

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

Experimental study on impact resistant behavior of steel portal frames under falling-weight impact loading

室蘭工業大学大学院 ○ 学生員 壺谷 孝史 (Takafumi Tsuboya)
 室蘭工業大学大学院 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

建築などの鋼骨組構造物は、主に自重などの固定荷重、人間や物品などの積載荷重および風荷重や雪荷重などを考慮して設計が行われている。しかしながら、発生確率は極めて低いが、自動車、脱線列車および航空機などの衝突や、ガス、火薬の屋内爆発による偶発的な衝撃荷重の作用も想定され、人命に関わる大事故に至る場合も少なくない。より安全・安心な構造物を供するためには、このような偶発作用に対しても十分に配慮した設計が望まれる¹⁾。

一方、構造物の耐衝撃設計に着目すると、落石防護覆道などの鉄筋コンクリート構造物に関しては、実規模に近い模型を用いた衝撃載荷実験²⁾や有限要素法による数値解析³⁾が数多く実施されている。しかしながら、鋼構造物に関しては部材レベルでの検討はなされているものの⁴⁾、構造物を対象としたものはそれほど研究されておらず未だ不明な点も多い。

このような背景より、本研究では、鋼構造物の耐衝撃挙動に関する基礎資料の収集を目的として、最も単純な構造形式である鋼門型骨組を対象として重錘落下衝撃実験を実施した。ここでは、柱梁接合形式の異なる2種類の門型骨組を用意し、接合部剛性が耐衝撃挙動に与える影響について検討を行った。また、比較のために同一骨

組に対して静載荷実験も実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、本実験で使用した鋼門型骨組(鋼種:SN400B, 幅:2.2m, 高さ:1.3m)の形状寸法を示している。柱材および梁材はそれぞれH200×200×8×12およびH200×150×6×9のH形鋼を使用した。また、柱梁接合部にはパネルゾーンの変形を抑制するために、柱材に板厚12mmの補剛材および板厚6mmのダブルプレートを溶接している。さらに、スパン中央部の梁材には衝撃荷重による局所座屈を抑制するために、板厚12mmの補剛材を配置している。

本研究では、鋼骨組の耐衝撃挙動に関する接合部剛性の影響を検討するために、柱梁接合形式として(a)剛接合および(b)トップ&シート接合(以後、TS接合)の2種類を用いた。TS接合は、L150×100×12の不等辺山形鋼を使用し、図-1(b)に示すように高力ボルトを用いて梁材と柱材を接合している。高力ボルトにはF10T(M20)を使用し、鋼構造接合部設計指針⁵⁾に従って182kNの締付け力を導入した。

