

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22510170

研究課題名（和文）突発衝撃荷重を受ける鋼骨組の進行性崩壊挙動に関する研究

研究課題名（英文）STUDY ON PROGRESSIVE COLLAPSE OF STEEL FRAME UNDER IMPACT LOADING

研究代表者

小室 雅人（KOMURO MASATO）

室蘭工業大学・工学研究科・講師

研究者番号：10270183

研究成果の概要（和文）：衝突や爆発といった衝撃的な荷重を受ける鋼構造物の進行性崩壊挙動を検討するために、柱梁接合形式の異なる3種類の鋼門型骨組を対象に、重錘落下衝撃実験および静荷重載荷実験を実施した。併せて、三次元弾塑性解析も実施し、実験結果との比較とともに解析手法の妥当性を検討した。衝撃的外力を受ける鋼骨組の動的挙動を実験的・数値解析的に明らかにするとともに、進行性崩壊挙動を効率よく解析するための基礎的な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate the progressive collapse behavior of steel structures subjected to exceptional loads such as explosion or collision, impact loading and/or static loading tests for the steel portal frame with three different types of beam-to-column connections were carried out. In addition, 3D elastic-plastic FE analyses were also performed. The validity of the analysis method was conducted by comparing the experimental results. Dynamic behaviors of steel frames under impact loading were experimentally and numerically investigated. Furthermore, a basic knowledge for effectively analyzing the progressive collapse behavior was obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム工学・社会システム工学・安全システム

キーワード：危機管理，減災，構造工学・地震工学，シミュレーション工学

1. 研究開始当初の背景

2001年に発生した米国同時多発テロでは、世界貿易センタービルに航空機が衝突・炎上し、ビル2棟と近隣の高層ビルが完全に崩壊した。この崩壊は火災に起因する進行性崩壊現象の典型である。

一方、衝突や爆発等といった現象は、極めて短時間に非常に巨大な力が構造部材や構

造物に作用する。そのため、それらが一瞬にして消失するような場合が想定される。その場合、近接する部材に応力が再分配されると同時に構造安定性が損なわれ、進行性崩壊を引き起こす可能性がある。このような状況に陥ることなく、構造物の安全性を確保するためには、各部材や柱一はり接合部にあらかじめ十分な余力を与えておく必要がある。部材

消失による構造物の動的挙動は、消失位置、材料特性、部材強度および柱-はり接合部挙動等の影響を受ける。特に、柱-はり接合部の挙動特性は、接合形式や構成要素によって大きく異なるため、構造全体の動的挙動に大きな影響を与えることが予想される。しかしながら、静的な接合部の挙動特性に関しては十分な研究成果があるものの、瞬間的な動的挙動特性に関しては未だ不明な点も多い。

したがって、このような想定外の衝撃外力に対して構造物の動的挙動を明らかにし、さらに進行性崩壊の可能性を検討することは、安全・安心な国民生活を保証するための重要な事項の一つである。

2. 研究の目的

爆発や衝突等の偶発作用による鋼構造物の進行的崩壊を防ぐために、強靱性を有する鋼構造物の設計法を確立することである。すなわち、偶発作用の一つである突発衝撃荷重作用時における鋼骨組の動的挙動特性や進行性崩壊現象を実験的・数値解析の側面から把握し、強靱性やリダンダンシーをもつ安全・安心な鋼構造物の設計法確立に向けた基礎データの収集を行うものである。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、以下の項目について研究を推進した。

