

桁構造による津波被災メカニズムへの影響と津波被災予測手法の提案

コンクリート研究室 渡邊 政博
指導教員 田中泰司, 有川太郎

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波により津波浸水域の約14%の橋梁が橋桁の流出, 橋脚の流出, 橋台の沈下等の被害を受けた。橋梁が被災することで交通ネットワークは分断され, 緊急車両等の交通に影響が出ることから, 橋梁の耐津波安定性を明瞭にすることが急務となっている。白石らは津波浸水域内の橋梁を対象に桁抵抗力津波作用力比 β を用いて, 橋梁の被害分析を行っている。分析結果を図-1に示す。本来であれば $\beta=1$ を境に被害ありと被害なしが判別されていなければならないが, 被害ありと被害なしが混在しており, 適切に予測できていないことがわかる。その要因として, 津波流速を適切に評価できていないことなどが挙げられている。そこで本研究では, 津波被災予測手法を提案し, 津波による橋梁の被害の予測精度の向上を目的とする。また, 桁構造の違いによる桁の被災メカニズムの影響についても検討することとする。

2. コンクリート橋に関する検討

2.1 対象橋梁

本研究では, 岩手県陸前高田市の国道43号線を跨ぐ沼田跨線橋を対象橋梁とした。選定理由としては, 写真-1に示すように対象橋梁は落橋防止装置およびアンカーバーには軽微な損傷しか見られないが桁の流出が確認されたことから, 大きな水平力を伴わずに揚力によって桁が流出したことが予測される本研究ではその被災メカニズムを解明するために実験及び数値解析を行う。

2.2 実験概要

(1) 実験断面

実験断面を図-2に, 実験模型を図-3に示す。実験は港湾空港技術研究所所有の総合沿岸防災実験施設で行った。実験は孤立波および定常流を対象として行うこととした。実験水路は水路長34m, 水路幅10mであり, 水路左端にある造波板を制御することで任意の波高の孤立波を造波する。また定常流については潮流発生装置によりポンプ出力を制御することで水路内の水を循環させ定常流を発生させている。

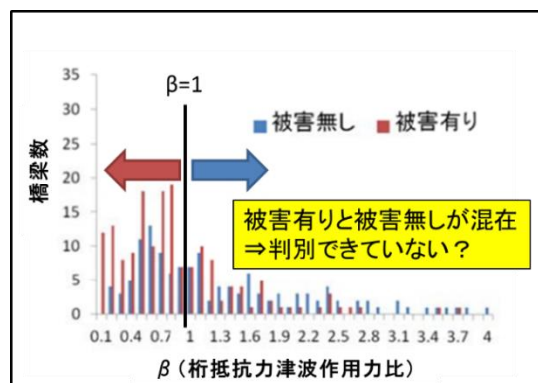


図-1 東北地方太平洋沖地震津波による被害橋梁の分析結果



写真-1 落橋防止装置及びアンカーバー

(2) 実験ケース

表-1に実験ケースを示す。初期水位は水

平床から水面までの高さとし、孤立波の条件では0.5m～0.71mとした。定常流の条件では桁が水没する水位である0.61m～1.01mまでを設けた。また、対象橋梁は6%の横断勾配を有しているため、勾配を付けたケースについても実施した。実験では孤立波および定常流による桁の流出を確認するため、孤立波においてはボルトで橋台に固定した桁と、固定しない桁の2桁を設置し実験を行った。定常流においては、桁をボルトで橋台に固定し実験を実施し計測したのち、ボルトをはずし流出実験を行った。

2.3 実験結果

(1) 孤立波

桁前の最大波高による静水圧で無次元化した波圧強度の分布図を図-4に示す。縦軸に無次元化した波圧強度 ($p/\rho gh$)、横軸には桁前面から波圧計までの距離を示す。分

布をみると、どの初期水位においても波圧強度は減少する傾向にあることがわかる。これは、桁の下面の形状が凹凸を有しているため、形状による圧力損失が発生していると考えられる。初期水位による影響を見ると、桁天端より高い位置に水位があるときは最大波圧にさほど違いはないが、水位が桁天端よりも低いと波圧強度が減少することが確認された。この理由としては、桁水没時には波圧計は最初から水に浸かっているため、水位が上昇した分だけ圧力が作用するが、dep0.5mの条件では初期水位から波圧計まで距離があるため、水位の上昇分がすべて圧力として作用するわけではない。このような理由からdep0.5mのみが波圧強度が小さくなったものとする。

