津波WG報告（敬称略，○印：主査）

津波の特徴と被害分析SWG
○庄司，片岡，幸左，佐々木
鴫原，竹田，松浦

実験検討SWG
○佐々木，伊津野，稲場
川崎，庄司，中尾，中村
星隈，山内

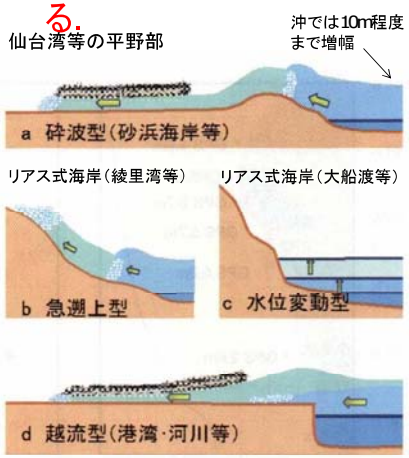
解析検討SWG
○中村，片岡，金山
川崎，武田，田崎

設計法SWG：Goal
○田崎，伊津野，片岡，梶田，西原，篠原，秋山，庄司
松浦，松永，星隈，中尾，古村，高木

第16回 性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム，土木学会，2013年7月18日

代表的な海岸断面と津波の侵入

沿岸での津波の高さは，地形条件が大きく影響する．



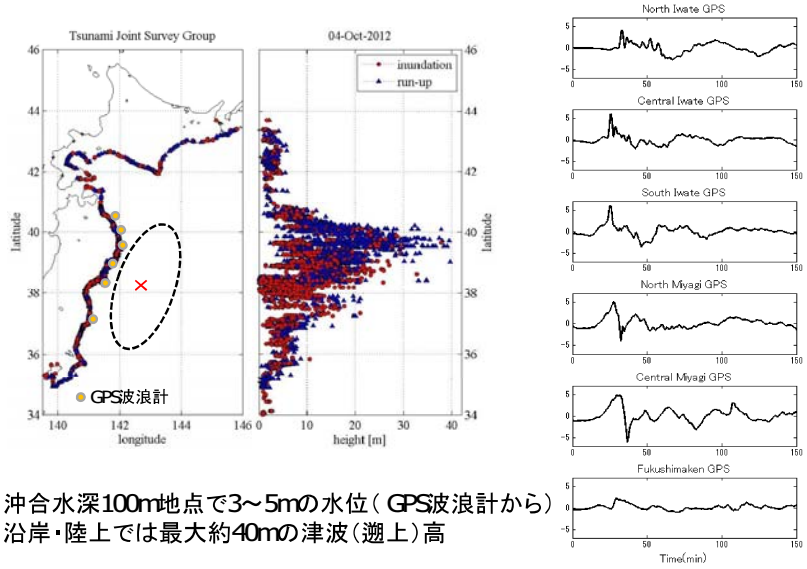
海底勾配の緩い砂浜海岸では，津波が沖合で増幅，先端が砕波し内陸を遡上する．浸水範囲が広い（内陸数km）

陸上部が急こう配斜面の場合，
(b) 海岸で砕けた波が勢いを持って遡上する．特に遡上高が大きい傾向．
(c) 海岸付近の水深が大きく，波が砕けない場合は，単に水位が上下に変動する．

港内の水深が大きい場合，水位が上昇し岸壁・護岸を乗り越え，先端が砕けながら速い流れで市街地に侵入する．

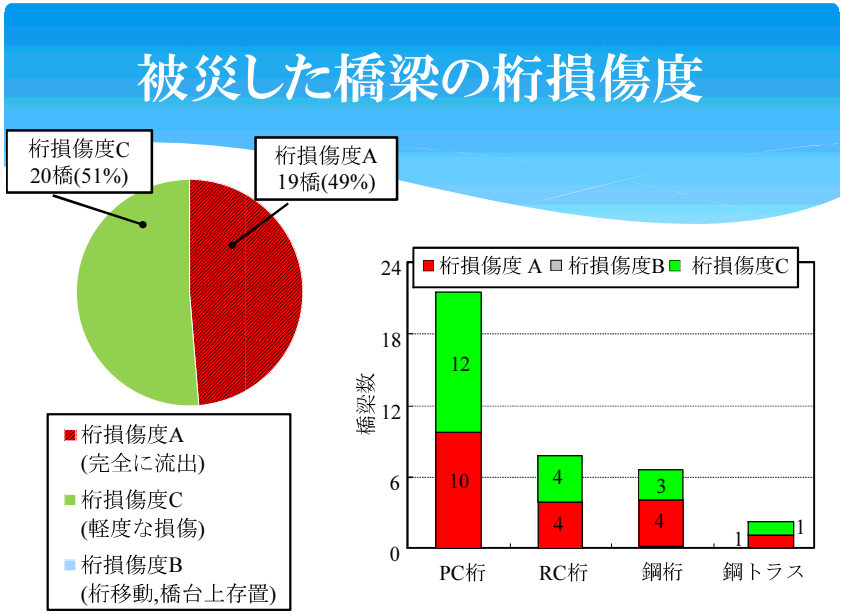
出典：土木学会誌Vol.96,No.7,2011
「東日本大震災における津波と港湾施設等の被害」

