

地震時の桁衝突に伴う橋台抵抗特性の検討

山澤文雄¹・西 弘明¹・白戸義孝¹・寺澤貴裕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を明らかにしてきた。

本実験は、上部工規模（支間長）がパラペットおよびウィングの押し抜きせん断耐力に与える影響を把握することを目的とし、既往実験⁴⁾と比較して重錘質量を大きくした場合について衝突実験を行い、そこで得られたバネ剛性等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。



写真-1 桁衝突による橋台損傷事例

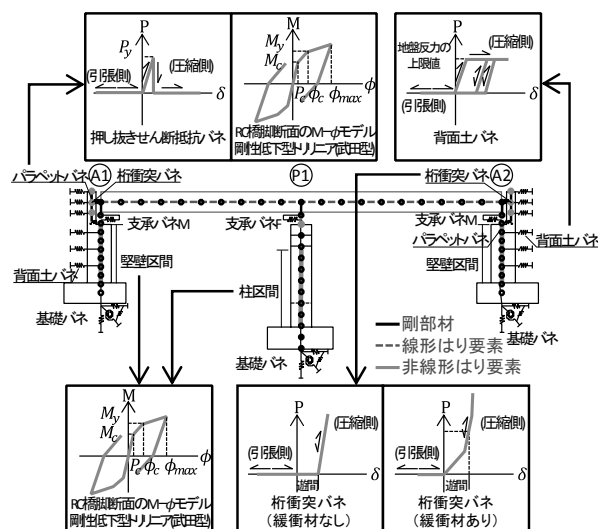


図-1 解析モデル

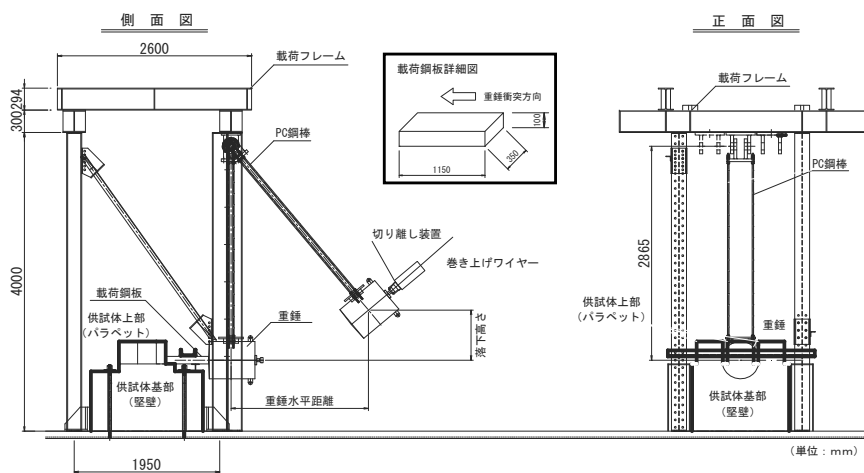


図-2 実験装置概要



写真-2 実験状況

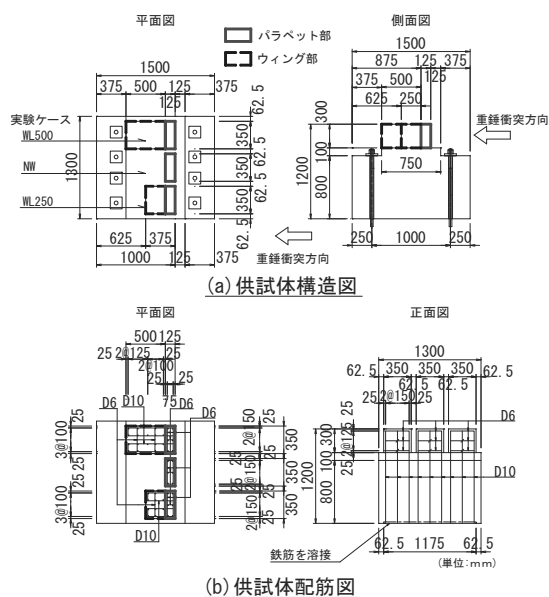


図-3 供試体形状および配筋図

表-1 実験ケース一覧

ケース名	NW	WL250	WL500
ウイング形状	無	有	有
ウイング長さ (mm)	—	250	500
重錘水平距離 (m)	0.05	0.15	0.3
	0.15	0.3	0.6
	0.2	0.45	0.8
	0.25	0.6	1
	0.3	0.80×2回	1.2
	0.4	1.00×2回	1.5
	0.5	1.2	2
	0.6	1.5	
衝突速度 (m/s)	0.1~1.5	0.3~2.9	0.6~4.0
パラペット断面寸法 (mm)	350×125	350×375	350×625
押抜きせん断耐力 (kN) ※1	41	123	206