- (1) 基本構造である門型骨組（幅：2.2 m、高さ：1.3 m）を対象に、重錘（質量：500 kg）を所定の高さから自由落下させる衝撃実験および比較のための静載荷実験を実施した（写真1および2参照）。衝撃実験は初期速度および増分速度を1 m/s とし、骨組が終局に至るまで衝突速度を漸増させる繰り返し載荷とした。静載荷実験は、梁材スパン中央に強制変位を与えることにより実施し、載荷点のたわみが約100 mm に達するまで実施した。さらに、柱-はり接合部の接合形式が動的挙動特性に及ぼす影響を確認するため、接合部形式の異なる3種類の試験体（剛接合骨組、EP接合骨組、TS接合骨組）について実験を実施し、接合部形式の違いによる動的挙動の差異を把握した。図1に対象とした柱-はり接合部形式を示す。
- (2) 有限要素法を用いた三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、実験結果の再現を行うとともに、信頼性の高い解析手法の確立を試みた。図2には、重錘落下衝撃を受ける剛接合骨組の要素分割状況を示している。使用要素は全て8節点固体要素とし、初期不整および残留応力に関しては考慮していない。また、EP接合およびTS接合骨組に関しては、実構造と同じようにプレート材あるいはアングル材と柱/梁



写真1 重錘落下衝撃実験状況
(剛接合骨組)



写真2 静載荷実験状況
(TS接合骨組)

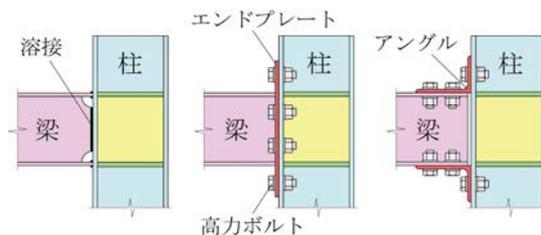


図1 3種類の接合部形式
(左から剛接合, エンドプレート(EP)接合,
トップ&シートアングル(TS)接合)

フランジ間に接触・剥離を伴う接触面を導入した。解析は、実測結果に基づき重錘の衝突速度を変化させて実施し、得られた結果を実験結果と比較することにより、解析手法の妥当性や動的特性を詳細に検討した。また、静載荷状態についても数値解析を実施した。

- (3) (2) で得られた解析手法を用いて、多層多径間骨組へ拡張し、数値解析を実施した。

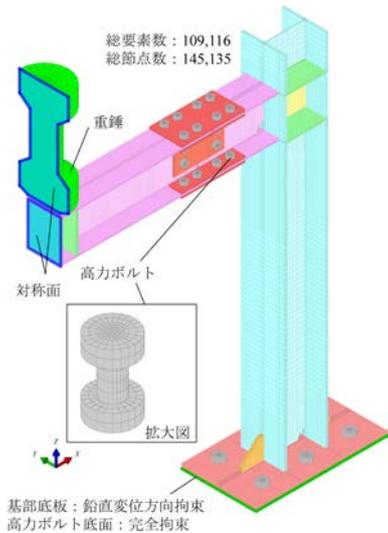


図2 有限要素モデル (剛骨組の場合)

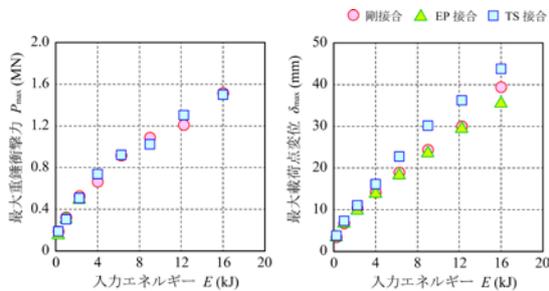


図3 入力エネルギーと最大応答値の関係 (左: 最大重錘衝撃力, 右: 載荷点変位)

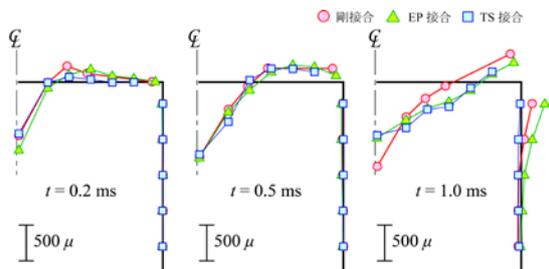


図4 時系列軸方向ひずみ分布 ($V = 3.0 \text{ m/s}$)

