルギーが、設計用地震動のおよそ10倍²⁾に達することが確認された。このことは、応答の最大値だけでなく累積値による評価が重要であることを示している。その評価法として、「エネルギーの釣合いに基づく耐震設計法」(以下エネルギー法と呼ぶ。)が有効であると考えられる。しかし、エネルギー法は実大実験を用いた検証例がほとんど無いことから、実験による検証は意義が大きい。

本報では、エネルギー法が、せん断モデルに基づいていることから、試験体をせん断質点系にモデル化し、その作成方法を示す事を目的とする。

2. E-ディフェンス震動台実験概要

考察対象は、2007年に行われた実験の試験体である¹⁾。軸組図を図1に、平面図を図2に、断面表を表1に、にそれぞれ示す。

試験体の下層4層は、1980年以前に建てられた超高層鋼構造建物の構造詳細を再現した鋼構造純ラーメン架構である。(以下、実架構部と呼ぶ。)その上にコンクリート錘と単体積層ゴム、単体積層ゴムとダンパーを直列につないだ塑性化装置からなる、上層部分の水平慣性力を再現する実験装置を取り付ける。(以下、この部分を縮約層と呼ぶ。)今回対象とする入力地震波は、三の丸波とする。図3に加

準会員 ○ 須賀貴之^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*1}
〃 大内隼人^{*1} 〃 北村春幸^{*1}
〃 長江拓也^{*2}

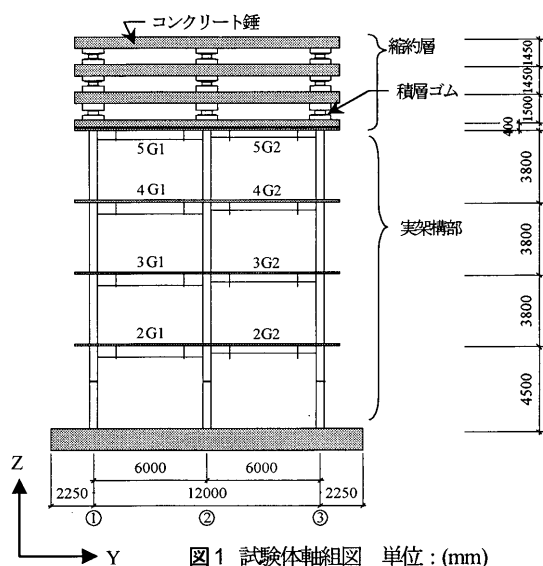


図1 試験体軸組図 単位: (mm)

表1 部材断面	
柱 C1	□-400x400x25
G1	5FL H500x200x9x16
G2	4-2FL H-600x200x8x19
G3	5FL H-650x199x9x14
G4	4-2FL H-800x199x10x15
G4	H-400x200x8x13

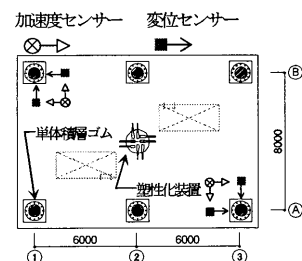


図2 縮約層平面図 (単位:mm)

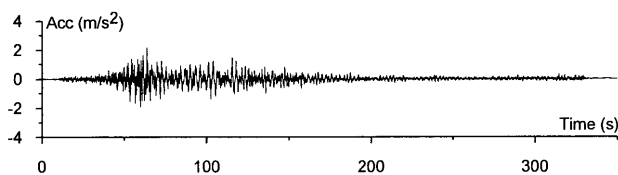


図3 名古屋三の丸波の加速度波形

速度波形を示す。試験体の応答は、各階末に設置した加速度センサーと変位センサーから取得した。(図2)

3. 静的解析に基づくせん断モデルの作成方法

設計で用いられる静的解析に基づき、せん断モデルを作成する。動的解析を行う事で、部材レベルモデルの解析結果を、せん断モデルがどの程度再現できるかを検証する。3次元の部材レベルモデル

は、F-07 試験体の設計図及び実験結果のデータをもとに作成した。解析モデルは、弾性範囲での各層の層せん断力 Q_i —層間変形角 R_i の履歴曲線より、最小二乗法により求めた層剛性が、弾性範囲に留まる加振結果と一致するように、2-4 階床スラブの合成効果による梁の剛性増大率 ϕ を1.7とし、5階床においては梁上コンクリート錘の影響により $\phi=3.7$ としている。縮約層の単体積層ゴムと塑性化装置は設計値を参照し、せん断ばねでモデル化した。上記の解析モデルを用い静的解析を行った。結果を図4に示す。