図-5に橋桁の流出結果を示す。また移動量が一番大きかったケースの流出状況を写

表-1 実験ケース

	初期水位 dep (m)	波高 h (m)	ポンプ出力 p (%)
孤立波	0.5	0.2-0.4	-
	0.61	0.2-0.5	-
	0.71	0.2-0.5	-
孤立波 勾配あり	0.5	0.3,0.5	-
	0.61	0.5	-
定常流	0.61	-	30~70
	0.71	-	50~70
	0.81	-	50~80
	0.91	-	30~90
	1.01	-	50~70
定常流 勾配あり	0.5	-	30~60
	0.81	-	50~70
	0.91	-	30~95

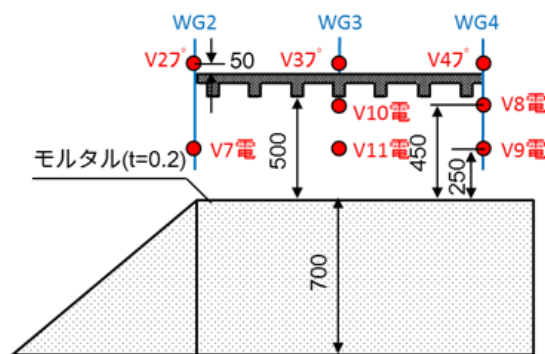


図-2 実験断面図

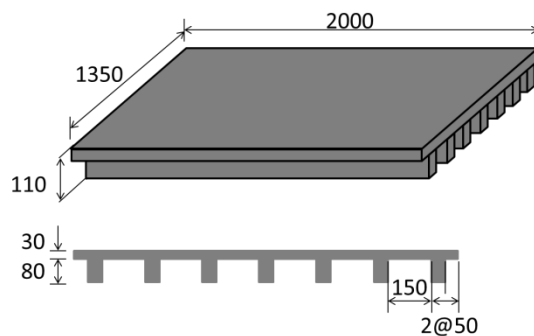


図-3 実験模型

真-2 に示す．移動量が一番大きかったのは初期水位 0.61m の条件であり，最も小さかったのは初期水位 0.71m の条件であった．このことから，桁天端に水位がある状態が最も危険であり，それよりも水位が高くなると孤立波では流出しにくくなることが確認された．

(2) 定常流

定常流の橋桁の波圧分布を把握するため，代表流速である V7 の平均値を用いて動圧 ($\rho v^2/2$) と圧力の比を算出した．結果を図-6 に示す．実線は桁下面の値を示し，破線は桁上面の値を示している．結果を見ると，水位が高くなると桁下面の比は-1 程度となっていることから，ベルヌーイの定理より，動圧の増加により圧力が減少したことが確認された．しかしながら桁上面に関しては動圧以外に水位変動による圧力変化

