

重錘落下衝撃を受ける鋼門形骨組の耐衝撃挙動に関する解析的検討

Numerical study on impact resistant behavior of steel portal frame under falling-weight impact loading

(株)構研エンジニアリング ○正会員 保木 和弘 (Kazuhiro Hoki)
(株)構研エンジニアリング 正会員 牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)
室蘭工業大学 正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学 木村 ゆき (Yuki Kimura)
釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国における耐衝撃構造物としては、落石覆道に代表される鉄筋コンクリート (RC)あるいはプレストレスト・コンクリート (PC) 構造と落石防護網等の鋼 (S) 構造に大きく分類される。前者の RC/PC 構造に関しては、これまで著者らの研究グループを始め、数多くの実験あるいは数値解析が実施されている^{1)~4)}。一方、S 構造に関しては、主に柔構造で衝撃力を受け止めることより、それらを構成するケーブルや金網の変形を含めた全体挙動に着目した検討^{5), 6)}が多く、H 形鋼等の部材単体に対する検討^{7), 8)}は必ずしも多くはない。

このような背景のもと、本研究では鋼部材の耐衝撃挙動に関する基礎資料の収集を目的に、H 形鋼を用いた門形骨組を対象に陽解法に基づく二次元動的骨組解析を実施した。また、得られた解析結果を別途実施した重錘落下衝撃実験結果と比較することにより、解析方法の妥当性を検討した。なお、数値解析に用いた構造解析プログラムは、ファイバー要素を用いた三次元非線形動的骨組解析コード Engineer's Studio (Ver.5.00.02) である。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には本実験で使用した剛接合骨組の形状寸法を示している。柱材および梁材の鋼種は SN400B としており、それぞれ H200×200×8×12、H200×150×6×9 の H 形鋼を使用した。なお、梁材に関しては、搬入および設置の利便性の観点から、力学的挙動に関して支障がない範囲に継手を設置している。継手に使用した高力ボルトは F10T (M16) としている。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 12 mm の補剛材および板厚 6 mm のダブルプレートとを溶接している。さらに、梁材中央部には荷重による局部座屈を抑制するために、板厚 12 mm の補剛材を溶接している。また、柱端部には板厚 22 mm のエンドプレートとリブを溶接し、高力ボルトを用いてエンドプレートを剛床に固定している。

2.2 実験方法および測定項目

本実験では、前述の骨組に対して、(1) 静載荷実験および (2) 重錘の初速度および増分速度を 1.0 m/s とし、衝突最大速度が 8.0 m/s まで繰返し与える漸増繰返し衝撃載荷実験 (以後、繰返し衝撃載荷実験) を実施した。表-1には実験ケースの一覧を示している。試験名の第一項目に