3.1 せん断モデルの作成方法

下層4層の実架構部のモデル化は、静的解析結果の層せん断力 Q_i —層間変形角 R_i 関係に対し、トリリニア置換を行う。各折れ点のせん断力 $Q_{y,i}$ 、層間変形角 $R_{y,i}$ は次のように定める。まず、第1折れ点はいずれかの部材が全塑性モーメントに達した際の、層せん断力 Q_{y1} と、その時の層間変形角 R_{y1} で定める。次に、第2折れ点の層せん断力 Q_{y2} は、終局状態を仮定し、各層の層間変形角が $R_i=1/50$ に達した際の、層せん断力とする。初期剛性は、第1折れ点によって決定され、各層のいずれかの部材が降伏モーメントに達するまでの、弾性剛性である。2次剛性は、層間変形角が $R_i=1/50$ に達した時点で、面積等価となるような値を定める。これにより、第2折れ点が定まる。3次剛性については、初期剛性の1/100と定める。縮約層については、部材レベルモデルでせん断ばねを使用してモデル化していることから、せん断モデルにおいても同様のばねを用いた。図4に、作成したせん断モデルの復元力特性を、静的解析の解析結果と共に示す。

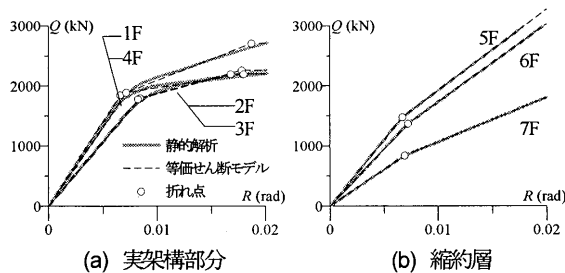


図4 静的解析結果のモデル化

3.2 動的解析による精度検証

前節で作成したせん断モデルに対して、部材レベルモデルの動的解析と同じ、名古屋三の丸波を入力し、時刻歴応答解析による検証を行う。図5に、解析結果から得た Q_i — R_i 関係の履歴曲線を、図6に各層が吸収したエネルギーの時刻歴を示す。図5,6より、静的解析結果から作成したせん断モデルは、部材レベルモデルによる動的解析を精度良く再現できることを確認した。

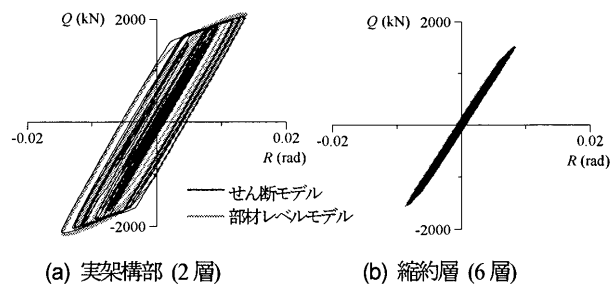


図5 履歴曲線

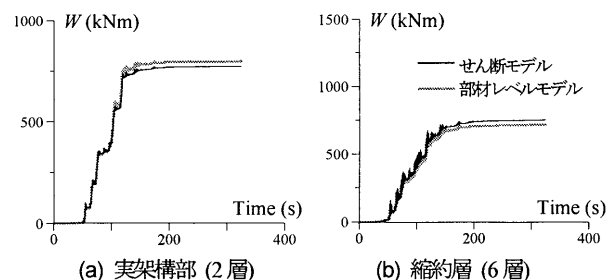


図6 吸収エネルギー時刻歴

4. 実験結果に基づくせん断モデルの作成方法

前章は、静的解析結果に対してモデル化をおこなった。同じモデル化手法を実験結果に対して行い、作成したせん断モデルの精度の確認をする。また、より高い精度で実験を追跡出来る解析モデルの作成を行い、その具体的方法について述べる。

4.1 実験結果のモデル化

前章同様の手法でモデル化を行う。ただし、静的解析に相当する試験体の Q_i — R_i 関係が実験からは得られないことから、文献3)の手法を加振時の Q_i — R_i 履歴曲線に適用して算出したスケルトンカーブを用いる。スケルトンカーブの妥当性を確認するため、前節で使った部材レベルモデルの動的解析結果の Q_i — R_i 履歴曲線から、スケルトンカーブを作成し、静的解析結果と比較し、図7に示す。図より両者は良く一致していることが分かり、スケルトンカーブが、静

