

論文 サイドブロックと PC 鋼材による桁の津波作用抵抗機構の検討

佐藤 祐子*1・轟 俊太郎*1・渡辺 健*2・大野 又稔*1

要旨：津波により桁に生じる作用力（水平力、揚力、曲げモーメント）に基づき、桁、支承、橋脚で構成される既設コンクリート橋りょうを対象として、地震作用も考慮した桁流失対策補強工法を提案した。さらに、実物大寸法の試験体を用いた載荷試験および有限要素法による数値解析を行うことで、本工法により対策した橋りょうの抵抗力および抵抗できる津波の規模が推定された。加えて、本工法の抵抗モーメントがモーメントの重ね合わせにより算出できることならびに、本工法の最大耐力は PC 鋼材の降伏により決まるという推定結果を得た。

キーワード：津波対策、桁流失対策工法、PC 橋りょう、サイドブロック、PC 鋼材

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震における津波により、橋りょうから桁が流失する被害が発生した。津波による被害軽減ならびに、被災後の速やかな復旧のためには、橋りょう被害状況を予測し、対策することが求められる。津波による桁の流失機構としては、桁の水平移動および回転移動が指摘されている。その要因としては、図-1 に示すように津波によって桁に作用する水平力、揚力とそれらによる曲げモーメントが挙げられる¹⁾²⁾。しかしながら、橋りょう近傍における流体情報の予測が困難であるため、橋りょうに作用する流体力の評価や流失限界値の設定について統一した見解は示されていない³⁾⁴⁾。

加えて、津波と地震の作用は異なるため、従来の耐震補強とは異なる対策も必要となる。例えば、津波の水平作用は地震の水平作用よりも大きいにも関わらず、一定時間一方向に作用するために、地震のように塑性域でエネルギーを吸収できず、すべて弾性域で対応することになる。さらに、津波は地震の随伴事象であることが多く、地震に抵抗した後に津波に抵抗することが期待される。

これらを受け、近年橋りょうに対する津波作用が盛んに検討され、水理実験や津波数値解析によって、桁に作用する波の特徴が明らかにされるとともに、桁に作用する流体力の評価手法が提案されている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。それらによると、橋りょうには津波先端部による衝撃力が作用した後、力が持続して作用する。衝撃力は短時間ではあるが、曲げモーメントと水平力が同時に作用するために、桁の安定性を低下させる。一方、力が持続して作用する時は、下向きの力が働くため回転に対する安定性は向上するが、持続的に水平力が働くため、滑動に対する注意が必要だと考えられる。

このような津波作用への対策としては、橋りょうに働く津波作用力を軽減させる手法と津波抵抗力を向上させる手法が考えられる。新設橋りょうにおいて津波作用力

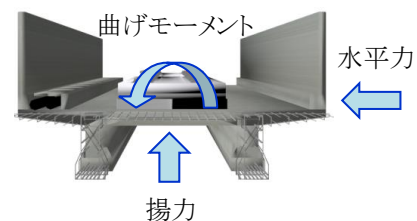


図-1 桁の流失の要因となる力

を軽減させる場合は、桁下空間の確保、桁断面形状の変更、ラーメン構造の採用などが考えられる⁸⁾⁹⁾。一方、既設橋りょうに適用する場合は、新設橋りょうと比較して設計・施工上の制約が多く存在するために、同様の対策を行うことは容易ではない。また、津波作用力を低減させる手法によって地震作用力に抵抗することはできない。津波抵抗力を向上させる手法としては、橋脚の補強、桁流失対策工の設置などが考えられるが、具体的な工法は提案されていない。

本研究では、既設コンクリート橋りょうの被害低減のために地震および津波に対する抵抗力を向上させる手法を提案することを目的としている。具体的には、津波により桁に作用する力に基づき、地震作用も考慮した桁流失対策補強工法とする。実物大寸法の試験体を用いた載荷試験および有限要素法を用いた数値解析を行い、提案工法が津波作用に抵抗する耐荷機構を有することを確認する。

2. 津波作用対策工法の提案

2.1 提案工法の概要

本工法は、桁、支承、橋脚で構成される、桁座寸法が橋軸方向に十分に確保された既設の鉄道コンクリート桁に適用することを想定する。鉛直力および水平力の両作用力に対して、それぞれに抵抗する別の部材を設けることとし、サイドブロックと PC 鋼材、緩衝ゴムを設置する（図-2）。すなわち、津波による水平力および線路直