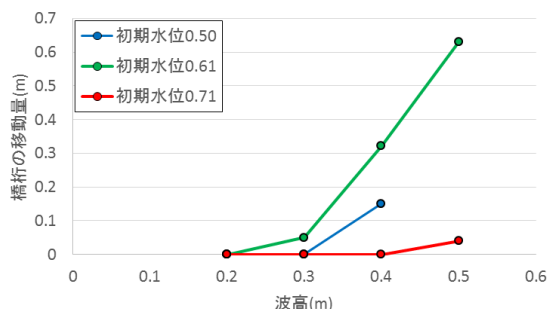


図-5 橋桁の移動量

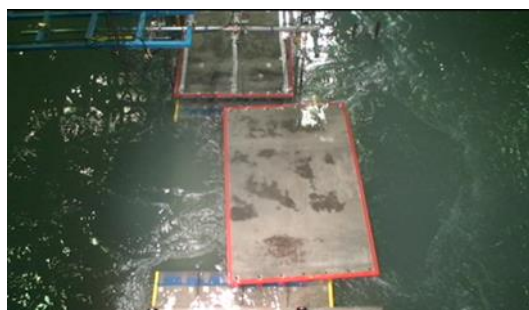


写真-2 dep0.61h0.5 の流出状況

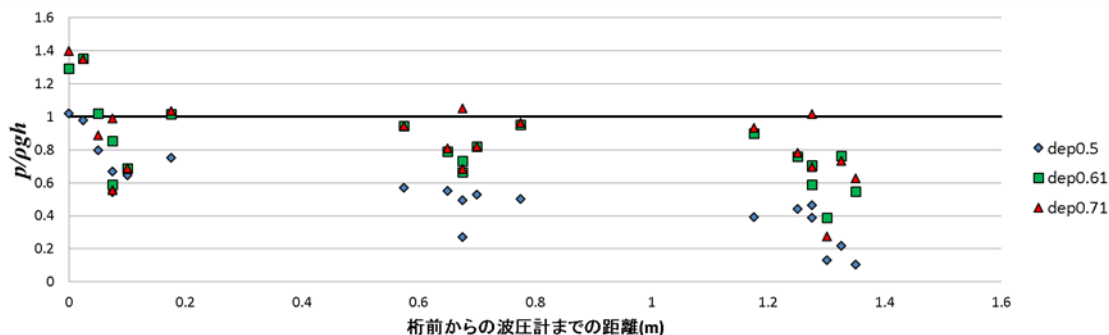


図-4 桁前面の波高で無次元化した波圧強度分布

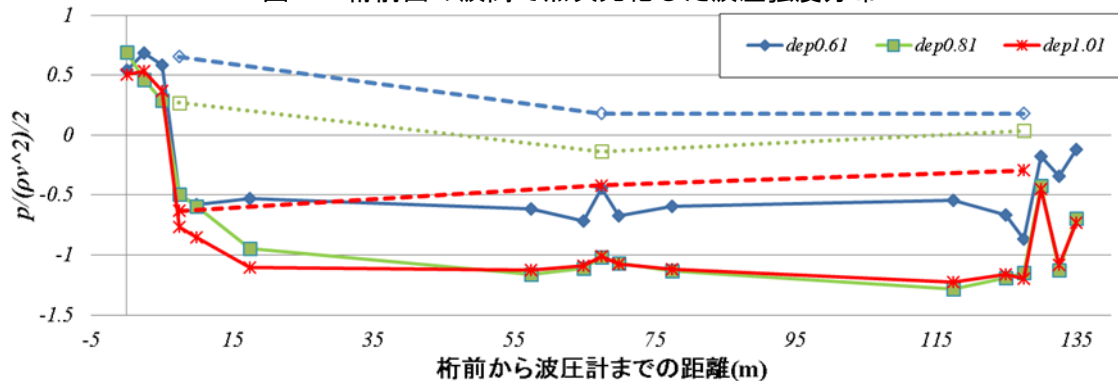


図-6 圧力動圧比の分布

も考慮されるため、桁下面とは異なる結果となった。

定常流における流出実験ではどのケースにおいても橋桁の流出が確認されなかった。これは、桁下面に負圧が生じることで橋桁に下向きの力が作用したため、摩擦抵抗力が増加したことが要因であると考えられる。

図-7、図-8 にフルード数で整理した抗力係数および揚力係数を示す。既往の実験において、各係数はレイノルズ数の増加とともに一定値に収束するが、実験結果では Fr の増加により、抗力係数は増加、揚力係数は減少する結果となった。これは、自由表面の影響によりこのような結果になったものと推測する。実験結果から、式(1)、式(2)に示す通り、各係数の算出式を提案した。

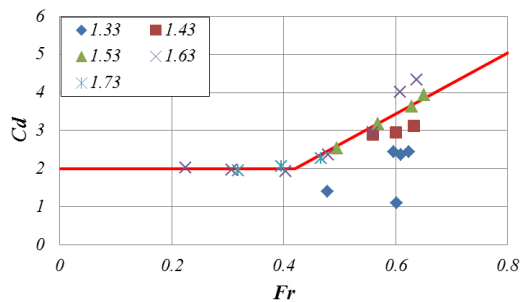


図-7 抗力係数と Fr の関係

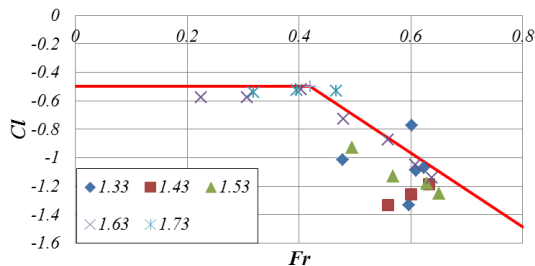


図-8 揚力係数と Fr の関係

$$Cd = \begin{cases} 8.0Fr - 1.36 & (Fr > 0.42) \\ 2.0 & (0 \leq Fr \leq 0.42) \end{cases}$$

—式(1)

$$Cl = \begin{cases} -2.6Fr + 0.592 & (Fr > 0.42) \\ -0.5 & (0 \leq Fr \leq 0.42) \end{cases}$$

—式(2)

3. 津波被災予測手法の提案

3.1 津波遡上解析

(1) 計算概要

本検討においては、高潮津波シミュレータ STOC を用いる。STOC では入れ子構造の格子を設定することが可能であり、格子を順次細かくすることで津波波源から沿岸部までの計算を精度よく低コストで行うことができる。また、計算モデルとしては STOC-ML を用いる。STOC-ML では圧力は静水圧近似より計算し、水表面については連続式から計算するモデルであり、広領域を低コストで計算することができるモデルである。

