

## 津波作用抵抗機構を考慮した桁流失防止工法の開発

佐藤 祐子\* 渡辺 健\*  
轟 俊太郎\* 大野 又稔\*

Development of a Method to Prevent Girders Outflow with due Consideration on Mechanism Resisting Tsunami

Yuko SATO Ken WATANABE  
Shuntaro TODOROKI Yuto OHNO

Some girders flowed out by Tsunami at the Great East Japan Earthquake on March 11, 2011. Some researchers stated that the outflow was caused by the horizontal force, the lift force and the moment that were acting on girders by Tsunami. In this study, a reinforcing method to prevent the girders from outflow was developed. The method provided the girders with PC tendons and side-blocks for resisting the hydronic forces. Based on the loading test and finite element analysis with the full-scale model, the resisting force of the girders to Tsunami by this method was calculated as a summation of the resisting moments of PC tendons and side-blocks.

キーワード：既設コンクリート橋りょう，桁，津波，流失防止，抵抗工法

## 1. はじめに

東日本大震災では、津波により橋りょうから桁が流失した。桁流失被害は、図1のように津波により桁に水平力、揚力とそれらによるモーメントが生じ、桁が水平・回転移動することで生じたと指摘されている<sup>1) 2) 3)</sup>。被害軽減と被災後の速やかな復旧には、被害状況を予測し、対策することが求められるが、橋りょう近傍の流況予測は困難であり、橋りょうに作用する流体力の評価や流失限界値について統一見解は示されていない。これを受け、水理実験や数値解析により橋りょうに作用する流体力とその影響が盛んに検討され、桁に作用する波の特徴が明らかにされるとともに、流体力の評価手法が提案されている<sup>1) 2)</sup>。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、持続力が作用する。衝撃力は短時間であるが、揚力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、持続力作用時は、水位の上昇に伴い鉛直力が上向きから下向きに変化することで桁の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、水平移動に対する注意が必要となる。

津波作用には地震作用と異なる特徴があり、耐震補強とは異なる対策が必要となる。例えば、津波の水平力は地震による水平力よりも大きい場合がある。また、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、全て弾性域で対応することになる。加えて、津波は地震の随件事象であることが多く、構造物は地震に抵抗した後に津波に抵抗することが期待される。

\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

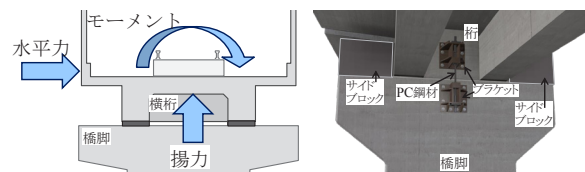


図1 桁の流失の要因となる作用 図2 提案工法

桁流失対策としては、橋りょうに働く津波作用力の軽減と津波抵抗力の向上が考えられる。新設橋りょうにおいて津波作用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<sup>3)</sup>などが考えられる。既設橋りょうの場合は、新設橋りょうと比較して設計・施工上の制約が多く、同様の対策を行うことは容易ではない。津波抵抗力を向上させる手法としては、桁流失防止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、津波により桁に生じる作用力に基づき、既設コンクリート橋りょうを対象とした桁流失防止工法を提案した。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い、本工法により対策した橋りょうの抵抗機構を検討した。

## 2. 津波作用対策工法の提案

## 2.1 提案工法の概要

桁流失防止工法は、津波による桁の流失防止とともに、津波を発生させる地震による桁の落橋を防止し、常時に生じる収縮や温度伸縮など桁の橋軸方向の伸縮を拘束しない構造であることが求められる。図2に提案した工法の概要を示す。本工法の構成部材は、桁の側面に設置したサイドブロックと、橋脚および桁に取り付けた鋼製ブ

特集：防災技術

表1 コンクリートの強度試験結果

供試体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
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 <sup>2</sup> )	降伏ひずみ	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D19-SD390	415	$2.76 \times 10^{-3}$	172
D38-SD490	506	$2.89 \times 10^{-3}$	181