*1 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修士（工学）（正会員）

*2 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士（学術）（正会員）

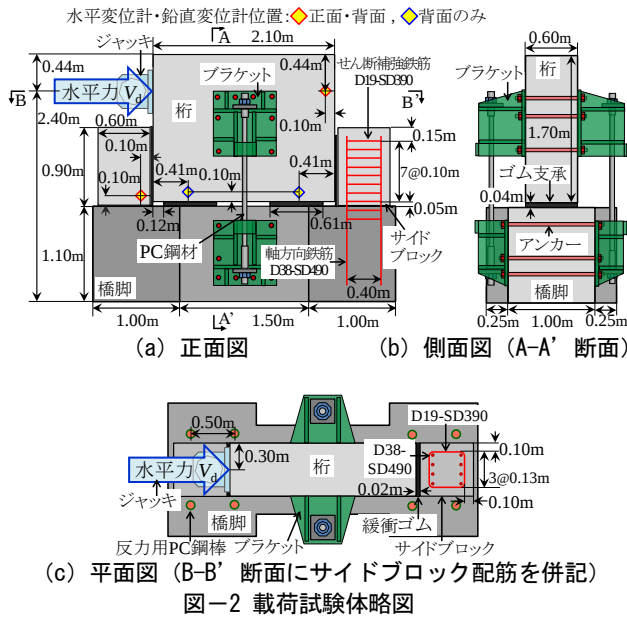


表-1 コンクリートの強度試験結果

供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
桁・橋脚	48.2	3.78	31.6
サイドブロック	21.9	2.08	20.0

表-2 鉄筋の引張強度試験結果

供試体	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ	弾性係数 (kN/mm ²)
D19-SD390	415	2.76×10^{-3}	172
D38-SD490	506	2.89×10^{-3}	181

表-3 鋼材の引張強度試験結果

供試体	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	断面積 (mm ²)
PC 鋼材	1829	192	691
接続ボルト	345	200	2027
ブラケット	295	207	-

角方向の地震作用に対してはサイドブロック、揚力および曲げモーメントに対してはPC鋼材で抵抗する。特に、初期波による衝撃力は、サイドブロックと桁間に配置した緩衝ゴムで分散してこれに抵抗する。

また、橋脚および桁の破壊よりも、サイドブロックのせん断破壊が先行することを想定し、RC ディープビームの設計せん断耐力式を用いて、想定橋りょう諸元から1200kNの津波水平力に耐えられるように設計する。

2.2 施工方法

本工法は、耐震補強としてサイドブロックを施工する際に、PC鋼材も施工することを想定している。施工手順は、以下の通りである。まず、アンカーを用いて上部ブラケットを桁、下部ブラケットを橋脚にそれぞれ取り付ける。この際、下部ブラケットがアンカーに接触するまで押し上げた状態で固定することで、PC鋼材が早期に緊張することを防ぐ。続いて、上部・下部両ブラケットにPC鋼材を設置する。その後、桁横に緩衝ゴムを設置する。

最後に、緩衝ゴムを型枠の一部として用いて、桁横にサイドブロックを打設するものである。

3. 載荷試験

3.1 試験概要

試験体は、桁長20mを想定して桁高等を決定した実大模型である(図-2)。非対称性によるねじれの発生を防ぐために、両面にPC鋼材とブラケットを設置した対称形であり、中心線上で載荷した(図-2(b)(c))。また、図-2(a)に示す位置に変位計を設置し、水平・鉛直変位を計測する。表-1、表-2、表-3に、使用するコンクリートおよび鉄筋、鋼材の強度試験結果を示す。PC鋼材を固定するブラケットとアンカーは、PC鋼材の降伏耐力以上を有するように設計する。

津波による水平力、水平力と揚力による曲げモーメントを作用力として想定し、PC鋼材が緊張しない状態から、1500kNジャッキにより水平方向に静的な単調載荷を行う。このとき、橋脚を図-2(c)に示す反力用PC鋼棒により反力床に固定する。さらに、テフロン板を側面に設置することで、面外方向への桁の転倒を防止する。

