

2 主桁橋が落下した場合における 段差防止構造の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討

Numerical study on impact resistance behaviour of gap prevention structure at two-girder bridges dropping

室蘭工業大学大学院 ○学生員 栗橋 大洋 (Taiyo Kurihashi) 室蘭工業大学大学院 正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 室蘭工業大学大学院 正会員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai) 室蘭工業大学大学院 名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 寒地土木研究所 正会員 佐藤 京 (Takashi Sato) ビー・ビー・エム 正会員 余野 智哉 (Tomoya Yono)
 東京ファブリック工業 正会員 久慈 茂樹 (Shigeki Kuji)

1. はじめに

我が国は、世界有数の地震多発地帯に位置しているため、毎年多くの地震災害が発生している。また、写真-1に示すように、災害に伴って橋梁が損傷するとともに大きな段差が生じる場合には、車両の通行が不可能になるため人命に係わる避難や救護の遅れが危惧されている。このような被害を受けた橋梁の早期機能復旧を目的とした対策工としては、落橋防止装置や変位制限装置の他、段差防止構造が採用されている。段差防止構造は、災害によって橋梁が落下した場合においても、路面の段差を緊急車両が通行可能な範囲内に抑えることを目的として、一般に桁端部の巻き立てコンクリート下部に設置されることが多い。一方で、これら段差防止構造の性能規定は現在のところ、不明確であり、フェールセーフ機能を確実に発揮するためには、衝撃作用荷重や橋梁落下時の応答性状を明確にすることが肝要であると考えられる。また、橋梁落下時には、段差防止構造や橋台あるいは橋梁自体に過大な衝撃力が作用する可能性も想定されることから、衝撃力を緩和する構造としてゴム等の緩衝体を設けることが望ましいとされている。しかしながら、ゴム緩衝体の適切な形状係数や緩衝体が吸収するエネルギー等についても十分に検討が行われていない

のが現状である。

このような観点から、本研究では、橋梁落下時における段差防止構造の緩衝性能および構造物の損傷状況に関する定性的な基礎データの収集・検討を目的として、最も簡易な橋梁形式である2主桁橋に着目し、緩衝ゴムを設置した段差防止構造上に橋梁が落下した場合における三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。なお、本研究では主桁・横桁・床版・段差防止構造までをモデル化するとともに、橋梁全体に対して設定初速度を変化させた数値解析を実施した。また、比較のために、段差防止構造に関しては緩衝ゴム設置の有無についても同様に検討を行った。本数値解析は汎用構造解析用プログラムLS-DYNA²⁾(R10)を用いて実施した。

2. 衝撃応答解析の概要

2.1 対象橋梁モデル

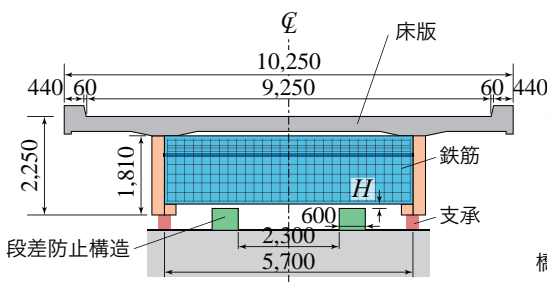
図-1には、本研究で対象とした簡易な橋梁モデルの形状寸法を示している。ここでは、実2主桁橋を参考に、図に示すような2主桁橋モデルを対象として数値解析を実施することとした。図より、対象橋梁は単純I桁橋であり、



