

桁端部緩衝材の低温時特性と桁衝突挙動に関する 実験および解析的検討

寺澤 貴裕¹・西 弘明¹・白戸 義孝¹・山澤 文雄¹

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

1. はじめに

既往地震において上部構造と橋台の接触による桁衝突が上部構造の変位を拘束し、橋脚が大きく損傷しなかった事例（写真-1）等を踏まえ、その変位拘束効果の耐震補強設計への考慮が期待される。その手法は、図-1に示すように、上部構造と橋台パラペットの接触等の水平抵抗を解析モデルに考慮し、橋全体系の動的解析により橋脚および橋台等の耐震性能を照査するものである。

また、橋台パラペット部が損傷した被害を分析し、橋台パラペット部の損傷形態やモデル化、抵抗特性に関する研究も進んできている¹⁾。さらに、桁衝突において緩衝材による地震慣性力の低減効果に関する研究²⁾がなされており、桁遊間部に緩衝材を間詰することで橋台や橋脚応答が低減することが明らかとなっている。

過年度において、図-1に示した非線形モデルを用いて、桁衝突に伴う下部構造応答特性の解析的検討³⁾を行っている。このモデルは既往研究の地震分析等を反映し、3次元非線形FEM解析により妥当性が確認されているが、橋台の押し抜きせん断抵抗バネ剛性および緩衝材を設置した場合の衝突バネ剛性は、いずれも静的載荷実験結果に基づく設定となっており、桁衝突に伴う橋台破壊形態の1つであるパラペット・ウィングの押し抜きせん断破壊に着目すると、衝突挙動を踏まえた動的載荷実験結果による設定が望ましいものと考えられる。

そこで、これまでに衝突力によるパラペットおよびウィングの押し抜きせん断耐力を把握する要素実験として、橋台パラペットおよびウィングを想定した供試体による衝突実験⁴⁾を実施し、衝突力による橋台の押し抜きせん断抵抗バネ剛性は既往解析モデル³⁾

と比較して小さくなること、衝突面に緩衝材を設置した衝突実験では、衝撃力が格段に緩和されること、さらに、要素実験から得られた緩衝材の剛性を用いた時刻歴応答解析による橋梁下部構造の地震時応答感度分析⁴⁾では、橋脚・橋台応答への緩衝材剛性の影響は少ないことを明らかにしてきた。