表-1には、本実験で使用した鋼材の材料物性値(ミリシート)を一覧にして示している。

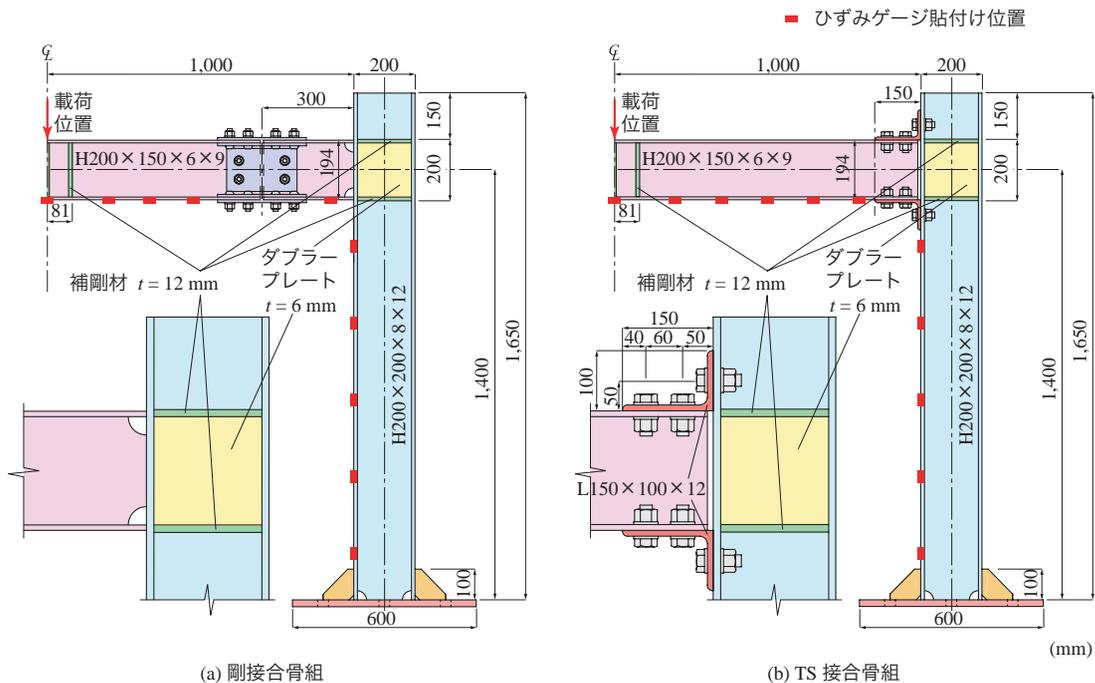


図-1 試験体概要(正面図および柱梁接合部拡大図)

表-1 物性値一覧

名称	鋼種	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)
柱材	SN400B	307	458	30
梁材		327	480	29
アングル材		307	443	32
補剛材		307	443	32
ダブルプレート		333	427	31



写真-1 衝撃実験状況

2.2 実験方法および測定項目

本実験では、接合部形式が鋼骨組の挙動特性に及ぼす影響を明らかにするために、衝撃実験の他に静載荷実験も実施している。以下、それぞれの実験方法について述べる。

静載荷実験は、梁材中央部に幅 10 cm の鋼厚板を介して、油圧ジャッキ（容量 500 kN）を用い、載荷点たわみが約 100 mm に達するまで行った。

衝撃実験は、梁材中央部に質量 500 kg の鋼製重錘を所定の高さから自由落下させることにより行った。衝撃荷重は、重錘の初速度および増分速度を 1.0 m/s と設定して、衝突速度が最大 8.0 m/s まで繰り返し与えることとした。重錘形状は、載荷点部の直径が 230 mm で、その底部には衝突時の片当たりを防止するために高さ 2 mm のテーパが施されている。なお、試験体はいずれも高力ボルトを用いて柱材基部底板を基礎に固定している。写真-1 は衝撃実験状況を示している。

本実験の測定項目は、(1) 衝撃実験においては重錘に内蔵された超歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力 P_i 、静載荷実験においては荷重測定用ロードセルによる静的荷重 P_s 、(2) 非接触式レーザ変位計による梁材中央点たわみ（以後、変位 δ ）および (3) ひずみゲージによるフランジ各点の軸方向ひずみである。なお、ひずみゲージの貼付け位置は図-1 に示すように骨組の内側フランジである。

3. 実験結果

3.1 静載荷実験結果

図-2 には、静載荷実験から得られた静的荷重 P_s と変位 δ_s の関係を示している。図より、載荷初期の勾配は両骨組でほぼ一致しており、その後、変位が $\delta_s = 10$ mm を超えたあたりから剛性勾配が低下していることが分かる。これより、 $\delta_s < 10$ mm の領域までは、両骨組ともに弾性的な挙動を示していることが分かる。また、実験終了時 ($\delta_s = 100$ mm) の静的荷重に着目すると、剛接合の場合