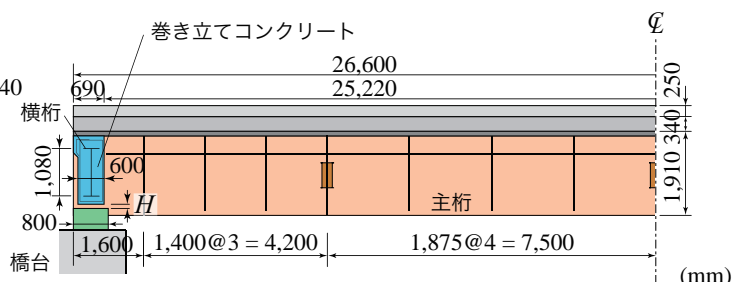
写真-1 地震による橋梁の被災事例¹⁾

表-1 解析ケース一覧

No.	ケース名	緩衝ゴムの有無	設定落下高さ H (m)	入力衝突速度 V (m/s)
1	N-H10	無し	0.1	1.40
2	N-H20		0.2	1.98
3	N-H30		0.3	2.42
4	N-H40		0.4	2.80
5	R-H10	有り	0.1	1.40
6	R-H20		0.2	1.98
7	R-H30		0.3	2.42
8	R-H40		0.4	2.80



(a) 正面図



(b) 中央断面図

図-1 対象とした橋梁モデルの概要図

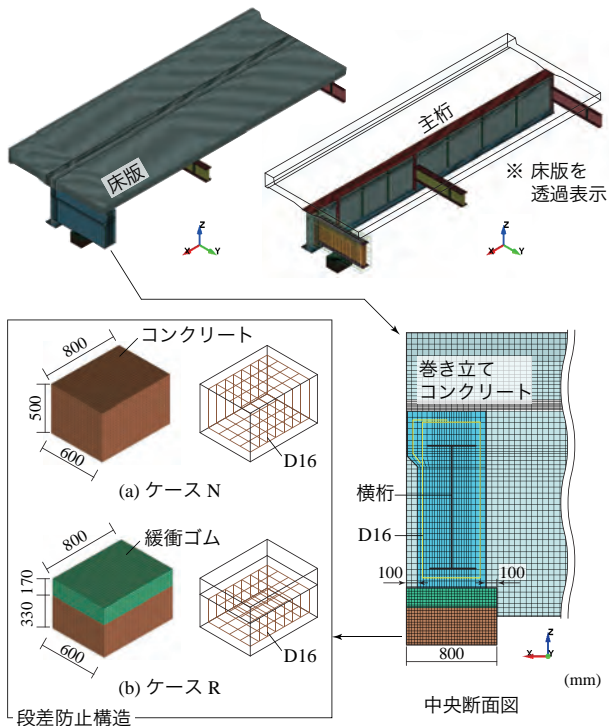


図-2 有限要素モデル

橋長は約 27 m, 主桁高は 1.8 m, 2 主桁の中心間隔は 5.7 m となっている。また、桁端部はコンクリートで巻き立てられており、その下には左右に 1 つずつ段差防止構造が設置されている。なお、段差防止構造の形状寸法 (幅 × 奥行き × 高さ) は、600 × 800 × 500 mm である。その他、床版や横桁などは図に示す通りである。

図-2には、図-1を基に作成した数値解析モデルを示している。ここでは、橋梁の対称性および計算時間を考慮し、主桁方向と横桁方向に等分した 1/4 モデルを採用した。また、適用した要素タイプは、巻立てコンクリート部および段差防止構造内部の配筋は 2 節点梁要素、主桁や横桁などの鋼材には 4 節点シェル要素、それ以外には全て 8 節点固体要素を採用した。段差防止構造に関しては、全て RC 造とする場合のケース N, 及び形状係数 1 の緩衝ゴム (高さ = 170 mm) を併用したケース R の 2 種類について検討を行った。

拘束条件は、それぞれの対称切断面において、その法線方向変位成分を固定するとともに、段差防止構造底部は完全固定と設定した。接触条件は、橋梁と段差防止構造間に滑り・剥離を伴う面一面の接触を設定しており、摩擦係数はケース N/R でそれぞれ、0.3, 0.5 とした。衝撃荷重に関しては、段差防止構造に巻立てコンクリート部が接するような形で配置し、設定落下高 H から換算される衝突速度を初速度として橋梁全体に入力することで作用させた。なお、重力は考慮している。