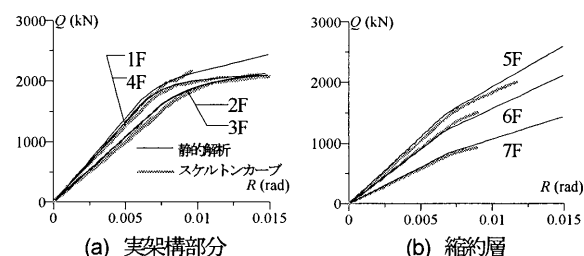


図7 スケルトンカーブと静的解析の対応関係

的 Q_i — R_i 曲線と等価であると言える。

上記の検討から、スケルトンカーブを用いて各層の Q_i — R_i 関係を算出し、これに対して前節と同様のトリリニア置換を行う。第1折れ点は、梁端が降伏したと判断できる層せん断力に達した時点で定める。これを図7に(×)で示す。降伏までの履歴曲線を黒線で示し、

全履歴曲線を灰色線で示した。

第二折れ点は、試験体が終局状態に達していないことから、スケ

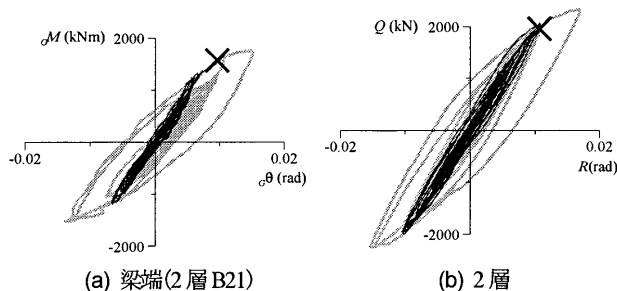


図8 梁端の降伏と層降伏の確認

ルトンカーブの最大荷重の点として定めた。また縮約層は、積層ゴムの単体試験から得られた水平剛性と、ダンパーのカタログ値から算出した、バイリニアの復元力を各層に与えている。

4.2 動的解析による精度検証

前節の方法で作成したせん断モデルで、動的解析を行い、実験結果と比較する。減衰は実験値から求めたレーリー減衰で、 $h1=1.94\%$ 、 $h2=3.44\%$ とした。図8に Q_i-R 履歴曲線、図9に吸収エネ

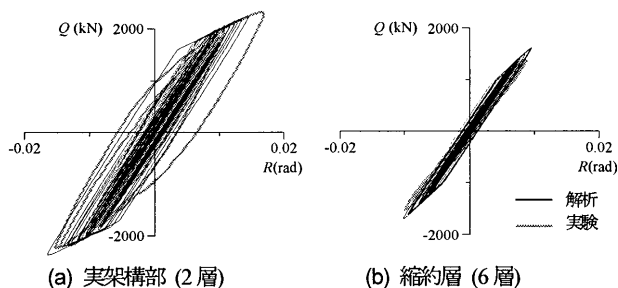


図9 履歴曲線

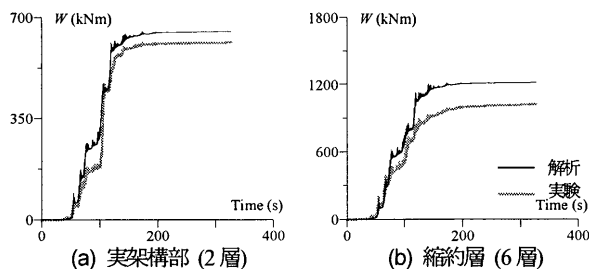


図10 吸収エネルギー時刻歴

ルギーの時刻歴を示す。図8,9から、モデルは、概ね良い精度で実験値を再現したと言える。

4.3 修正モデルの作成

前節までの検討で、せん断モデルは試験体の応答性状を概ね再現出来ることが分かる。ここでは、せん断モデルを用いて更に予測精度を向上させる場合、どのようなモデル化が考えられるかを、前節のモデルを修正することで示していく。