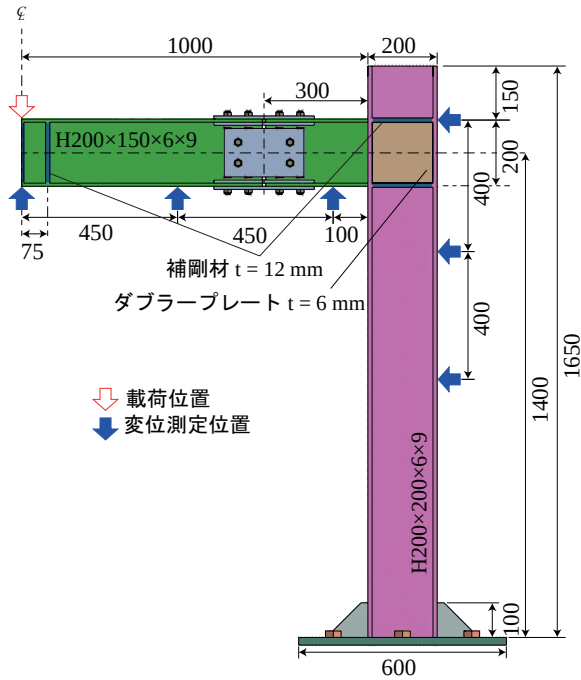


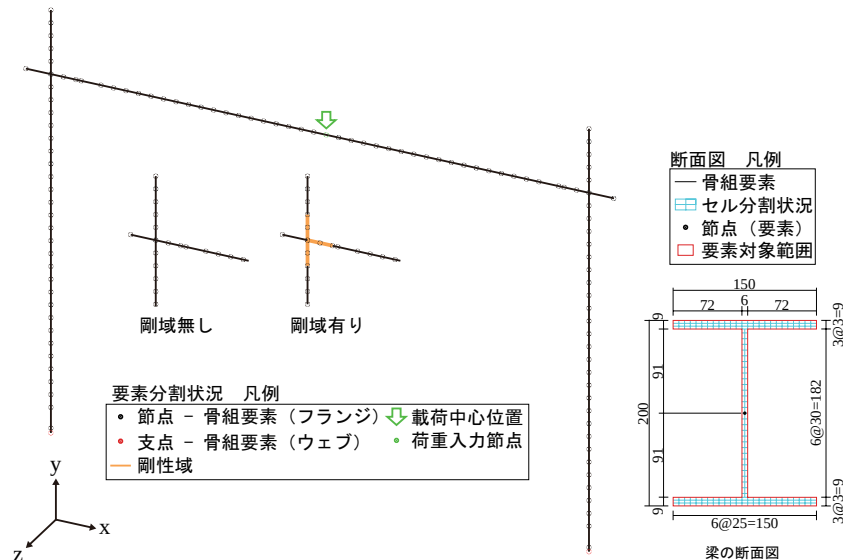
図-1 鋼門形寸法

表-1 実験ケース一覧

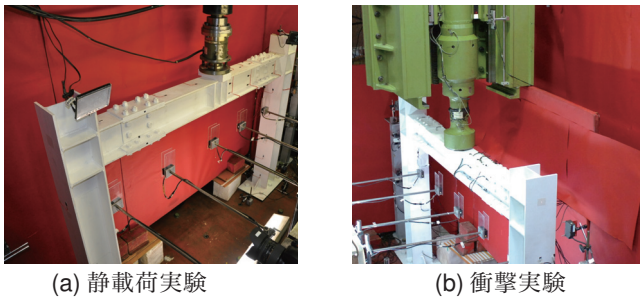
試験名	衝突速度 V (m/s)	入力エネルギー E (kJ)
S	-	-
IC-1	1.0	0.25
IC-2	2.0	1
IC-3	3.0	2.25
IC-4	4.0	4
IC-5	5.0	6.25
IC-6	6.0	9
IC-7	7.0	12.25
IC-8	8.0	16

表-2 使用鋼材の材料物性値

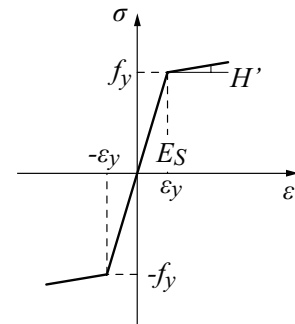
	鋼種	降伏強度 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)	弾性係数 E_s (MPa)	ポアソン比 ν_s
柱	SN400B	300	530	206	0.3
梁		320	590		



図－2 骨組モデルおよび要素分割状況



写真－1 実験状況



図－3 数値解析に用いた鋼材の構成則

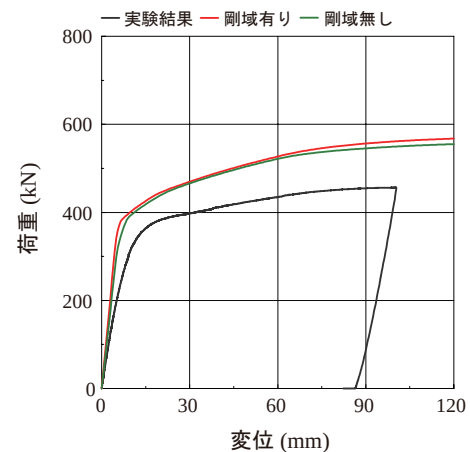
は荷重方法，第二項目には衝突速度を示している．また，表－2には鋼材の材料物性値を示している．