表3 鋼材の引張強度試験結果

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

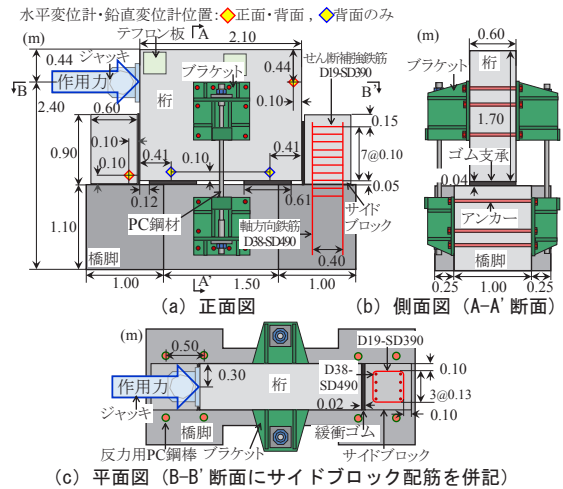


図3 荷重試験体略図

ラケット，それらを繋ぐPC鋼材である。PC鋼材とブラケットの接続部は，軸方向の伸縮を拘束しないように可動する仕様となっている。津波による水平力に対してはサイドブロックで，揚力とモーメントに対してはPC鋼材で抵抗して，桁の流失を防止する。津波による各々の力の大小は，橋りょうに到達する波の特性に応じて変化するが，本工法は，各々の力に抵抗する部材を分離・独立して考えるため，設計の単純化と波の特性に応じた最適断面の設定が可能である。また，地震に対しても，サイドブロックで橋軸直角方向の落橋を防止し，橋脚に取り付けたブラケットで橋軸方向の落橋を防止することができる。なお，本試験対象は，橋軸方向の桁座寸法が十分に確保された既設鉄道コンクリート橋りょうを想定したため，ブラケットに橋軸方向の落橋防止機能を持たせていない。さらに，津波先端部による大きな衝撃力に対しては，地震による衝撃力とともに，サイドブロックと桁の遊間に設置した緩衝ゴムで力を分散させて抵抗する。

2.2 施工方法

本工法は，後述する手順で，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。はじめに，アンカーを用いて上部ブラケットを横桁，下部ブラケットを橋脚に取付ける。続いて，上部・下部ブラケットに，PC鋼材を緊張しないように設置する。その後，桁横に緩衝ゴムを設置し，それを型枠の一部として，桁横にサイドブロックを打設し，施工完了となる。

3. 荷重実験による津波抵抗機構の推定

3.1 荷重試験概要

試験体は，図3のような横桁・支承周辺の実物大模型である。ただし，両面にPC鋼材とブラケットを設置した対称形とし，非対称性によるねじれの発生を防止した。

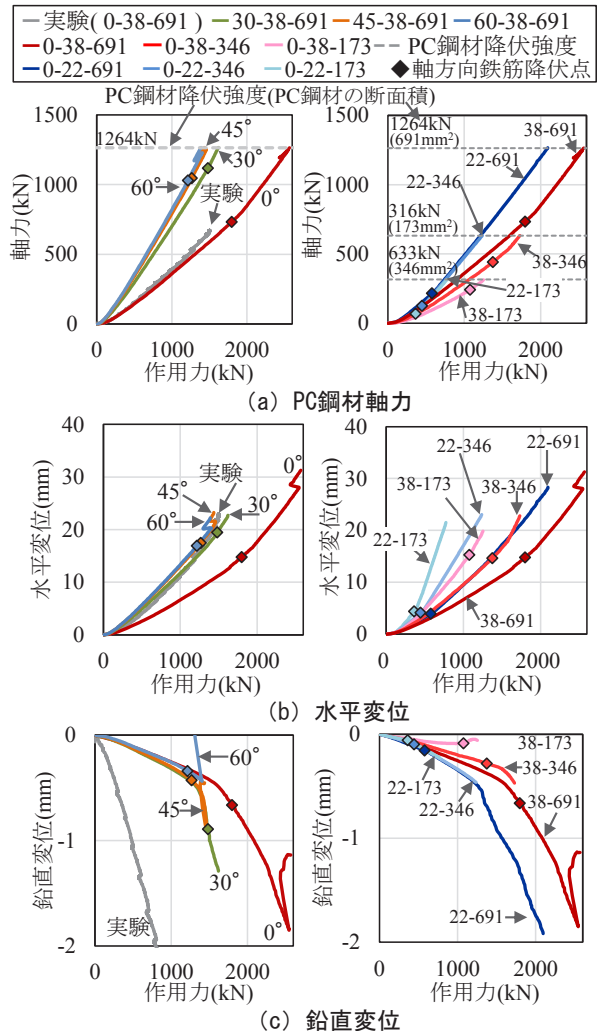


図4 作用力と変位およびPC鋼材軸力の関係

使用したコンクリートおよび鉄筋，鋼材の強度試験結果を表1，2，3に示す。津波による水平力，水平力と揚力によるモーメントを作用力として想定し，1500kN ジャッキにより水平方向に静的な単調荷重を行った。

