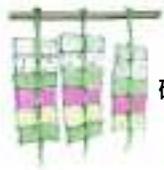


# 鉄骨造建物の巨大地震動下での倒壊挙動



研究ノート

多田 元英\*, 向出 静司\*\*

Collapsing Behaviour of Steel Buildings under the Mega Earthquake Excitation

Key Words : collapse, steel buildings, mega earthquake

## 1. はじめに

建築基準法は最低守られるべき必要条件であるにもかかわらず、法が要求するクライテリアだけに基づいた画一的な構造安全性の検討が行われている場合が多い。法が担保するのは数十年に一度の中地震（震度 V 弱程度）に対して建物が無損傷、数百年に一度の大地震（震度 VI 強程度）に対して建物がある程度の損傷に留まることである。それに対し、兵庫県南部地震で被った甚大な被害を教訓に、施主と構造技術者の対話と合意に基づいて建物の構造性能を設定すべきであること、設定される構造性能は決して画一的なものでなく地震規模と損傷程度の多様な組合せが用意されるべきであることなどが重要と考えられるようになった。そのような認識の下、法が担保する大地震（極めて稀に発生する地震）より大きな巨大地震に対して、基本的で最も大切な構造性能は建物の完全な倒壊を回避するというこ

ろ。たとえば大阪地域では上町断層や南海・東南海で巨大地震の発生が危惧されており、現在の建築基準法に基づく画一的なチェックでは倒壊に対する余裕度が不明なだけでなく、余裕度の低いものから高いものまで玉石混交の状態になっている。建物の倒壊は所有者・使用者だけの損害に留まらず、周辺地域に多大な危害を及ぼし都市機能の欠損にもつながることから、保有水平耐力の発揮後に最終的な倒壊がどのように発生するかを明確にし、それを構造設計技術に反映させることが極めて重要である。

## 2. 4階建て鉄骨造建物の巨大地震動下での弾塑性および倒壊挙動事例

鉄骨造骨組の倒壊挙動に関する実験的な検討としては、(独)防災科学技術研究所の実大3次元震動破壊実験施設 (E-ディフェンス) において、2007年9月に行われた実大4層鉄骨造建物の震動台による完全倒壊実験<sup>1)</sup>が挙げられる。この試験体は、建築基準法に基づいて設計されたラーメン形式の一般的な中層鉄骨造建物である。数十年に一度の頻度で起こる中程度の地震を想定した1次設計用地震力に対しては、層間変形角を1/200 rad以下とし、短期許容応力度設計を行っている。数百年に一度の頻度



\* Motohide TADA  
1958年3月生  
大阪大学大学院博士前期課程 工学研究科 建築工学専攻 修了 (1982年)  
現在、大阪大学 工学研究科地球総合工学専攻 教授 博士(工学) 建築構造  
TEL : 06-6879-7651  
E-mail : tada@arch.eng.osaka-u.ac.jp



\*\* Seiji MUKAIDE  
1978年3月生  
大阪大学大学院博士前期課程 工学研究科 地球総合工学専攻 修了 (2002年)  
現在、大阪大学 工学研究科地球総合工学専攻 助教 博士(工学) 建築構造  
TEL : 06-6879-7653  
E-mail : mukaide@arch.eng.osaka-u.ac.jp



図1 試験体の全景写真

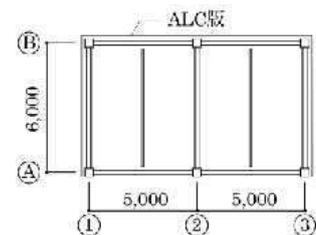


図2 試験体の梁伏図

で起こる大地震を想定した2次設計では、各層の保有水平耐力が必要値を上回っていることを確認し、梁または柱梁接合部パネルの塑性化を伴う全体崩壊機構を形成するよう、柱の梁・パネルに対する部材耐力比 (COF) を1.48～2.13にしている。試験体の全景写真を図1に示し、梁伏図を図2に示す。全景写真において、1階部分の建物コーナー外部のフレームは、実験施設を保護するための倒壊防止架台である。