本研究では、緩衝材の低温時特性を把握すること



写真-1 桁衝突による橋台損傷事例

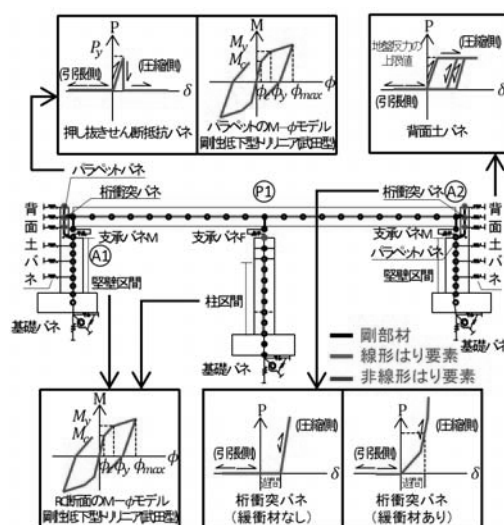


図-1 解析モデル

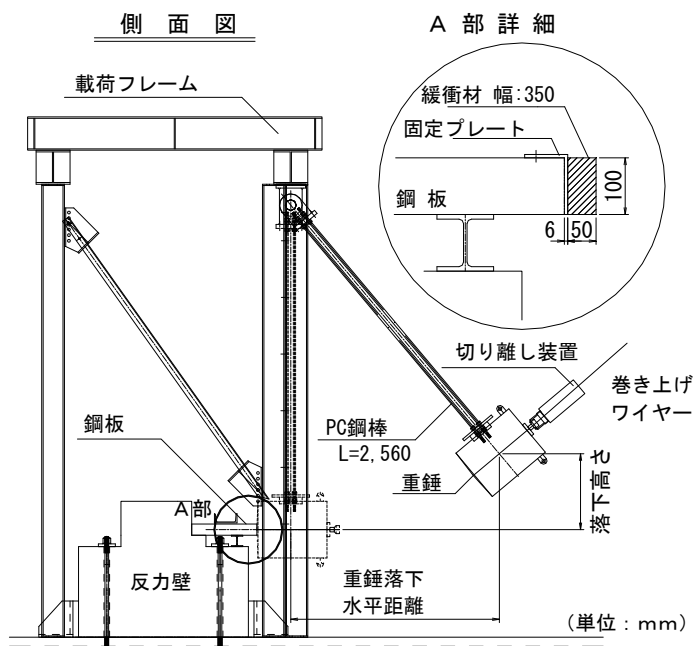


図-2 実験装置概要



写真-2 実験状況



写真-3 緩衝材設置状況

を目的に、低温環境下における桁衝突を想定した要素実験（重錘衝突実験）を行うとともに、そこで得られた緩衝材の初期剛性を用いて橋梁下部構造の地震時応答感度分析を実施した。

2. 実験概要

(1) 実験方法

図-2に実験装置の概要を、写真-2に実験状況を示す。衝撃力は载荷フレームに吊り下げられた重錘（質量1,000kg）を所定の高さまで引き上げ、振り子運動によって衝突させることにより緩衝材に作用させた。なお、重錘は引き上げ時および衝突時に横振れしないようにPC鋼棒を用いて吊り下げている。緩衝材は写真-3に示すように鋼板（幅350 mm，奥行575，高さ100 mm，SS400）の前面に設置した。計測項目は、重錘に設置した加速度計による重錘加速度、高速度カメラ撮影（1000fps）による緩衝材圧縮変形量および、緩衝材中央部に埋設した熱電対による緩衝材内部の温度である。

(2) 緩衝材および実験ケース

緩衝材は、硬度65 $\pm$ 5のクロロブレンゴムで、寸法は幅350mm，奥行50mm，高さ100mmである。

表-1に実験ケースを示す。実験ケースLRは初冬期を想定し緩衝材を屋外に暴露した状態から、また、実験ケースFRは厳冬期を想定し緩衝材を冷凍室内に

表-1 実験ケース

ケース名	LR	FR	NR
緩衝材	有		無
外気温 ⁵⁾ (°C)	2.3~3.2		5.1~6.5
緩衝材内部温度 (°C)	3.4~4.6	-21.6~-1.0	—
重錘落下水平距離 (m)	0.3 0.6 0.8 1.0×5 回	1.0×5 回	0.3 0.6 0.8 1.0
重錘速度 (m/sec)	0.6~1.9	1.9	0.6~1.9

48時間存置し、緩衝材内部温度が-25℃となるまで冷却した状態から、それぞれ外気温⁵⁾2.3℃~3.2℃の屋外において衝突実験を行った。また、緩衝材の効果を把握する目的で、鋼板の前面に緩衝材を設置しない実験ケースNRも併せて衝突実験を行った。また、緩衝材は各実験ケース毎に交換し、衝撃力は各実験ケース内で累積的に作用させた。なお、実験時の緩衝材内部温度は実験ケースLRで3.4℃~4.6℃、実験ケースFRは実験開始時で-21.6℃であったが、時間経過とともに緩衝材内部温度は上昇し、実験終了時では-1.0℃であった。