以下に解析モデルが模擬していない試験体の応答性状を指摘し、

その評価とモデル化について述べる。図10に微小変形範囲の剛性と履歴曲線を示す。図10(a)より、実験の履歴曲線は梁端降伏前においても非線形であるが、解析モデルはこれを模擬していないことが挙げられる。これを評価するために、図10(b)に示す手法で等価剛性 K_{eq} を履歴曲線の1周毎に算出し、層間変位の時刻歴と重ね、剛性の振幅依存性を確認した。結果を図10(c)に示し、層間変形角 $R=1/1000$ を境に剛性が低下することが確認できる。これを基に、修正モデルでは層間変形角 $R=1/1000$ の微小変形範囲に折れ点を設け、微小変形範囲を模擬することを目的とする。これは通常の「第1折れ点」と異なる意味合いであるので、混同を避けるため、「第0折れ点」と呼ぶ。またこの範囲の剛性を「0次剛性」とする。剛性は、層間変形角 $R=1/1000$ 以内での履歴曲線から、最小二乗法により求める。

次に、第1折れ点を修正する。 fQ_y は、図10(a)の(○)に示すようにスケルトンカーブの性質上、変位に多少の誤差を生じることが

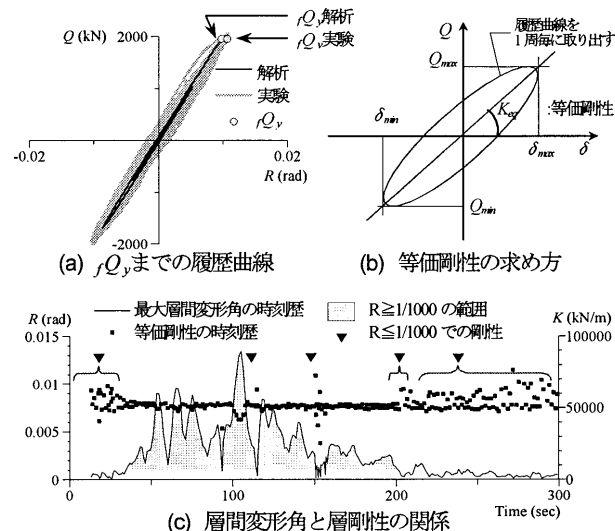


図11 微小変形範囲における非線形性の評価

ある。修正モデルではこの差をなくすため、第1折れ点を、梁端が降伏する時刻での層せん断力と層間変形の値を直接用いることとする。同様にスケルトンカーブの最大荷重の点も、変位に誤差を生じるので、2次剛性は、実験で観測された最大荷重の点と第1折れ点とを結ぶ線分の傾きとして定める。

縮約層に対するモデル化は、縮約層でも実架構部と同様の現象が見られたため、実架構部と同じ手法で各層でスケルトンカーブを用いてトリリニア置換した。第0折れ点は、層間変形角と層剛性の関係から、剛性の変化がみられた $R=1/3000 \sim 1/10000$ の範囲で折れ点を設けるモデル化とし、第1折れ点は、ダンパーが降伏する点、二次剛性は、第1折れ点とスケルトンカーブの最大荷重の点を結ぶ線分の傾きとして定めた。

図11(a)は、最大荷重時の履歴曲線を1周だけ取り出し、実験と解

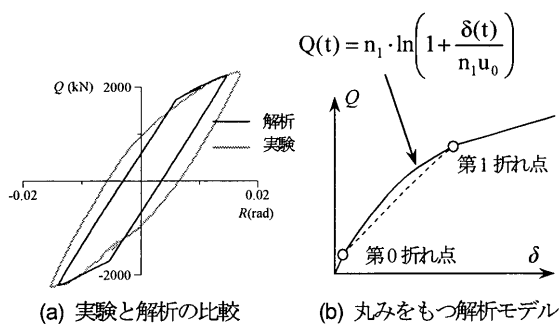


図12 履歴曲線の丸み評価

析と比較している。これにより、実験は解析と異なり曲線を呈していることが分かる。よって、修正モデルでは、第0折れ点と第1折れ点の間を、次式で曲線補間し、実験を模擬することとした。

4.4 時刻歴応答解析による精度の検証

前節で述べた方法によって、修正したせん断モデルを用いて、同様の時刻歴応答解析を行い、精度の検証を行う。解析結果と実験値の比較を示す。図12に履歴曲線、図13に吸収エネルギーの時刻歴、図14に第1折れ点までの履歴曲線を、それぞれ示す。図12に示す履歴曲線の結果から、修正したモデルによる予測結果は、実験値をより忠実に追跡している事が確認できる。図13の吸収エネルギーの