3.2 試験結果

図-2(a)に示した変位計の計測結果が正面と背面とで一致しており、偏心がないことを確認した。

図-3に載荷終了時(水平力1501kN)の損傷状況を示す。まず、水平力500kNで桁が押込まれる側(図-3右側)のサイドブロックに斜めひび割れが発生した。その後、サイドブロックのひび割れの進展とともに、橋脚にも圧縮側サイドブロック下、圧縮側ゴム支承下の順にひび割れが生じ、水平力1200kN付近で中央部にひび割れが生じたが、載荷終了時にもコンクリートの圧縮破壊やせん断補強鉄筋の降伏等は生じなかった。

図-4に示す水平力-変位関係より、最大水平力(1500kN)では試験体は破壊していない。さらに、図-5のサイドブロックの軸方向鉄筋(以下、軸方向鉄筋)の水平力-ひずみ関係から軸方向鉄筋は降伏に至っておらず、サイドブロックのせん断補強鉄筋(以下、せん断補強鉄筋)にも降伏は見られなかった。このことから、本試験体諸元における最大抵抗力は1500kNよりも大きいことが確認された。なお、ひび割れ発生位置と計測位置の差異はあるが、サイドブロック内における水平力に対するひずみは、橋脚に近いほど大きくなり、それに伴った曲げモーメントが作用しているものと思われる。

桁はひび割れ等の損傷が生じず、最大水平力時まで剛体回転した。このことから桁を剛体とみなし、図-2(a)に示した桁上の3点の変位量から桁の回転・移動量を推定した結果を図-6に示す。ここで、図-6(a)が桁全体、その他は図-6(a)に示す拡大域の変位である。拡

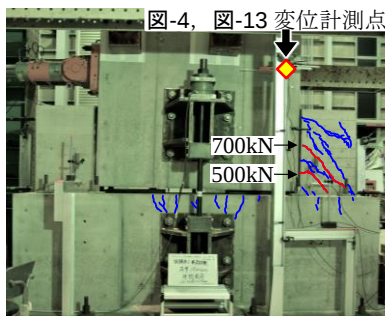


図-3 荷重試験体の写真
(荷重終了時)

