

論文 桁衝突に伴う橋台抵抗特性の実験及び解析的検討

西城 能利雄*1・佐藤 孝司*1・西 弘明*2

要旨：本研究では、桁衝突に伴う橋台の破壊形態の1つである押し抜きせん断破壊に着目し、衝突力作用時における橋台の抵抗特性を把握するための基礎検討として、橋台を想定した供試体による衝突実験を実施した。また、衝突力の緩衝効果が期待できる緩衝ゴムを設置した場合の衝突実験も実施した。以上の衝突実験で得られた押し抜きせん断パネおよび緩衝ゴムの初期剛性を用い、剛性の違いによる下部構造応答感度分析を実施した。解析結果より、本実験で設定した押し抜きせん断初期剛性を採用した場合、破壊形態が変化し、橋脚応答は低減すること、緩衝ゴムの初期剛性の違いは、照査結果に対して影響が小さいことを確認した。

キーワード：桁衝突、衝突実験、橋台、押し抜きせん断破壊パネ、緩衝ゴム、初期剛性

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パネ剛性および緩衝材を設置した場合の衝突パネ剛性は、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。さらに、衝突実験で得られた押し抜きせん断パネおよび緩衝ゴムの初期剛性を用い、初期剛性の違いによる下部構造の応答感度分析を実施した。



(赤実線は押し抜きせん断によるひび割れ位置)

写真-1 桁衝突による橋台損傷事例

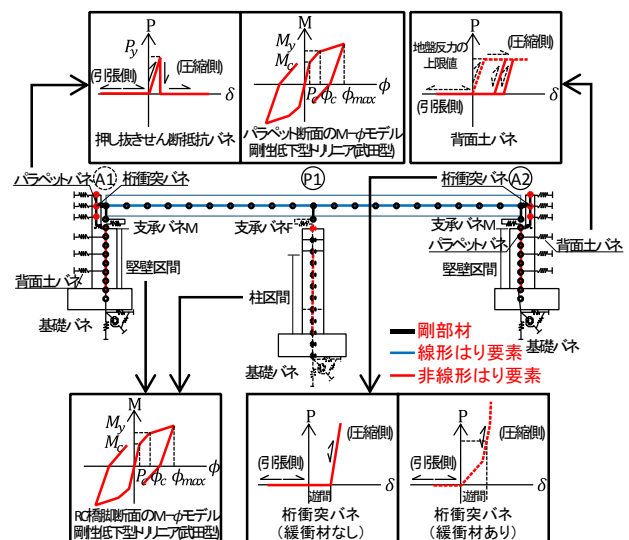


図-1 解析モデル

*1 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (正会員)

*2 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 博士(工学) (正会員)

