

鋼構造骨組に対する地震応答解析の精度検証の振動台実験

名古屋大学工学部環境土木建築学科建築学コース

長江研究室 浅井 健志郎

1. 背景と目的

2016年に発生した熊本地震では、震度7の大きな地震が連続して2度も発生した。こうした問題を踏まえて、大変形を伴う建物地震時応答を考慮した設計が必要である。本研究ではその素養の蓄積のために(1)フレームモデルを用いた弾塑性解析、(2)等価1自由度応答の等価線形解析を振動台実験に対して実施する。つくば大型耐震実験施設において4大学共同のもと、2020年12月に実施された鋼構造骨組の振動実験結果を詳細に分析し、フレームモデル検証に必要な判断材料を蓄積したのでそれを報告する。等価線形解析では、2015年12月実施のRC造骨組実験との比較によって鋼構造骨組の特性を明確にする。

2. 実験と試験体概要

本研究ではまず初めに、各立面1スパンのフレームで構成される鋼構造骨組に対する振動台実験を対象に、分析を進める。試験体詳細を図1に示す。入力地震波として、JMA-Kobe 原波 NS 方向 (図2) の振幅倍率 10%, 25%, 50%, 100% とした波形を用いた。図3には錘の上に設置した加速度計とフレーム試験体の層間変位時刻歴を示す。

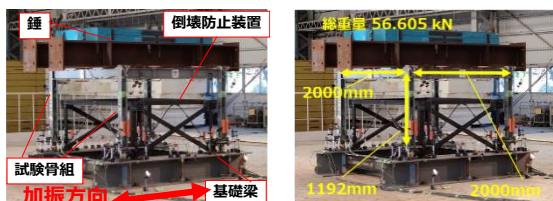


図1 試験骨組

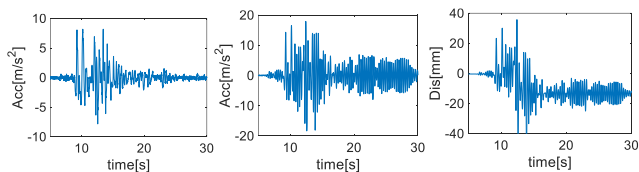


図2 Kobe 波形

図3 100%加振時の Acc と Dis 時刻歴

3. 実験分析

実験で得られた計測データを整理し、分析する。各変形量の計測計画は連携する各大学と協力し、様々な位置に適切に変位計を設置した。ひずみから断面の曲率を算出し、その直線分布を外挿することで材端のモーメントを求めた。ひずみゲージの計測値の分布、柱頭モーメント、梁端モーメントの算出により、理想的な単純梁となっていることや架構全体としての応力分布を明らかにした (図4)。耐力の計算値と実験値との比較を図5に示す。100%加振において、柱頭が塑性化していることがわかる。一方で梁端は弾性範囲にとどまる。

同様にして梁端回転角、接合部せん断変形角、柱頭塑性回転角、を計測データ妥当性を検証しながら詳細に計算した。この実験分析より得られたフレーム試験体の応答性状は、後述する解析モデルの構築において、判断材料として非常に妥当性のある資料となった。

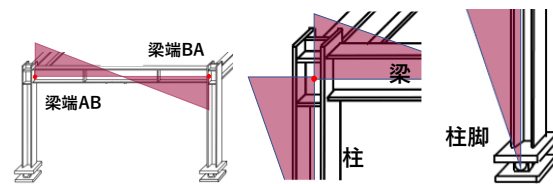


図4 計測データから確認した応力状態

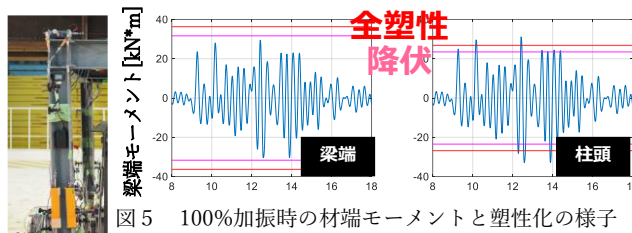


図5 100%加振時の材端モーメントと塑性化の様子

4. 地震応答の再現

実験で得られた鋼構造フレーム試験体の地震時応答を数値解析によって表現し、実験値との整合という観点で比較する。解析ソフトウェアとしては UC Berkley より世界展開される OpenSees を用いた。解析モデルの概要を図6に示す。実験結果を参考にして材端に弾塑性回転ばねを組み込み、それにより線材の応答値を再現する計画とした。ばねの骨格曲線にはバイリニアを採用し、初期剛性は理想的な単純支持の部材を考え、柱梁それぞれに理論値を与えている。柱頭はピンとし、接合部は変形の影響は無いと考え剛域のみ考慮した。入力の実験の層間変位を参照し、同様の時刻歴波形を与えた。解析と実験値の比較を図7~10に示す。各変形量ともに実験値を良好に表現でき、システムとしての剛性、部材の塑性変形を適切に評価できていることを確認した。