※1 道路橋示方書⁴⁾においてコンクリートの圧縮強度より許容押抜きせん断応力度 ($\tau=0.94N/mm^2$) で算出。

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。衝撃力は載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供試体に衝突させることにより供試体に作用させた。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。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（またはウイング）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、押抜きせん断破壊が発生するように図に示す載荷鋼板（B350 mm×W575 mm×H100 mm, SS400）をパラペットの重錘衝突面側基部に配置し、重錘による衝撃力が載荷鋼板を介してパラペット基部に作用させるようにした。

(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。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。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26.6N/mm²、静弾性係数は2.17×10⁴N/mm²であり、道路橋示方書⁵⁾におけるコンクリートの許容押抜きせん断応力度から供試体の押抜きせん断耐力を算出すると、表に示すように41～206kNとなる。ここで、押抜きせん断耐力の算出に用いた面積はパラペットと堅壁の接触面（＝

以後、「パラペット抵抗面」とする。)の面積であり、必ずしもせん断破壊面がパラペット抵抗面と一致するとは限らないがひとつの指標として算出した。

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、重錘水平距離(これ以降、「H」と略す)は図-2に示すように重錘を引き上げた際の水平距離で、この水平距離を段階的に大きくすることで累積荷重として衝撃力を与えたが、実験ケースWL250のH=0.80mおよびH=1.00mにおいては、それぞれ2回ずつ重錘を落下させた。また、衝突速度は重錘落下高さから算出した。

本実験で用いた重錘質量1,000kgは支間長16m程度、既往実験⁴⁾の重錘質量338kgは支間長7m程度のコンクリート橋(幅員10m)上部工にそれぞれ相当する。

(3) 計測方法

本実験では、重錘に設置した加速度計により加速度を測定し、この測定値と重錘質量の積を衝撃力とした。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。

3. 実験結果

(1) 衝撃力による損傷状況

図-4に各実験ケースにおける実験終了時の供試体損傷状況を示す。

実験ケースNWにおいては、H=0.50mからの重錘落下によってまずパラペット・堅壁境界にクラックが発生した。その後、H=0.60m、H=0.70mの重錘落下においてそのクラックが進展し、H=0.80mの重錘落下において、パラペット前面から約35mmの位置から堅壁上面にクラックが発生した。

実験ケースWL250においては、実験ケースNWの場合とは異なりH=0.80mの重錘落下において、パラ

ペット先端から20mmの位置を始点として堅壁側面にクラックが発生し、その後のH=1.00mの重錘落下において新たにパラペット・堅壁境界にクラックの発生と、堅壁側面クラックの進展が見られた。

実験ケースWL500においては、H=1.20mの重錘落下においてパラペット先端から50mmの位置を始点として堅壁側面にクラックが発生した。その後、H=1.50mの重錘落下において実験ケースWL250の場合と同様に、新たにパラペット・堅壁境界にクラックの発生と、パラペット先端から300mmの位置を始点として堅壁側面に2本目のクラックが発生した。

(2) 衝撃力とパラペット下端変位の関係

図-5に衝撃力と重錘衝突におけるパラペット下端最大変位の関係を示す。なお図中には既往実験⁴⁾における結果も併せて示したが、実験ケースNWにおいては、加速度計の出力超過が見られていたため、その計測値については参考値とし白抜きで表示した。

実験ケースNWにおいては、パラペット・堅壁境界の境界にクラックが発生したH=0.50mの重錘落下までは衝撃力の増加に伴いパラペット下端変位は線形的に増加する。その後、H=0.60mの重錘落下では衝撃力はH=0.50mとほぼ同等であったが、パラペット下端変位はそれ以前と比較して大きくなった。その後は衝撃力の増加に伴いパラペット下端変位も増加した。