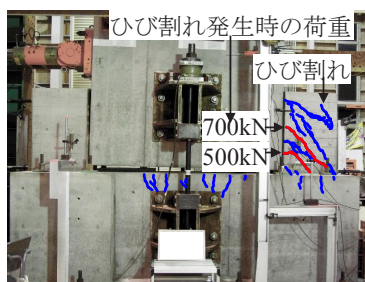


図5 荷重試験体の写真  
(1500kN 作用時)

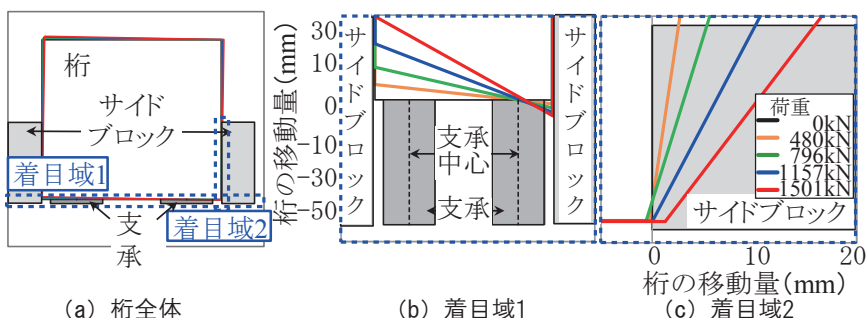


図6 桁を剛体と仮定して桁上の変位計を基に推定した桁の変位

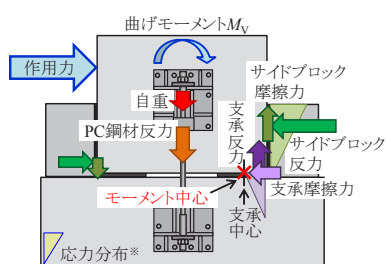


図7 想定した作用と抵抗機構

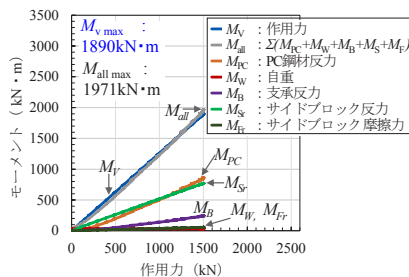


図8 モーメント作用力関係

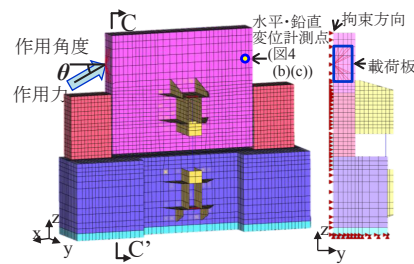


図9 解析モデル略図

### 3.2 津波抵抗機構の推定

図4に作用力と変位およびPC鋼材軸力の関係を示すが、詳しくは4章で解析結果とともに述べる。図5に荷重終了時(作用力1500kN)の損傷状況を示す。まず、作用力500kNで図5右側の荷重反対側サイドブロックに斜めひび割れが生じた。このひび割れの進展とともに橋脚にも荷重反対側サイドブロック下、荷重側支承下の順にひび割れが生じ、作用力1200kN付近で橋脚中央部にひび割れが生じた。しかしながら、1500kN作用時にもコンクリートの圧縮破壊やサイドブロックの軸方向鉄筋(以下、軸方向鉄筋)およびサイドブロックのせん断補強鉄筋に降伏は生じなかった。以上より、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。