部材消失位置, 接合部形式および材料強度等の影響を数値解析的に検討した。

4. 研究成果

一連の研究において得られた結果を整理すると次のとおりである。

(1) 重錘落下衝撃実験および静載荷実験

図3に示す重錘質量と衝突速度から算出される入力エネルギーと最大応答値の関係から, 最大重錘衝撃力は入力エネルギーの増加とともに増加する傾向を示すこと, また, 接合部剛性 (形式) が最大重錘衝撃力に与える影響は小さいこと, 入力エネルギーと最大変位の関係 (図3右参照) は, ほぼ線形関係

にあり, その傾きは接合部剛性が小さいほど大きくなる傾向にあること, 等を実験的に明らかにした。

図4に衝突速度 $V = 3.0 \text{ m/s}$ における骨組内側フランジの軸方向ひずみ分布を時系列的に示す。衝突初期の $t = 0.2 \text{ ms}$ では, ひずみが梁材のスパン中央部にのみ発生し, 梁材の端部や柱材にはひずみが発生していない。 $t = 0.5 \text{ ms}$ では, ひずみは梁材端まで伝達していることが分かる。なお, 0.5 ms までは接合部形式にかかわらずほぼ類似のひずみ分布を示している。このことは, 重錘衝突初期に発生する衝撃力が接合部剛性によらずほぼ等しいことを裏付けているものと考えられる。さらに $t = 1.0 \text{ ms}$ では, 梁端部に大きなひずみが発生すると共に, 柱材にも伝達していることが分かる。これより, 応力の伝播状況を実験的に明らかにした。

静載荷実験から得られる荷重-変位関係 (図5) より, 荷重レベルが小さい領域 (弾性領域) では, 接合形式にかかわらずほぼ同一の挙動性状を示す。一方, 静的 (終局) 耐力は, 接合形式によって異なり接合部限界曲げ耐力に対応して大きくなる傾向にある。また接合部近傍の梁材に生じる軸方向ひずみは, 接合部耐力の大きさに対応して大きくなることを確認した。

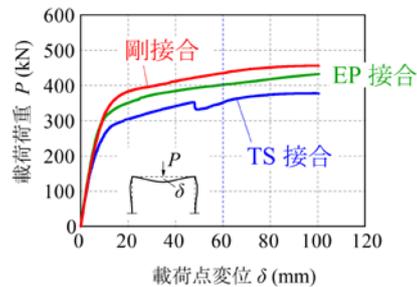


図5 荷重-変位関係 (静載荷)

(2) 有限要素法を用いた三次元弾塑性解析

図6には, 数値解析結果の一例として, 衝突速度 6 m/s における TS 接合骨組の重錘衝撃力と載荷点変位の応答波形を実験結果と解析結果を比較して示している。図より, 重錘衝撃力波形に着目すると, 数値解析結果の最大値は実験結果のそれよりも小さく評価されるものの, 波形性状や衝撃力継続時間に関しては, 両者ほぼ一致している。また, 載荷点変位波形の場合においても, 最大載荷点変位以降の波形性状は, 両者で必ずしも一致していないものの, 最大載荷点変位は概ね対応していることが分かる。

図7には, 静載荷時における数値解析結果の一例として, 剛接合骨組の解析結果を実験結果と比較して示している。図より, 載荷初期の剛性勾配や部材の塑性化による剛性の低下傾向など, 数値解析結果は実験結果を非