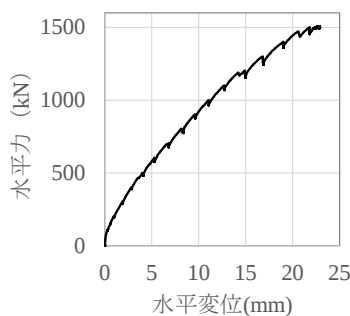


図-4 水平力-水平変位関係

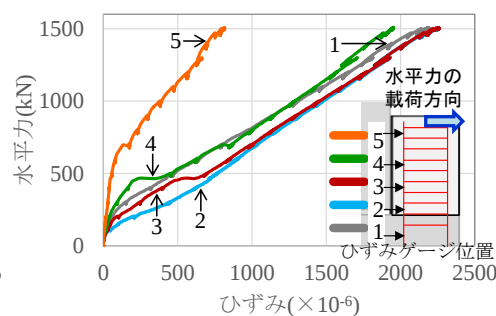


図-5 サイドブロックの軸方向鉄筋の
水平力-ひずみ関係

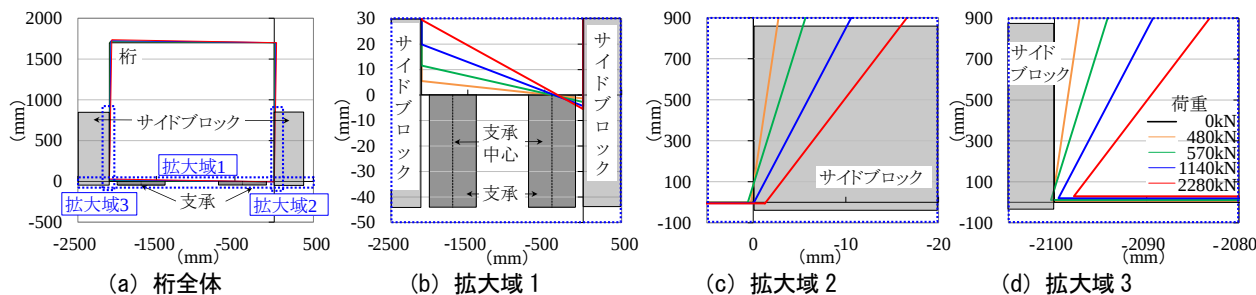


図-6 桁上の変位計を基に桁を剛体であると仮定して推定した桁の変位

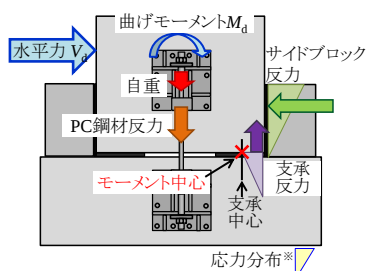


図-7 想定した作用と抵抗機構

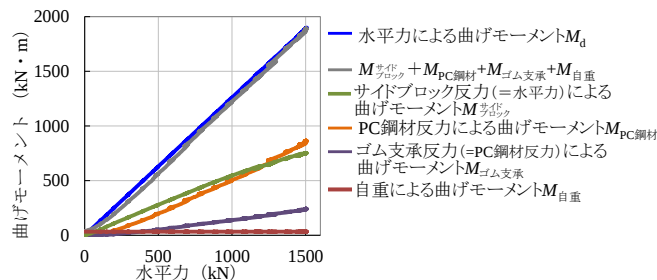


図-8 曲げモーメント-水平力関係

大域 1 より、桁の回転中心はゴム支承中心であると考えられる。ゴム支承中心を回転中心とすると、水平力のアーム長は 1.26m であり、最大水平力荷重時の曲げモーメントは 1890kN・m となる。

また、拡大域 2 より、サイドブロックはひび割れが生じているが、コンクリートの圧縮破壊や鉄筋の降伏が生じるまでは弾性とみなせると仮定すると、サイドブロックおよびゴム支承に生じる応力は三角形分布であると推測される。さらに、拡大域 3 より、水平力が小さい段階では曲げモーメントの影響により、桁はサイドブロックに接触するが、水平力の増加と共に水平方向に移動し、サイドブロックに接触しないことがわかる。

以上から、本試験体では水平力およびそれによる曲げモーメントに対して、自重ならびに PC 鋼材反力、サイドブロック反力、支承反力により図-7 のように抵抗すると推定される。これを基に算出した抵抗モーメントを図-8 に示す。なお、PC 鋼材反力による曲げモーメントは、荷重試験時の PC 鋼材の軸力を用いて算出した。図-8 から水平力による曲げモーメント (M_d) と、サイドブロック ($M_{\text{サイドブロック}}$)、ゴム支承 ($M_{\text{ゴム支承}}$)、自重

($M_{\text{自重}}$)、PC 鋼材 ($M_{\text{PC 鋼材}}$) を足し合せた曲げモーメントは同等であることが確認できる。これにより、図-7 に示す抵抗機構の成立性を確認し、抵抗モーメントの算出方法が明らかになった。

4. 数値解析

荷重試験では、コンクリートの圧縮破壊やせん断補強鉄筋の降伏等が生じず、最大抵抗力が確認できていない。そこで、最大抵抗力把握のために非線形有限要素解析 (FEM) を実施する。さらに、PC 鋼材の断面積および軸方向鉄筋の種別を変更した複数のケースを設定することで、本工法の津波作用に対する抵抗力への PC 鋼材および軸方向鉄筋の影響を評価する。

4.1 解析概要

数値解析では、対称性を考慮し、3.で示した試験体の 1/2 をモデル化する。したがって、サイドブロック 1 つにつき、引張側と圧縮側各 2 本の軸方向鉄筋をモデル化する。各部材は、表-4 に示す要素で表現する。各要素は、表-1、表-2、表-3 の材料試験結果に準じて定める。その他は、表-5 のように構成材の一般値を用いる。境

