

建築鉄骨の激震時脆性破壊性能に及ぼすスケール効果に関する破壊力学的考察
 Fracture mechanics study on scale effect of brittle failure evaluation in buildings due to severe earthquake

学籍番号 03-180864 岩田 裕真
 指導教員 川畑 友弥

(2020 年 1 月 30 日提出)

Keywords: 建築, 鋼構造, 脆性破壊, 延性破壊, スケール則

1. はじめに

近年建築物は高層化・大型化が進んでいる。しかし、部材の寸法が大きくなると、材料力学的検討により導出される負荷段階よりも早期に脆性破壊が発生する「スケール効果」が存在することが一般に知られている。しかし、大型構造建築物建造の際の耐震性評価には等比縮小サイズでのみで評価が行われているという現状がある。そこで本研究では、この建築構造の大変形時脆性破壊現象においてスケール効果が本当に見られるのか、そしてその因子は何に由来しているのかを実験的・解析的に明らかにしていく。

2. 等形状を持つ柱梁模型試験片の三点曲げ試験

約 1:1/2:1/4 にスケーリングした柱梁模型試験片(以下 L サイズ, M サイズ, S サイズと呼ぶ)を用いて三点曲げ実験を行った。Fig. 1 に試験片の寸法を, Fig.2 に実寸大サイズである L サイズの試験片の実験セットアップを示す。

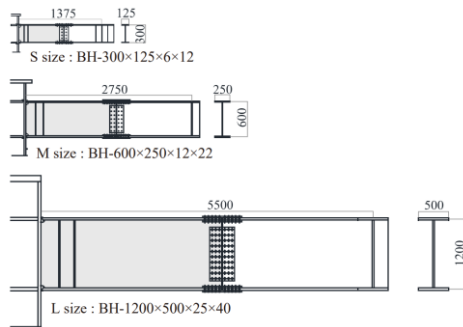


Fig.1 General dimensions of specimens

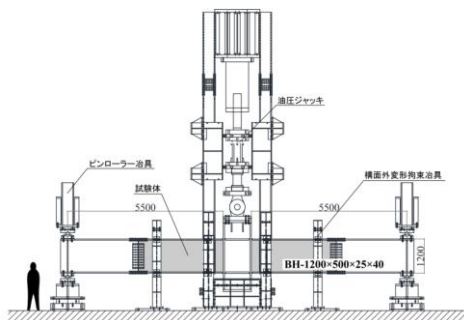


Fig. 2 Experiment setup for L specimen

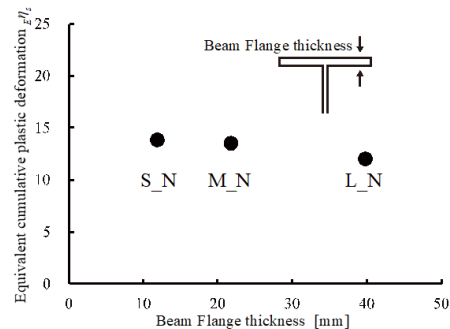


Fig. 3 Comparison between thickness and $E\eta_s$

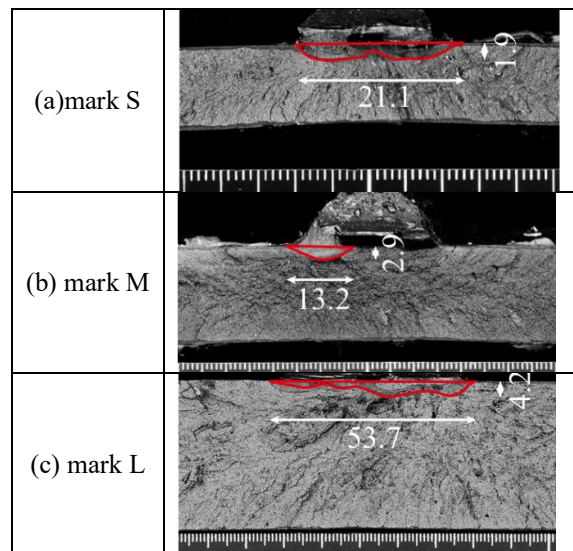


Fig. 4 Fracture appearance and ductile crack extension size of each specimen

载荷実験はいずれの試験体も脆性破壊によりその耐荷能を急速に失うことで終了した。全ての試験体で柱と梁の接合部近傍(同等の箇所が上下左右4箇所あるうちの1箇所)で破断している。この破断形態は阪神淡路大震災など大地震での一般建築の破損例と同様である。Fig. 3 は実験結果の最終整理結果を示している。この図の縦軸は、等価累積塑性変形倍率 $E\eta_s$ というもので、変形によって部材に加えられたエネルギーを部材の寸法によらないように無次元化したものである。脆性破断した時の $E\eta_s$ の値を3つの試験体で比較したところ、部材寸法が大きくなっても破断時の