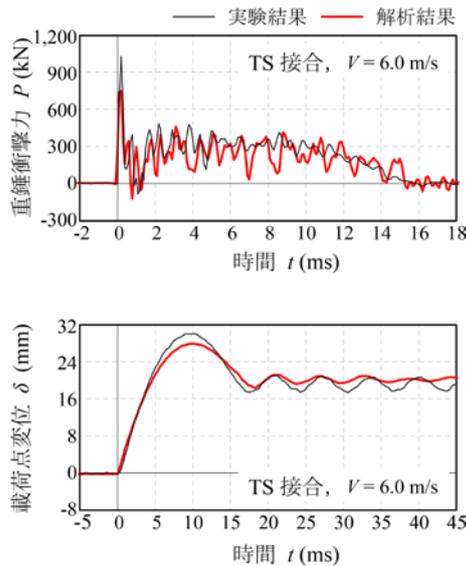


図6 応答波形の比較
(上段：重錘衝撃力，下段：載荷点変位)

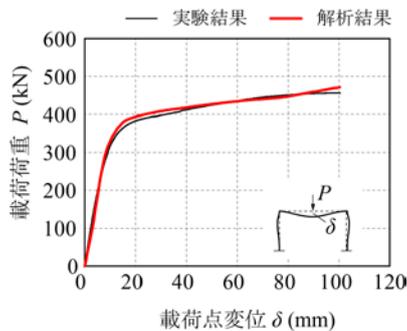


図7 荷重-変位関係の比較 (剛接合骨組)

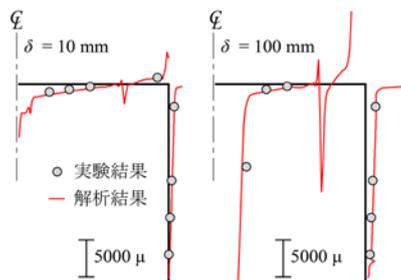


図8 軸方向ひずみの比較 (剛接合骨組)

常によく再現していることが分かる。

図8には、剛接合骨組を一例として、骨組内側の軸方向ひずみ分布について実験結果と数値解析結果を比較して示している。図より、数値解析結果は実験結果のひずみ分布をほぼ適切に再現している。さらに、載荷点近傍に局所的に発生している比較的大きなひずみ分布もよく再現していることが分かる。

これより、提案の数値解析手法を用いることにより、接合部形式にかかわらず鋼門型骨組の動的・静的挙動特性を精度よく再現する

ことが可能であるといえる。

(3) 多層骨組への展開

(2)で提案した解析手法を用いて、進行性崩壊に向けた検討として多層多径間骨組を対象に数値解析的な検討を試みた。しかしながら、接合部を詳細にモデル化したことによって、数値解析モデルが非常に複雑となった。その結果、計算時間が膨大なり、種々のパラメータを変化させた数値解析を十分に実施することができなかった。

今後は、接合部を実験結果に基づいて簡易モデルにモデル化するなどの検討を行って、進行性崩壊におよぼす部材消失の影響を明らかにする必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

- ① Komuro, M., Kishi, N., and Chen, W.F.: Impact response analysis of steel portal frames under falling-weight impact loading, *New Developments in Structural Engineering and Construction*, 査読有, 435-440, 2013, DOI: 10.3850/978-981-07-5354-2 St-61-166
- ② 壺谷孝史, 小室雅人, 岸 徳光: 接合形式の異なる鋼門型骨組の静的耐荷挙動に関する実験的・数値解析検討, *土木学会北海道支部論文報告集*, 査読無, 第69号, A-42, 2013.
- ③ 小室雅人, 岸 徳光: 鋼門型骨組の衝撃荷重載荷実験と数値シミュレーション, *日本建築学会2012年度大会(東海)*, 査読無, 論文番号: 20175, 349-350, 2012.
- ④ 壺谷孝史, 小室雅人, 岸 徳光: 重錘落下衝撃を受ける鋼門型骨組の耐衝撃挙動に関する実験的検討, *土木学会北海道支部論文報告集*, 査読無, 第68号, A-41, 2012.
- ⑤ Kishi, N., and Komuro, M.: Dynamic response analysis of steel portal frames with semi-rigid connection under impact loading, *Behaviour of steel structures in seismic areas*, 査読有, 997-1002, 2012, DOI: 10.1201/b11396-152
- ⑥ Komuro, M., Kishi, N., and Kurihashi, Y.: Impact loading tests of steel portal frames with different types of connections, *Behaviour of steel structures in seismic areas*, 査読有, 1003-1008, 2012, DOI: 10.1201/b11396-153
- ⑦ Komuro, M., Kishi, N., Kurihashi, Y. and Chen, W.F.: Dynamic response analysis for rigid steel portal frames under impact loading, *Applied Mechanics and Materials*, 査読有, 82, 247-252, 2011, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.82.247