表-4 解析モデルの構成要素

部材	非線形モデル	要素
桁	(線形)	ソリッド要素
サイドブロック	圧縮軟化: Parabolic モデル, 引張軟化: JSCE Softening モデル, 回転ひび割れモデル	
橋脚※1		
PC 鋼材	バイリニア型	梁要素
ゴム支承	クーロン摩擦モデル (図-9) (せん断剛性は有効, 引張時には剥離を考慮) (着力は0, 摩擦角は一般的な 20°, ダイレイタンス角は0)	接触要素
緩衝ゴム	引張時には剥離を考慮, 接線方向剛性は微小値 (図-10)	
サイドブロック-橋脚間	(線形)	
軸方向鉄筋※2 (サイドブロック)	バイリニア型	トラス要素
接続ボルト		埋込鉄筋要素
軸方向鉄筋※2 (橋脚)		
せん断補強筋		シェル要素
ブラケット	バイリニア型 (ソリッド要素と完全結合)	

※1 解析の安定性から最下段の1層は弾性要素

※2 鉄筋とコンクリートの付着は完全付着

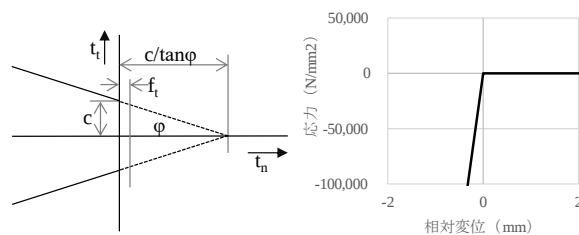


図-9 接触要素の非線形特性 (ゴム支承) 図-10 接触要素の線形特性 (桁-サイドブロック間)

表-5 接触要素の材料物性値

	法線方向剛性 (N/mm³)	接線方向剛性 (N/mm³)
サイドブロック-橋脚間	3.10×10^5	1.03×10^5
緩衝ゴム	3.10×10^5	1.00×10^{-3}
ゴム支承	3.10×10^5	1.03×10^5

表-6 解析ケース

		サイドブロックの軸方向鉄筋	
		D38-SD490	D22-SD390
PC 鋼材の断面積 (mm²)	691	Case1-a	Case1-b
	346	Case2-a	Case2-b
	173	Case3-a	Case3-b

界条件は、橋脚底面で X, Y, Z 方向完全拘束とし、対称面において Y 方向を拘束する。

表-6 に、実施した解析ケースを示す。PC 鋼材や軸方向鉄筋の貢献度評価を行うために、計 6 ケースを実施した。PC 鋼材の断面積について、載荷試験を再現した Case1, 断面積を 1/2 にした Case2, 1/4 にした Case3, 軸方向鉄筋について、載荷試験を再現した Case a, D22-SD390 に変更した Case b とした。D22-SD390 の物性値は、公称値を用いている。自重を作用させた後に、橋脚下面から 2400mm の位置に 0.2mm ずつ 20mm まで強制変位を与える。このとき、高さが 500mm, 幅は対称面があるため 250mm の載荷板の範囲に剛体要素を取付けることで、局所変形を防止した。

4.2 解析結果

図-11 に Case1-a のひび割れひずみを、図-12 に圧縮主応力をコンター図で示す。さらに、全ケースの解析結果から、水平力-変位関係を図-13 (a) (b) に、水平力と PC 鋼材の軸力の関係を図-13 (c) に、載荷試験結果とともに示す。いずれのケースも載荷反対側のサイドブロックの外側の引張側軸方向鉄筋 (以下、1 本目) が降伏した後に、内側の引張側軸方向鉄筋 (以下、2 本目) が降伏し、その後 PC 鋼材が降伏すると同時に最大抵抗力を示しており、サイドブロックにせん断破壊は生じていない。よって、本工法の最大抵抗力は、PC 鋼材の降伏により決まるといえる。また、軸方向鉄筋が曲げ降伏すると、PC 鋼材が負担する水平力は降伏前と比較して増加の割合が大きくなるが、急激に上昇することはない (図-13 (c))。

