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

Numerical study on impact resistant behavior of steel portal frames with different types of connection

室蘭工業大学大学院	〇正 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

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 対象とした衝撃載荷実験や数値解析が数多く実施されて いる^{1).2)}.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^{3),4)},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-DYNA⁵⁾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, 柱梁接合形式の異なる3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. 数值解析概要

2.1 鋼門形骨組

図1には、本論文で解析対象とした鋼門形骨組(幅:2.2 m、高さ:1.3 m)の形状寸法を示している。梁材および柱材はそれぞれH200×150×6×9およびH200×200×8×12で



図1 鋼門形骨組(剛結接合の場合)



図 2 接合形式

ある.また,柱梁接合部の柱材にはパネルゾーンの変形 を抑制するために,板厚12mmの補剛材および板厚6 mmのダブラープレートを配置している.さらに,スパ ン中央部の梁材には衝撃荷重による局所変形を抑制す るために,板厚12mmの補剛材を配置している.

ここでは、柱梁接合形式の耐衝撃挙動への影響を検討 するために、接合形式として、(a)剛結接合、(b)エンド プレート接合(以後、EP接合)、および(c)トップ&シー トアングル接合(以後、TS接合)の3種類を設定してい る.図2には剛結接合を除く2種類の接合形式における 形状寸法を示している.高力ボルトはF10T(M20)とし、 ボルト孔のクリアランスは2mmである.なお、柱梁接 合部の剛性は、剛結接合が最も大きく、次いでEP接合、 TS接合の順に小さくなる.

2.2 物性モデル

鋼材の材料物性値は,既往の実験結果⁶⁾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3に示すように多直線で結ぶマルチリ 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 ϵ に依存することが知られている⁷⁾.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³⁾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.

表 1 各材料の力学的特性⁶⁾ 引張 弾性 ポアソ 降伏 伸び 降伏 係数 ン比 応力 強さ ひずみ E_s (GPa) f_v (MPa) f_u (MPa) (%) $\varepsilon_{v}(\mu)$ v_s 鋼材 1,507 205 0.3 440 308 35.3 ボルト 206 0.3 1,060 1,098 19.7 5,146



図3 解析で仮定した鋼材の真応カー真ひずみ関係⁶⁾

平成22年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第67号



図4 要素分割状況(剛結接合の場合)

2.3 解析モデルおよび境界条件

図4および図5には、剛結接合骨組および衝突体であ る鋼製重錘の要素分割状況,および各接合形式における 柱梁接合部を拡大して示している.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,各接合形 式で若干異なるが剛結接合骨組の場合(図4参照)ではそ れぞれ74,724 および48,350 である.

本数値解析では、図4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.また、図5に示すEP接合と TS 接合に関しては、エンドプレートと柱フランジ間、 あるいはアングル材と梁および柱フランジ間、高力ボル トと近接する部材についても接触面を定義している.ま た、各高力ボルトには所定の初期張力を導入している.

なお,本数値解析では,鋼門形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4参照)に所定の衝突速度を与えることにより載荷 することとした.なお、重錘のリバウンドを考慮するた めに、重錘のみに重力を作用させている.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4 m/sまで1 m/sずつ4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(接合形 式によって若干異なるが177 Hz程度)に対して2%とし た.また、解析時間は200 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



(a) 剛結接合

(c) TS 接合

図5 柱梁接合部の要素分割状況

(b) EP 接合

表2 解析ケース一覧

解析	接合	衝突速度
ケース	形式	V (m/s)
A-1/2/3/4	剛結接合	
B-1/2/3/4	EP 接合	$1\sim 4$
C-1/2/3/4	TS 接合	

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項目に接合形式のタイプ(A:剛結接合,B:EP接合,C:TS接合)を、第2項目に衝突速度V(m/s)を用いて定義している.