(2) 計算条件

計算範囲は浸水域にある橋梁を対象とし、青森県南部から千葉県北部の沿岸部を設定した。地形データは中央防災会議地形データの 1350m メッシュ、450m メッシュ、150m メッシュ、50m メッシュを用いた。計算格子は地形データのメッシュサイズに合わせて、最内側格子が 50m となるように 4 階層を設定した。50m メッシュの領域は No.13 ~ No.27 の計 15 領域となる。鉛直方向には分割せず、単層モデルとして計算した。格子の設定例を図-9 に示す。入力波源は高川モデル 3) を用いた。計算時間は地震発生後からの 2 時間として、橋梁位置の流速および水位を計測し、橋梁位置の流況の把握を試みる。なお、浸水域や橋梁位置および被害の有無については白石らの調査結果を参考とした。

3.2 被災予測手法の提案

(1) 予測精度の定義

β による評価においては、 β が1未満の橋梁は流出し β が1以上の橋梁は流出しないと予測される。実際の被害と β による予測結果は表-2に示すように分類され、表中のA、Dは実際の被災状況を予測できており、B、Cについては実際の被災状況を予測できていないといえる。そこで、式(5.2)に示す通り、被災状況を予測できた橋梁数(A+D)を橋梁の総数(A+B+C+D)で除した値を予測精度と定義し、後述する予測結果について予測精度の比較を行うこととする。

$$\text{予測精度}\alpha = \frac{A+D}{A+B+C+D} \times 100(\%)$$

—式(3)

(2) 流速による影響

推定流速による結果とSTOCにより得られた流速により計算された結果を図-10および図-11に示す。推定流速による算出は被害ありの橋梁についてはすべて $\beta > 1$ の範囲に分布しており、被災を予測できている。しかしながら、被害なしの橋梁についての被災予測精度は低く、26橋中8橋しか予測できていない結果となった。しかしながら、安全側に予測しているといえる。一方で、STOCによる流速を用いて計算すると β 値は大きくなっており、 β による被害の予測もできていない結果となっている。各条件における予測精度として、推定流速による結果とSTOCによる結果はどちらも $\alpha = 59\%$ であった。しかしながらSTOCによる結果では被害あり、被害なしの橋梁が全体的に分布していることから被災の有無を予測することは難しいといえる。

(3) 実験式の適用

コンクリート橋の実験結果から算出された抗力係数、揚力係数の実験式を適用し予測精度について検討する。橋梁位置の F_r は時々刻々と変化するため、本検討においては水位最大時、流速最大時の F_r を対象に検討を行った。図-12に流速最大時の F_r を用いた結果、図-13に水位最大時の流速を用いた結果について示す。流速最大時の F_r を用いると、被害なしの橋梁については予測できているが、被害ありの橋梁をみると18橋中7橋しか予測できていない結果となった。予測精度は、被害なしの橋梁を予測できていたため72%と高くなったが、被害ありの橋梁が $\beta \geq 1$ の範囲に多く分布しているため、危険側の予測となる結果となった。水位最大時の F_r による計算結果を見ると、ほとんどの橋梁が $\beta \geq 1$ の範囲に分布する結果となった。水位最大時の流速は、流速最大時よりも小さくなってしまふ。そのため、津波作用力も小さくなり、 β は大きい値の範囲に分布する傾向となる。したがって、水位最大時の β で評価するのは適切ではないといえる。