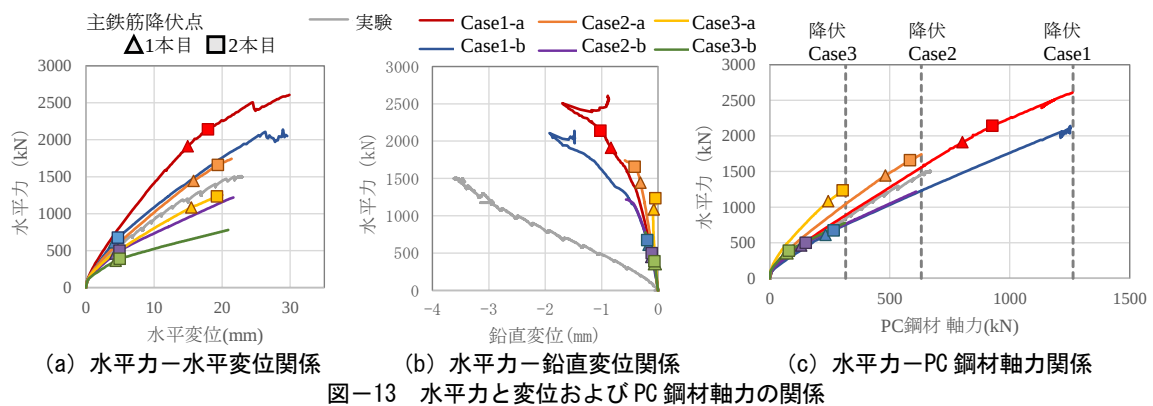
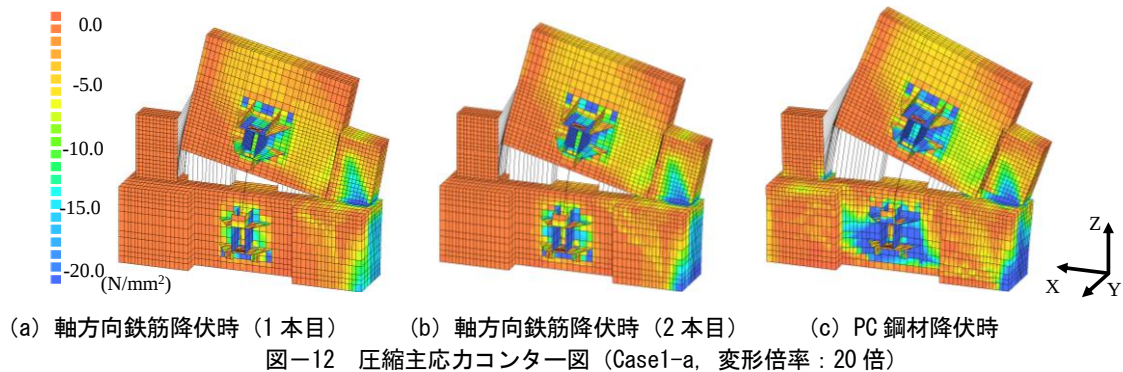
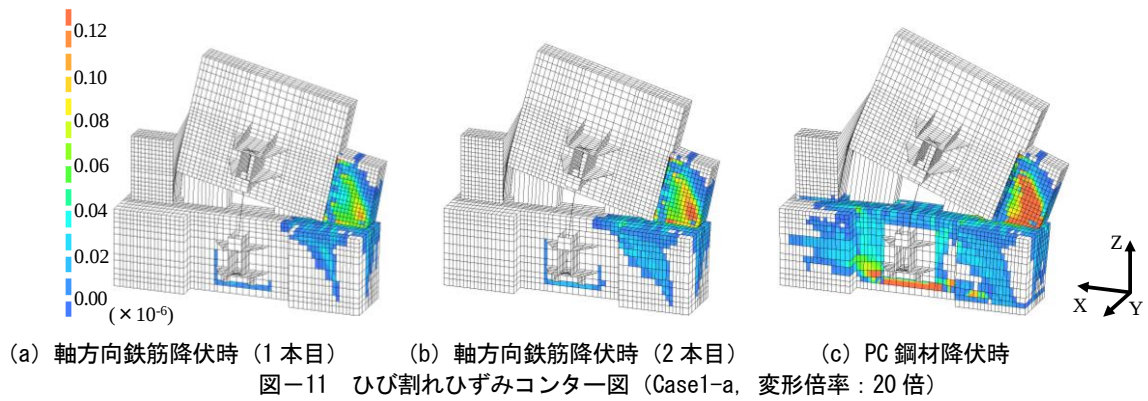
表-7 に、解析結果における軸方向鉄筋 (P_1 , P_2) と PC

