

(30) 剛結鋼骨組の耐衝撃挙動に関する数値解析的研究

Numerical study on impact resistant behavior of steel rigid frames

小室 雅人*, 岸 徳光**, 玉木 美帆***

Masato Komuro, Norimitsu Kishi, and Miho Tamaki

* 博(工), 室蘭工業大学大学院, 講師, 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** 工博, 室蘭工業大学大学院, 教授, 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

*** 室蘭工業大学大学院, 博士前期課程, 建築社会基盤系専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

Key Words: impact response analysis, steel frame, impact resistant behavior, rigid connection

キーワード: 衝撃応答解析, 鋼骨組, 耐衝撃挙動, 剛接合

1. はじめに

わが国では社会基盤施設に対する耐衝撃設計の確立に向け、主に鉄筋コンクリート(RC)部材あるいは構造物を対象とした衝撃荷重実験や数値解析が数多く実施されている(例えば 1)~4)。一方、衝撃荷重を受ける鋼部材あるいは鋼構造物の耐衝撃挙動を対象とした研究に関しては、部材レベルでは実施されているものの^{5), 6)}、構造物を対象としては実施されておらず未だ不明な点も多いのが現状である。

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形剛結骨組を対象に、LS-DYNA⁷⁾を用いた三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、柱材の剛性が異なる 2 種類の骨組を対象に、入力エネルギーを変化させて単一載荷状態の衝撃解析を行い、最大衝撃力、最大変位、骨組の変形状況や応力波動伝播等について検討を行った。

2. 数値解析概要

2.1 鋼門形骨組

図-1 には、本研究で解析対象とした鋼門形骨組(幅: 2,200 mm, 高さ: 1,300 mm)の形状寸法を示している。ここでは、柱材の剛性の耐衝撃挙動への影響を検討するために、梁材を H200×150×6×9 と固定し、柱材を 2 種類(骨組 1 では H200×200×8×12, 骨組 2 では H150×150×7×10)に変化させて数値解析を実施した。柱梁接合部は溶接による剛接合を仮定している。また、柱梁接合部の柱材にはパネルゾーンの変形を、スパン中央部の梁材には衝撃荷重による局所変形を抑制するために、板厚 12 mm の補剛材を配置している。

2.2 物性モデル

鋼材の材料物性値は、既往の実験結果⁸⁾を参考に表-1 に示すように設定した。また、解析に用いた真応力-真ひずみ関係は、図-2 に示すように多直線で結ぶマル

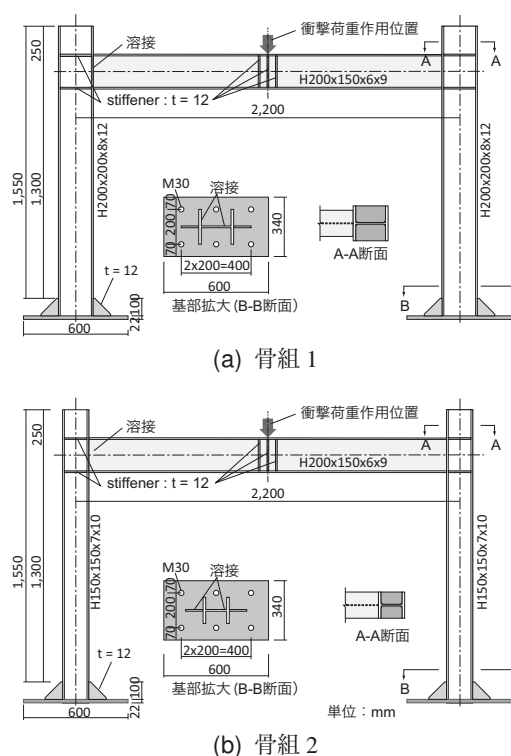


図-1 鋼門形骨組

表-1 鋼材の力学的特性⁸⁾

弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s	降伏応力 f_y (MPa)	引張強さ f_u (MPa)	伸び (%)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)
205	0.3	308	440	35.3	1,507