1500kN作用時においても、桁にはひび割れ等の損傷が生じなかった。このことから桁を剛体とみなし、図3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、図6(b),(c)は図6(a)に示す着目域の変位である。図6(b)より、桁の回転中心は支承中心であると考えられる。支承中心を回転中心とすると、作用力のアーム長は1.26mであり、最大作用力のモーメントは1890kN・mとなる。また、ひび割れが生じて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変形とみなせると仮定すると、図6(c)より、サイドブロックおよび支承に生じる応力は三角形に分布すると推測される。

以上から、本試験体では作用力 $V$ およびそれによるモーメント $M_v$ に対して、PC鋼材反力 $R_{pc}$ と自重 $W$ 、支承反力 $R_B$ 、サイドブロック反力(荷重反対側 $R_{sr}$ )、支承-桁間の摩擦力 $F_B$ 、サイドブロック-桁間の摩擦力(荷重反対側 $F_{sr}$ )により図7のように抵抗すると推定される。

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)	
サイドブロック	圧縮軟化: Parabolic モデル,	ソリッド
橋脚 <sup>*1</sup>	引張軟化: JSCE Softening モデル, 回転ひび割れモデル	
PC鋼材	バイリニア型	梁
ゴム支承	ク-ロン摩擦モデル(図10)	接触
緩衝ゴム	引張時に剥離を考慮, 接線方向剛性は微小(図11)	
サイドブロック-橋脚間	(線形)	
サイドブロック軸方向鉄筋 <sup>*2</sup>	バイリニア型	トラス
接続ボルト		埋込鉄筋
橋脚軸方向鉄筋 <sup>*2</sup>		
せん断補強鉄筋		
ブラケット	バイリニア型 <sup>*3</sup>	シェル

<sup>\*1</sup> 解析の安定性から最下段の1層は弾性要素

<sup>\*2</sup> 鉄筋とコンクリートの付着は完全付着

<sup>\*3</sup> ソリッド要素と完全結合

反力に水平せん断抵抗係数0.10<sup>6)</sup>を乗じたものを摩擦力と仮定すると、荷重側サイドブロックと支承が桁に接触していないとき、式(1)、式(2)が成立し、作用力とPC鋼材反力の計測値および自重から反力が導かれ、摩擦力も推定される。

$$V = R_{sr} + 0.1R_B \quad (1)$$

$$R_{pc} + W = R_B + 0.1R_{sr} \quad (2)$$

図7を基に算出した抵抗モーメントを図8に示す。この時、PC鋼材反力はPC鋼材軸力とし、サイドブロック反力によるモーメントの算定時に支承厚みによるアーム長の低減はしていない。作用力によるモーメント $M_v$ と、PC鋼材反力 $M_{pc}$ 、自重 $M_w$ 、支承反力 $M_B$ 、荷重反対側サイドブロック反力 $M_{sr}$ 、荷重反対側サイドブロック摩擦

特集：防災技術

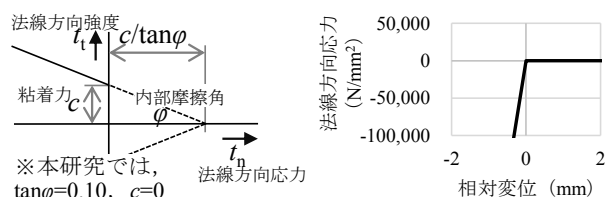


図 10 接触要素の非線形特性（ゴム支承） 図 11 接触要素の非線形特性（緩衝ゴム）

表 5 接触要素の材料物性値

	法線方向剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	接線方向剛性 (N/mm <sup>2</sup> )
緩衝ゴム	$3.10 \times 10^5$	$1.00 \times 10^3$
ゴム支承	$3.10 \times 10^5$	$1.03 \times 10^5$

表 6 解析ケース

作用角度	0°		30°	45°	60°	
サイドブロックの軸方向鉄筋	D22	-SD390	D38-SD490			
PC 鋼材の断面積 (mm <sup>2</sup> )	691	0-22-691	0-38-691	30-38-691	45-38-691	60-38-691
	346	0-22-346	0-38-346	—	—	—
	173	0-22-173	0-38-173	—	—	—