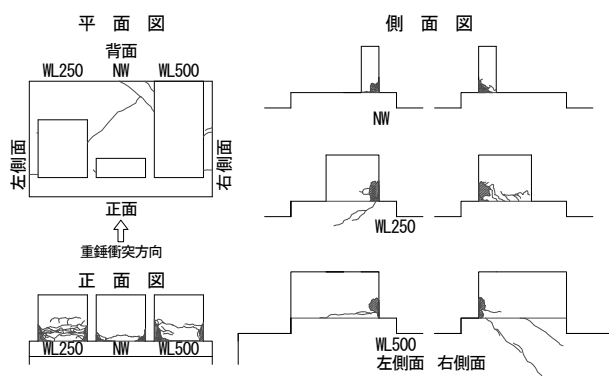


図-4 実験終了後の供試体損傷図

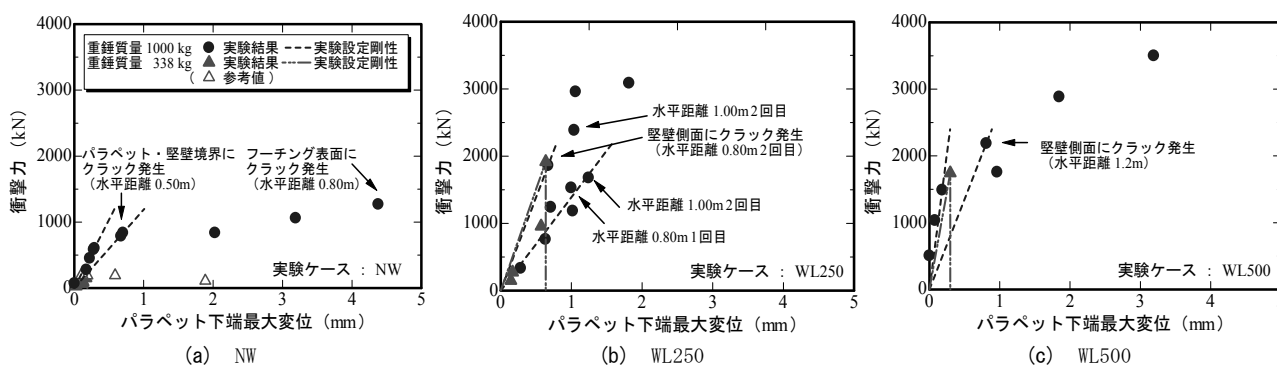


図-5 衝撃力とパラペット下端最大変位

実験ケースWL250においても実験ケースNWと同様に堅壁にクラックが発生したH=0.80mの重錘落下以前には、衝撃力とパラペット変位の関係は線形関係にあるといえる。しかしながら、クラックが発生した重錘落下位置においては、衝撃力とパラペット下端変位の関係はバラツキが大きい。同一水平距離からの重錘落下を繰り返したH=0.80mおよびH=1.00mの1回目、2回目の結果を比較しても衝撃力とパラペット下端変位の関係には明確な傾向は見られなかった。これは、実験ケースNWと比較してパラペット抵抗面積が大きいため損傷面の摩擦や未破壊部および、鉄筋による抵抗による影響があると考えられる。

実験ケースWL500においてもクラック発生以前は前述の2ケースと同様に、衝撃力とパラペット変位の関係は線形関係にあるといえる。しかしながら、実験ケースWL250で見られたようなクラックが発生した重錘落下位置近傍でのバラツキはあまり見られず、その後は再び衝撃力の増加に伴いパラペット下端変位も増加した。

(3) 初期剛性および押抜きせん断応力度

表-2に実験結果から求めた各実験ケースにおける初期剛性 (= 衝撃力/パラペット下端変位) および押抜きせん断耐力 (= 衝撃力) を示す。ここで本実験における衝撃力はクラックが発生した前後での重錘落下位置におけるそれぞれの衝撃力とした。

初期剛性については本実験条件においては重錘質

表-2 初期剛性・押抜きせん断耐力

ケース名	断面寸法 (mm)	初期剛性Es (kN/mm)	押抜きせん断 耐力Py(kN)	押抜きせん断 応力度 τ (kN/mm ²)
NW	350×125	1,200~2,100	787~836	18.0~19.1
		1,000	(192)	(4.4)
WL250	350×375	1,400~2,800	1,530~1,862	11.7~14.2
		3,000	1,917	14.6
WL500	350×625	2,700~8,200	1,758~2,187	8.0~10.0
		5,900	1,742	8.0

※上段：重錘質量 1,000kg，下段：重錘質量 338kg⁴⁾

※実験ケース NW 下段については参考値

量の影響は小さく、既往の実験と比較して重錘質量は約3倍であるが、いずれの実験ケースにおいても初期剛性は同程度であった。また、いずれの実験ケースにおいても初期剛性は既往の解析モデル³⁾ ($E=7 \times 10^4 \text{ kN/mm}$) と比較して小さくなった。