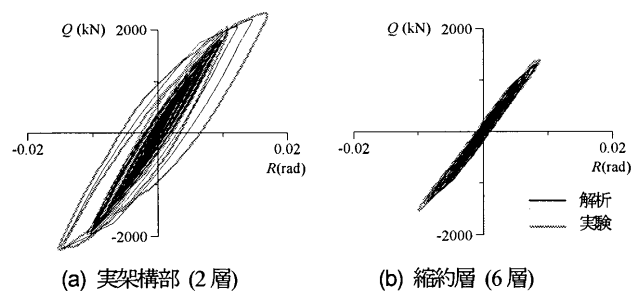
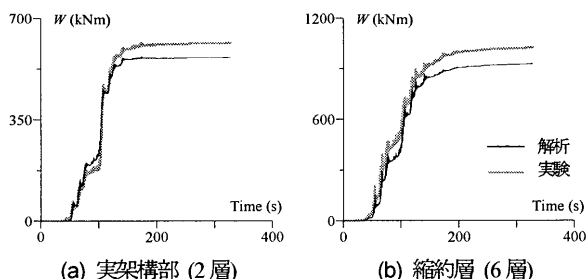


図13 履歴曲線



(a) 実架構部 (2層)

(b) 縮約層 (6層)

図14 吸収エネルギー時刻歴

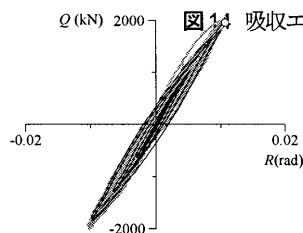


図15 履歴曲線

きる事を確認できた。

時刻歴においても同様に実験値を精度良く追跡できた。

図14より、微小変形範囲においても、本手法による解析モデルが高い精度で実験値を追跡で

5. まとめ

本報で得られた知見を以下に示す。

- ・静的解析結果の Q_i-R_i 曲線から作成したせん断モデルは、3次元部材レベルモデルの動的解析結果を、高精度に再現できる。
- ・文献3) によるスケルトンカーブは、層の Q_i-R_i 履歴に適用することで、静的解析に相当する Q_i-R_i 曲線を与える。また、これを静的解析結果と見なし、トリリニア置換したせん断モデルは、元の実験結果を高い精度で再現する。
- ・せん断モデルを用いて試験体の予測精度を追求する場合は、微小変形範囲における、試験体の非線形挙動を模擬すること。試験体の丸みをモデル化すること。降伏後の剛性を的確に評価すること等が求められることがわかった。また、これらを実験したせん断モデルは、実験結果をより忠実に追跡することができた。

上記の知見から、実験結果を精緻に評価し、モデル化することで、せん断モデルによる時刻歴応答解析で、試験体の応答を精度良く追跡することが可能である。しかし、静的増分解析から得た、せん断モデルも、試験、実験の履歴から得たスケルトンカーブに置き換えて同様のモデル化をしたせん断モデルは、最大応答だけでなく吸収エネルギーの時刻歴に対しても高い精度を示した。このことから、現行のモデル化手法が実験に対しても有効であると言える。更なる予測精度の向上には、部材レベルモデルでの検証が必要と考える。

参考文献

- 1) 長江拓也, 鐘育霖, 島田侑, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, 齊藤大樹, 北村春幸, 福和伸夫, 日高桃子: 超高層建物の耐震性能を検証する実架構実験システムの構築—E-ディフェンス振動台実験—, 日本建築学会構造系論文集, 第640号, pp.1163-1171, 2009.6
- 2) 佐藤大樹, 島田侑, 大内隼人, 長江拓也, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛: 長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物のエネルギー吸収と分担率, 日本建築学会構造系論文集, 第653号, pp.1217-1226, 2010.7
- 3) 加藤, 秋山, 山内: 鋼材の応力ひずみ履歴曲線に関する実験測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.937~938, 1973.10
- 4) 株式会社日建設計東京オフィス構造設計室: 建築物の性能設計と検証法, 2002.9

謝辞

本研究は文部科学省が推進する「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の一環として、(独)防災科学技術研究所が受託した「②都市施設の耐震性能評価・機能確保に関する研究」の成果の一部です。また、大林組 佐野剛志氏には多くの貴重なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

*1 東京理科大学理工学部建築学科

*2 (独)防災科学技術研究所