- ⑧ 小室雅人, 岸 徳光 : 衝撃荷重を受ける鋼門型骨組の動的応答解析, 日本建築学会 2011 年度大会 (関東), 論文番号: 22557, 11123-1114, 2011.
- ⑨ 小室雅人, 岸 徳光 : 異なる柱梁接合部を有する鋼門形骨組の耐衝撃挙動に関する数値解析的研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 査読無, 第 67 号, A-51, 2011.
- ⑩ 小室雅人, 岸 徳光, 玉木美帆 : 剛結鋼骨組の耐衝撃挙動に関する数値解析的研究, 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 査読無, 10, 155-160, 2010.
<http://kabse.doc.kyushu-u.ac.jp/ronbun/ronbun10/No10-30.pdf>

[学会発表] (計 10 件)

- ① Komuro, M.: Impact response analysis of steel portal frames under falling-weight impact loading, The Seventh International Structural Engineering and Construction Conference, 2013.6.19, Honolulu, USA.
- ② 壺谷孝史 : 接合形式の異なる鋼門型骨組の静的耐荷挙動に関する実験的・数値解析検討, 土木学会北海道支部平成 24 年度年次技術研究発表会, 2013.2.3, 函館工業高等専門学校
- ③ 小室雅人 : 鋼門型骨組の衝撃荷重載荷実験と数値シミュレーション, 日本建築学会 2012 年度大会 (東海), 2012.9.14, 名古屋大学
- ④ 壺谷孝史 : 重錘落下衝撃を受ける鋼門型骨組の耐衝撃挙動に関する実験的検討, 土木学会北海道支部平成 23 年度年次技術研究発表会, 2012.2.3, 北海道立道民活動センター (かでの 2・7)
- ⑤ Kishi, N.: Dynamic response analysis of steel portal frames with semi-rigid connection under impact loading, Proceedings of 7th STESSA 2012, 2012.1.11, Santiago, Chile
- ⑥ Komuro, M.: Impact loading tests of steel portal frames with different types of connections, Proceedings of 7th STESSA 2012, 2012.1.11, Santiago, Chile
- ⑦ Komuro, M.: Dynamic response analysis for rigid steel portal frames under impact loading, Third International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, 2011.8.30, Lugano, Switzerland.
- ⑧ 小室雅人 : 衝撃荷重を受ける鋼門型骨組の動的応答解析, 日本建築学会 2011 年度大会 (関東), 2011.08.24, 早稲田大学
- ⑨ 小室雅人 : 異なる柱梁接合部を有する鋼門形骨組の耐衝撃挙動に関する数値解析的研究, 土木学会北海道支部平成 22 年度年次技術研究発表会, 2011.2.6, 苫小牧工業高等専門学校

- ⑩ 小室雅人 : 剛結鋼骨組の耐衝撃挙動に関する数値解析的研究, 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム, 2010.12.10, 九州大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者
 小室 雅人 (KOMURO MASATO)
 室蘭工業大学・工学研究科・講師
 研究者番号 : 10270183

(2) 研究分担者
 岸 徳光 (KISHI NORIMITSU)
 釧路工業高等専門学校・校長
 研究者番号 : 30153076

栗橋 祐介 (KURIHASHI YUSUKE)
 室蘭工業大学・工学研究科・講師
 研究者番号 : 30414189