本実験条件においては、押抜きせん断耐力に対する重錘質量の影響は小さく、既往実験⁴⁾と同程度となった。また、既往実験および本実験の実験結果は道示⁵⁾の許容押抜きせん断応力度から算出した耐力と比較して大きいといえる。これは静的載荷と衝突載荷という実験載荷条件の相違が影響していると推察される。

(4) 衝突速度と衝撃力との関係

図-6に各実験ケースにおける衝突速度と衝撃力の関係を示す。いずれの実験ケースにおいても衝突速度が速くなるほど衝撃力が大きくなっており、本実験の範囲内においては、衝突速度と衝撃力の関係は概ね直線近似が可能である。しかしながら、実験ケースNWにおいてのみパラペット・堅壁境界にクラックが発生したH=0.50m位置の重錘落下後には両者の関係は直線関係にあるものの、それまでに比べて衝撃力が若干ではあるが小さくなる傾向にある。これは、重錘衝突時のパラペット損傷により衝突力が吸収されるためだと考えられ、抵抗面積が小さい実験ケースNWほどその傾向が顕著に現れたが、実験ケースWL250やWL500においては、前述のようにクラック発生後も損傷面の摩擦や未破壊部および、鉄筋による抵抗による影響などが大きいため、実験ケースNWのような衝撃力が小さくなる傾向は小さかったと推察される。

3. 解析概要

前述の実験結果を踏まえ、前述の図-1の既設解析モデルの押抜きせん断抵抗バネを修正し、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実施した。その解析結果より、実

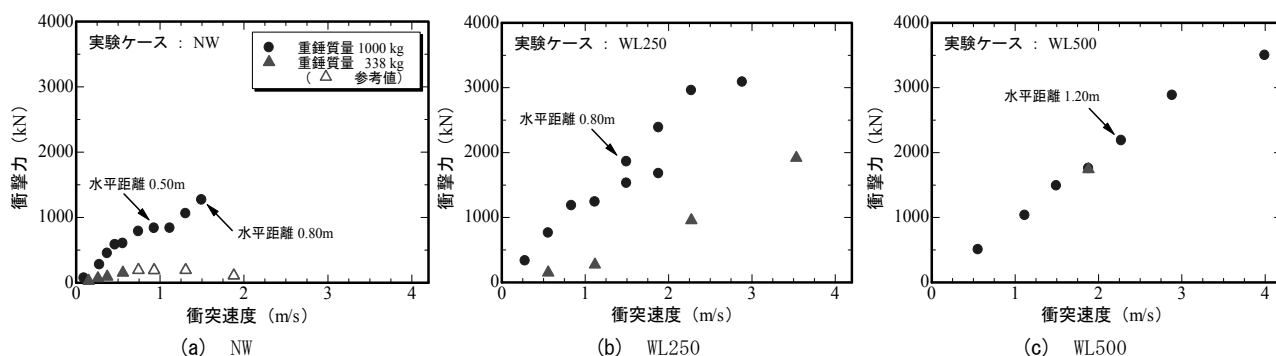


図-6 衝撃力と衝突速度

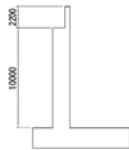
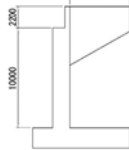
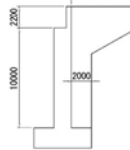
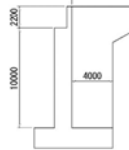
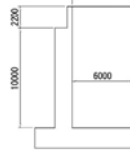
(a) ウィングなし	(b) パラレル	(c) 二辺固定+ パラレル①	(d) 二辺固定+ パラレル②	(e) 二辺固定
				
許容押抜きせん断応力度 ($\tau=0.85\text{N/mm}^2$)				
橋台耐力1,360kN	橋台耐力2,143kN	橋台耐力4,724kN	橋台耐力9,350kN	橋台耐力9,350kN
パラベット曲げ破壊	堅壁曲げ破壊		パラベット押し抜き破壊	
押抜きせん断応力度 ($\tau=4.00\text{N/mm}^2$)				
橋台耐力1,360kN	橋台耐力2,143kN	橋台耐力4,724kN	橋台耐力9,410kN	橋台耐力14,680kN
パラベット曲げ破壊	堅壁曲げ破壊		堅壁曲げ破壊	