加振には1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録を用い、建物短手 (X) 方向にEW成分、建物長手 (Y)

方向にNS成分、上下 (Z) 方向にUD成分を入力している。震動台実験では、原波に対する加速度の倍率で5%、10%、12.5%、20%に低減した地震動による弾性加振、40%と60%の大きさの弾塑性加振を行い、最後に100%加振で試験体を倒壊させている。溶接部が損傷することなく、1階柱の頭部と脚部に局部座屈が生じ、1階の層崩壊によって倒壊した。

この震動台実験での倒壊挙動を「統合化構造解析システム」<sup>2)</sup>でシミュレートする<sup>3)</sup>。複数の既存プログラムを統合することにより、各構造部分の挙動を詳細に解析しながら互いの連成効果を考慮して建物全体の挙動を解明できることが本システムの特徴である。

JR鷹取駅記録地震動を60%に低減したときの統合解析結果として、振動中に塑性化を経験した部位を図3に示す。梁や柱梁接合部パネルに対して柱の耐力を大きく設計しているため (COF=1.48～2.13)、柱が心棒効果を発揮し、建物全般に塑性化部位が分散して梁降伏先行型の全体崩壊機構を形成している。

JR鷹取駅記録地震動を原波 (100%) で入力したときの解析結果と実験結果を以下に比較して示す。1階の層間変形角について、時刻歴を図4に、軌跡を図5に示す。実線が統合化構造解析結果、点線が

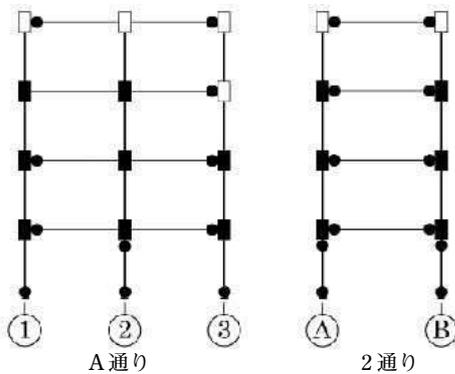


図3 振動中に塑性化を経験した部位 (鷹取60%波)

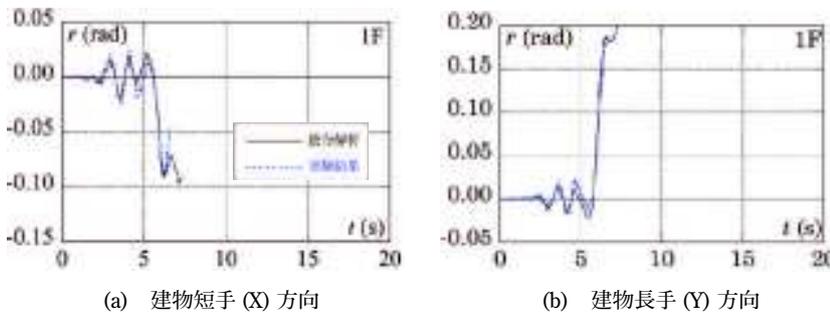


図4 1階の層間変形角の時刻歴 (鷹取100%波)

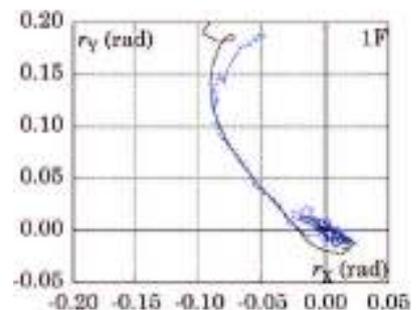


図5 1階の層間変形角の軌跡 (鷹取100%波)

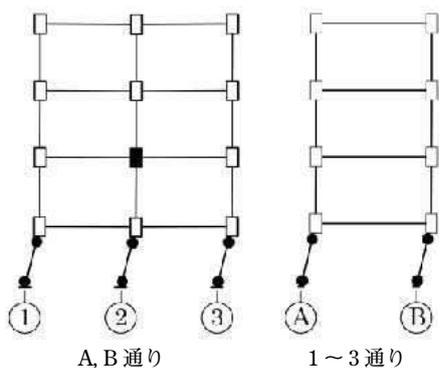
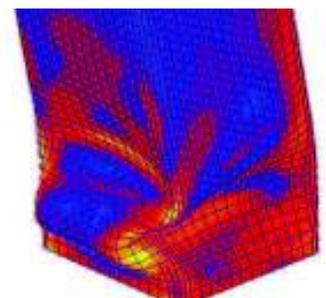