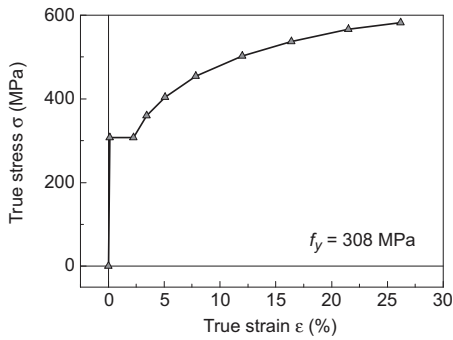


図-2 解析で仮定した真応力-真ひずみ関係⁸⁾

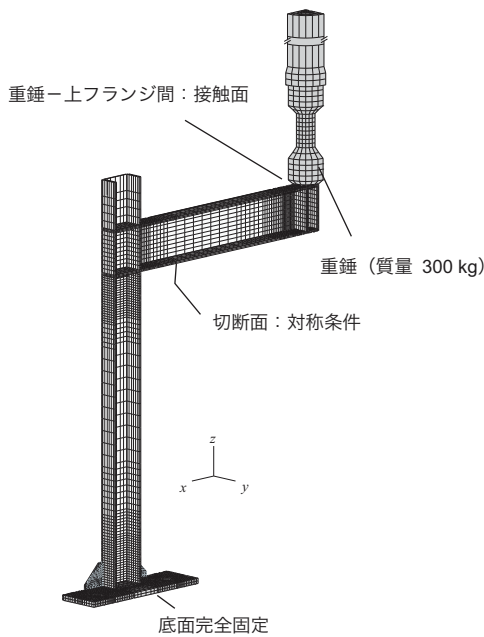


図-3 要素分割状況 (骨組 2 の場合)

チリニア型に近似している。鋼材の降伏は、von Mises の降伏条件に従うこととした。

なお、鋼材の降伏応力 f_y は、一般にひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に依存することが知られている⁹⁾。しかしながら、(1) 本研究で設定した衝突速度が比較的小さいこと、および (2) 衝撃荷重を受ける鋼梁を対象とした数値解析⁵⁾ によるとその影響は小さいことが報告されていること等より、本解析ではひずみ速度効果を無視することとした。

2.3 解析モデルおよび境界条件

図-3 には、骨組 2 および衝突体である鋼製重錘の要素分割状況を示している。解析モデルは対称性を考慮して 1/4 モデルとした。使用要素は全て三次元固体要素を用いた。総要素数および総節点数は、骨組で若干異なるが骨組 2 の場合 (図-3 参照) ではそれぞれ 11,008 および 17,703 である。

本数値解析では、図-3 に示すように柱材基部の鋼板下面を完全固定とし、対称切断面には連続性が満足する

表-2 解析ケース一覧

解析ケース	対象骨組	衝突速度 V (m/s)
F1-1/2/3/4/5/6	骨組 1	1 ~ 6
F2-1/2/3/4/5/6	骨組 2	

ように境界条件を設定した。重錘下面と梁の上面フランジの要素間には、面と面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。

なお、本数値解析では、剛結鋼骨組の基本的な耐衝撃特性を把握することを目的としているため、幾何学的非線形性は考慮するものの、残留応力および初期不整については無視することとした。また、後述の衝撃力は接触面に作用する接触力を総和して算出している。

2.4 解析方法

衝撃荷重は、梁材のスパン中央に 300 kg 鋼製重錘 (図-3 参照) に所定の衝突速度を与えることにより载荷することとした。ここでは、入力衝撃エネルギーと各種応答特性との関係を明らかにするために、重錘の衝突速度 (以後、衝突速度 V) を $V = 1$ m/s から 6 m/s まで 1 m/s ずつ 6 段階に変化させた。なお、減衰は質量比例型減衰を採用し、鉛直方向の固有振動モードが卓越する場合の最低次固有振動数に対して 2% とした。また、解析時間は 300 ms までとした。数値解析における時間間隔は、Courant の安定条件を満足するように LS-DYNA 内で自動的に設定される。

表-2 には、本解析で実施した解析ケースを一覧にして示している。解析ケースは、第 1 項目に骨組のタイプ (F1: 骨組 1, F2: 骨組 2) を、第 2 項目に衝突速度 V (m/s) を用いて定義している。