表-1には、本研究で実施した解析ケースの一覧を示している。ここでは、段差防止構造の形式および橋梁の落下高さ H をパラメータとした計 8 ケースの数値解析を実施した。ケース名に関して、第一項目は段差防止構造の形式 (N: 全て RC 造, R: 緩衝ゴムを設置) を、第二項目は H に

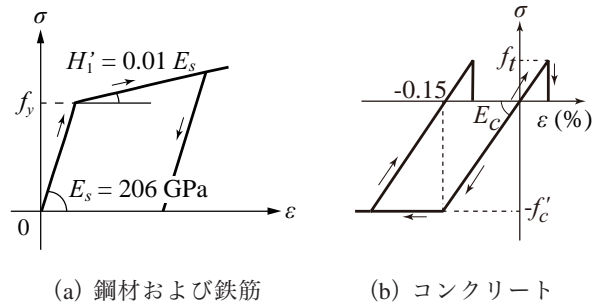


図-3 材料構成則

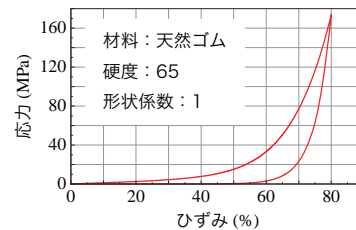


図-4 緩衝ゴムの応力-ひずみ関係

後続する数値で設定落下高さ (cm) を示している。なお、橋梁の設定落下高は、支承が破壊に至りそのまま橋梁が落下することを想定した 0.1 m 落下から、外的作用によって橋梁が跳ね上がるとともに支承が破壊に至った後に橋梁が落下する場合も想定し、最大で 0.4 m 落下までの解析を実施することとした。

2.2 材料構成則

図-3, 図-4には本数値解析で用いた鋼材、鉄筋、コンクリートおよび緩衝ゴムの応力-ひずみ関係を示している。以下に、各材料物性モデルの概要を述べる。

図-3 (a)には鋼材および鉄筋の応力-ひずみ関係を示している。図より、鋼材および鉄筋には塑性硬化係数を弾性係数の 1% とするバイリニア型の等方硬化則を適用した。また、降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用した。単位体積質量、弾性係数およびポアソン比に関しては公称値を用い、それぞれ $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E_s = 206 \text{ GPa}$, $\nu_s = 0.3$ とした。なお、鋼材は SS400 材を、鉄筋は SD295 を想定し、降伏応力 f_y はそれぞれ、 $f_y = 245, 295 \text{ MPa}$ と仮定した。

図-3 (b)には、コンクリート巻立て部および段差防止構造に適用したコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。図より、圧縮側に関しては、相当ひずみが 0.15% に達した時点でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用した。引張側に関しては引張強度 (圧縮強度の 1/10) に達した時点で引張力を伝達しないモデル (カットオフモデル) を採用した。なお、圧縮強度は $f'_c = 30 \text{ MPa}$ と仮定した。

図-4にはケース R の場合において使用したゴム緩衝体の応力-ひずみ関係を示している。ここでは、形状係数を 1 とした、硬度 65 の天然ゴム材料を仮定した。密度およびポアソン比は、 $\rho_{rub} = 1.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\nu_{rub} = 0.495$ とした。なお、図に示す曲線は、別途実施した静的圧縮試験結