図6 解析終了時の塑性化部位 (鷹取100%波)



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図7 柱脚の局部座屈状況 (鷹取100%波)

実験結果であり、図5の横軸は建物短手 (X) 方向の層間変形角 ( $r_X$ )、縦軸は建物長手 (Y) 方向の層間変形角 ( $r_Y$ ) である。X 負方向かつ Y 正方向に1階部分が倒壊した震動台実験の結果が、解析でも同様に追跡できている。また、解析終了時の塑性化部位の分布を図6に示す。設計時の想定を少し上回る程度の地震動では図2に示すように塑性化部位が建物全体に分散して安定した挙動を示すものの、鷹取地震動原波では1階柱脚が局部座屈して耐力劣化が生じた後に1階柱頭に塑性化が及び、最終的に1階の層崩壊型に移行して倒壊に至っている。1通りとA通りの交点における1階柱脚の局部座屈状況について、震動台実験で観察した写真を図7(a)に、解析結果を図7(b)に示す。両者で同様の局部座屈が生じていることがわかる。

### 3. 耐力劣化部材で構成される梁降伏先行型骨組の倒壊に至るまでの挙動

文献4)では、多層鉄骨骨組の巨大地震動下での倒壊挙動を、様々なパラメータの下で魚骨形骨組の時刻歴解析を通じて考察している。考察の結果、前節での震動台実験の挙動とも符合する形で、倒壊に至るまでの崩壊機構の変遷を説明することができている。図8を参照して、全体崩壊機構から部分層崩壊機構へ移行する倒壊過程の概要を以下に記す。

- [1] 全体崩壊機構が形成された後、いずれかの部材で最大耐力到達後、耐力が劣化する。
- [2] 耐力劣化が生じた節点の上下の（最下・最上層では一方の）柱の反曲点が同節点側に近づき、

同節点と隣接する節点側の柱の曲げモーメントが増加する（応力の再配分が行われる）。

- [3] この隣接する節点を境にして、耐力劣化が生じた側は層全体の剛性が低下することから、隣接する柱においても反曲点が耐力劣化した節点側に近づく傾向がある。このため、耐力劣化節点に隣接する節点では、接合する上下の柱の曲げモーメントの比率が大きく変化し、柱梁耐力比  $COF$  が1.0を上回っている節点でも、柱に塑性ヒンジが形成されうる。
- [4] さらに、変形が進むと、耐力劣化節点に隣接する節点の柱が梁のどちらかで、最大耐力到達後、耐力が劣化する。
- [5] 柱が耐力劣化する場合は、部分層崩壊機構に移行し、倒壊に至る。梁が耐力劣化する場合は、さらに隣接する節点で上記の [2] ~ [4] のサイクルが繰り返される。
- [6] その後も同様に、柱が耐力劣化すると、複数層にわたる部分層崩壊機構に移行し、柱が耐力劣化しないまま全ての節点で梁の耐力劣化が進むと、全体崩壊機構のまま倒壊に至る。

以上のように、柱の反曲点の移動が進むと、上層柱下端と下層柱上端の曲げモーメントの差が大きくなり、やがて複曲率から単曲率に移行する（すなわち、長柱化する）。このため、 $COF$  が2を超えるような強柱であっても中間層柱が塑性化することになる。最下層の下端を除く位置で柱が耐力劣化して部分層崩壊に移行すると、それ以外の場所で柱の塑性変形はほとんど進まず、やがて崩壊機構を構成する塑性