3. 数値解析結果

3.1 各種応答波形

(1) 重錘衝撃力波形

図-4 には、 $V = 2, 4, 6$ m/s における重錘衝撃力波形を示している。波形は、縦軸に重錘衝撃力を、横軸に重錘衝突時点を原点に取り整理している。

図-4 より、重錘が梁フランジと衝突 (接触) している時間、すなわち衝撃力が 0 以上である継続時間 (以後、重錘衝突時間) は、全ての解析ケースで 9 ~ 12 ms 程度と非常に短時間であることが分かる。その波形は高周波成分を有する非常に複雑な分布性状となっている。これは、重錘衝突時に重錘下面と梁上面フランジとの接触範囲が時間によって刻一刻と異なることを意味している。なお、衝突速度 V が增大するほど重錘衝突時間が長くなる傾向にあることが分かる。

また、柱の剛性による差に着目すると、骨組 2 (F2) の場合が骨組 1 (F1) の場合よりも重錘衝突時間が若干長く示されている。これは、骨組 2 の場合が骨組 1 の場合よ

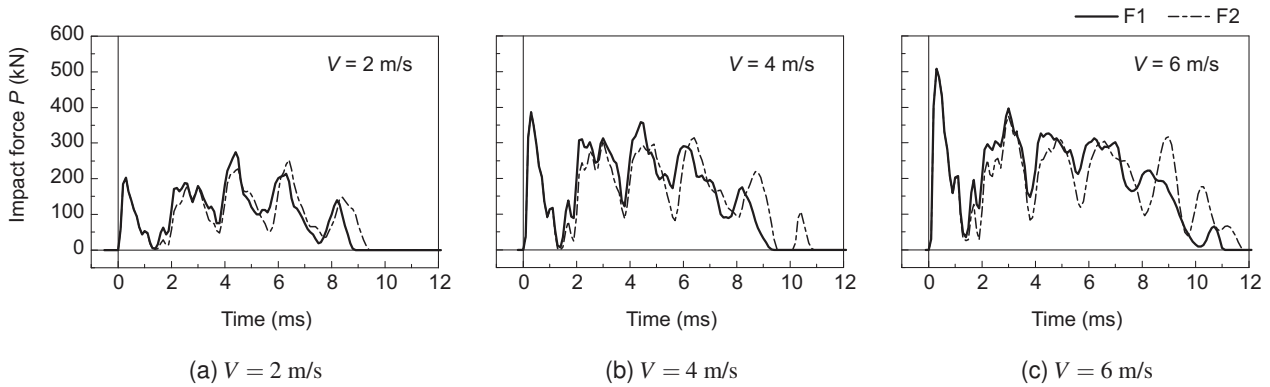


図-4 最大衝撃力波形

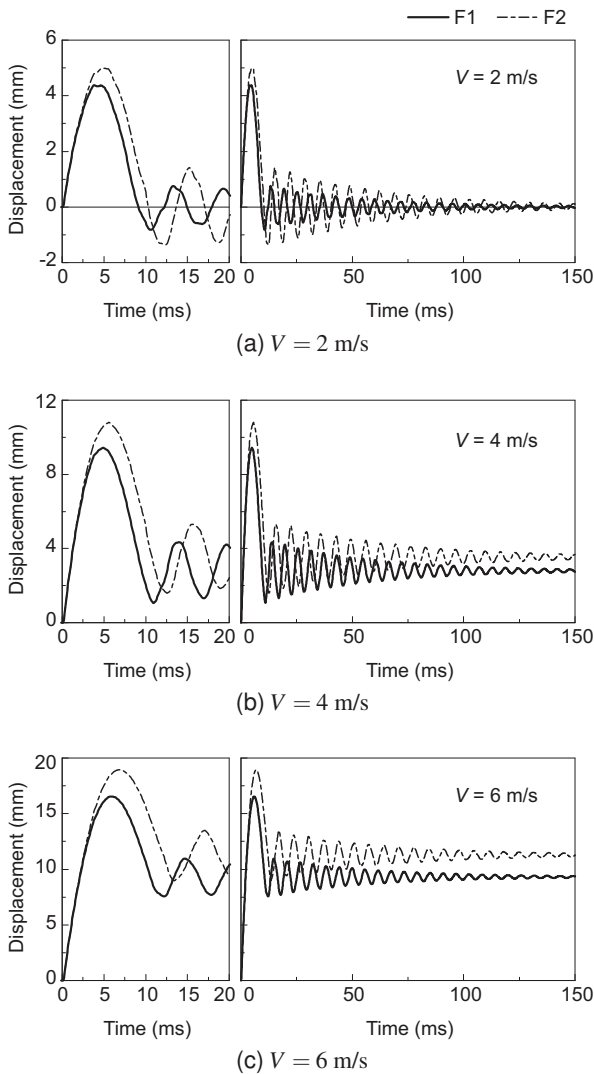


図-5 載荷点変位波形

り柱材の剛性が小さいことより、撓み性に富むことによるものと推察される。

さらに、波形を詳細に見ると、後述の図-5に示すように弾性的な挙動を示す $V \leq 2 \text{ m/s}$ では、衝撃初期の第1波の振幅は、それ以降に発生する衝撃力よりも小さく示されているのに対し、衝突速度 V の増大とともに、第1

波の振幅が増大する傾向にあることが分かる。なお、衝撃初期の第1波に関しては、2つの骨組による顕著な差は見られない。これは、衝撃初期には、載荷点近傍の曲げ剛性が応答に大きく影響を与え、柱材の曲げ剛性の影響は小さいことを暗示している。

(2) 変位波形

図-5には、 $V = 2, 4, 6 \text{ m/s}$ における載荷点変位波形を比較して示している。なお、衝突初期の変位応答を確認するために継続時間が $0 \sim 20 \text{ ms}$ 範囲を拡大して示している。

図より、衝突速度 $V = 2 \text{ m/s}$ では、いずれの骨組においても残留変位は生じていないことから、弾性応答範囲内にあることが分かる。また、衝突速度 V の増大とともに最大変位も増大し、かつその発生時刻が遅くなる傾向にあることが分かる。また、最大変位に着目すると、重錘衝撃力と同様に柱材の剛性の小さい骨組2が剛性の大きい骨組1と比較して大きくなっている。