鋼材降伏時の水平力 (P_3), 平面保持を仮定して算出したサイドブロックの曲げ降伏耐力 (M_y) とアーム長 ($L_a = M_y / P_2$) を示す。このとき、アーム長は曲げ降伏耐力を 2 本目の軸方向鉄筋降伏時の水平力 (P_2) で除した値とする。あわせて、載荷試験を基に三角形分布を仮定した際のアーム長 (0.60m) で曲げ降伏耐力を除した値を曲げ降伏時の水平力 ($V_y = M_y / 0.6$) として示す。

まず、載荷試験を再現した Case1-a に着目する。図-12 から、載荷試験と同様に圧縮側のサイドブロックおよびその下の橋脚、圧縮側のゴム支承下の橋脚の順にひび割れが生じ、橋脚のひび割れは引張側のサイドブロック下にまで発生する範囲が広がっている。ただし、下部ブラケット周辺のひび割れは載荷試験では確認できていない。

表-7 と同様に算出すると、1 本目の軸方向鉄筋降伏時のアーム長は 0.51m, 2 本目の降伏時は 0.45m, PC 鋼材降伏時は 0.37m となる。図-12 からサイドブロックの圧縮主応力分布が水平力の増加に伴い変化し、アーム長が短くなっていることが読み取れる。したがって、見かけのアーム長が短くなることで、軸方向鉄筋降伏後もサイドブロック反力が増加し続けるために、PC 鋼材反力が急増することがなかったものと推測される。

しかしながら、軸方向鉄筋降伏前には圧縮主応力分布にこのような顕著な変化は見られない。それに関わらず、1 本目の軸方向鉄筋降伏時のアーム長が、軸方向鉄筋降伏前である載荷試験結果を基に三角形分布を仮定して推測した 0.60m よりも短い。この要因としては、ゴム支承の非線形特性としてクーロン摩擦モデルを導入したことにより、ゴム支承の水平反力の影響が無視できない



ほど大きくなり、サイドブロックが負担する水平力が載荷した水平力よりも小さくなったことが考えられる。

また、図-13 (a) (b) から載荷試験と解析で水平力-水平変位関係は一致せず、水平力に対する変位が大きいことが分かる。この要因として、サイドブロックの打設時に型枠として用いたことによる弾性範囲内での緩衝ゴムの変形が解析では表現できていないことが挙げられる。他にも、載荷試験ではアンカーが剛結されておらず、シーす内を自由に動くことができるが、解析ではブラケットと桁および橋脚の接触面が剛結されており、アンカーの挙動が制限されていることなどが考えられる。ただし、後者については、アンカーのひずみにすべりはみられないので、主要要因ではないと思われる。

しかしながら、水平力-PC 鋼材の軸力関係は概ね一致しており、水平力に対する PC 鋼材の応答を解析が十分に再現できていると考えられる。また、解析で得られたサイドブロックの耐力 1911kN は、軸方向鉄筋の降伏に

より決定される。一方、図-5 において軸方向鉄筋のひずみが水平力に比例して増加すると仮定すると、降伏時の水平力は約 1960kN と推定でき、解析値 1911kN とほぼ等しくなり、サイドブロックの曲げ降伏耐力を適切に再現できたことを示唆している。図-8 に示したように弾性範囲における水平力による曲げモーメントは、自重と PC 鋼材、サイドブロック、支承 (=PC 鋼材) の各反力から推定でき、これはサイドブロック反力の見かけのアーチ長が短くなることを考慮すると、塑性範囲でも成立することを解析結果から確認している。以上と図-13 の水平力-変位関係から、本試験体諸元による最大抵抗力は 2606kN と推定され、サイドブロックのみが抵抗するとして算定した耐力 1200kN に対して、PC 鋼材等も抵抗することにより、試験体としての耐力が増加することを推定できた。このとき載荷試験と同様にゴム支承中心を回転中心とすると曲げモーメントは、3284kN・m となる。