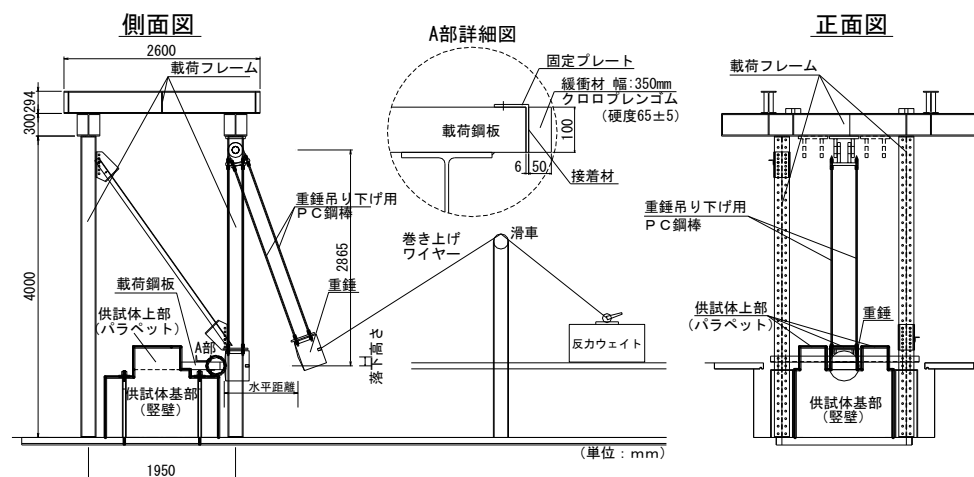


図-2 実験装置概要

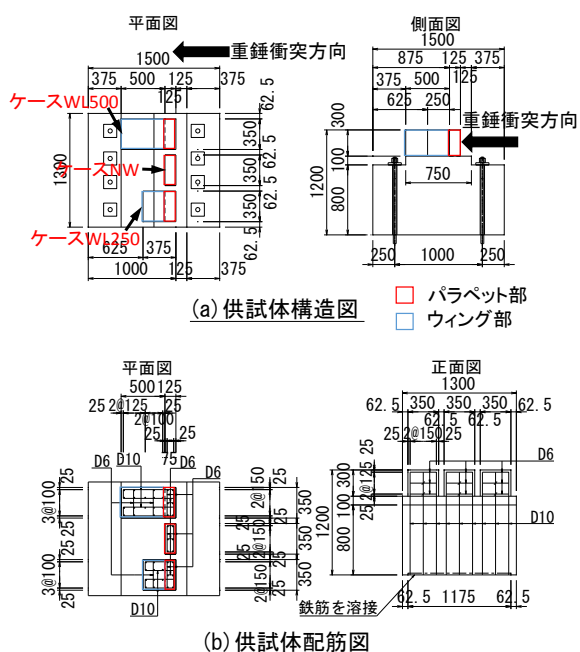


図-3 供試体形状および配筋図

2. 実験概要

2.1 実験方法

図-2 に実験装置の概要を示す。実験は、図に示すように载荷フレームに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）とパラペット（またはウィング）を想定した供試体上部（これ以降「パラペット」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。緩衝材有りのケースでは、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。

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 ($\tau=0.96\text{N/mm}^2$) で算出した値である

2.2 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-2 には実験前の供試体状況を示す。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、パラペットの寸法は幅 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°±5）を使用し、寸法は幅 350 mm、奥行き 50 mm、高さ 100 mm 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。この衝突速度は後述の解析モデルを用いた予備検討結果（1.0～1.2m/s 程度）を参考に設定した。

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。

2.3 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-3 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

3.1 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（押し抜きせん断パネの解析モデル）。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（パネ定数 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赤破線で図示した。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赤破線で図示した。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 倍と大きくなる。

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



写真-2 実験前供試体状況

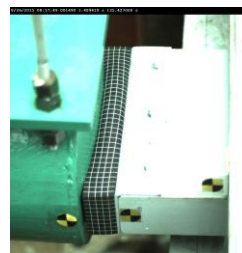
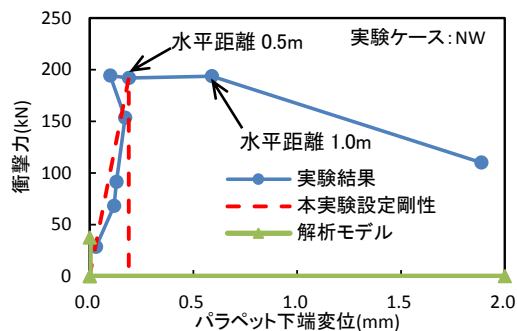
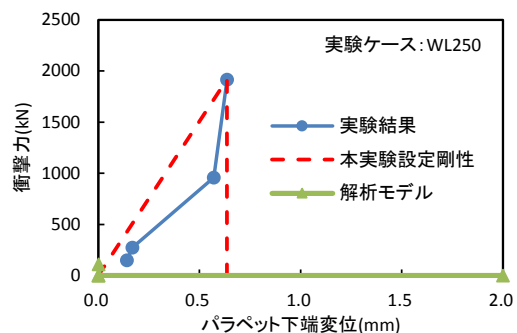


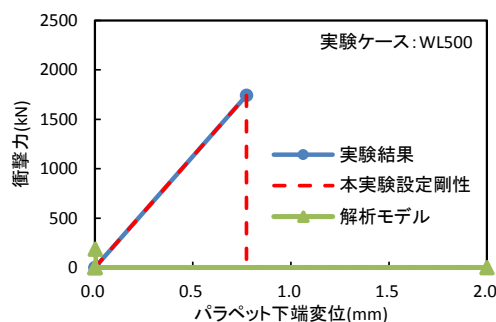
写真-3 緩衝材の変形状況
(高速度カメラ画像)