観測水位及び津波高の特徴

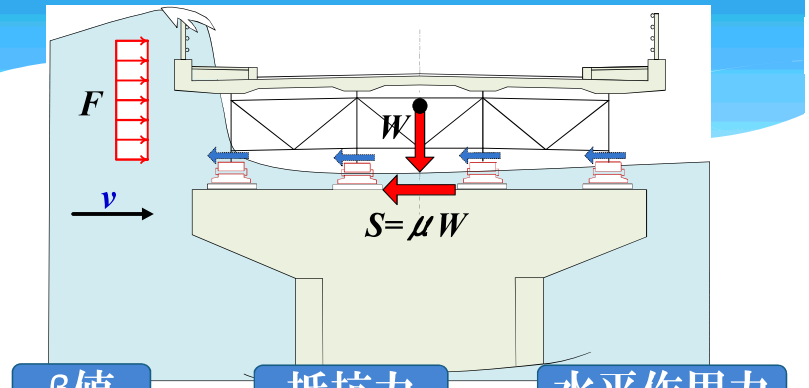


沖合水深100m地点で3～5mの水位（GPS波浪計から）
沿岸・陸上では最大約40mの津波（遡上）高

被災した橋梁の桁損傷度



桁抵抗力作用力比β値の算出



β値

$$\beta = \frac{S}{F}$$

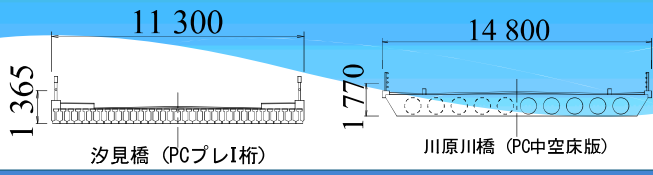
抵抗力

$$S = \mu \cdot W$$

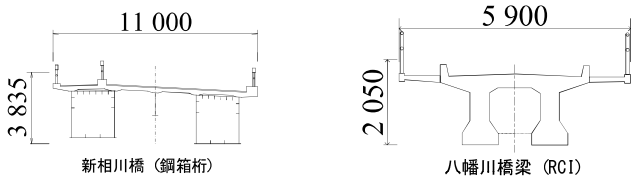
水平作用力

$$F = \frac{1}{2}\rho_w C_d v^2 A_h$$

上部構造形式が異なると

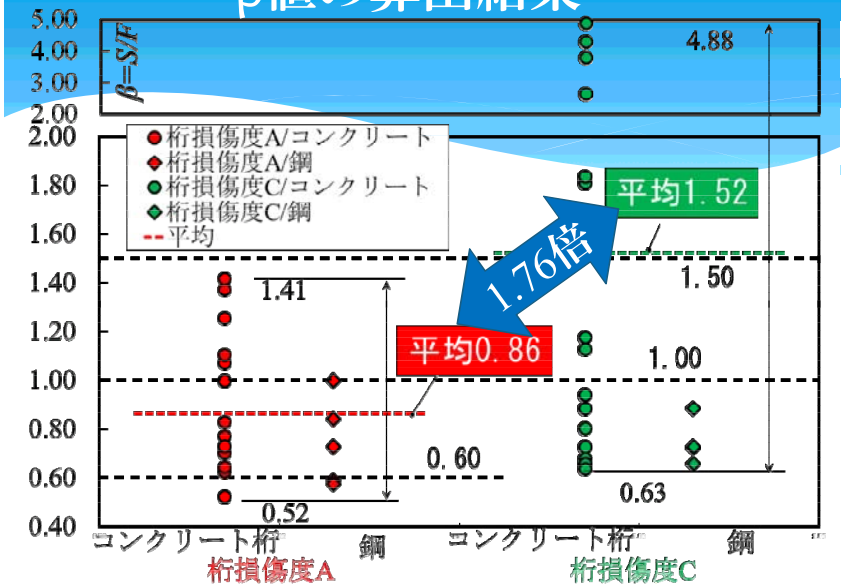


幅Bが比較的大きく，扁平な形状→B/Dが大きい

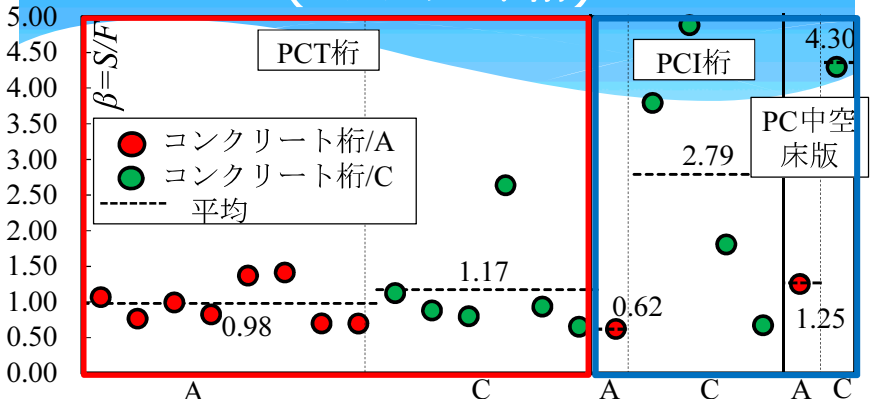


B/Dが小さい→上段の形式とは傾向が異なる

β値の算出結果



桁形式毎に分類したβ値（コンクリート桁）



AとCの差が無い

AとCの差が有る

支承破壊形態と被害分析

水戸辺川にかかる同一形式・同規模の橋梁2橋の支承破壊形態が同一であることを確認した。

単純鋼鈑桁橋（2主桁）　L=25.0m、W=4.0m　支承形式：線支承