力  $M_{Fr}$  の各モーメントの総和である抵抗モーメント  $M_{all}$  は同等であり、推定した抵抗機構の妥当性が確認された。

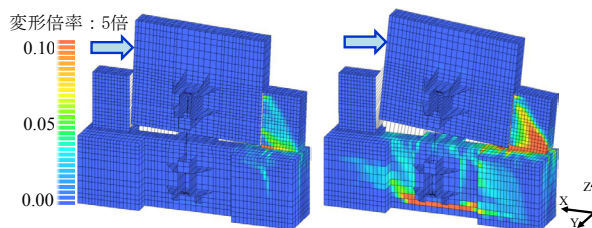
#### 4. 数値解析による抵抗機構の検討

##### 4.1 数値解析概要

解析モデルは、図 9 に示す 3 次元モデルとする。対称性を考慮し、載荷試験における試験体の 1/2 を対象とした。各部材は、表 4 に示す要素で表現し、表 1, 2, 3 の材料試験結果、および表 5 の構成材の一般値に基づき物性を定める。境界条件は、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。

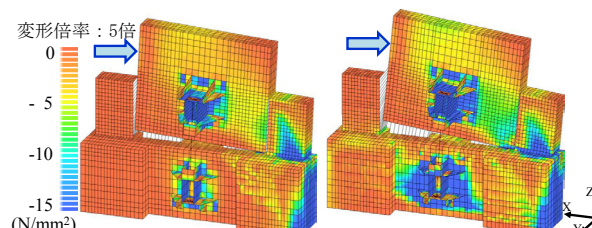
自重を作用させた後に、橋脚下面から 2400mm の位置において作用角度方向に 0.2mm ずつ強制変位を与える。このとき、高さ 500mm、幅 250mm の載荷板の範囲に剛体要素を取付けることで、局所変形を防止する。

数値解析では、PC 鋼材や軸方向鉄筋の抵抗機構への影響と津波の規模の抵抗機構への影響を検討するため、9 ケースを実施した。解析ケースを表 6 に示す。ケース名は（作用力の作用角度）-（軸方向鉄筋の公称径）-（PC 鋼材の断面積）であり、Case0-38-691 が実験を再現したものである。PC 鋼材や軸方向鉄筋の影響の検討では、PC 鋼材の断面積を載荷試験の 1/1 (691mm<sup>2</sup>) と 1/2 (346mm<sup>2</sup>)、1/4 (173mm<sup>2</sup>)、軸方向鉄筋を D38-SD490 と D22-SD390 にしたものを組合せて 6 ケースを比較する。なお、作用力の作用角度は載荷試験と同じく水平とし、D22-SD390 の物性値は、公称値を用いる。津波の規模の抵抗機構への影響の検討では、作用力の作用角度を 0°, 30°, 45°, 60° とした 4 ケースを比較する。ここで、角度のあるケースは、載荷試験で想定した東日本大震災クラスの津波と規模が異なる津波が来襲し、



(a) 軸方向鉄筋降伏時 (b) 最大作用力載荷時

図 12 最大主ひずみコンター図 (Case0-38-691)



(a) 軸方向鉄筋降伏時 (b) 最大作用力載荷時

図 13 最小主応力コンター図 (Case0-38-691)

より大きな揚力が桁に作用する場合を想定している。なお、本検討では軸方向鉄筋と PC 鋼材は、載荷実験と同一とした。

##### 4.2 解析結果

Case0-38-691 の最大主ひずみコンター図を図 12、最小主応力コンター図を図 13 に示す。得られた作用力と変位、PC 鋼材の軸力の関係を図 4 に併記した。Case0-38-691 と載荷試験は、ひび割れの発生位置および発生順序、作用力と PC 鋼材の軸力関係が概ね一致しており、作用力に対する 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。しかしながら、解析では載荷試験よりも作用力に対する変位が小さい。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緩衝ゴムの変形やブラケットと桁および橋脚を結合するアンカーのシーす内の挙動が解析では表現できていないことやゴム支承にクーロン摩擦モデルを導入したことにより、水平反力の影響が大きくなったことなどが考えられる。