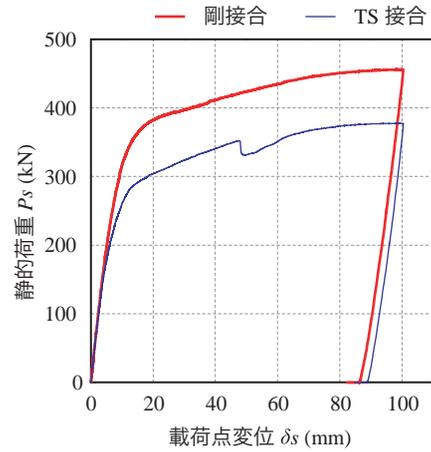


図-2 荷重-変位関係

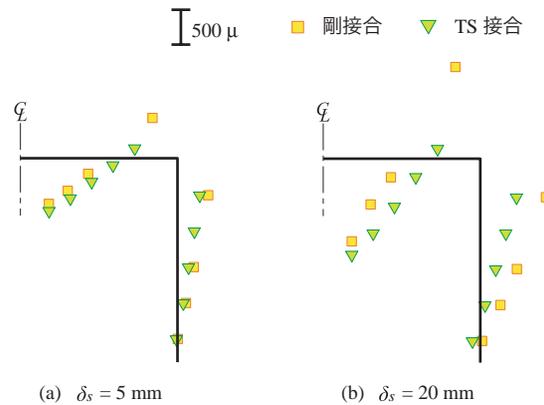


図-3 各変位時における軸方向ひずみ分布

には 456 kN であるのに対し、TS 接合の場合は 378 kN となっており、前者は後者の 1.2 倍程度の静的耐力を有することが分かる。

図-3 には、変位が $\delta_s = 5, 20$ mm 時における骨組内側フランジの軸方向ひずみ分布を示している。図より、接合部形式に関わらず、載荷点から梁材端へほぼ線形的にひずみが増加していることが分かる。また、弾性的な挙動を示す $\delta_s = 5$ mm では、両骨組のひずみ分布はほぼ一致している。一方、変位が増加した $\delta_s = 20$ mm では、接合部近傍に発生するひずみは剛接合の方が TS 接合よりも大きいことが分かる。これは、TS 接合の場合には接合部が非線形な剛性特性を有することより、同一変位では接合部が受け持つ曲げモーメントが小さいことに起因している。

3.2 各種応答波形

図-4 には、衝突速度 $V = 1.0, 3.0, 7.0$ m/s における両骨組の重錘衝撃力波形を示している。波形は縦軸に重錘衝撃力 P_i を、横軸に重錘衝突時点を原点に取り整理している。

図より、衝撃力の継続時間（以後、衝撃力作用時間）は 10 ~ 15 ms 程度であり、衝突速度が大きいほど長くなる傾向にある。

接合形式の影響について着目すると、衝撃初期の第 1 波に関しては、接合形式による顕著な差は見られない。これは、衝撃初期において梁材の曲げ剛性が応答に大きな影響を与え、柱梁接合部の影響は小さいことを示唆している。なお、衝撃力作用時間に関しては、剛接合よりも