(a) NW



(b) WL250



(c) WL500

図-4 衝撃力とパラペット下端変位との関係

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。

3.2 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。

3.3 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 2.3 で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 (20kN/mm～60kN/mm) を考慮した設定を行うことが考えられる。

4. 解析概要

4.1 解析モデル

解析対象には、橋台供試体と同様に昭和 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を想定している。下部構造については、堅壁高さ 10 m の逆 T 式橋

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

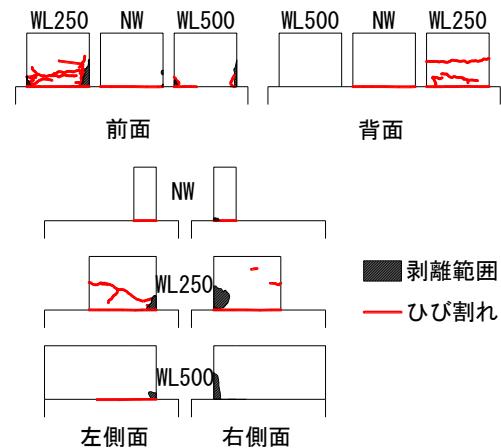


図-5 各実験終了時のパラペット損傷図

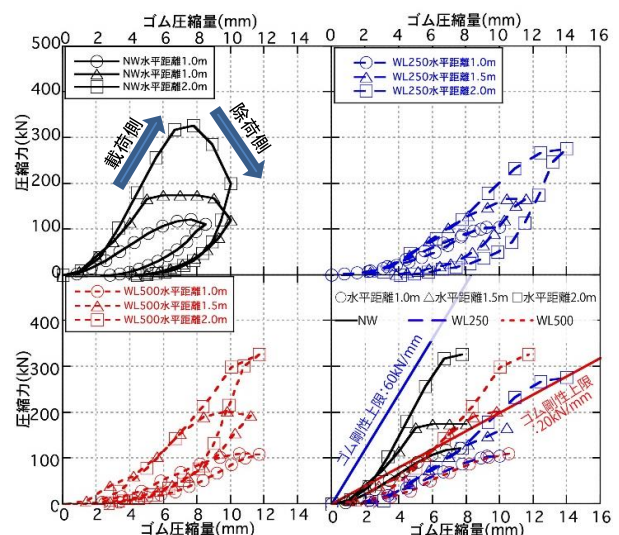


図-6 緩衝材の圧縮力と圧縮量の関係

台、高さ 2.2 m・厚さ 0.5 m の橋台パラペット、躯体高 10 m の壁式橋脚とした。

桁衝突による橋台の破壊形態は橋台ウィング形式により異なるため、図-7 に示すような橋台ウィング形式を解析ケースに考慮した。各橋台ウィング形式の各部位耐力および橋台の破壊形態を表-3 に示す。ここで、橋台の破壊形態は各部位（堅壁およびパラペット）の曲げ・せん断・押し抜き耐力を比較し、耐力が最小となるものを選定した。

解析モデルは、図-1 に示す橋梁全体系の非線形解析モデルである。但し、破壊形態を想定した部位以外は線形モデルとした。考慮した水平抵抗は、橋台パラペットおよび橋台背面土の水平抵抗、桁の衝突であり、図中に

表－3 橋台破壊形態

橋台 ウイング 形式	堅壁			パラペット			破壊形態
	曲げ 耐力 (kN)	せん断 耐力 (kN)	押し抜き せん断 耐力 [*] (kN)	曲げ 耐力 (kN)	せん断 耐力 (kN)	押し抜き せん断 耐力 [*] (kN)	
(a)ウイング無し	2143	15357	—	1360	2501	—	パラペット 曲げ
(b)パラレル	2143	15357	—	41905	—	9350	堅壁曲げ
(c)二辺固定 ＋パラレル①	4724	—	18700	41905	—	9350	堅壁曲げ
(d)二辺固定 ＋パラレル②	9410	—	20400	41905	—	9350	パラペット 押し抜き
(e)二辺固定	14680	—	22100	41905	—	9350	パラペット 押し抜き

※1 押し抜きせん断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 ($\tau = 0.85 \text{ N/mm}^2$) と抵抗面積との積である