表-2 結果の分類

	$\beta \geq 1$	$\beta < 1$
被害なし	A	B
被害あり	C	D

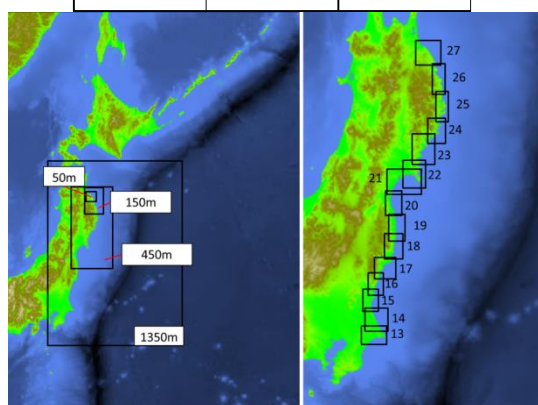


図-9 格子の設定例

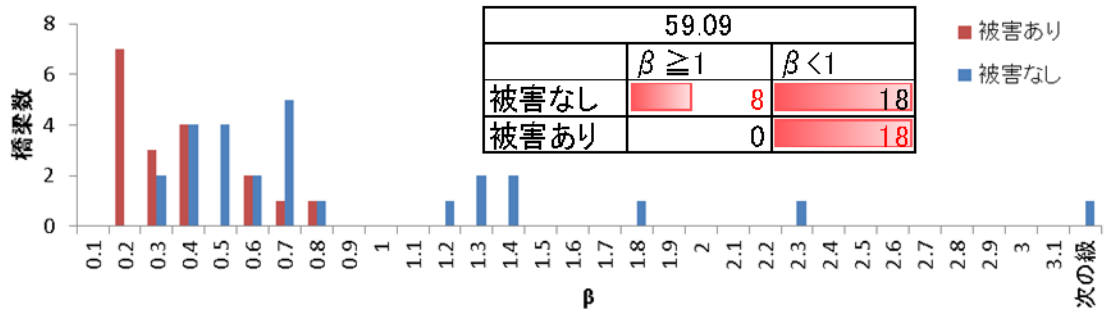


図-10 推定流速による結果

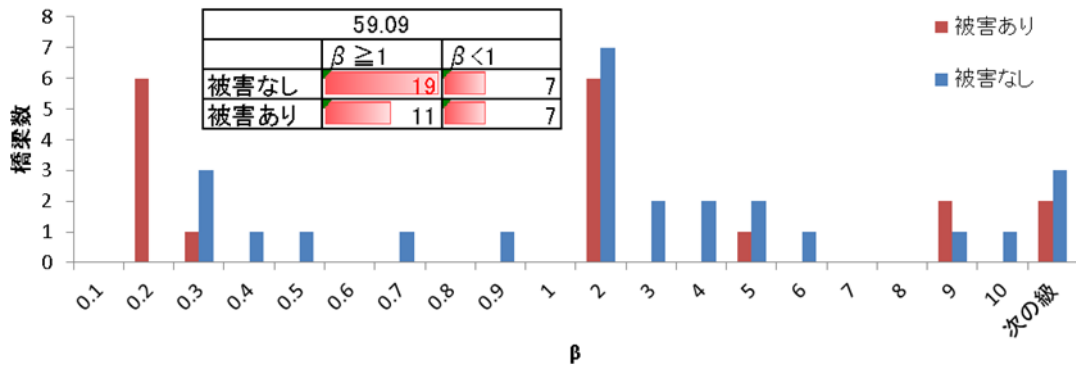


図-11 STOCにより得られた流速による結果

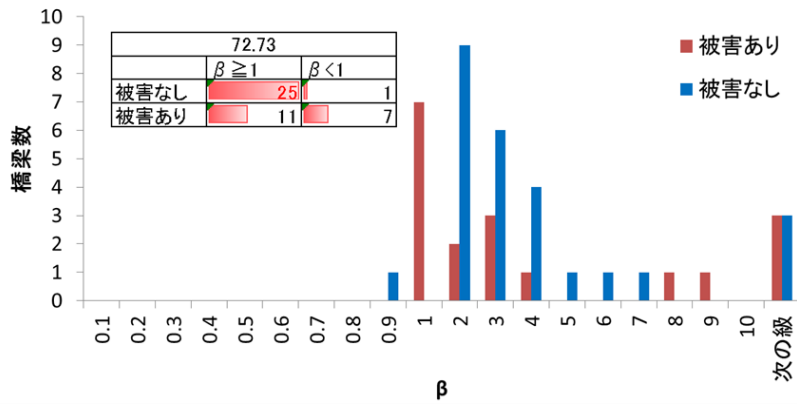


図-12 流速最大時の Fr を用いた結果

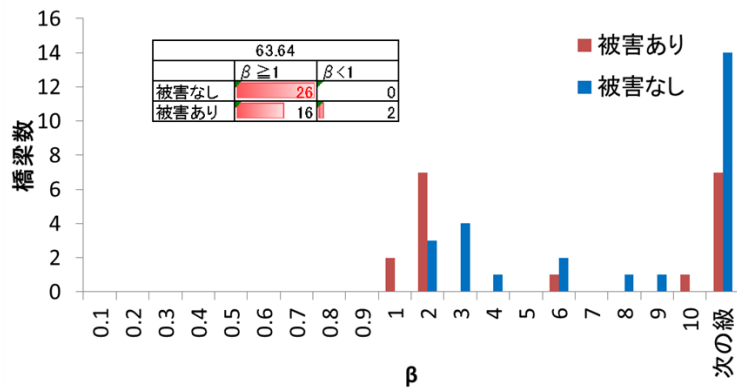


図-13 水位最大時の流速を用いた結果

今回の計算では、STOC の計算格子および地形データのメッシュは 50m であり、高さ方向も 1 層として計算を行ったため、実際に発生する流速よりも小さくなるのが考えられる。そのため、より詳細な計算を行い流速を正確に計算することで、予測精度は向上すると思われる。