ひび割れの発生位置および発生順序、最大抵抗力を発揮するタイミングは、全ケースで共通していた。まず、載荷反対側サイドブロックとその下の橋脚にひび割れが生じ、載荷反対側サイドブロックの引張側軸方向鉄筋が外側、内側の順に降伏した。PC 鋼材の作用力負担分は、軸方向鉄筋が降伏すると降伏前と比べて増加率が大きくなった。その後、載荷反対側支承下の橋脚、載荷側サイドブロック下の橋脚の順にひび割れが生じ、PC 鋼材降伏とほぼ同時に最大抵抗力が発揮された。なお、サイドブロックにせん断破壊は生じなかった。また、Case30-38-691 では、橋脚中央部のひび割れは生じなかった。

##### 4.3 軸方向鉄筋と PC 鋼材の抵抗機構への影響

PC 鋼材の断面積に関わらず、降伏強度が等しい軸方向鉄筋が降伏する水平変位は概ね等しいことが図 4 (b) か

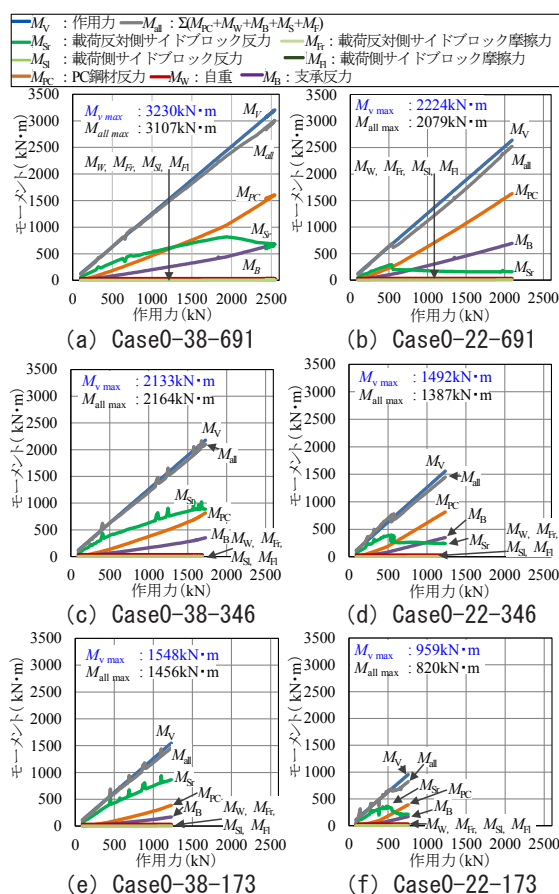


図 14 モーメント作用力関係

ら確認できる。また、全ケースで、載荷反対側サイドブロックの引張側軸方向鉄筋降伏後に、PC 鋼材降伏により最大抵抗力が発揮されたことから、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ことが確認された。

PC 鋼材の断面積が減少するほど、水平変位、鉛直変位ともに増加しており、PC 鋼材が桁の回転移動を抑制していることが確認された。また、PC 鋼材の断面積が小さいほど、あるいは軸方向鉄筋の降伏強度が高いほど、作用力のうち PC 鋼材の負担する割合が減少した。

図 8 と同様に算出したモーメントを図 14 に示す。この時、摩擦力および支承反力、サイドブロック反力は接触要素の応力から求めた。図 8 と図 14 (a) より載荷試験を再現した Case0-38-691 と載荷実験結果が一致することを確認した。また、各部材の降伏耐力から算定した Case0-38-691 の最大抵抗モーメントは 3130 kN・m であり、作用力によるモーメント  $M_v$  の最大値および抵抗力モーメント  $M_{all}$  の最大値とほぼ等しかった。

作用力によるモーメント  $M_v$  と抵抗力モーメント  $M_{all}$  は、軸方向鉄筋が降伏するまでは軸方向鉄筋の降伏強度と PC 鋼材の断面積に関わらず、概ね等しいことがわかる。軸方向鉄筋が降伏すると、載荷反対側サイドブロック反力によるモーメントが減少し、作用力によるモーメント  $M_v$