表－5 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	1/10000 秒
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	TDAP III
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

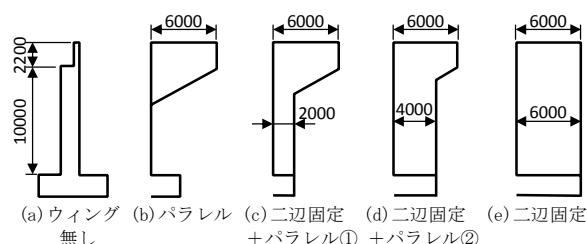
表－4 押し抜きせん断バネ諸元

	許容押し抜き せん断耐力 (N/mm ²)	押し抜き せん断耐力 (kN)	バネモデル 剛性 (kN/mm)
既往解析	0.85	9,350	7.0E+04
本実験 設定	4.00	44,000	1.02E+03

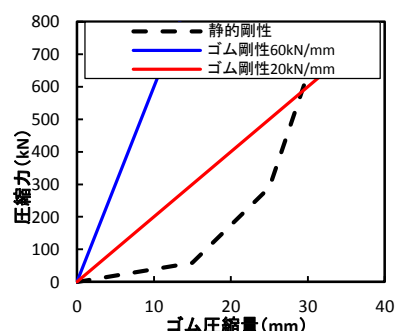
示すようにバネでモデル化した。橋台パラペットバネは過去の被災状況より破壊形態に応じて、曲げ破壊型の場合には図中に示す剛性低下トリリニア型M- ϕ モデルを、せん断破壊型の場合には押し抜き抵抗バネとして考慮した。初期剛性は、3.1 で設定した値および本実験結果に基づく値の2種類を設定した。実験結果による押し抜き抵抗バネとしては、最大耐力・剛性が小さいケースNWの値を採用した。本解析に使用した押し抜きせん断バネの諸元を表－4 に示す。橋台背面土バネおよび桁衝突バネは既往解析³⁾の値と同様とした。緩衝材を設置した場合の桁衝突バネのバネ値は、以下の様に設置した3種類の緩衝ゴム剛性とした(図－8)。既往研究²⁾より厚さ50mmのゴムの圧縮力ー圧縮量の関係とした場合(これ以降、静的剛性と略す)、本衝突実験結果のゴム剛性のばらつきを考慮し、ゴム剛性の上限および下限とした場合である。橋台堅壁基部および橋脚基部の曲げ破壊型モデルは、剛性低下トリリニア型M- ϕ モデルとした。基礎バネは底版下面に水平と回転の2自由度に集約したバネとして設定した。支承条件は橋脚上1点固定とした。

4.2 解析条件および解析ケース

表－5 に示す解析条件で、道路橋示方書V耐震設計編⁶⁾のタイプII地震動を入力波とした時刻歴応答解析を実施した。押し抜きせん断バネ剛性の影響を検討するケースでは、支間長を30m一定とし、遊間量を20・40・70と変化させた場合、遊間量を40mm一定とし、支間長を30・50mと変化させた場合とした。緩衝ゴム剛性の影響を検討するケースでは、支間長を30m、遊間量を70mmで一定とし、ゴム剛性は3種類(静的剛性、初期剛性20kN/mmおよび60kN/mm)とした。



図－7 橋台ウイング形式



図－8 解析モデルの緩衝ゴム剛性

5. 解析結果

5.1 押し抜きせん断バネ剛性の影響

図－9 に遊間量・支間長を変えた場合の橋脚・橋台応答に及ぼす押し抜きせん断バネ剛性の影響を示す。なお、既往解析³⁾において破壊形態が押し抜きせん断破壊となる橋台ウイング形式は、形式(d), (e)であった。ここでは、橋台ウイング形式(d), (e)ともに解析結果は同傾向であるため、代表例として橋台ウイング形式(d)の結果を示す。表－3 に示す本実験で設定した押し抜きせん断バネ剛性を採用することで、堅壁の曲げ耐力が最も小さくなるため、破壊形態は堅壁曲げ破壊に誘導される。しかし、堅壁照査結果がいずれも1.0以下であり、堅壁は降伏まで至っていない。橋脚、橋台(パラペット・堅壁)応答は、いずれのケースにおいても従来せん断バネ剛性を採用した場合と比較して低減されている。また、本検討範囲内においては、支間が大きいほど、遊間が大きいほど橋脚、橋台(パラペット・堅壁)応答は大きくなる傾向にある。