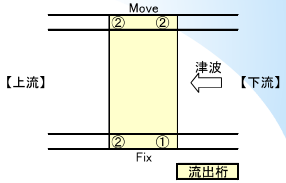
①下沓のみ残る

Fix　下流側写真
片方（津波作用側）のピンチプレートなし

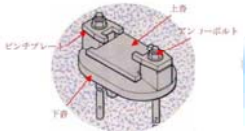
②下沓・上沓なし

Mov　正面写真

Fix　上流側写真



平面図



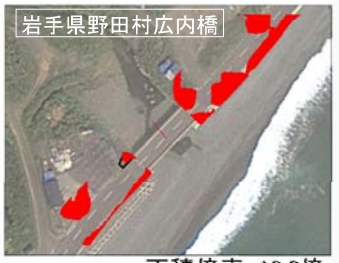
線支承概要図

推定された盛土流出領域

面積倍率：0.7倍

面積倍率：1.1倍

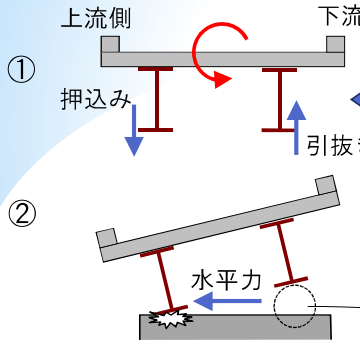
面積倍率：2.7倍



面積倍率：18.0倍

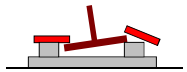
支承破壊形態と被害分析

【推察される壊れ方】



・下流側の支承に上向き反力

・下流側の桁が浮き上る。
・上流側の支承に水平力集中
・上流側の支承はせん断破壊され下沓ごと桁が流出

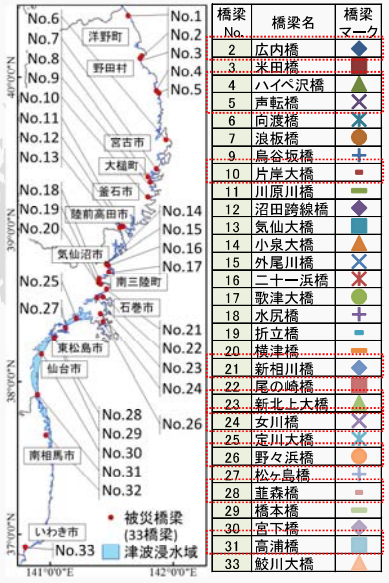


ピンチプレートは下流側が外れ、上流側は残る。

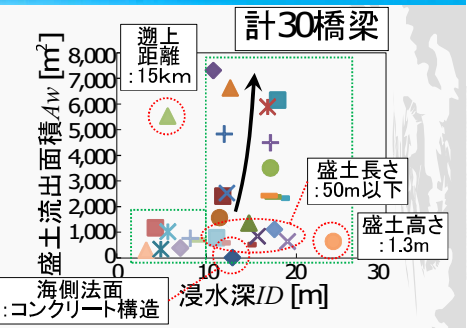
Fix側とMov側の破壊形態の違いについて
⇒アンカーボルトのせん断抵抗の違いか？
（せん断耐力比　F:M　=　3:2）