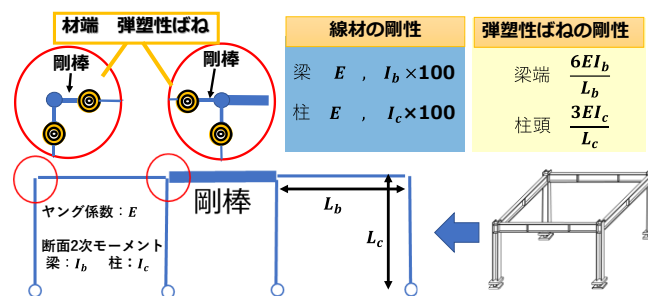


図6 解析モデル概要

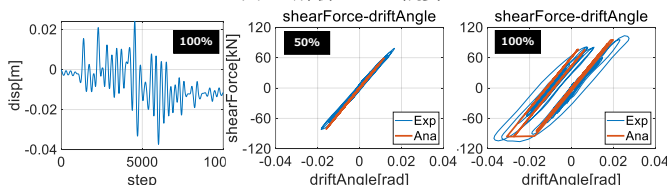


図7 入力波形

図8 層せん断力-層間変形角

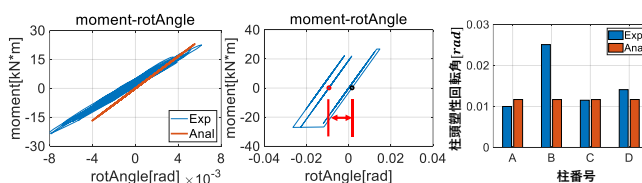


図9 梁端たわみ角

図10 柱頭塑性回転角

5. 弾塑性応答時における剛性の推移

骨組の弾塑性解析では刻々と変わる剛性の推移，すなわち復元力特性をどう設定するか，ということが最大のテーマである。一連の共同研究では実大柱梁接合部実験の分析の際，除荷剛性の推移から構造物の剛性劣化性状について検討されている。本研究でもその分析を一部踏襲する形で，フレームの除荷剛性を調査し，また同じく復元力特性の設定に大きく寄与していると思われる再荷剛性についての分析も加えて実施した。さらに，鋼構造との比較対象として以降の分析では，2010/12，2015/12 に E-Defense で実施された4層と10層のRC造フレーム実験の1自由度応答を比較対象とする。

1次モードを仮定して実験値の特性に対応する等価1自由度応答を，限界耐力計算法においても採用されている以下の式(1)，(2)から求める(図11)。

$${}_1S_d = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \beta_1 u_i \delta_i(t)}{\sum_{i=1}^N m_i \beta_1 u_i \delta_i(t)} \quad (1)$$

$${}_1S_a = \frac{\sum_{i=1}^N P_i(t) \beta_1 u_i \dot{S}_d(t)}{\sum_{i=1}^N m_i \beta_1 u_i \dot{S}_d(t)} \quad (2)$$

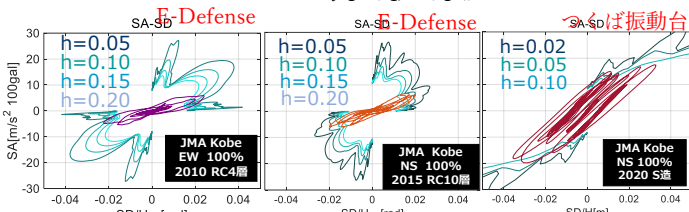


図11 等価1自由度応答と応答スペクトル

除荷剛性と再荷剛性を抽出して定量評価したうち，除荷剛性を示す(除荷剛性:抽出したサイクルごとに変位ピークの点から耐力0の直前の点までの履歴を最小二乗法により一次関数に近似した傾き)。図12に結果を比較する。