3. 数值解析結果

3.1 各種応答波形

(1) 重錘衝擊力波形

図6には、各解析ケースのV=1~4m/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6より,接合形式や衝突速度によらず衝撃力波形は, 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.また,EP接合およびTS接合の場合には,衝撃力が 0となる時刻が存在するものの,衝撃力が励起されてい る時間(以後,衝撃力作用時間)は8~12 ms程度と非常 に短時間であることが分かる.なお,柱梁接合部の影響 に着目すると,TS接合が剛結接合やEP接合よりも衝撃 力作用時間が若干長く示されている.これは,TS接合 の場合が他の接合形式の場合より,接合部剛性が小さい 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,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,衝撃初期には,載荷点近傍の曲げ剛性が応答に大き な影響を与え,柱梁接合部の剛性の影響は小さいことを 暗示している.

(2) 変位波形

図 7には、 $V = 1 \sim 4$ m/s における載荷点変位波形を接 合形式ごとに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 $0 \sim 30$ ms 範囲を拡 大して示している.

図より,接合形式にかかわらず衝突速度Vの増加とと



図 7 載荷点変位波形

もに最大変位も増加する傾向にあることが分かる.また,各衝突速度における最大変位を接合形式で比較すると,TS接合が最も大きく,剛結接合が最も小さい.これは,接合部剛性が小さいほど変形が生じやすいためと考えられる.

各接合形式について詳細に見ると、剛結接合の場合に は、他の接合形式と比較して変位波形の周期が短く、ま た $V \leq 2$ m/s 程度までは残留変位が生じていない.一方、 接合部剛性の最も小さい TS 接合の場合には変位波形の 周期が長く、かつV = 1 m/s から残留変位が発生してい る. なお、EP 接合の場合には、両者の中間的な挙動性状 を示している.

これより,変位波形は,接合部剛性が小さいほど長周 期成分が卓越し,かつ小さな衝突速度から残留変位を生 じる傾向にあることが明らかとなった.

(3) 各種最大応答値と入力エネルギーの関係

図8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と入力エネルギーEの関係を示している. 図8(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、接合形式が最大衝撃力に与える影響は小さいことが分かる.

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,各接合形式の最大変位を比較すると,V=3 m/s において接合部剛性が小さい TS 接合が接合部剛性の大きい剛結接合の場合に対して 50 % 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, 剛結接合の場合には、入力エネルギーEが 600 J 以下の場合には残留変位 δ_{res} は発生せず、1,000 J 以上の場合に残留変位 δ_{res} が発生するのに対し、TS 接合の場合には小さな入力エネルギーから残留変位が発生している.

3.2 骨組の断面力分布

図9には、衝突速度V=3m/sを例に、代表的な時刻について曲げモーメント分布を時系列的に示している.

t = 0.7 msでは、梁材の曲げモーメントはスパン中央 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.その後、 $t = 1.0 \sim 1.5$ 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.t = 5msでは、剛結接合および EP 接合 (TypeA & B)では柱材 にも大きな曲げモーメントが発生しているのに対し、 TS 接合では柱材に伝達される曲げモーメントが小さく、 ピン接合に近い挙動を示していることが分かる.このこ とは、TS 接合のように静載荷状態では柱材に曲げモー メントを伝達する接合形式でも、衝撃力作用時ではピン



図 8 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



図 9 曲げモーメントの時系列分布およびその時刻(V=3 m/s)

接合に近い状態になることを示唆している.さらに時刻 が進行したt=12~15 msでは,重錘のリバウンドによ り梁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.

4. まとめ

- (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、接合部剛性が最大衝撃力に与える影響は小さい.
- (2) 一方,最大変位と入力エネルギーの関係はほぼ線形 関係にある.また,最大変位は接合部剛性の影響を 受け,剛性が小さいほど大きくなる傾向にある.
- (3) トップ&シートアングル接合のように静載荷状態では柱材に曲げモーメントを伝達する接合形式でも、 衝撃力作用時ではピン接合に近い挙動となる。

今後は, 衝突速度を増加させた数値解析を実施すると ともに, 本数値解析結果と今後予定されている衝撃荷重 載荷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る.

参考文献

- 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.
- 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- John O. Hallquist: LS-DYNA user's manual, Livermore Software Technology Corporation, 2009.3.
- 6) 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.
- Kuo-Chun Chang and George C. Lee: Strain rate effect on structural steel under cyclic loading, *J. Eng. Mech.*, **113**(9), 1292-1301,1987.