次に、6 つのケースを比較する。まず、水平力-変位

表－7 サイドブロック軸方向鉄筋・PC 鋼材降伏時の水平力とアーム長

解析 ケース	サイドブロック					PC 鋼材 降伏時	
	1 本目の軸方向鉄筋 降伏時	2 本目の軸方向鉄筋 降伏時					
	水平力 P ₁	曲げ降伏耐力 M _y	曲げ降伏耐力時の水平力 V _y =M _y /0.6	水平力 P ₂	アーム長 L _a = M _y / P ₂		水平力 P ₃
	kN	kN・m	kN	kN	m		kN
Case1-a	1911	957	1595	2140	0.45	2606	
Case1-b	611	270	450	674	0.40	2051	
Case2-a	1443	957	1595	1658	0.58	1741	
Case2-b	460	270	450	500	0.54	1253	
Case3-a	1082	957	1595	1233	0.78	1253	
Case3-b	362	270	450	389	0.69	779	

関係に着目する。PC 鋼材の断面積が低下するほど PC 鋼材の変形および桁の移動が起こりやすくなり、水平変位、鉛直変位ともに増加する（図－13 (a) (b)）。さらに、表－7 からアーム長が PC 鋼材の断面積が小さいほど長くなり、サイドブロックに作用する水平力の重心が上に移動することがわかる。このことから PC 鋼材が桁の回転移動を抑制していることが確認できる。

最後に、PC 鋼材の軸力に着目する。図－13 (c) から、PC 鋼材の断面積が低下するほど、あるいは軸方向鉄筋の耐力が増加するほど、水平力のうち PC 鋼材が負担する割合が低下していることが確認できる。よって、本工法は、本試験体諸元の範囲において、サイドブロックにより弾性範囲を、PC 鋼材により最大耐力を設定できるといふ推定結果を得た。これらの成果を用いることで、適切なサイドブロックおよび PC 鋼材の諸元の決定が可能となり、桁の流失対策において適切な耐力の設定が可能になると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 桁、支承、橋脚で構成される既設コンクリート橋りょうを対象とする、桁流失対策補強工法を提案した。本工法は、津波および線路直方向の地震作用による水平力ならびに水平力と揚力による曲げモーメントに対して、PC 鋼材およびサイドブロック、ゴム支承の各反力と自重により抵抗するものである。サイドブロックにおける見かけのアーム長が水平力の増加とともに短くなることを仮定することで、水平力 2600kN、曲げモーメント 3200kN・m 規模の津波においても、本試験体は桁の流失を防止できる可能性があると考えられる。
- (2) 水平力により桁に作用する曲げモーメントは、弾性範囲では、サイドブロック、ゴム支承、自重、PC 鋼材の各反力による曲げモーメントを足し合せたものと同等である。このことから、各曲げモーメントを算出することで、抵抗モーメントの算出が可能であると考えられる。
- (3) 本試験体では、PC 鋼材およびサイドブロックの軸方

向鉄筋の耐力に関わらず、サイドブロックが曲げ降伏した後に、PC 鋼材が降伏する。すなわち、サイドブロックにより弾性対応範囲を、PC 鋼材により最大耐力の設定が可能となると考えられる。

なお、本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 有川太郎，渡邊政博，窪田 幸一郎：津波による橋梁の安定性に関する検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，I_911-I_915，2013
- 2) 渡辺健，大野又稔，織田幸伸：一様流作用下における PC 桁の流失の限界値評価に関する実験的検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 71，No. 2，I_1189-I_1194，2015
- 3) 渡辺健ほか：一様流作用下におけるコンクリート鉄道橋りょうに働く流体力に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.70，No.2，I_856-I_860，2014
- 4) 庄司学ほか：橋桁に作用する津波波力の水平成分と鉛直成分の発生メカニズムに関する実験的考察，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.4，I_1134-I_1144，2012
- 5) 林秀和ほか：橋りょう上部構造に作用する津波波力特性に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.60A，pp. 45-58，2014
- 6) 佐藤崇，幸左賢二，山内邦博：東北地方太平洋沖地震津波の周期特性に着目した橋桁作用力特性の評価，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.72，No.2，I_997-I_1002，2016
- 7) 大野又稔，渡辺健：水位差に着目した桁の水平流体力評価に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，pp.43-48，2016
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V耐震設計編），丸善出版，pp.6-7，2012
- 9) 川崎佑磨ほか：津波による流体力軽減に有効な整流板形状に関する実験的研究，土木学会論文集 A1，Vol.70，No.1，pp.129-136，2014