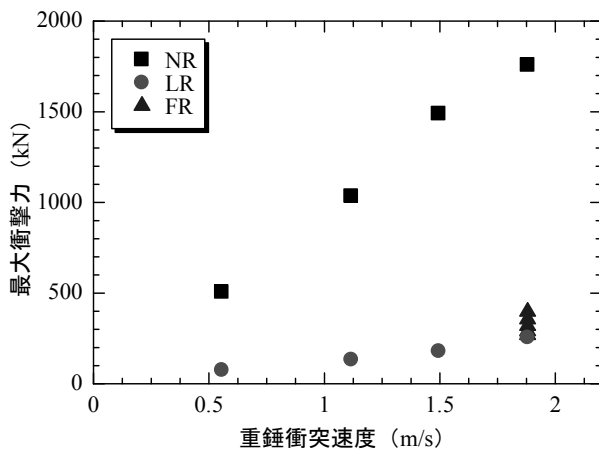


図-3 重錘衝突速度と最大衝撃力の関係

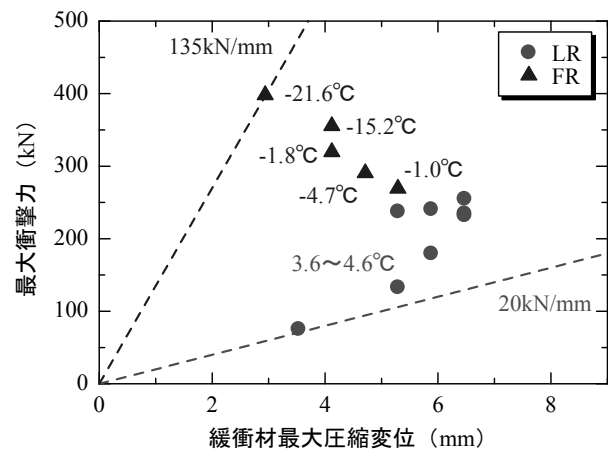


図-4 緩衝材最大圧縮変位と最大衝撃力の関係

形式	橋台Ⅰ	橋台Ⅱ	橋台Ⅲ
	ウイングなし	パラレル	二辺固定 +パラレル
破壊形態	胸壁曲げ破壊	堅壁曲げ破壊	
橋台耐力	1,360kN	2,143kN	9,410kN

図-5 橋台ウイング形式

表-2 解析条件

項目	条件
設計方向	橋軸方向
積分手法	Newmark β 法 ($\beta=0.25$)
解析時間間隔	1/10,000sec
減衰考慮方法	Rayleigh 減衰
固有周期計算手法	サブスペース法
使用プログラム	TDAPⅢ
基礎地盤条件	Ⅱ種地盤
衝突位置	桁中心
入力地震波	タイプⅡ-Ⅱ-1

3. 実験結果

(1) 重錘衝突速度と最大衝撃力の関係

図-3に重錘衝突速度と衝突時の最大衝撃力の関係を示す。最大衝撃力は重錘質量 m と衝突時最大加速度 a_{max} との積($m \times a_{max}$)である。実験ケースNRでは重錘衝突速度が速くなるとともに最大衝撃力は線形的に大きくなり、重錘衝突速度1.8m/sec(重錘落下水平距離1.0m)の時の衝撃力は1758kNであった。実験ケースLRではNRと同様に重錘衝突速度が速くなるとともに最大衝撃力は増加するが、重錘衝突速度1.8m/sec(重錘落下水平距離1.0m)の時の最大衝撃力は232kN~254kNであり、実験ケースNRの約1/7であった。実験ケースFRでは後述の緩衝材内部温度の上昇とともに最大衝撃力は398kNから269kNへと低減し、実験ケースNRの約1/4~1/7であり、低温環境下においても緩衝効果は期待できると考えられる。

(2) 緩衝材最大圧縮変位と最大衝撃力の関係

図-4に緩衝材最大圧縮変位と最大衝撃力と関係を示す。実験ケースFRにおいては、緩衝材内部温度の上昇とともに圧縮変位量も大きくなった。緩衝材の初期剛性(最大衝撃力/圧縮変位量)を算出すると、約20kN/mmから135kN/mmの範囲であった。

4. 解析概要

解析対象には、昭和55年道示以前で設計された2径間連続のコンクリート橋(支間長30m, 遊間70mm)および、鋼橋(支間長50m, 遊間100mm)を想定している。下部構造は、堅壁高さ10mの逆T式橋台(高さ2.2m, 厚さ0.5mのパラペット)および躯体高10mの壁式橋脚とした。

図-5に解析ケースに考慮した橋台ウイング形式を示す。ここで破壊形態は、堅壁、パラペット各部位の曲げ、せん断、押し抜き耐力を比較し最小となるものとした。なお、押し抜き耐力の算出には既往実験⁴⁾で得られた衝撃力による押し抜きせん断応力度($\tau=4.00\text{N/mm}^2$)を用いた。