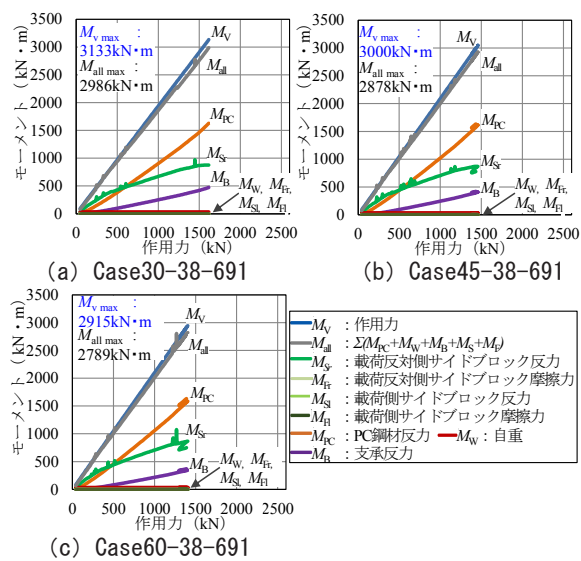


図 15 モーメント作用力関係

を抵抗力モーメント  $M_{all}$  が下回る傾向があった。載荷反対側サイドブロック反力によるモーメントは、軸方向鉄筋の降伏後、軸方向鉄筋に D38-SD490 を用いた場合は緩やかに減少するが、D22-SD390 を用いた場合は急激に減少した後 PC 鋼材の降伏まで一定となった。一方で、軸方向鉄筋降伏後には PC 鋼材反力と支承反力によるモーメントによる負担割合が大きくなり、作用力によるモーメント  $M_v$  と抵抗力モーメント  $M_{all}$  の最大値の差は 140kN 以下であり、図 7 に示す抵抗機構が成立することを確認した。

各摩擦力、載荷側サイドブロック反力によるモーメントの合計は全ケースにおいて 10kN・m 以下である。これは、摩擦力は微小であることと、載荷側サイドブロック反力は下方にのみ作用するのでアーム長が 30mm 程と短いことによる。加えて、自重によるモーメントは一定であるので、本工法の抵抗モーメントの差は PC 鋼材反力、支承反力、載荷反対側サイドブロック反力によるモーメントによることになる。摩擦力が微小であることと鉛直方向の力のつり合いから、支承反力は PC 鋼材反力に比例する。PC 鋼材反力のアーム長は一定としており、最大値は PC 鋼材降伏強度により決まる。また、PC 鋼材降伏時の載荷反対側サイドブロック反力によるモーメントは、軸方向鉄筋の降伏強度が大きい方が大きい。このため、PC 鋼材断面積が大きいほど、あるいは軸方向鉄筋の降伏強度が大きいほど最大抵抗モーメントが大きくなった。

#### 4.4 津波の規模の抵抗機構への影響

図 8 と同様に算出した抵抗モーメントを図 15 に示す。作用力の作用角度に関わらず、作用力によるモーメント  $M_v$  と抵抗力モーメント  $M_{all}$  が概ね等しく、図 7 に示す抵抗機構が成立することを確認した。

作用角度が異なる 4 ケースについて、表 7 に軸方向鉄筋降伏時および最大作用力載荷時の作用力  $V$  と載荷反対

特集：防災技術

表7 軸方向鉄筋降伏時および最大作用力載荷時の作用力と荷重反対側サイドブロック反力

作用角度 $\theta$	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	
軸方向鉄筋降伏時	$V$	1798	1489	1411	1311
	$V_h$	1798	1289	998	656
	$V_{Sr}$	1548	1329	1319	1312
	$V_{Su}$	1764	1397	1387	1386
	$a$	0.55	0.70	0.70	0.70
最大作用力載荷時	$V$	2567	1616	1459	1404
	$V_h$	2567	1400	1032	702
	$V_{Sr}$	2253	1337	1327	1314
	$V_{Su}$	2897	1395	1392	1386
	$a$	0.34	0.70	0.70	0.70

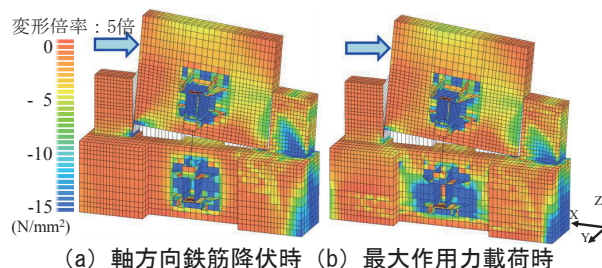
$V$ :作用力(kN),  $V_h$ :水平作用力(kN),  $V_{Sr}$ :荷重反対側サイドブロック反力(kN),  $V_{Su}$ :サイドブロックの曲げ降伏耐力  $V_{Su} = M_u/a$ (kN),  $M_u$ :曲げ降伏モーメント(975kN・m),  $a$ :アーム長(m)