(3) 各種最大応答値と入力エネルギーの関係

表-3には、各解析ケースから得られた最大応答値および残留変位を一覧にして示している。また、図-6には、表-3の結果を横軸に入力エネルギー E を取って整理している。

図-6(a)より、最大重錘衝撃力 P_{\max} に着目すると、入力エネルギー E の増加とともに最大重錘衝撃力 P_{\max} は増加するものの、その増加率は減少する傾向にあることが分かる。また、入力エネルギー E が小さい領域では、骨組(柱材の剛性差)による影響がみられるものの、入力エネルギー E の増加とともに、その影響は小さくなることが分かる。

次に、(b)図に示す最大変位 δ_{\max} に着目する。図より、最大変位 δ_{\max} は入力エネルギー E とほぼ線形関係にあることが分かる。また、両骨組の最大変位を比較すると、柱材の剛性が小さい骨組2(F2)が剛性の大きい骨組1に対して、いずれの入力エネルギー E に対しても14%程度大きくなっている。

(c)図に示す残留変位 δ_{res} に着目すると、入力エネルギー E が600 J以下の場合にはいずれの骨組においても残留変位 δ_{res} は発生せず、1,000 J以上の場合に残留変位

表-3 最大衝撃力, 最大変位および残留変位一覧

解析ケース	衝突速度 V (m/s)	入力エネルギー E (J)	最大重錘衝撃力 P_{\max} (kN)	最大変位 δ_{\max} (mm)	残留変位 δ_{res} (mm)
F1-1	1	150	134.4	2.14	0.00
F1-2	2	600	275.0	4.38	0.00
F1-3	3	1,350	349.0	6.66	0.74
F1-4	4	2,400	385.1	9.43	2.80
F1-5	5	3,750	456.5	12.70	5.74
F1-6	6	5,400	507.6	16.53	9.31
F2-1	1	150	122.2	2.44	0.00
F2-2	2	600	252.5	4.99	0.02
F2-3	3	1,350	320.1	7.58	0.83
F2-4	4	2,400	386.8	10.80	3.54
F2-5	5	3,750	457.5	14.49	7.05
F2-6	6	5,400	508.2	18.95	11.28