4. 鋼桁橋に関する検討

4.1 対象橋梁

東北地方太平洋沖地震による津波によって、道路橋のみならず鉄道橋についても同様に被害を受けた。そこで、在来線の通る一般的な鋼製鉄道橋を対象として実験を行い、コンクリート橋と比較することで、形状や構造形式の違いが作用力や被災メカニズムに与える影響について検討する。

4.2 実験概要

(1) 実験模型

実験模型は在来線の通る一般的な鋼製の鉄道橋を模型縮尺 1/5 として図-14 のとおり作製した。桁高は 272mm、桁幅は 440mm、

桁長は 3000mm で重量は 1.36kN である。写真-3 に示すとおり鋼桁模型の正面は不透過であるが、底面および側面は斜材があるのみで面積透過率が高く、上面についても斜材と枕木のみであり、底面や側面と同様に透過性のある構造となっている。

(2) 実験ケース

表-3 に実験ケースを示す。実験は孤立波および定常流を対象とし実験を行い、はじめに鋼桁への作用力を計測したのち、3 ケースを対象として流出実験を行った。

4.3 実験結果

孤立波作用時における鋼桁への作用力を図-15 に示す。コンクリート橋と同様に波高に比例して水平力、鉛直力ともに増加する傾向にあることが確認された。図-16 に定常流時の鋼桁への作用力を示す。定常流についても流速の増加に伴い水平力は増加し、下向きの鉛直力が増加するという同様の傾向が得られた。

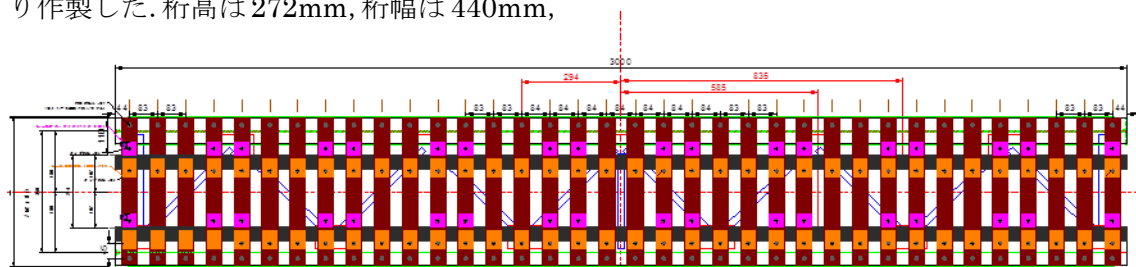


図-14 鋼桁模型平面図



写真-3 鋼桁模型

図-17 に定常流時の抗力係数，揚力係数をコンクリート橋と比較した結果を示す。抗力係数についてはコンクリート橋よりも大きくなり，揚力係数についてはコンクリート橋よりも小さくなる結果となり，形状が与える各係数への影響が確認された。

表-3 に流出実験における桁の流出結果を示す。流出までに至ったケースは1 ケース

のみであった。写真-4 に流出実験における桁の流出状況を示す。コンクリート橋では孤立波により桁が傾いたのち浮き上がり流出するような形態であったが，鋼桁については滑動したのち回転し流出に至るといった形態であり，流出形態の違いが確認された。

表-3 実験ケース

実験	造波	初期水位(m)	波高(m)	ポンプ出力(%)
分力計	孤立波	0.4 (桁下-0.1)	0.2,0.3,0.4,0.5	—
		0.5 (桁下+0)	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5	
		0.7 (桁下+0.2)	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5	
		0.8 (桁下+0.3)	0.1,0.2,0.3,0.4	
	定常流 (逆流)	0.8 (桁下+0.3)	—	30,50,70
		0.9 (桁下+0.4)	—	30,50,70
流出	孤立波	0.5 (桁下+0)	0.1,0.2	—
		0.6 (桁下+0.2)	0.5	
		0.4 (桁下-0.1)	0.5	

