

【研究ノート】

複数回の地震動を受ける鋼構造建築物の梁端部損傷の有無を反映したシミュレーションに基づく応答比較

三田凜也¹，永野康行²

¹ 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科，大学院生

² 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科，教授 博士（工学）

本研究は，複数回の地震動を受ける鋼構造建築物を対象として，初回の地震による梁端部損傷が後続の地震時の応答に及ぼす影響を数値解析により検討した．SS7 で作成した純ラーメン 5 階建てモデルに兵庫県南部地震を作用させ，3D・DynamicPRO により算出した疲労損傷度 D に基づき回転剛性低下付与やピン置換により損傷反映モデルを作成し，想定南海トラフ地震を入力した結果を損傷無モデルと比較した．その結果，梁端部損傷を有するモデルでは全体の層せん断力は低下する一方で，下層の層間変形角が増大し変形の集中層が変化することが明らかとなり，既往の地震による内部損傷を考慮しない評価では複数回の地震時倒壊リスクを過小評価するおそれが見られた．

キーワード：複数回の地震動，鋼構造，梁端部，立体骨組モデル

1. はじめに

阪神・淡路大震災の被害調査で，鋼構造建築物は外観上無被害と判定された建物であっても梁端フランジやダイアフラムの破断など深刻な内部損傷が確認された事例が報告されている¹⁾．とくに柱梁接合部に損傷が集中し，外部から視認しにくいことから，現在でも内部損傷を抱えた建築物が残存している可能性がある．このような内部損傷が補修されないまま残存すると，将来の地震時に建築物は設計時に想定した耐震性能を発揮できず，無損傷の建物に比べて構造被害が増大するおそれがある．近い将来発生が懸念される南海トラフ巨大地震においても，過去の地震で内部損傷を受けた鋼構造建築物が再び強い地震動を受ける可能性は高い．

鋼構造建築物における地震後の内部損傷が，その後に発生する地震動に対して建物応答をどのように変化させるかの影響を明らかにすることは，今後の被害予測および耐震対策の検討にとって重要な

課題である。

本研究では、鋼構造建築物を対象とし、過去に受けた地震動による損傷の有無が、その後に発生する地震動に対して、建物応答にどのような影響を及ぼすかを、数値シミュレーションによる応答比較を通じて明らかにすることを目的とする。柱梁接合部などに生じた内部損傷が、後続地震時の最大層間変形角や最大層せん断力などの応答指標に与える影響を定量的に評価し、損傷の蓄積に伴う倒壊の可能性を、損傷の有無や損傷程度の異なるモデル間で比較する。

2. 研究方法

2.1 複数回の地震動 (E_k)

本研究では、対象建物が供用期間中に複数回の地震動を受ける状況を想定する。入力地震動の回数を k ($k \geq 2$ の自然数) とし、第 1 地震動を E_1 、第 2 地震動を E_2 、一般に第 k 地震動を E_k と定義する。解析では、これらの地震動を E_1, E_2, \dots, E_k の順に建物モデルに作用させる。

2.2 建物モデル (M_i)

本研究では、鋼構造建築物を対象とし、これを立体骨組みモデルとして表現する。初期健全モデルを M_0 とし、第 $i-1$ 損傷モデル M_{i-1} が地震動 E_i ($0 \leq i \leq k-1$) を受けた後の第 i 損傷反映モデルを M_i とする。以下では、初期健全モデルと損傷反映モデルの定義及び作成方法を示す。

2.2.1 初期健全モデル (M_0)

初期健全モデル M_0 ($i=0$) は、対象とする鋼構造建築物を設計通り作成した、全ての柱梁接合部が健全で損傷のない状態の立体骨組モデルである。モデルの作成には Super Build / SS7²⁾ (以下, SS7) を用いる。

2.2.2 損傷反映モデル (M_i)

損傷反映モデル M_i ($1 \leq i \leq k-1$) は、 i 回目の地震動を受けた後に生じた梁端部の損傷を反映した建物の立体骨組モデルである。 M_0 が地震動 E_1 を受けた後の損傷を反映したモデルを M_1 、 M_1 が E_2 を受けた後のモデルを M_2 とし、一般に M_{i-1} が地震動 E_i を受けた後の損傷を反映したモデルを M_i と定義する。