衝撃荷重実験は，質量 500 kg の鋼製重錘を目標衝突速度に対応した所定の高さより，梁材中央部に自由落下させることにより行った．本実験の測定項目は，(1) 重錘に組み込まれたロードセルによる重錘衝撃力 P_i ，または油圧ジャッキ先端に取り付けたロードセルによる静荷荷重 P_s ，(2) 非接触型レーザ式変位計による柱材および梁材の各点変位(荷重点変位は δ とする)である．写真－1には，静荷重および衝撃荷重実験状況を示している．

3. 数値解析概要

3.1 解析モデルおよび境界条件

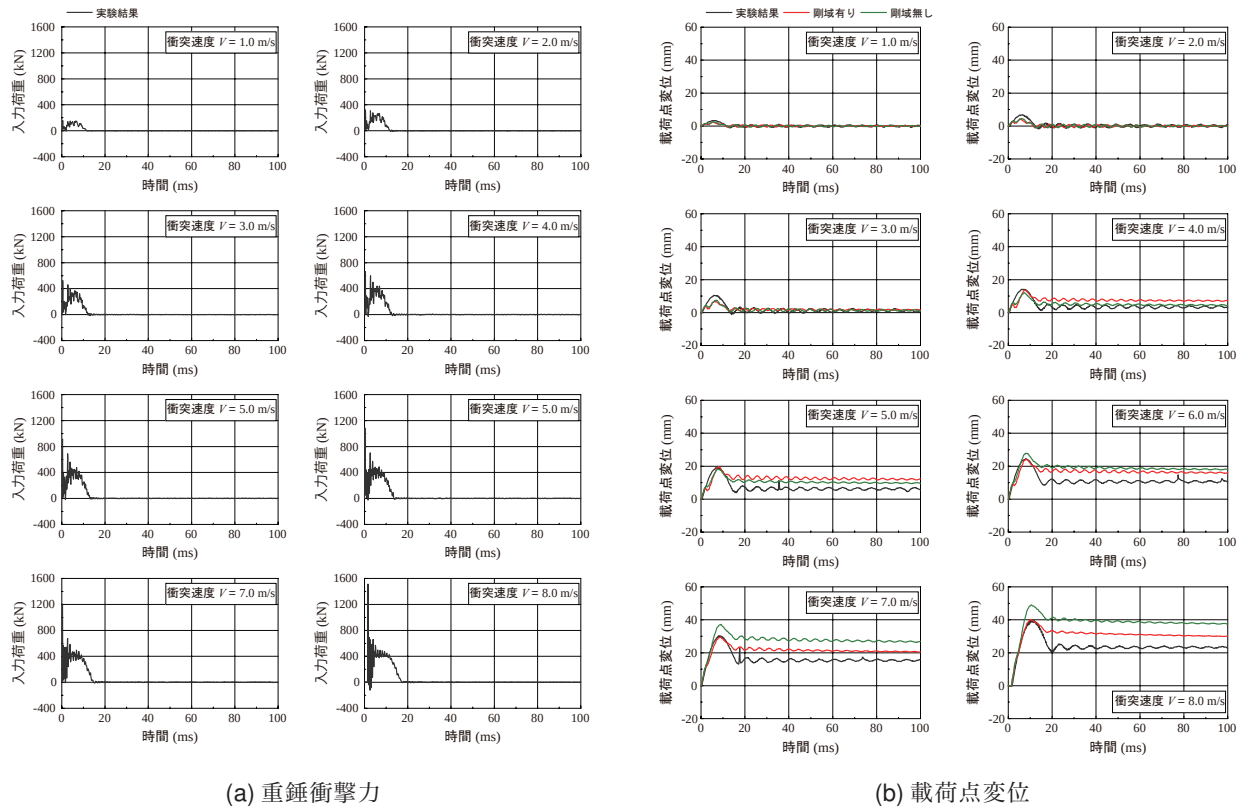
図－2には本数値解析に用いた骨組モデルおよび軸方向の要素分割状況を示している．ここでは，柱梁接合部について，剛域を考慮する場合と考慮しない場合の2種類について検討した．境界条件に関しては柱基部を完全固定としている．衝撃荷重の入力方法は，実験結果より得られた重錘衝撃力をスパン中央の節点に作用させることによって再現した．減衰定数 h は，質量比例型減数項のみ考慮することとし，鉛直方向最低次モードに対して $h = 1\%$ と設定した．また，時間増分 Δt_{cr} は Courant 条件を満足するように， $\Delta t_{cr} = 0.1 \text{ ms}$ とした．