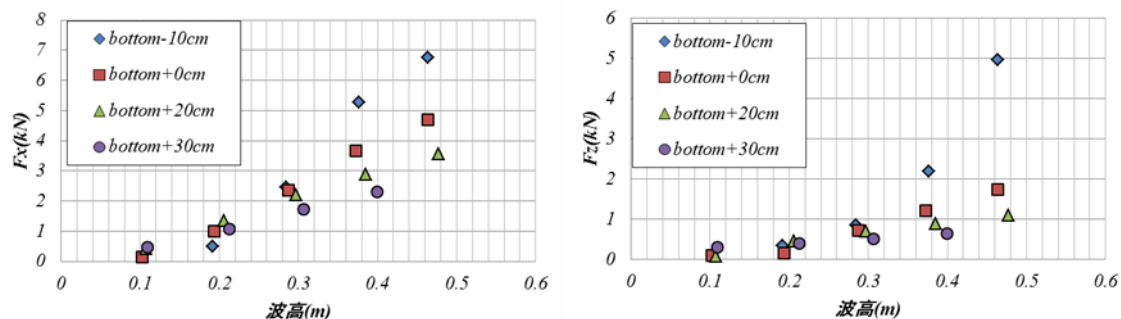


図-15 孤立波作用時における鋼桁への作用力

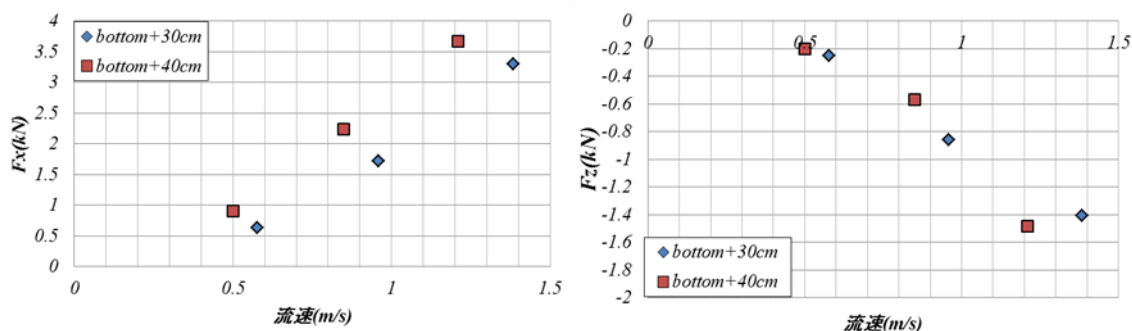


図-16 定常流時における鋼桁への作用力

5. CADMAS-STR の適用性に関する検討

5.1 目的

桁の流出を予測するうえで、被災判定式を用いる方法や、流体解析により得られた作用力から安全率を算出する方法がある。しかしながら、流体計算と構造計算を連成計算することで、流体力を受けた構造物の挙動を直接計算することが可能となり、どのように構造物が移動するかを計算により予測することができる。そこで本章では、流体計算と構造計算を連成した CADMAS-STR の適用性を検討することで、より詳細な桁の流出計算の可能性について検討する。

5.2 計算概要

CADMAS-STR とは気液 2 層の CADMAS-SURF/3D による流体解析と

FEM による構造物解析を連成した計算モデルである。図-18 に連成計算の概要を示す。流体から構造物へ圧力を受け渡す際は、構造物表面の節点が属する流体セルを検索したのち、その接点に属する流体セルおよび上下の流体セルの圧力を元にその節点位置での圧力を補間し算出する。補間された圧力を面積分し各節点に荷重を割り当てることで、流体から構造物へ圧力を受け渡す。構造物が変位は流体セルの空隙率の減少として表現し、空隙率の増減から流速分布を計算し、流体に受け渡す。また、構造物同士に接触面を定義することが可能であり、接触面の摩擦係数を設定することができる。摩擦モデルには動摩擦・静摩擦があり、摩擦力が静止摩擦力を超えた際に動摩擦モードへと移行する。

表-3 桁の流出結果

初期水位(cm)	波高(m)	結果
0.5 (桁下高)	0.1	移動せず
0.5 (桁下高)	0.2	滑動
0.7 (桁下+20cm)	0.5	滑動+回転 (流出)
0.4 (桁下・10cm)	0.5	滑動+回転 (流出には至らず)