以上より、本実験で設定した押し抜きせん断バネ剛性を採用することで、破壊形態が縦壁曲げ破壊に誘導され、橋脚の最大応答は抑制される。

5.2 緩衝ゴム剛性の影響

図-10 に橋脚・橋台応答に及ぼす緩衝ゴム剛性の影響を示す。橋台ウィング形式は、破壊形態が異なる形式(a), (b), (d)の3 ケースとした。橋台形式の違いによる下部構造応答の違いは見られるものの、緩衝ゴム剛性の違いによる下部構造応答は大きな差は見られない。以上より、本検討条件の範囲内では、緩衝ゴム剛性の橋脚・橋台応答への影響は少ないといえる。

6. 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と、衝突実験で得られた橋台の抵抗特性等を用いた下部構造応答感度分析を実施した。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(20kN/mm~60kN/mm)を考慮した設定を行うことが考えられる。
- (4) 衝突実験結果より設定した押し抜きせん断バネ剛性を解析モデルに反映することで破壊形態が変化し、橋脚の応答が小さくなる。
- (5) 緩衝ゴム剛性の違いによる橋脚・橋台応答への影響は少ない。

今後は、本実験結果を反映した解析モデルにおいて、非線形バネを破壊形態によらずに各部位に設定した場合の解析を行い、下部構造応答感度分析を行う予定である。

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

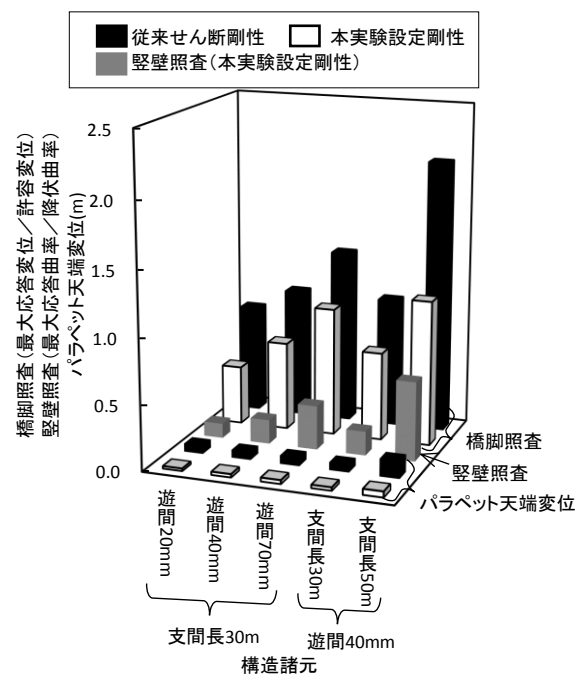


図-9 橋脚・橋台応答に及ぼす押し抜きバネ剛性の影響(橋台形式(d))

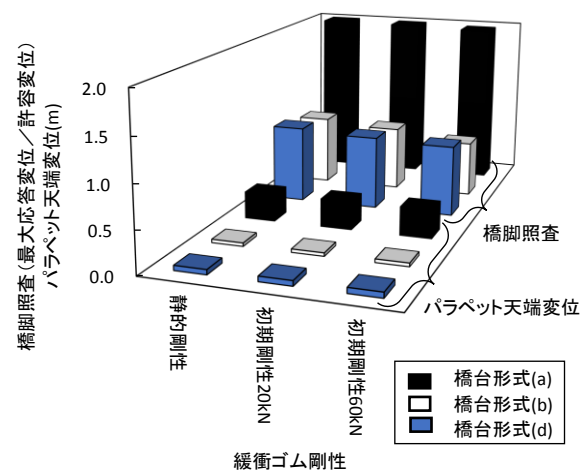


図-10 橋脚・橋台応答に及ぼす緩衝ゴム剛性の影響(支間長 30m, 遊間 70mm)

次学術講演会講演概要集, Vol.70, pp.225-226, 2015.9

- 4) 宮菌雅裕、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
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2012