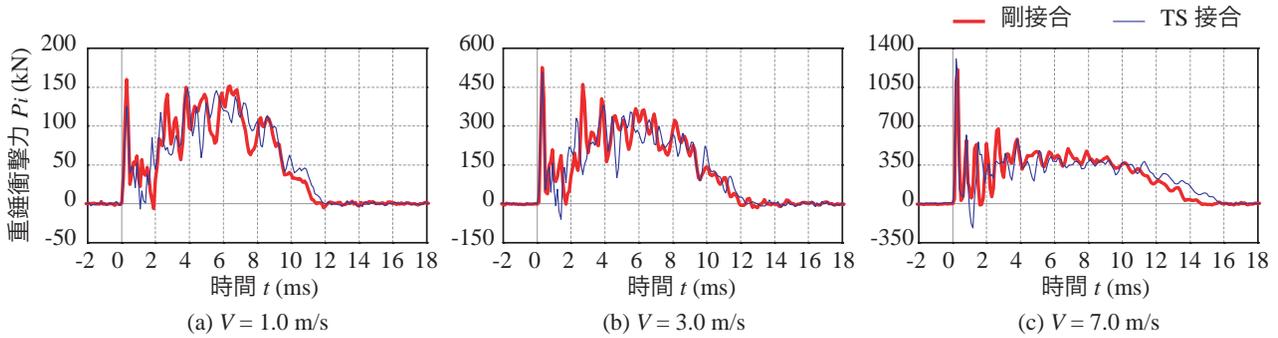


図-4 時刻歴重錘衝撃力波形

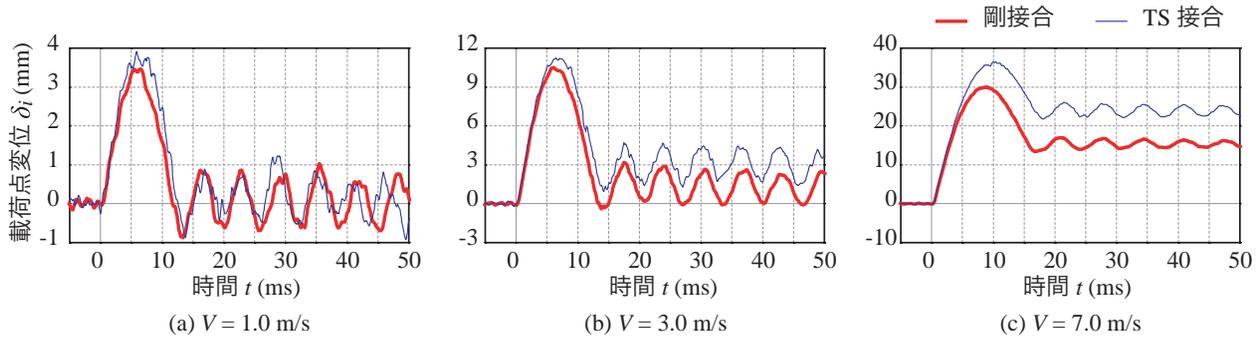


図-5 時刻歴変位波形

TS 接合の方が若干長いことが分かる。

図-5には、 $V = 1.0, 3.0, 7.0$ m/s における変位波形を接合形式ごとに比較して示している。図より、接合形式に関わらず衝突速度の増加とともに最大変位が増加する傾向にあることが分かる。

接合形式について詳細に見ると、衝突初期における両骨組の波形性状はほぼ一致していることが分かる。また、最大変位はTS接合が剛接合に比べ大きく、最大変位発生時刻も遅い。これは、接合部剛性が小さいほど変形が生じやすいことを示唆している。なお、 $V = 1.0$ m/s の場合には、両骨組ともに残留変位は生じていないことより、弾性応答であることが分かる。

3.3 入力エネルギーと各種応答値の関係

図-6には、入力エネルギー E と実験結果から得られた最大重錘衝撃力 $P_{i\max}$ 、最大変位 $\delta_{i\max}$ および残留変位 δ_{ires} の関係を示している。なお、入力エネルギー E は実測衝突速度を用いて算出している。

(a) 図より、最大重錘衝撃力に着目すると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ものの、その増加率は減少する傾向にあることが分かる。また、接合形式に関わらずほぼ同様な分布性状を示していることから、最大重錘衝撃力に及ぼす接合部剛性の影響は小さいことが分かる。

(b) 図より、最大変位は入力エネルギーに対してほぼ線形関係で増加することが分かる。また、同一入力エネルギーの場合について、TS接合は剛接合と比べ、最大変位が大きく示されている。これは、接合部剛性が小さいことにより、TS接合の方がたわみ性に富むためと考えられる。

