

地震時の桁衝突に伴う橋台抵抗特性の実験的検討

山澤文雄¹・佐藤孝司¹・西 弘明¹・西城 能利雄²

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）

²正会員 北海道開発局 室蘭開発建設部 苫小牧道路事務所（〒053-0816 苫小牧市日吉町2丁目1-5）

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と橋台および背面土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事例を分析し、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⁾により、桁遊間部に緩衝材を間詰することで橋台、橋脚応答が低減することが明らかとなっている。

過年度の桁衝突に伴う下部構造応答特性の解析的検討に関する研究³⁾においても、図-1に示した非線形モデルを採用している。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。しかし、橋台の破壊形態および耐荷力などの抵抗評価に課題があると言える。ここで、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こととした。

桁衝突の解析モデルにおいて、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いるが、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、本研究では桁衝突に伴う橋台破壊形態の1つである押し抜きせん断破壊に着目し、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強

度を把握するための要素実験として、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を実施した。また、桁遊間部の緩衝材の有無による衝撃力の緩衝効果程度を把握する目的で、緩衝ゴムを設置した場合の衝突実験も実施した。

2. 実験概要

(1) 実験方法

図-2に実験装置の概要を、併せて写真-2に実験状況を示す。実験は、図に示すように載荷フレームに



写真-1 桁衝突による橋台損傷事例

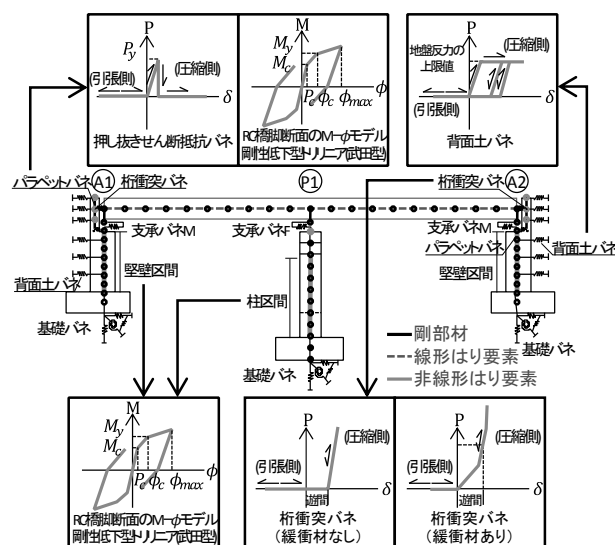


図-1 解析モデル

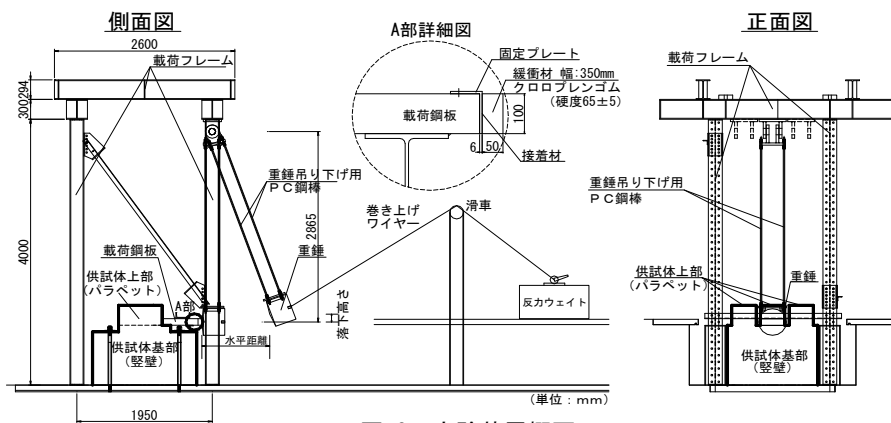
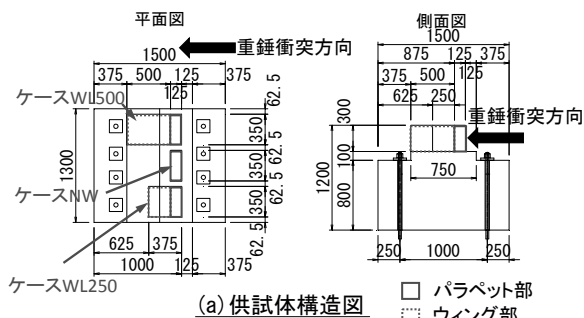