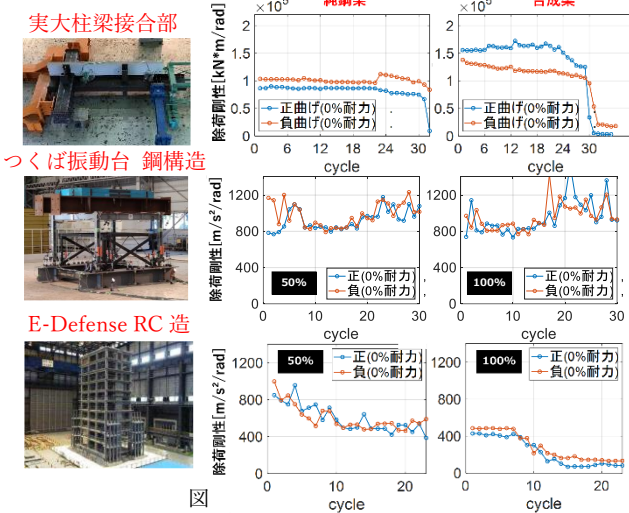


図12 除荷剛性の推移

実大柱梁接合部，2020年鋼構造フレームは塑性化後でも剛性が大きく落ちることはない。2015年のRC試験体は大変形後除荷剛性，再荷剛性ともに大きく低下している。このような残留変形の有無や剛性劣化挙動，除荷時と再荷時の様相の違いは，弾塑性解析，等価線形解析の両者において，合理的に反映されるものである。

6. 等価線形化解析

応答スペクトル法では静的増分解で1次モード応答の骨格曲線を作成するのが通常であり，等価線形化法に基づくキャパシティー・スペクトル法によって応答変位点を求め，各層の応答評価，各部材の応力評価等の手順でおこなわれる。ここではこうした評価法を念頭に置き，前節で求めたフレームの1自由度応答をもとに必要なパラメータを推定し，その後等価線形化法を用いた応答評価に対する有用性，前節で確認した地震応答時の特性との関連を考察する。結果を各試験体別に図13，図14に示す。

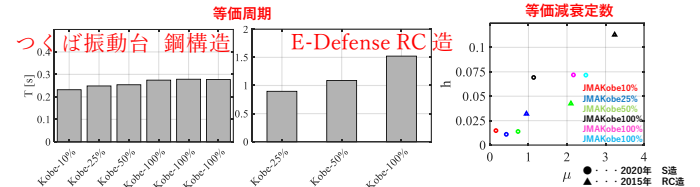


図14 パラメータの推定

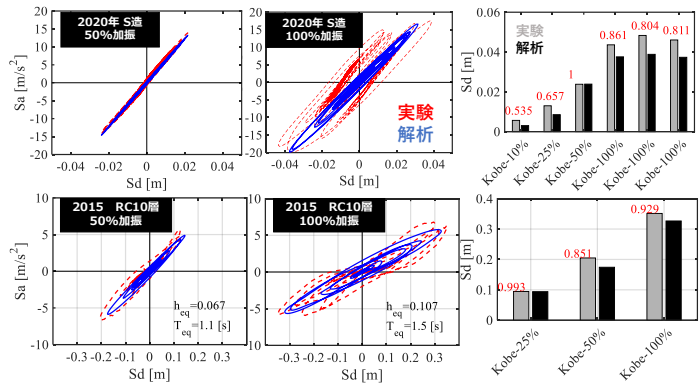


図15 実験と等価線形解析の比較

鋼構造試験体においては特徴的な残留変形を伴う変位の推移は再現できていないが，応答スペクトル法を用いて最大応答値を評価することは合理的である。RC造試験体に関しては剛性が低下していき，最大のピーク応答点を指向する履歴を描くため，地震応答は最大応答値以外の時刻も良好に対応する。繰り返す地震の場合は，剛性が当初よりも大きく低下しており，周期と減衰の推移を事前に評価することが必要である。

7. まとめ

今回，鋼構造骨組の振動台実験に参加することができ，各種工学量の計測方法と分析手法を習得できた。弾塑性解析と等価線形化解析を実施，それぞれの解析方法に有利な点を見出した。鋼構造骨組の場合，除荷剛性や再荷剛性が変化しない代わりに残留変形が累積する。累積塑性変形で限界を定義する場合，弾塑性履歴の設定が解析上も必要である。RC骨組のように剛性がある規則で低下していく構造の場合は等価線形化解析において，時刻歴まで追える可能性がある。鋼構造骨組の場合，等価線形化法は最大応答点については追えそうであるが，累積塑性変形の評価は大きな課題である。

参考文献

- 1) 松宮智央，長江拓也，鍾育霖，岡崎太郎，福山國夫，中島正愛：超高層鋼構造建物の柱梁接合部に関する4層骨組み振動台実験/2012年1月，日本建築学会構造系論文集 第77巻 第671号 85-94。
- 2) 野々山優輔：実大実験に基づく超高層鋼構造建物の構造部材および非構造部材の耐震性能評価，名古屋大学大学院環境学専攻，令和2年