(c) 図より、残留変位に関しては最大変位と同様に入力エネルギーに対してほぼ線形関係で増加する傾向が見られる。

3.4 時系列ひずみ分布

図-7には、 $V = 3.0$ 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している。図より、衝突初期である $t = 0.2 \sim 0.5$ 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ことが分かる。その後、 $t = 1.0$ ms 時点においてひずみは梁材端までひずみが伝達し、 $t = 2.5$ ms では柱材にひずみが伝達している。また、最大変位発生時刻近傍である $t = 6.0$ ms では、载荷点近傍の局所的なひずみを除き、図-3(b)に示す静載荷時とほぼ同様なひずみ分布を示していることが分かる。これより、衝突速度が $V = 3.0$ m/s 程度の場合には、接合部形式に関わらずその挙動は静載荷時とほぼ等しいものと推察される。さらに、最大変位発生時刻以降に関しては、重錘のリバウンドにより梁材および柱材に負のひずみが発生し、その後は減衰自由振動状態となっている。

なお、既往の数値解析結果⁶⁾では、衝撃荷重を受けるTS接合はピン接合に近い状態となると報告されており、今回の実験結果と大きく異なる傾向を示している。この要因の1つとして試験体のモデル化の影響が考えられる。すなわち、既往の数値解析では高力ボルトは孔中心に理想化された状態で配置しているのに対し、実際の実験では重力の影響などにより高力ボルトは偏心し、かつ孔壁に接触して配置された状態となっている。これらの影響に関しては、今後検討が必要であると考えている。

4. まとめ

本研究では、鋼構造物の耐衝撃挙動に関する基礎資料の収集を目的として、最も単純な構造形式である鋼門型骨組を対象として重錘落下衝撃実験を実施した。本論文で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