図－4 荷重-変位関係(静荷重)

3.2 材料構成則

図－3には鋼材に用いた応力-ひずみ関係を示している．ここでは，塑性硬化係数 H' を弾性係数 E_s の 1% とするバイリニア型の等方硬化則を適用した．なお，降伏応力は表－2に示す値を用いた．



図－5 時系列波形 (衝撃載荷実験)

表－3 最大変位値一覧

解析 ケース	衝突速度 V (m/s)	実験値 (mm)	剛域有り (mm)	剛域無し (mm)
IC-1	1.0	3.4	2.4 (-29%)	2.6 (-24%)
IC-2	2.0	6.8	4.1 (-40%)	4.6 (-32%)
IC-3	3.0	10.5	6.8 (-35%)	7.6 (-26%)
IC-4	4.0	14.2	13.6 (-4%)	12.1 (-15%)
IC-5	5.0	19.0	19.6 (3%)	18.2 (-4%)
IC-6	6.0	24.6	24.1 (-2%)	27.9 (13%)
IC-7	7.0	30.3	29.4 (-2%)	37.2 (22%)
IC-8	8.0	40.0	40.1 (0.3%)	49.1 (23%)

4. 数値解析結果および考案

4.1 静載荷実験

図－4には、静載荷実験で得られた荷重とスパン中央点下フランジ中央部変位の関係を解析結果と比較して示している。図－4より、実験結果は変位の増大とともに荷重が線形に増大し、降伏荷重近傍より剛性勾配が徐々に低下し終局に至っている。一方、解析結果では初期の剛性勾配が実験結果に比べて大きく、かつ降伏荷重も若干大きく評価されているものの、降伏後の剛性勾配は両社で概ね再現していることが分かる。

4.2 衝撃載荷実験

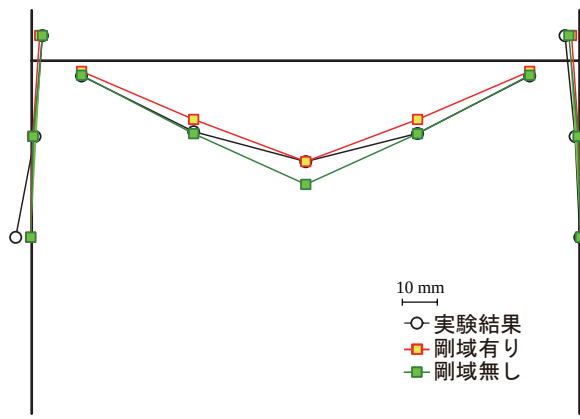
図－5には実験より得られた重錘衝撃力波形(解析に用いた入力荷重)と載荷点変位に関する時刻歴応答波形を解析結果を比較して示している。また、表－3には最大応