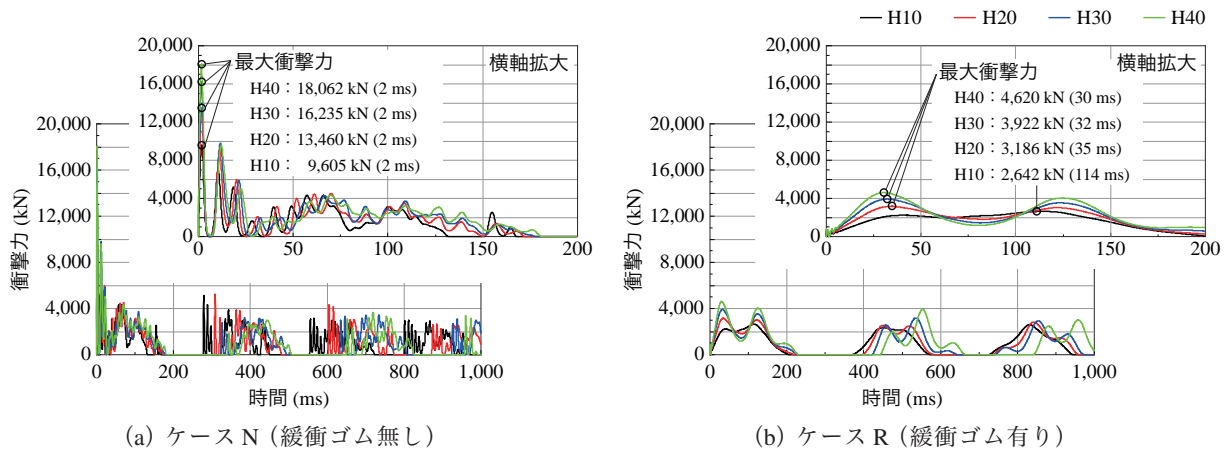


図-5 衝撃力波形

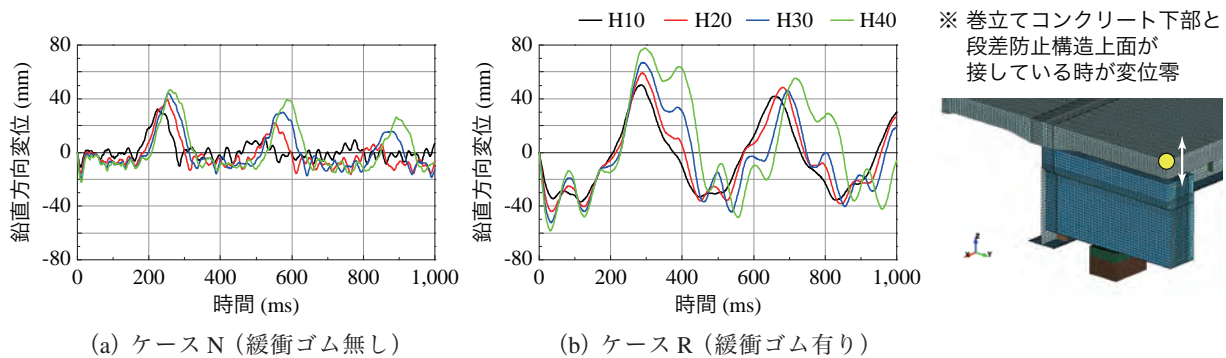


図-6 床版の鉛直方向変位波形

果を基に設定したものである。

その他、床版については配筋を省略していることから、弾性体でモデル化することとした。また、単位体積質量、弾性係数およびポアソン比に関しては公称値を用い、それぞれ $\rho_c = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E_c = 20 \text{ GPa}$, $\nu_c = 0.2$ とした。

3. 数値解析結果および考察

3.1 各時刻歴応答波形

図-5には、本数値解析結果より得られた全8ケースに関する衝撃力波形を比較する形で示している。なお、時間軸を200msまで、あるいは1,000msまでとした2つのグラフを示した。また、衝撃力は巻立てコンクリートおよび段差防止構造間に作用する接触反力による結果である。

図より、緩衝ゴムを設置しないケースNに着目すると、落下高によらず衝突初期2ms時において最大値を示し、その後高周波成分を伴った正弦半波状の波形分布を示している。最大衝撃力に関しては、H10/H40の場合においてそれぞれ、9,605/18,062kNである。また、第一波の継続時間は130~170ms程度であることも見て取れる。さらに、200ms以降に着目すると、数回に渡って衝撃力が励起していることより、リバウンド挙動を呈している様子がうかがえる。