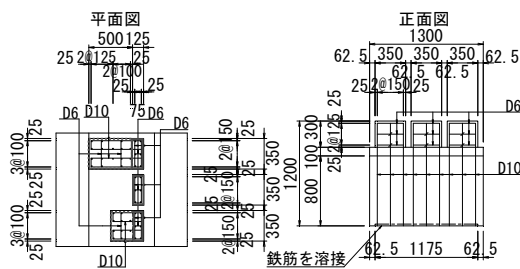
図-2 実験装置概要



写真-2 実験状況



(a) 供試体構造図



(b) 供試体配筋図

図-3 供試体形状および配筋図

吊り下げられた重錘（質量3.38kN）を所定の高さまで吊り上げ、振り子運動によって供試体に衝突させることにより行った。衝撃力は落下高さを徐々に高く（水平距離を徐々に大きく）して累積荷重として与えた。また、堅壁を想定した供試体基部（これ以降「堅壁」と略す）とパラベット（またはウィング）を想定した供試体上部（これ以降「パラベット」と略す）の境界において、押し抜きせん断破壊が発生するように载荷鋼板（B350 mm×W575 mm×H100 mm）を配置し、重錘による衝撃力が载荷板を介して導入される構造とした。緩衝材有のケースでは、重錘と緩衝材の衝突として衝突力を導入させるため、図-2（A部詳細図）に示すように载荷鋼板の重錘衝突面に緩衝材を設置した。

(2) 供試体および実験ケース

図-3に供試体形状および配筋図を、表-1に実験ケースの一覧を示す。また、写真-3には実験前の供試

表-1 実験ケース

ケース名	ウィング有無/ ウィング長 (mm)	緩衝材有無	重錘水平 距離 (m)	重錘 衝突 速度 (m/s)	押し抜き せん断 耐力※ ¹ (kN)
NW	無し	無し	0.1～ 1.0	0.1～ 1.9	42
WL250	250	無し	0.3～ 1.8	0.6～ 4.2	126
WL500	500	無し	1.0	1.9～ 4.0	210
NW-R	無し	有り	1.0～ 2.0	1.9～ 4.0	42
WL250-R	250	有り			126
WL500-R	500	有り			210

※1 道路橋示方書においてコンクリートの圧縮強度より許容押し抜きせん断応力度（ $\tau=0.96N/mm^2$ ）で算出した値である



写真-3 実験前供試体状況



写真-4 緩衝材の変形状況
(高速カメラ画像)

体状況を示す。供試体の設計にあたっては、昭和55年道示以前に設計された逆T式橋台の配筋を想定し、実験装置の寸法を考慮して1/4スケールに縮小することで供試体の諸元を設定した。また、軸方向鉄筋比および帯鉄筋比が実物大とできるだけ等価となるように鉄筋径を決定している。堅壁寸法は幅1300 mm、奥行き1500 mm、高さ900 mm、パラベットの寸法は幅350 mm、奥行き125～625 mm、高さ300 mmとした。

本実験ではウィング有無、ウィング長の違いによる押し抜きせん断耐力を把握するため、ウィング長（奥行き）をパラメータとした3ケースを基本とした。また、緩衝材の緩衝効果を把握するため、基本3ケースに緩衝材を設置したケースも実施した。緩衝材にはクロロプレンゴム（硬度65 $\pm$ 5）を使用し、寸法は幅350 mm、奥行き50 mm、高さ100 mm

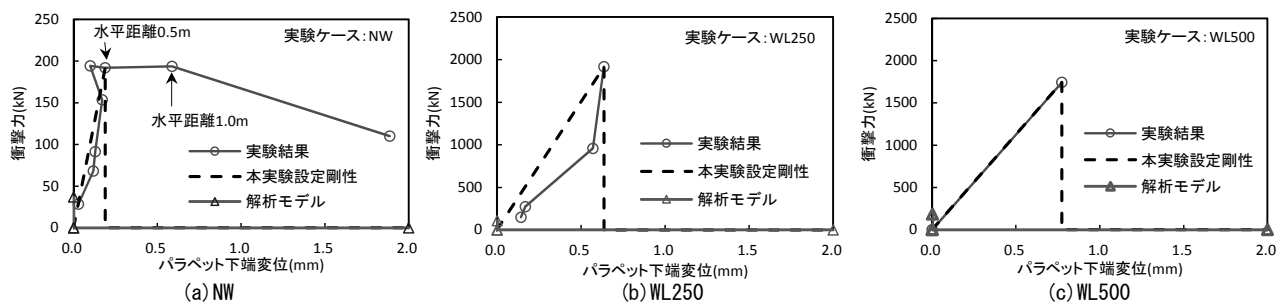


図-4 衝撃力とパラペット下端変位との関係

とした。各ケースの重錘の落下時の水平距離および衝突速度を表-1に示す。

パラペットの主鉄筋および帯鉄筋（配力筋）にはそれぞれD10，D6を用いた。実験時のコンクリートの圧縮強度は 27.5N/mm^2 ，静弾性係数は $2.37 \times 10^4\text{N/mm}^2$ であった。