梁端部の損傷は時刻歴応答解析結果を基に反映する。時刻歴応答解析には Super Build / 3D・DynamicPRO³⁾ (以下, 3D・DynamicPRO) を用いる。解析結果から得られる梁端部の疲労損傷度 D の値に応じて梁端部損傷を考慮したモデルに更新する。

損傷程度は、a. $D < 0.2$, b. $0.2 \leq D < 0.5$, c. $0.5 \leq D < 0.9$, d. $0.9 \leq D$ の 4 区分のいずれに属するかを判定し、次のように処理する。a の場合は損傷が小さいとみなし、当該梁端部の結合状態は変更しない。b の場合は梁端部に亀裂が発生したような軽微な損傷とみなし、梁端部の回転剛性を初期値から 10% 低下させる。c の場合は梁端部の亀裂が拡大したような損傷とみなし、梁端部の回転剛性を初期値から ($D \times 100$)% 低下させる。d の場合は梁端部のフランジが破断したとみなし、結合状態をピン接合へ置き換える。

3. 例題：兵庫県南部地震＋想定南海トラフ地震

3.1 入力地震動

兵庫県南部地震を受けた後、想定南海トラフ地震を受けることを想定し、神戸市中央区を対象地域とする。兵庫県南部地震の JMA 神戸 NS 成分⁴⁾を E_1 、想定南海トラフ地震⁵⁾を E_2 とする。図 1, 2 にそれぞれ E_1 , E_2 の加速度時刻歴波形を示す。本例題では、1 方向加振とする。

3.2 解析対象建物と解析結果

3.2.1 解析対象建物概要

構造設計・部材断面事例集⁶⁾を基に 5 階建て純ラーメンの鋼構造建物を対象とする。SS7 を用いて立体骨組モデルとして初期健全モデル M_0 を作成する。図 2 の(a), (b), (c)にそれぞれ M_0 の床伏図、軸組図、全体図を示す。加振方向は短辺方向 Y とする。

3.2.2 解析ケース

表 1 に解析ケース C_{ik} を示す。建物解析モデル M_i に地震動 E_k を入力した解析ケースを C_{ik} と定義する。 C_{02} は M_0 に E_2 を入力したものであり、 C_{02} と C_{12} により損傷の有無による応答比較を行う。

表 1 解析ケース C_{ik}

解析ケース C_{ik}	建物解析モデル M_i	入力地震動 E_k
C_{01}	M_0	E_1
C_{12}	M_1	E_2
C_{02}	M_0	E_2

3.2.3 解析結果

C_{01} の解析結果から、梁端部の損傷は b が 20 か所、c が 14 か所、d が 22 か所である。この結果を基に結合状態を指定し、 M_1 を作成する。

図 4, 5 にそれぞれ最大層間変形角、最大層せん断力を示す。 C_{12} と C_{02} を比較すると、最大層間変形角は 4, 5 階では 0.7 倍から 0.9 倍に小さくなったが、1 階から 3 階までは C_{12} が 1.4 倍から 2.1 倍大きくなった。最大層せん断力は全階で 0.6 倍から 0.7 倍小さくなった。