#1最大衝撃力は接触面に作用する接触力により算出した。

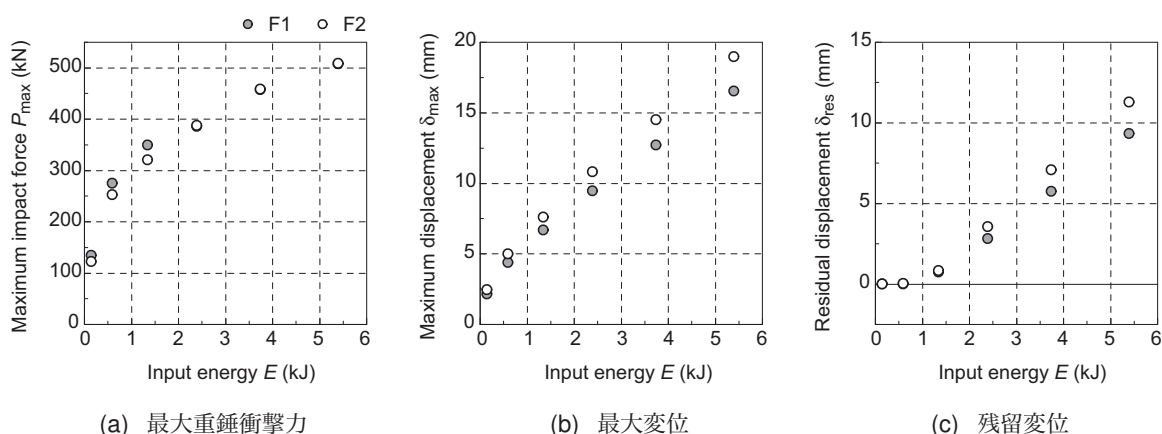


図-6 入力エネルギーと最大衝撃力, 最大変位および残留変位の関係

δ_{res} が発生することが分かる。なお、残留変位の場合においても、最大変位の場合と同様に、入力エネルギー E と比例関係にあることが分かる。

3.2 骨組の断面力分布

図-7には、骨組2における衝突速度 $V = 6$ m/s を例に、代表的な時刻について曲げモーメントおよび軸力分布を時系列的に示している。なお、各時刻点は (c) ~ (e) 図中の a ~ h に示す9時刻である。

まず、曲げモーメント分布に着目する。最大重錘衝撃力を示す a 点 ($t = 0.3$ ms) では、梁材の曲げモーメント (a 図参照) はスパン中央部のみに局所的に発生し、柱梁接合部および柱材にはほとんど生じていないことが分かる。また、同一時刻における梁材の軸力は、最大 4 kN 程度であることを確認している。

次に、b 点 ($t = 0.9$ ms) および c 点 ($t = 1.9$ ms) の曲げモーメント分布より、曲げモーメントが徐々に柱梁接合部に伝達していく様子が確認できる。c 点では、柱材にも大きな曲げモーメントおよび大きな軸力が発生し