答変位の一覧を示している。なお、()内には誤差を示している。

図－5(b)より、実験結果では重錘衝突後5～10msで最大応答値に到達し、その後減衰自由振動に至っている。また、最大応答値および残留変位は衝突速度に対応して大きくなっていることが分かる。一方、解析結果を見ると、剛域の有無にかかわらず波形形状は概ね実験結果を再現していることが分かる。

残留変位に着目すると $V \leq 3.0$ m/s までは実験結果とほぼ等しい値を示しているものの、 $V \geq 4.0$ m/s では解析結果は実験結果より大きく評価されている。一方、剛域を考慮しない場合では、 $V \leq 3.0$ m/s では解析結果は実験結果より小さく、 $V \geq 4.0$ m/s では実験結果より大きく評価されており、剛域の有無により異なる傾向がみられた。

表－3より、剛域を考慮した場合の最大変位値に着目すると、 $V \leq 3.0$ m/s では実験結果より小さな値を示しているものの、 $V \geq 4.0$ m/s では誤差が3%程度以内で実験結果を再現している。 $V \leq 3.0$ m/s では剛域考慮の有無によらず最大応答値が実験結果よりも小さい。これは、前述のように静載荷解析において降伏荷重に至るまでの剛性が実験結果と比較して若干高めに評価されていたことが一つの要因と考えられる。また、剛域の有無による顕著な差が生じなかった理由としては、 $V \leq 3.0$ m/s では衝撃荷重が比較的小さく、結果として隅角部に伝達される応力も小さくなり、剛性の影響が相対的に小さいものと推察される。 $V \geq 4.0$ m/s についての最大応答値に関して考察する。剛域を考慮した場合、実験結果を精度良く評



図－6 最大応答時の変位分布

価できたのは、静載荷解析で降伏荷重以上の剛性勾配をほぼ再現できたこと、更に剛域を設定することによって隅角部を介して梁から柱に応力が適切に伝わったことによるものと推察される。一方、剛域を考慮しない場合は、隅角部の剛性が不足し柱の分担が小さくなったため梁の応答が大きくなったことによるものと推察される。

図－6には実験ケースIC-8における最大応答時の変位分布を解析結果と比較している。柱の変位に着目すると剛域を考慮しない場合の方が内側への変位が大きいことが分かる。これは隅角部に剛域を考慮していないため隅角部の剛性が不足し、梁から柱に断面力が適切に伝達されないことを示唆している。このことから隅角部を有する門型構造を対象に衝撃問題を骨組解析によって評価する場合には隅角部に剛域を考慮する必要がある。

5. まとめ

本研究では、鋼部材の耐衝撃挙動に関する基礎資料の収集を目的に、H形鋼を用いた門形骨組を対象に動的応答解析を実施した。本論文で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) 静載荷解析では剛域の有無によらず、実験結果より降伏荷重を大きく評価する。
- 2) 衝撃解析では剛域を考慮した場合、最大変位値は精

度よく再現可能であるものの、残留変位の再現性は低いことが明らかになった。

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25420566)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 今野久志, 岸 徳光, 池田憲二, 竹本伸一: 各種大型PRC 桁の耐衝撃挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, 46A, 1819-1830, 2000.3.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩: 衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越するRC梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, 土木学会, 53A, 1251-1260, 2007.3.
- 3) 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, 55A, 1313-1326, 2009.3.
- 4) N. Kishi, S. Okada, H. Konno: Numerical impact response analysis of rockfall protection galleries, *J. Struct. Eng. Int.*, IABSE, 19(3), 313-320, 2009.8.
- 5) 原大輔, 香月 智, 田代元司: 円柱形要素を用いた個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析, 土木学会論文集A, Vol. 65, No. 2, pp. 536-553, 2009.
- 6) 山口 悟, 今野久志, 西 弘明, 佐々木哲也, 小室雅人: 従来型ポケット式落石防護網の実規模重錘衝突実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 21, pp. 104-110, 2013.
- 7) 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.
- 8) 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ15, 土木学会構造工学委員会衝撃実験解析法の標準化に関する研究小委員会, 土木学会, 2004.5.