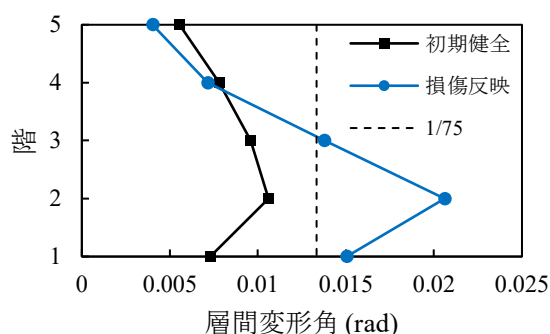


図 4 C_{12} ・ C_{02} 最大層間変形角

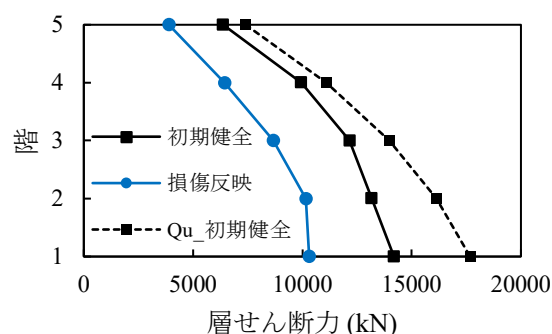


図 5 C_{12} ・ C_{02} 最大層せん断力

4. おわりに

本研究では、鋼構造純ラーメン 5 階建て建物を対象に、兵庫県南部地震 (E₁) で梁端部が損傷した状態 (M₁) と損傷のない状態 (M₀) について、想定南海トラフ地震 (E₂) を入力した解析ケース C₁₂ および C₀₂ の応答比較を行った。C₁₂ は C₀₂ と比べて、下層の最大層間変形角が増大し上層で減少するなど変形の集中層が変化し、全層の最大層せん断力はむしろ減少するという応答特性が確認された。このことから、初回の地震動による梁端部損傷は、後続の地震時の架構の耐力を低下させるだけでなく、特定層への変形集中を通じて倒壊を助長しうるということが示唆される。同一の入力地震動 E₂ に対しても、内部損傷の有無により最大層間変形角と最大層せん断力の分布が大きく異なることから、複数回地震動を想定した鋼構造建築物について考慮することが重要である。

大地震に対して現行の建築基準法では、建物は多少の被害を許容するが、倒壊などの重大な損傷を生じさせず、人命の安全性を確保するものとされている。複数回の大地震動を受けることが想定されていないのが現状である。兵庫県南部地震の後に南海トラフ巨大地震を受ける場合、数十年の期間があるため、耐震補修・補強、建て替えなどの対策を講じることも可能である。一方で、熊本地震のような場合、前震と本震の期間が数十時間のため、内部損傷があるか否かが分からず、対策を講じるのが難しい。内部損傷があると変形が大きくなり、倒壊・層崩壊の危険性が高まることがシミュレーションにより明らかとなったことから、複数回の大地震を視野に入れて設計することが望ましい。

謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所が運営する「E-Defense 実験データアーカイブ (ASEBI)」において公開されている実験番号 E201303、課題名「地震によって損傷を受けた鉄骨建築物の耐震安全対策に関する実験研究」の実験データを利用した。また、解析にはユニオンシステム株式会社の構造解析プログラム Super Build / SS7 および SS21 / 3D・DynamicPRO を用いた。貴重なデータおよびソフトウェアを整備・提供された関係各位に、ここに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会：1995年兵庫県南部地震 鉄骨造建物被害調査報告書，日本建築学会，1995.5
- 2) ユニオンシステム株式会社：Super Build/SS7 解説書 計算編，SS7_cal.pdf，802 pp.，2024.（参照 2025/11/18）
- 3) ユニオンシステム株式会社：SS21/3D・DynamicPRO 解説書 計算編，3DDynPROcal.pdf，106 pp.，2024.（参照 2025/11/18）
- 4) 気象庁：強震波形（平成7年(1995年)兵庫県南部地震），https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html，（参照 2025/11/18）
- 5) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：E-Defense 実験データアーカイブ (ASEBI)，課題名「地震によって損傷を受けた鉄骨建築物の耐震安全対策に関する実験研究」，<https://doi.org/10.17598/nied.0020-E201303>
- 6) 日本建築防災協会：構造設計・部材断面事例集，pp.496-501，2007

Note:

Response Comparison Based on Simulations Incorporating Beam-End Damage in Steel Frame Buildings Subjected to Multiple Earthquake Motions

Rinya Mita¹, Yasuyuki Nagano²

¹ Graduate School of Disaster Resilience and Governance, University of Hyogo, Graduate Student

² Graduate School of Disaster Resilience and Governance, University of Hyogo, Professor, Dr. Eng.

Abstract

This study investigated the effect of beam-end damage from the initial earthquake on the response during subsequent earthquakes in steel structures subjected to multiple seismic motions, using numerical analysis. A five-story ramen model created in SS7 was subjected to the Southern Hyogo Prefecture Earthquake. Based on the fatigue damage index D calculated using 3D · DynamicPRO, a damage-reflected model was created by incorporating reduced rotational stiffness and pin replacements. The results from applying the assumed Nankai Trough Earthquake input were compared with those from a model without damage. The results revealed that while the total inter-story shear force decreased in the damaged model, the inter-story drift angle in the lower stories increased, causing a shift in the story where inter-story drift concentrated. This indicates that evaluations ignoring internal damage from previous earthquakes may underestimate the collapse risk during multiple seismic events.

Keywords: Multiple seismic motions, Steel Structure building, Beam-end, Three-dimensional frame model