(3) 計測方法

本実験では，重錘の重心位置に設置した加速度計により重錘加速度を測定した。また，各パラペットの衝突面から見て背面側のパラペット上端および下端に設置したレーザー変位計により，変位量を測定した。また，緩衝材の変形は，写真-4に示すように重錘，载荷鋼板，不動点に設置したターゲットを高速度カメラ撮影する(1000fps)ことにより測定した。

3. 実験結果

(1) 衝撃力とパラペット下端変位との関係

図-4に各ケースにおける衝撃力とパラペット下端変位の関係を示す。ここで，衝撃力は重錘加速度と重錘質量の積である。なお，図中には，既往検討³⁾における設定法を参考に算出した衝撃力-変位関係を併せて示している（押し抜きせん断バネの解析モデル）。解析モデルの耐力は，道路橋示方書におけるコンクリートの圧縮強度の影響を考慮した許容押し抜きせん断応力度（ $\tau = 0.96\text{N/mm}^2$ ）と抵抗面積との積とし，剛性（バネ定数E）は解析事例等⁴⁾を参考に $E = 70,000\text{kN/mm}$ と設定した。

NWにおいては，水平距離0.5 m位置の重錘落下まではパラペット下端変位と，衝撃力はおおよそ線形関係にある。実験結果を近似したパラペットの初期剛性を黒破線で図示した。その剛性は既往解析モデルと比較して小さくなるものの，最大耐力は約5倍の大きさとなる。また，水平距離0.5 m以上の範囲の重錘落下ではパラペット下端変位は大きく増加するが，衝撃力は頭打ちとなり，水平距離1.0 m以上では急激に低下した。これは鉄筋ひずみ計測を行っていないため，推測の域を超えないが，損傷面の摩

擦や未破壊部の抵抗によると考えられる。

WL250においては，本実験の範囲では，衝撃力とパラペット下端変位はおおよそ線形関係にある。実験結果を近似した初期剛性は既往解析モデルと比較して小さくなるものの，最大耐力は約15倍の大きさとなる。

WL500においては，加速度計の出力超過により測定データが1点しか採用できなかったため，衝撃とパラペット下端変位の関係は把握できていないが，参考に実験結果を近似した初期剛性を黒破線で図示した。その剛性は既往解析モデルと比較して小さくなるものの，最大耐力は約8倍と大きさとなる。

以上より，いずれのケースにおいても近似したパラペットの初期剛性は既往解析モデルと比較して小さくなるといえる。

表-2に各ケースにおける押し抜きせん断耐力の一覧表を示す。実験における押し抜きせん断耐力は，いずれも道示の許容押し抜きせん断耐力と比較して大きいといえる。これには静的载荷と衝突载荷という実験载荷条件の相違が影響していると考えられる。

(2) パラペット損傷状況

図-5に各ケースの実験終了時におけるパラペットの損傷図を示す。前面（重錘衝突面）を正面として左右側面を示している。

NWにおいては，パラペットと堅壁の境界面にクラックが発生し，押し抜きせん断破壊が見られる。それ以外にクラックは見られなかった。

WL250においては，クラック発生量が3ケースの中で最も多い。損傷は右側面の剥離から始まり，重錘の水平距離が増加する度，左右側面の剥離が拡大した。重錘の水平距離2.0 mの落下時点で剥離箇所から側面のクラックが発生した。最終的には背面の中央付近，パラペットと堅壁の境界面にクラックが発生した。

WL500においては，WL250と同様に側面の剥離が顕著である。パラペットと堅壁の境界面のクラックは，前面の左側および左側面の中央付近まで進展した。

(3) 緩衝材の圧縮力と圧縮量との関係

図-6に緩衝材を設置した場合の水平距離1.0～2.0 mの実験ケースにおける緩衝材の圧縮力と圧縮量の関係を示す。ここで、圧縮力は定義した衝撃力とし、圧縮量は高速度カメラ画像より計測した値とした。履歴は重錘衝突時には図中の「載荷矢印」側から最大圧縮力に達し、その後、重錘跳ね返り時には「除荷矢印」側をたどる。ここで、右下の図は各実験ケースを合成したもので載荷側のみを表記している。