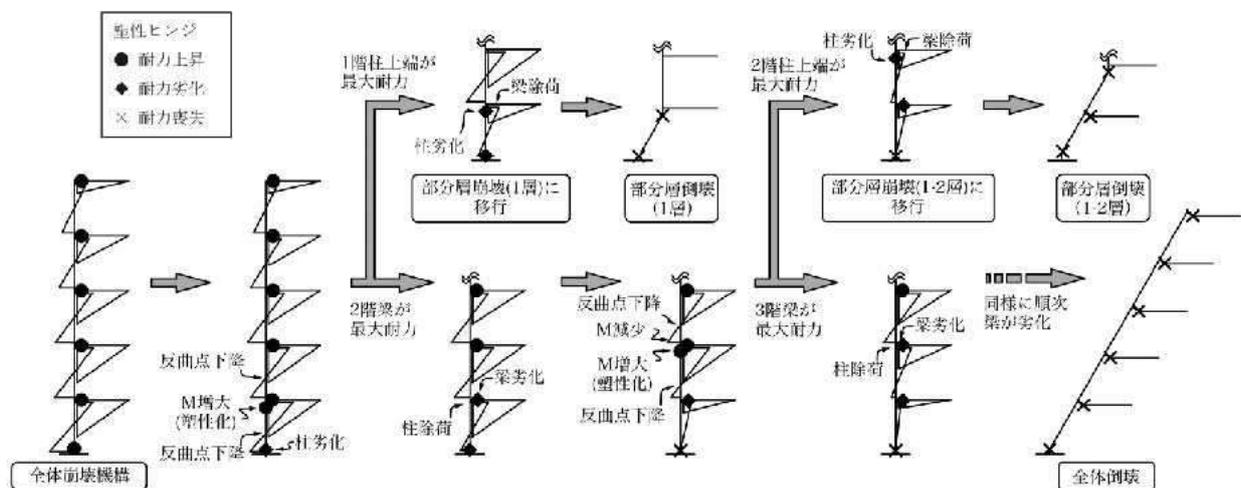


図8 崩壊機構の変遷例

ヒンジが全て耐力を喪失して不安定状態となり、倒壊に至る。

文献4)では、倒壊層数の大局的な傾向として、 $COF$ が大きいほど、また柱の構造ランクが高く、梁の構造ランクが低いほど倒壊層数が増加することを示している。また、倒壊時の損傷に寄与するエネルギーは、 $COF$ が大きくなり倒壊層数が増加するにともなって増加すること、 $COF$ がある値以上で倒壊層数がほぼ一定になると倒壊に寄与するエネルギーも概ね一定になることなどを示している。

#### 4. むすび

梁降伏先行型で設計された鉄骨造骨組は、塑性域に進入した当初は全層にわたって塑性化部位が分散する。しかし、柱・梁のいずれの部材においても局部座屈などによる耐力劣化が生じると、柱の反曲点高さが耐力劣化側に著しく移動し、 $COF$ が十分に大きくないかぎり部分層崩壊に移行して倒壊に至る。すなわち、現行の2次設計で梁降伏先行型の崩壊機構を保証するために適切な $COF$ で設計しても、倒壊に際しては全層にわたる機構が必ずしも担保され

ることにはならない。

#### 参考文献

- 1) 島田侑子, 吹田啓一郎, 山田哲, 松岡祐一, 多田元英, 大崎純, 笠井和彦: 震動台実験における倒壊挙動 —実大4層鉄骨造建物の完全崩壊実験 その3—, 日本建築学会構造系論文集, No. 653, pp. 1351-1360, 2010. 7
- 2) 多田元英, 桑原進: インターネットで異種プログラムを統合した構造解析システムの基本考察, 日本建築学会構造系論文集, No. 580, pp. 113-120, 2004. 6
- 3) 堀本明伸, 多田元英, 玉井宏章, 大神勝城, 桑原進, 三谷淳: 実大4層鉄骨造建物の統合化構造解析システムによる立体倒壊解析, 構造工学論文集, Vol. 55B, pp. 277-283, 2009. 3
- 4) 向出静司, 元木洸介, 北川智也, 多田元英: 局部座屈による耐力劣化を考慮した多層鋼造ラーメン骨組の倒壊解析, 日本建築学会構造系論文集, No. 685, 2013. 3