側サイドブロック作用反力  $V_s$  を示す。ここで、サイドブロック反力の重心からサイドブロック底面までの距離をアーム長  $a$  とし、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モーメント  $M_u$  を  $a$  で除した値をサイドブロックの曲げ降伏耐力  $V_{Su} (= M_u/a)$  とした。また、図15にCase60-38-691の最小主応力コンター図を示す。表7から荷重反対側サイドブロックでは、軸方向鉄筋降伏時および最大作用力載荷時において、荷重反対側サイドブロック反力  $V_{Sr}$  がサイドブロックの曲げ降伏耐力  $V_{Su}$  とほぼ等しいことがわかる。また、荷重反対側サイドブロック反力は、Case0-38-691では作用力よりも小さくなるが、その他のケースでは水平作用力よりも大きくなった。これは、図13のようにCase0-38-691では桁が荷重側サイドブロックと接触しないが、その他のケースでは図16のように桁が荷重側サイドブロックと接触するためと考えられる。その結果、水平作用力  $V_h$  と荷重反対側サイドブロック作用力  $V_s$  は一致せず、最大作用力が荷重反対側サイドブロックの曲げ降伏耐力  $V_{Su}$  を上回った。

荷重反対側サイドブロック反力の作用力分布を図17に示す。作用角度が  $30^\circ$  以上の場合は、荷重反対側サイドブロック反力が概ね三角形に分布していることがわかる。また、荷重反対側サイドブロック下方200mmには応力がほとんど生じていない。一方で、Case0-38-691では、初期は三角形分布であるが、桁が荷重反対側サイドブロックと下部と接触したことで、1000kN以上の作用力載荷時には、荷重反対側サイドブロック下方200mmにも作用力が生じた。なお、最大作用力載荷時には、サイドブロック最下段に局所的に大きな作用力が生じているが、これは局所的な破壊が生じたためと考えられる。

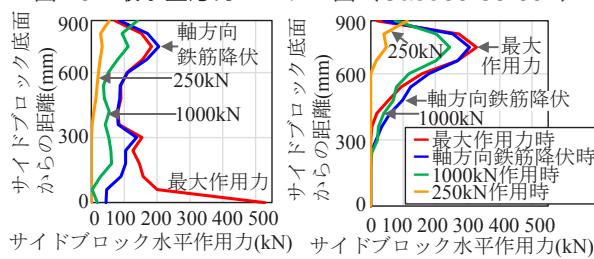
5. おわりに

本研究では、津波により桁に生じる作用力に基づき、既設コンクリート橋りょうを対象とした桁流失防止工法を提案した。そして、本工法の抵抗モーメントは、本試験体諸元の範囲において、サイドブロック軸方向鉄筋の



(a) 軸方向鉄筋降伏時 (b) 最大作用力載荷時

図16 最小主応力コンター図 (Case60-38-691)



(a) Case0-38-691 (b) Case60-38-691

図17 荷重反対側サイドブロック作用力分布

降伏強度やPC鋼材の断面積、作用力の作用角度によらず、各反力により算出されるモーメントの和として表現でき、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決定できることを確認した。なお、諸元によりPC鋼材とサイドブロックの損傷順序が異なる可能性も考えられるが、その場合も荷重反対側サイドブロック反力のアーム長を仮定することで最大抵抗モーメントが算出できると推察される。すなわち、サイドブロックおよびPC鋼材の諸元により、損傷状況と耐力を管理した桁の流失対策が可能であると考えられる。

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。

文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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（構造・地震工学），Vol.70，No.1，pp.129-136，2014
- 4) 佐藤祐子・轟俊太郎・渡辺健・大野又稔：「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」，コンクリート工学会年次論文集，Vol.39，No.2，2017
- 5) 佐藤祐子・渡辺健・轟俊太郎・安保知紀・村田裕志：「桁流失防止工法の抵抗機構に対する作用角度の影響」，コンクリートの補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.17，p.321，2017
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 - コンクリート構造物，丸善出版，p.400，2004