NW, WL250の圧縮力と圧縮量はともに重錘の水平距離が大きくなるほど増大する傾向にある。それに対してWL500ではその傾向は見られない。また、いずれの実験ケースにおいても重錘の水平距離が同じ場合には被衝突体の剛性に関わらず圧縮力はほぼ同程度の大きさとなる。既往研究⁵⁾において、同厚の緩衝材に重錘が速度1.5m/sで衝突した際、最大衝突力が約30kNで最大約15mmの圧縮量であった。しかし、本実験の緩衝材の圧縮量は最大衝突力が約300kNで最大約14mmと、既往研究の緩衝材の圧縮量と比較して小さい。これは本実験の重錘の衝突速度が2～4m/sと既往研究と比較して速いため、緩衝材の特性値の速度依存性が影響しているものと考えられる。ここで、本実験におけるゴム剛性は、図-4右下の合成図より各実験ケースの載荷側曲線の接線勾配の下限20kN/mmから上限60kN/mmの範囲にある。以上より、本実験結果を緩衝材のゴム剛性として反映する場合には、ゴム剛性のばらつき（20～60kN/mm）を考慮した設定を行うことが考えられる。

4. まとめ

本研究では、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強度を把握するための要素実験として、橋台供試体を用いた衝突実験を実施した。本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験結果を近似したパラペットの初期剛性は既往解析モデル³⁾と比較して小さくなる。
- (2) 既往研究⁵⁾の緩衝材の衝撃荷重に対する圧縮量と比較して圧縮量が小さかった。これは緩衝材の特性値の速度依存性が影響していると考えられる。
- (3) 本実験結果を緩衝材のゴム剛性として反映する場合には、ゴム剛性のばらつき（20～60kN/mm）を考慮した設定を行うことが考えられる。

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

表-2 押し抜きせん断耐力

ケース名	断面寸法 (mm)	抵抗面積 (mm ²)	衝撃力 (kN)	押し抜き せん断応力度 (N/mm ²)
NW	350×125	43,750	191.95	4.39
WL250	350×375	131,250	1917.00	14.61
WL500	350×625	218,750	1742.31	7.97

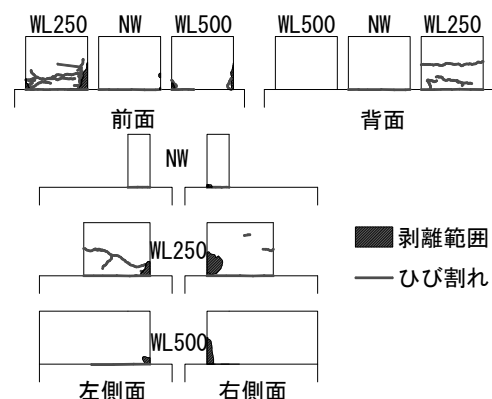


図-5 各実験終了時のパラペット損傷図

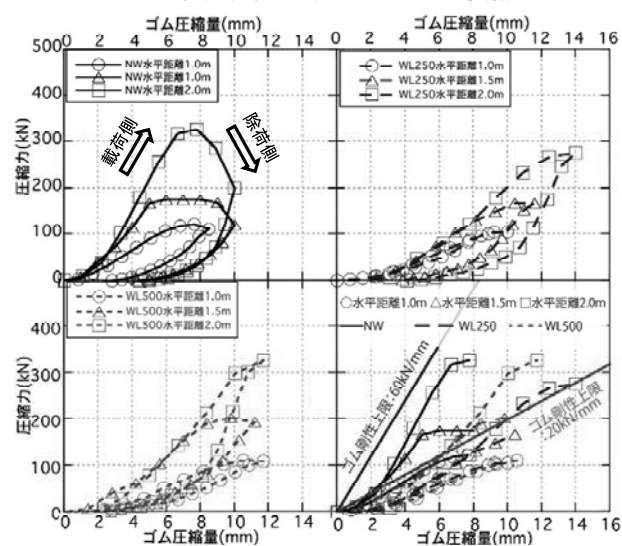


図-6 緩衝材の圧縮力と圧縮量の関係

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. 323-324，2005. 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慣性力の低減効果，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) 宮藺雅裕，幸左賢二，濱本朋久，猪熊康夫：新潟県中越地震で被災を受けた橋梁の桁衝突解析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28，No. 2，pp. 997-1002，2006. 7
- 5) 結城洋一，玉井宏樹，宇野まり子，園田佳巨，春日井俊博：拘束条件が緩衝ゴムの衝撃力低減効果に及ぼす影響に関する実験的考察，第11回構造物の衝撃問題シンポジウム論文集，2014. 10