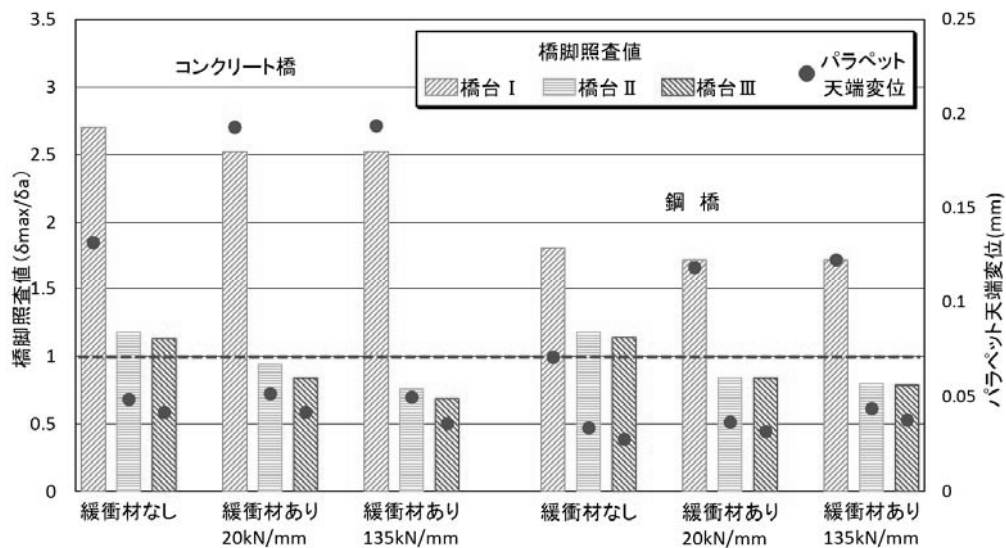


図-6 橋脚照査値およびパラペット天端変位

橋梁全体系の非線形解析モデルは、前述の図-1の既往解析モデル³⁾の押抜きせん断抵抗バネを修正し、バネ値を既往実験⁶⁾で得られた $E_s=1200\text{kN/mm}$ とした。橋台背面土バネおよび桁衝突バネは既往解析³⁾の値と同様にした。緩衝材を設置した場合の桁衝突バネのバネ値は、衝突実験結果より緩衝材初期剛性の 20 kN/mm および 135 kN/mm の2ケースとし、桁端衝突を考慮した橋梁全体系の地震時挙動に関する時刻歴非線形応答解析を道路橋示方書V耐震設計編⁷⁾のタイプII地震動を入力波として表-2に示す解析条件で行い、地震時応答感度分析を実施した。

5. 解析結果

図-6に解析結果における橋脚照査値（最大応答変位 δ_{max} /許容変位 δ_a ）およびパラペット天端変位を示す。コンクリート橋、鋼橋ともにウィングなしの橋台形式IIにおいては緩衝材設置の効果は見られず橋脚照査値は1.0を超えており、橋脚は損傷した。しかしながらパラレルウィングがある橋台形式IIおよびIIIにおいては、いずれの緩衝材剛性においても橋脚は損傷を回避できており、低温時においても緩衝材による緩衝効果を期待できると考えられる。また、既往研究⁴⁾の結果と同様に橋脚・橋台応答への緩衝材剛性の影響は少ないと考えられる。

6. まとめ

本研究では、低温環境下での要素実験（衝突実験）によって得られた緩衝材の初期剛性を用いた橋

梁下部構造の地震時応答感度分析を実施した。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 緩衝材設置による緩衝効果は、厳冬期を想定した低温環境下においても期待できる。
- (2) 橋脚・橋台応答への緩衝材剛性の影響は少ない。

参考文献

- 1) たとえば、田崎賢治、幸左賢二、新井伸博、阿部弘典：桁衝突解析における橋台部の抵抗特性とモデル化に関する一考察，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.59，pp.323-324，2004.9
- 2) 田崎賢治、幸左賢二、阿部弘典、新井伸博：橋の桁端部に間詰め材を充填する地震完成力の低減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1171-1176，2004.7
- 3) 西城能利雄，岡田慎哉，西 弘明：地震時の桁衝突に伴う橋梁下部工応答特性の解析的検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.70，pp.225-226，2015.9
- 4) 西城能利雄，佐藤孝司，西 弘明：桁衝突に伴う橋台抵抗特性の実験及び解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，2016
- 5) 気象庁HP-過去の気象データ検索，2016年11月7日，2016年11月8日，札幌市
- 6) 寺澤貴裕，佐藤孝司，西 弘明，山澤文雄：桁衝突に伴う橋台抵抗特性に関する実験的検討，土木学会北海道支部論文報告集，第73号，部門A-54，2017.2
- 7) 日本道路協会 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2013.3