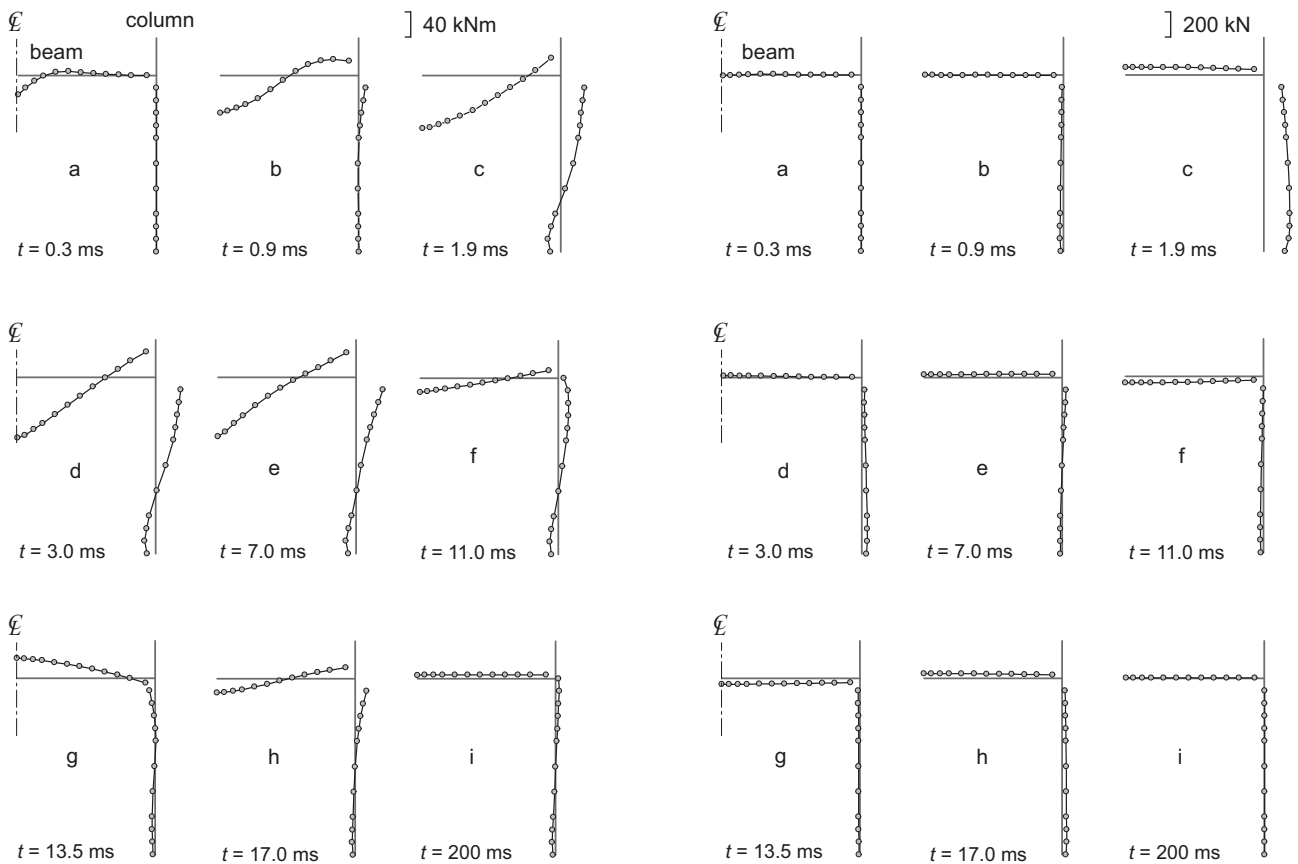
ており、衝撃力が柱基部に伝達されていることが分かる。

最大変位を示した e 点 ($t = 7.0$ ms) では、静載荷と類似した曲げモーメント分布を示している。さらに時刻が進行した g 点 ($t = 13.5$ ms) では、梁および柱材に負曲げモーメントが発生している。その後は減衰自由振動状態となっている。

3.3 塑性ひずみ分布

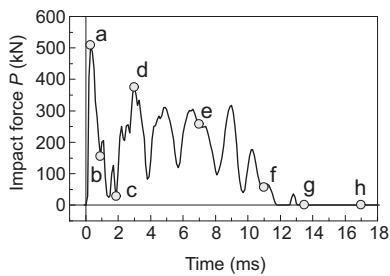
図-8には、衝突速度 $V = 6$ m/s を与えた場合の骨組2における解析終了時の塑性ひずみ分布を示している。(a) 図は柱梁接合部近傍、(b) 図は載荷点近傍を拡大して示している。

(a) 図より、柱梁接合部のパネルゾーンにおいて 0.4 % 程度の塑性ひずみが発生している。また、(b) 図より載荷点近傍では 1 % を超える塑性ひずみが発生していることが分かる。なお、上記以外の領域においては塑性ひずみは発生していない。また、同一骨組において弾性応答範囲内であった $V = 1$ m/s では、塑性ひずみは発生していないことを確認している。