次に、ケースRの場合に着目すると、落下高によらず、ケースNの場合の高周波成分を除去したような波形性状を示していることが確認できる。最大値に着目すると、H10/H40の場合においてそれぞれ、2,642/4,620kNであり、緩衝ゴムを設置しない場合と比較すると最大値を1/4程度

まで抑制することが明らかとなった。

図-6は、本数値解析結果より得られた全8ケースに関する床版の鉛直方向変位波形(上向きを正)を比較する形で示している。図に示すように、巻き立てコンクリート上部および幅方向中央位置における床版の節点に着目している。また、鉛直方向変位は巻き立てコンクリートと段差防止構造が接している時刻において変位零としている点に留意が必要である。

図より、ケースNに着目すると、衝撃力波形と対応して、衝突初期10ms程度において鉛直下向きの最大変位を示しており、H40の場合において22mm程度変位している。その後は、リバウンドによって上方に変位し、重力によって再度下降し段差防止構造と再衝突するような傾向を示している。なお、正の変位が励起している間は図-5に示す衝撃力波形は零を示していることは勿論である。

ケースRの場合に着目すると、ケースNの場合とは異なり、緩衝ゴムが変形することによって正負ともにその変位は大きくなる傾向が見て取れる。また、変位は、段差防止構造との衝突直後から徐々に減衰している様子が確認できる。なお、各波の継続時間に着目すると、ケースRの場合がケースNの場合よりも周期が長く示されており、緩衝ゴムの効果によって衝撃的な作用が緩和される傾向にあることが見て取れる。

3.2 最大変位時におけるひび割れ分布状況

図-7には、ケースN/R-H40に関して、鉛直下向きの最大変位到達時における巻き立てコンクリート部および段差

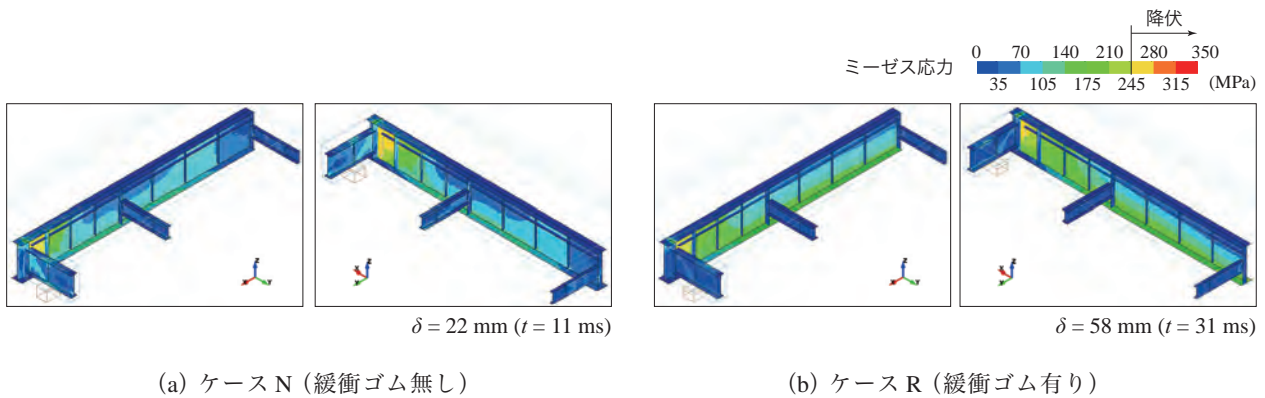


図-8 最大変位時における桁のミーゼス応力コンター図 ($H = 0.4$ m)