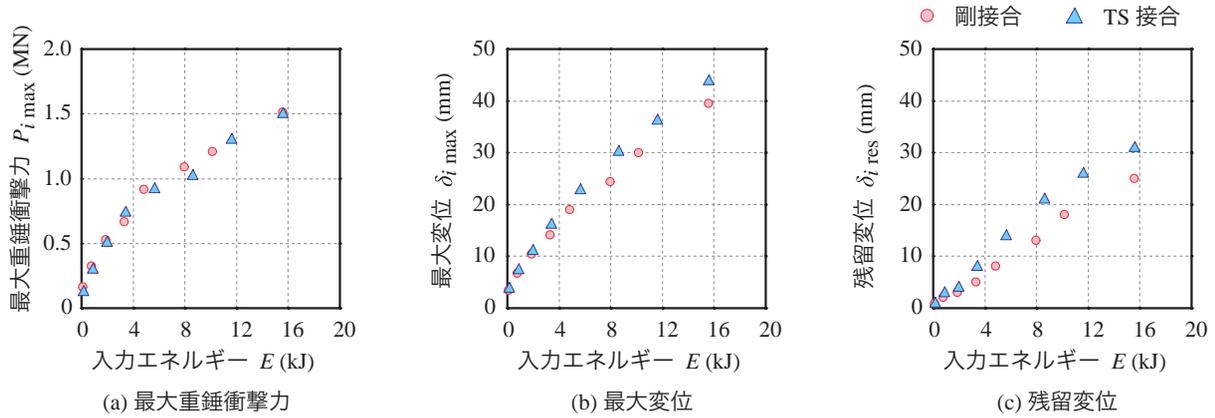


図-6 入力エネルギーと各種応答値の関係

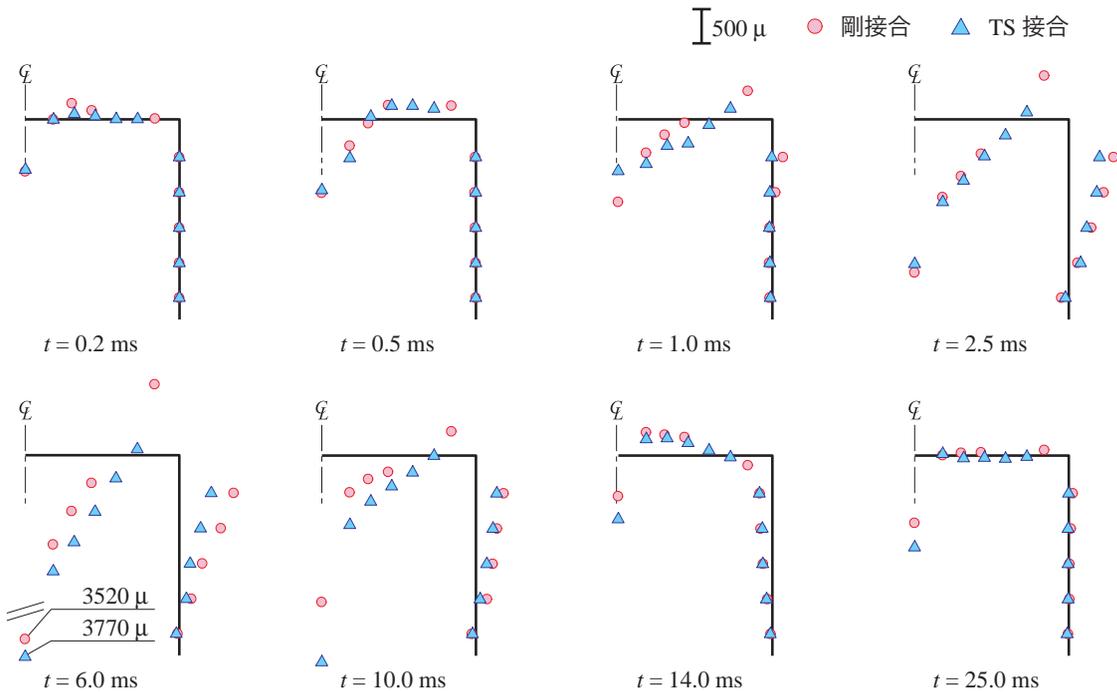


図-7 時系列軸方向ひずみ分布 ($V = 3.0$ m/s)

- 1) 入力エネルギーの増加とともに最大重錘衝撃力は増加するものの、その増加率は減少する傾向にある。また、接合部剛性が最大重錘衝撃力に与える影響は小さい。
- 2) 入力エネルギーと最大変位の関係は、ほぼ線形関係にある。また、その傾きは接合部剛性の影響を受け、接合部剛性が小さいほど大きくなる傾向にある。
- 3) 衝突速度が $V = 3$ m/s 程度の場合には、接合部形式に関わらず、最大変位発生時刻のひずみ分布は静載荷実験の場合と類似の傾向を示す。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号 22510170) の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 構造物の耐衝撃設計ガイドラインに関するシンポジウム, 日本建築学会構造委員会応用力学運営委員会

耐衝撃性能の評価小委員会, 土木学会構造工学委員会構造物の耐衝撃性能評価研究小委員会, 2010.11.

- 2) 川瀬良司, 岡田慎哉, 鈴木健太郎, 岸徳光: 敷砂緩衝工を設置した RC 製アーチ構造の耐衝撃挙動に関する実規模重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, 土木学会, 2009.3.
- 3) 玉木美帆, 岸徳光, 今野久志, 三上浩: 繰り返し重錘落下を受ける実規模 RC 桁の耐衝撃挙動に関する数値解析法の妥当性検討, コンクリート工学年次論文集, 2011.
- 4) 河西良幸, 澤本佳和: 重錘衝突を受ける鋼梁の実験前予測解析と実験後シミュレーション解析, 前橋工科大学研究紀要, 7, 79-84, 2003.3.
- 5) 鋼構造接合部設計指針, 日本建築学会, 2006.3.
- 6) 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, 平成 22 年度土木学会北海道支部論文報告集, 第 67 号 (CD-ROM), A-51, 2011.2