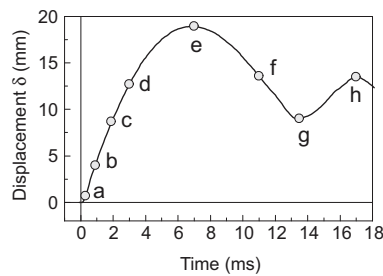


(a) 曲げモーメント分布

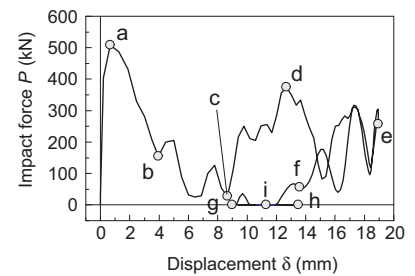
(b) 軸力分布



(c) 衝撃力波形



(d) 変位波形



(e) 衝撃力-変位関係

図-7 骨組2における曲げモーメントの時系列分布およびその時刻

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形骨組を対象に三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、柱材の剛性が異なる2種類の骨組を対象に、入力衝撃エネルギーを変化させた衝撃解析を実施し、最大衝撃力、最大応答変位および残留変位等について検討を行った。本研究により得られた知見を整理すると、以下のとおりである。

- (1) 入力エネルギーが増大するほど、重錘と梁フランジ間の重錘衝突時間は長くなる傾向にある。
- (2) 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。一

方、最大変位および残留変位と入力エネルギーの関係はほぼ線形関係にある。

- (3) 衝撃荷重を受ける鋼門形骨組の断面力分布の推移状況を明らかにするとともに、重錘リバウンド時には骨組の断面力分布が負荷荷状態となることを確認した。

今後は、本数値解析結果と今後予定されている衝撃荷重実験結果を比較することにより、その妥当性を検討する予定である。

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。

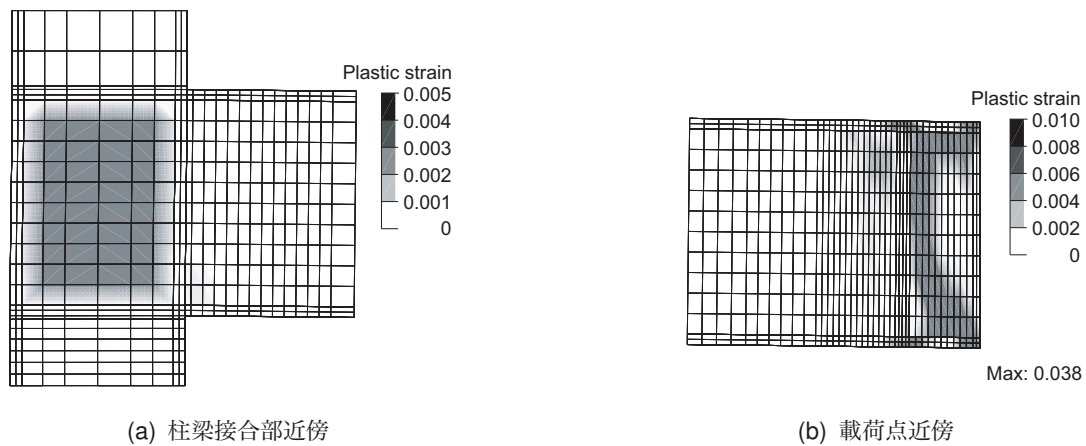


図-8 解析終了時における塑性ひずみ分布
(骨組 2, $V = 6 \text{ m/s}$, 変形倍率: 等倍)

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) 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.
- 6) 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.
- 7) John O. Hallquist: *LS-DYNA user's manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2009.3.
- 8) 佐藤陽介, 小室雅人, 岸 徳光: トップ&シートアングル接合の接合部剛性特性に関する実験的検討, 鋼構造年次論文報告集, 15, 121-128, 2007.11.
- 9) Kuo-Chun Chang and George C. Lee: Strain rate effect on structural steel under cyclic loading, *J. Eng. Mech.*, 113(9), 1292-1301, 1987.