図-7 橋台ウィング形式と破壊形態(道示・実験値)

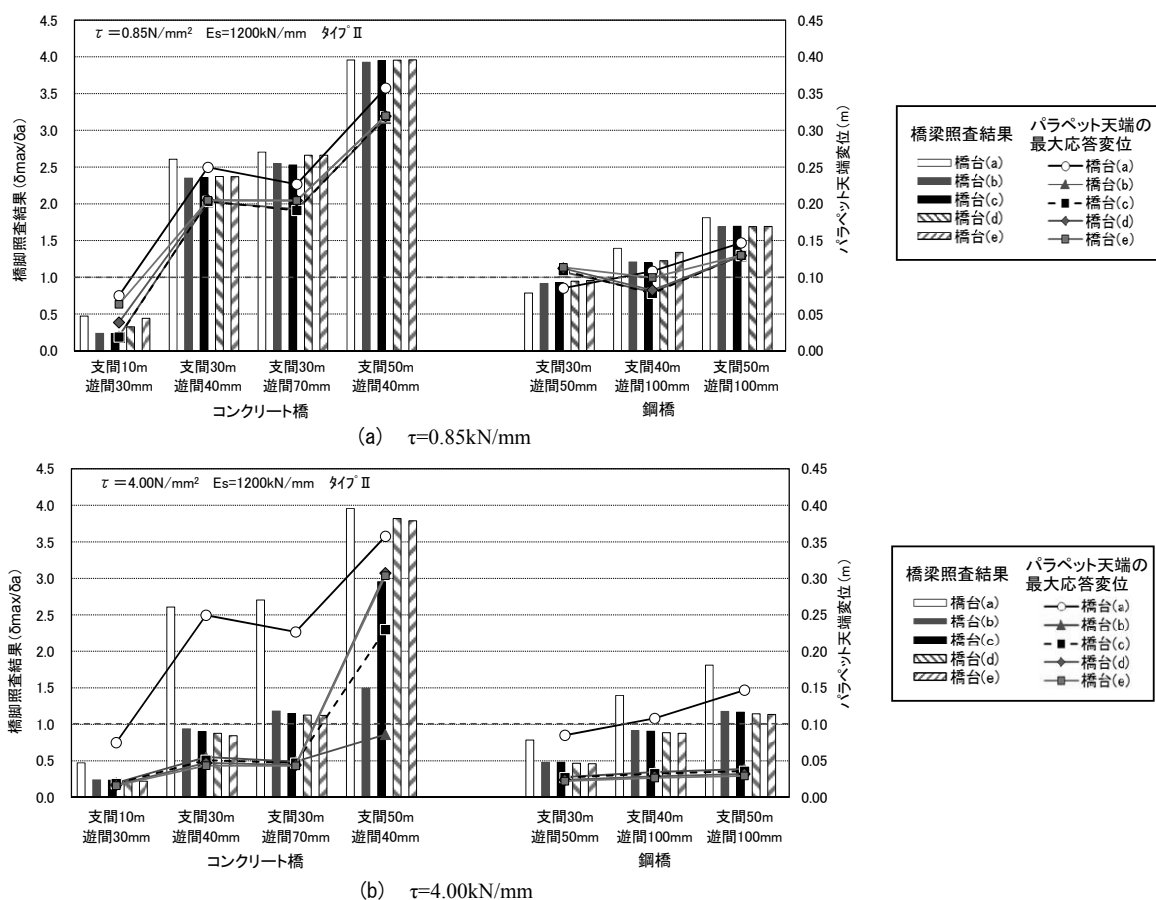


図-8 橋脚照査結果とパラベット天端変位

験結果から各諸元が桁端衝突を考慮した耐震補強方法への影響を検討した。

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および鋼橋を想定している。下部構造は、堅壁高さ10 mの逆T式橋台(高さ2.2 m、厚さ0.5 mのパラベット)および躯体高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って異なるため、図-7に示す橋台ウィング形式を解析ケースに考慮した。こ

こで破壊形態は、堅壁、パラベット各部位の曲げ、せん断、押抜き耐力を比較し最小となるものとした。

表-3にパラベットの押抜きせん断バネの設定値を示す。パラベットの押抜きせん断剛性は、最も剛性が低い評価となる実験ケースNWの値 $E_s=1,200\text{kN/mm}$ および最も剛性の高い評価となる実験ケースWL500の値 $E_s=8,200\text{kN/mm}$ を設定した。また、せん断応力度 τ については、道示⁵⁾での許容押抜きせん断応力度 $\tau=0.85\text{N/mm}^2$ と参考値ではあるが、