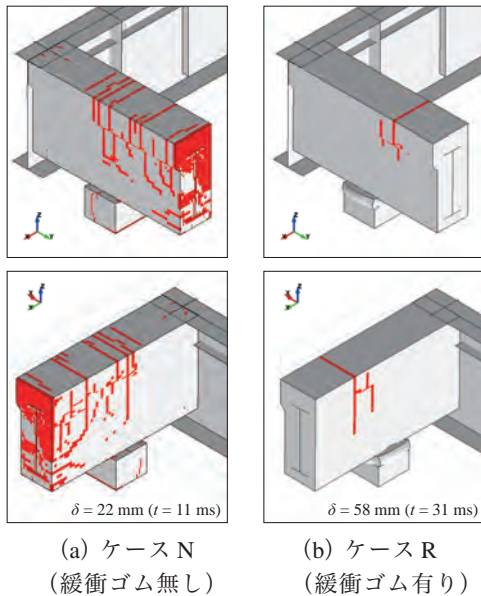


図-7 最大変位時のひび割れ分布図 ($H = 0.4$ m)

防止構造に関するひび割れ分布図を比較する形で示している。なお、図-3 (b)に示す通り、本研究では引張強度到達後、引張応力を伝達しないモデルを採用していることより、第一主応力が零の値を示す要素を赤色表示し、ひび割れ要素として評価することとした。

(a)図より、ケースNに着目すると、衝突初期11ms時点において、巻き立てコンクリートには上縁から下縁に向かって多数のひび割れの進展が確認できる。これは衝撃的な作用によって瞬間的に負曲げの状態に至ったことによるものと推察される。

一方で、(b)図より、ケースRに着目すると、ケースNの場合と比較して損傷状況が大きく異なり、ひび割れによる損傷領域が明らかに小さいことが分かる。これは、緩衝ゴムを設置することによって衝撃荷重強度の低減や分散化が図られるため、損傷が小さくなったことによるものと推察される。ただし、段差防止構造設置直上部近傍は負曲げとなるため、若干のひび割れは発生している。

3.3 最大変位時における桁のミーゼス応力コンター図

図-8には、ケースN/R-H40に関して、鉛直下向き最大変位到達時における主桁および横桁に関するミーゼス

応力コンター図を比較して示している。なお、降伏応力 $f_y = 245$ MPaと設定していることより、黄～赤色領域要素は降伏に至っていることを表している。

(a)図より、ケースNの場合には、段差防止構造と衝突した桁端部周辺に降伏を示す黄色領域が確認できる。また、桁全体を見ると、横桁や衝突部近傍以外の主桁部は、いずれの領域においても弾性範囲内にあることが分かる。

一方で、(b)図より、ケースRの場合を見ると、ケースNの場合と同様に、桁端部周辺領域において降伏を示す黄色領域が確認される。ただし、その領域はケースNの場合よりも小さいことがうかがえる。また、主桁下縁全体に比較的均一に200 MPa程度の応力が発生している様子も見て取れる。

すなわち、ケースNの場合には衝突初期に床版が最大変位を示すと同時に、桁全体は局所的な変形を示す。一方、ケースRの場合には緩衝ゴムの効果によって衝撃的な作用が緩和され床版の最大変位到達時刻が延びるとともに、桁は全体で変形する傾向を示すものと推察される。

4. まとめ

- 1) 巻き立てコンクリートと段差防止構造間に生じる最大衝撃力は、緩衝ゴムを設置することによって1/4程度まで抑制可能である。また、ゴムの荷重分散効果によって最大変位到達時刻が延びるとともに、床版の変位波形もそれに対応した性状を示す。
- 2) 落下高さが0.4mの場合には、緩衝ゴム設置の有無によらず、主桁の段差防止構造との衝突部近傍は降伏に至る傾向を示す。しかしながら、緩衝ゴムを設置することによって動的効果が低減され、主桁が全体で変形し桁端部の降伏領域は縮減する傾向を示す。

謝辞

本数値解析を実施するにあたり、(株)構研エンジニアリング 竹原智久氏、室蘭工業大学構造力学研究室 長岡芽晟君、永井泰圭君には、解析モデルの作成やデータ分析など多大な支援を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) (一社)日本橋梁建設協会：熊本地震橋梁被害調査報告書，2016.
- 2) Hallquist, J. O.: *LS-DYNA User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2018.