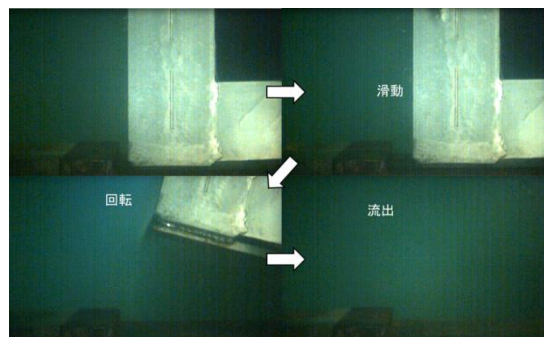


写真-4 桁の流出状況

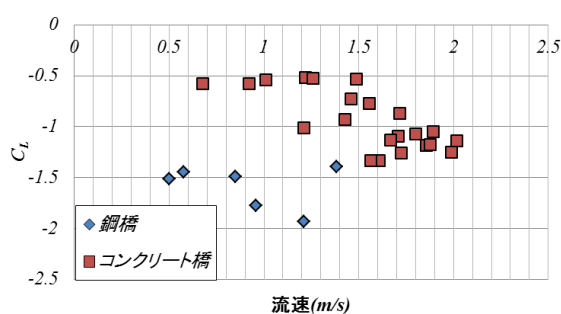
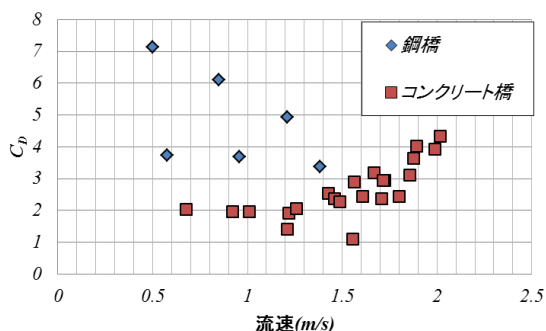


図-17 形状による抗力係数・揚力係数の違い

5.3 計算結果

図-19に計算による桁の流出状況を示す。孤立波の作用により桁が回転したのち流出する結果となっており、定性的に流出形態を再現することができていることがわかる。

図-20に実験値との移動量の比較を示す。破線は実験における桁の水平方向の移動量を示している。(a)を見ると、計算では16cm程度移動する結果となっており実験の約3倍程度の値となった。これは動摩擦係数を暫定的に0.2と設定したため、実験値との差が生じたものと考えられる。一方で(b)では実験よりも移動量が小さくなる結果となった。実験では鉛直方向の移動量については計測していないため、今後、水平方向、鉛直方向の移動量を比較し、定量的に検討することが必要である。

6. まとめ

本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 抗力係数, 揚力係数, 流出形態は桁の形状により大きく異なることが確認された。
- (2) 津波被災予測手法の提案では桁位置のおおよその流況を計算により把握し, 実験により得られた抗力係数, 揚力係数の式を適用し被災判定を行った。計算格子が粗いため計算で得られる流速が小さくなり β 値は大きくなる結果となった。また桁の形状による影響については考慮していないため, 今後は形状による抗力係数, 揚力係数への影響を反映させる必要がある。
- (3) コンクリート橋の流出計算としてCADMAS-STRを用いた再現解析を行い定性的に桁の流出状況を再現することができることが確認された。

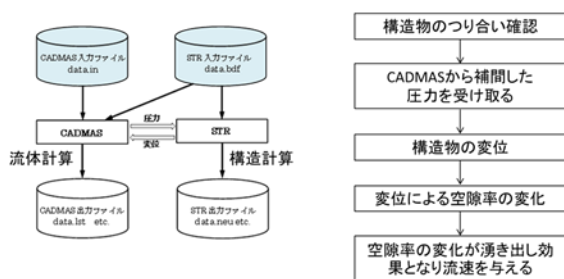
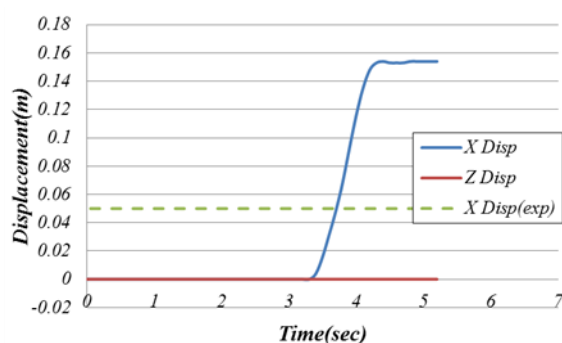


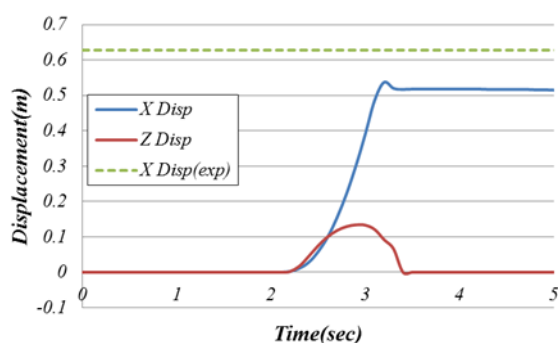
図-18 計算概要



図-19 計算による桁流出の様子
(初期水位 0.61m 波高 0.5m)



(a) 初期水位 0.61m 波高 0.3m



(b) 初期水位 0.61m 波高 0.5m

図-20 実験との移動量の比較