表-3 押抜きせん断バネの設定値

押し抜きせん断 応力度 $\tau(\text{N/mm}^2)$	パラベットの押抜きせん断バネ剛性 $E_s(\text{kN/mm})$
0.85(道示IV編)	1,200または8,200(実験結果)
4.00(実験結果)	1,200または8,200(実験結果)

表-4 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

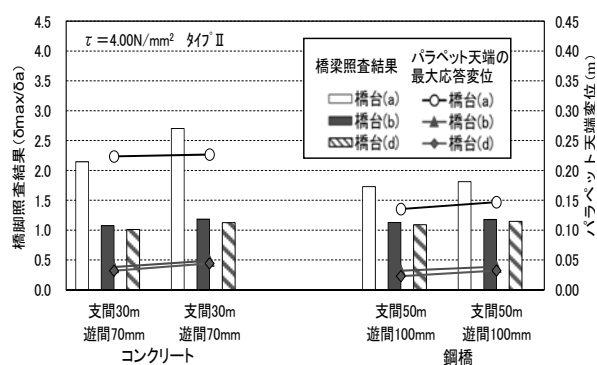


図-9 橋脚照査結果とパラペット天端変位

実験で得られた最小値 $\tau=4.00\text{N/mm}^2$ を使用した場合について比較検討をした。なお、解析条件は表-4に示すとおりであり、入力波は道路橋示方書Ⅴ耐震設計編⁶⁾のタイプⅡ地震動とした。

4. 解析結果

(1) 押抜きせん断応力度の影響

図-8にパラペットの押抜きせん断バネEsを1,200kN/mmとした場合の押抜きせん断応力度による橋脚照査結果($\delta_{\max}/\delta_a$)およびパラペット天端の最大応答変位を示す。図中の棒グラフが橋脚照査結果、折れ線グラフがパラペット天端の最大応答変位結果である。(a),(b)図の比較より、橋脚照査結果およびパラペット天端の最大応答変位には、押抜きせん断応力度の違いが大きく影響していることが分かる。道示の許容押抜きせん断応力度 $\tau=0.85\text{N/mm}^2$ を解析に用いた結果は、パラペットに大きなせん断破壊を生じており、橋脚の応答が過大となっている。一方、実験の押抜きせん断応力度 $\tau=4.00\text{N/mm}^2$ を解析に用いた結果は、支間50mより小さい規模の橋では、パラペットのせん断破壊が限定であり、橋脚の損傷が回避できるまで小さくなっている。実験から得られた押抜きせん断応力度はばらつきが大きいものの、最小の押抜きせん断応力度を用いることで、安全側の評価になるものと考えられる。

(2) パラペットの押抜きせん断剛性の影響

コンクリート橋、鋼橋それぞれ1橋を対象として、実験押抜きせん断応力度を $\tau=4.00\text{N/mm}^2$ とした場合におけるパラペットの押抜きせん断剛性の影響を確認した。図-9に各ケースの橋脚照査結果($\delta_{\max}/\delta_a$)およびパラペット天端の最大応答変位を示す。解析結果に大差はみられないことから、パラペットの押抜きせん断剛性の橋脚やパラペットの変位応答に与える影響は小さいといえる。コンクリート橋、鋼橋ともにEs=1,200kN/mmの値を用いる方が、橋

脚の応答変位が大きく安全側の評価となる。

5. まとめ

本研究では、上部工規模がパラペットおよびウィングの押し抜きせん断耐力に与える影響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および実験で得られたバネ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。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 衝撃力作用時のパラペット初期剛性に与える重錘質量の影響は小さい。また、衝突実験結果より得られた初期剛性は既往解析モデル³⁾と比較して小さくなる。
- (2) 衝撃力作用時の押抜きせん断耐力は、道示⁵⁾の許容押抜きせん断応力度から算出した耐力と比較して大きくなる。
- (3) 衝突速度と衝撃力の関係は線形関係にあるが、パラペット抵抗面積が小さい場合、押抜きせん断クラック発生後の衝撃力は小さくなる。
- (4) 衝突実験結果より設定した押抜きせん断応力度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) パラペットの押抜きせん断剛性の違いが、橋脚やパラペットの変位応答に与える影響は少ない。

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) 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) 日本道路協会 道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編、pp. 156-157, 2012. 3
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、2012