$e\eta_s$ は僅かしか小さくならなかった。ただし、これらの試験片に用いた鋼材を用いて行ったシャルピー試験の結果から、L材のシャルピー靱性はS材、M材に比べて非常に優れていたことがわかっていて、靱性が優れているにもかかわらず破断時の $e\eta_s$ の値が下がったということは、スケール効果が見られたのかもしれないという考察が可能である。また、Fig. 4 は破面の様子を示している。この様子から、脆性破壊が始まる前にはまず延性破壊が起きていることがわかる。

3. 線形破壊力学理論を用いた脆性破壊特性のスケール効果評価

第2章で行った鉄骨試験では、試験片に小さなコンピュータ(Raspberry pi[1])と web カメラを取り付け、破壊発生地点であるスカラップ底の状態をモニタリングした。鉄骨実験で载荷途中の破壊の様子を常時カメラで追うというのは本分野の実験では初めての例である。この観察により延性亀裂が徐々に進展していること、L試験体では早期に亀裂が進展していることなど重要な事実を確認した。ここでは、成長した延性亀裂から脆性破壊に転じる現象にたいして線形破壊力学理論を用いたスケール効果推定を行う。

シャルピー衝撃特性から平面ひずみ応力拡大係数 K_{Ic} に変換し[2]、脆性破壊は最弱リンク事象であることからこの K_{Ic} を $m=4$ のワイブル分布と捉える[3]。ワイブル分布確率密度関数、累積破壊確率を算出することで、構造モデルでの脆性破壊限界条件が材料特性ばらつき分布のどの位置に相当するのかが把握できる。これを用いて、どの試験体にも M 材あるいは S 材を用いたとして材料特性を統一して比較すると、明確に L サイズのモデルで早く破壊が発生することがわかった (図は割愛)。これは脆性破壊特性に関してスケール効果が見られることを証明したと言える。

4. 有限要素法解析を用いた延性破壊発生時のスケール効果評価

第3章では、脆性破壊発生特性にはスケール効果が見られることがわかり、また第2章では脆性破壊が発生する前に延性亀裂進展が必ず発生することが分かった。そこで、有限要素法(以下FEM)解析を用いて延性破壊発生特性のスケール効果の評価を試みる。

延性破壊はひずみ支配であるため、FEM で延性き裂を再現する際、相当塑性歪をクライテリオンとするダメージ損傷則を実装した要素削除法を採用する。この時の相当塑性ひずみの値を限界相当塑性ひずみと呼ぶ。

まず、第2章で行った鉄骨試験で用いた試験片から一部分を取り出し、CTOD 試験を行う。このCTOD 試験を FEM で再現し、試験片の材料特性

を得ることを試みる。

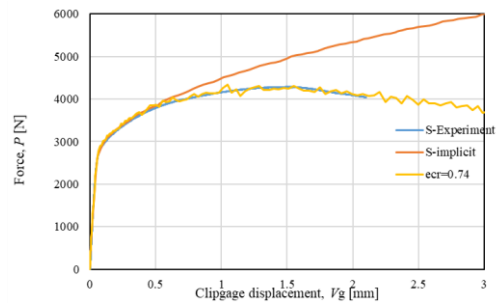


Fig. 5 determination of critical ductile fracture initiation strain by comparison of CTOD test data and explicit FEM with element deletion

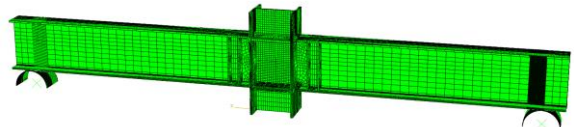


Fig. 6 FEM model for actual structural test specimen

Fig. 5 は、材料定数である限界相当塑性ひずみの値を得るために CTOD 実験値から得られる $P-Vg$ 曲線に様々な限界ひずみ値を設定して合わせこんだ結果を表すグラフである。要素削除法では、通常こうした計算で用いられる陰解法では要素が削除される段階で計算が不安定化するため、川畑ら[4]の手法を参考に陽解法を用いた準静的解析として進める。

こうして得られた限界相当塑性ひずみの値を、Fig. 6 に示した実験シミュレーションモデルに入れ、要素が削除されるモジュールを組み込む。

数値計算の結果は、第2章で評価の際に用いた $e\eta_s$ を用いて評価する。L, M, S の3種類のモデルに同じ材料定数を入力し (ここでは M の材料定数)、それぞれ要素が削除され始めた時点、すなわち延性き裂が発生した時点での $e\eta_s$ の値を比較すると、 $S>M>L$ の順となり、L サイズでは早期に延性き裂が発生することが分かった。これにより、脆性破壊のみならず延性破壊進展についてもスケール効果が見られると言える。

5. まとめ

本研究により、延性破壊発生特性、脆性破壊発生特性のいずれにおいてもスケール効果は見られることが分かった。しかし、その要因の定量的ブレークダウンが課題として残っている。

参考文献

- [1] Raspberry Pi, https://ja.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi, 2020.1.30
- [2] API 579-1 ASME FFS-1, 2016, Fitness-For-Service
- [3] A. Pineau, Advanced in Frac. Res., 5th I.C.F., D. Francois, Eds., 2, 553, 1981
- [4] 川畑友弥, 大畑充, 南二三吉, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.5(2007), 235-243