【今後の取り組み】
支承の壊れ方が明らかなデータを多く収集し、流出形態を分析・整理する。

盛土流出面積と浸水深との関係



橋梁No.	橋梁名	橋梁マーク
2	広内橋	
3	米田橋	
4	ハイベ沢橋	
5	声転橋	
6	向渡橋	
7	浪板橋	
9	烏谷坂橋	
10	片岸大橋	
11	川原川橋	
12	沼田跨線橋	
13	気仙大橋	
14	小泉大橋	
15	外尾川橋	
16	二十一浜橋	
17	歌津大橋	
18	水尻橋	
19	折立橋	
20	横津橋	
21	新相川橋	
22	尾の崎橋	
23	新北上大橋	
24	女川橋	
25	定川大橋	
26	野々浜橋	
27	松ケ島橋	
28	韮森橋	
29	橋本橋	
30	宮下橋	
31	高浦橋	
33	鮫川大橋	



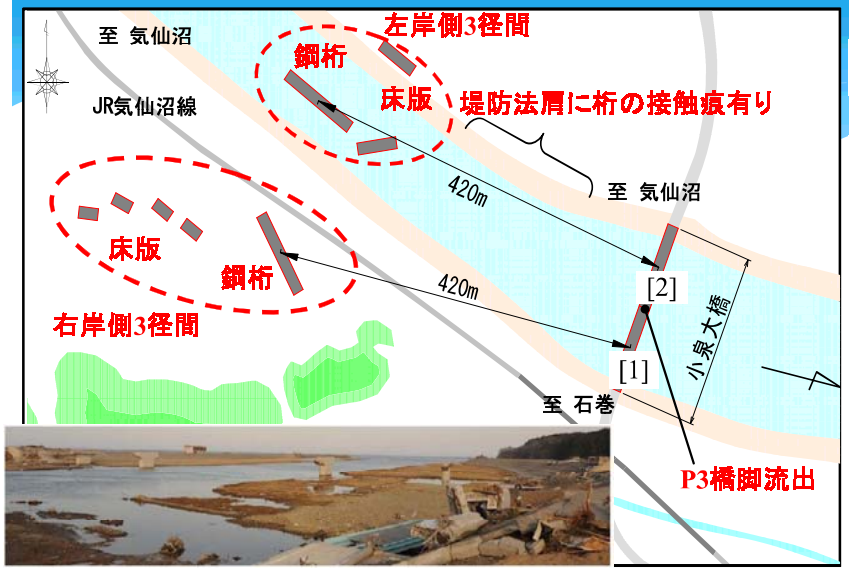
全体の傾向

- ID ≦10m → Aw ≦1,200m²
- ID ≧10m → Aw = 36m²～7,293m²

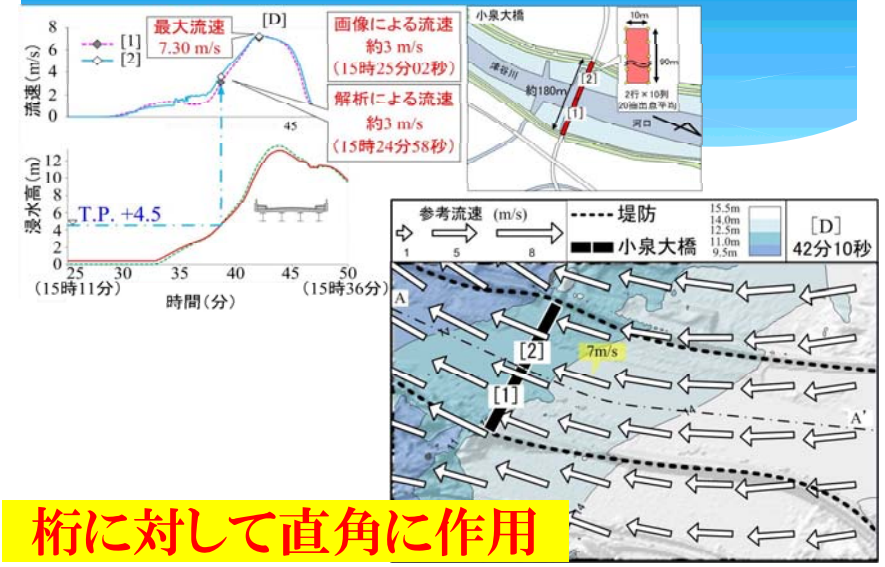
傾向が異なるもののメカニズム

- ID：小 → Aw：大 ⇒ 作用時間が長く，Aw が大
- ID：大 → Aw：小 ⇒ 洗掘作用を免れ，Aw が小
- 〃 ⇒ 盛土高さが低く，作用が小
- 〃 ⇒ 盛土長さが短く，作用が小

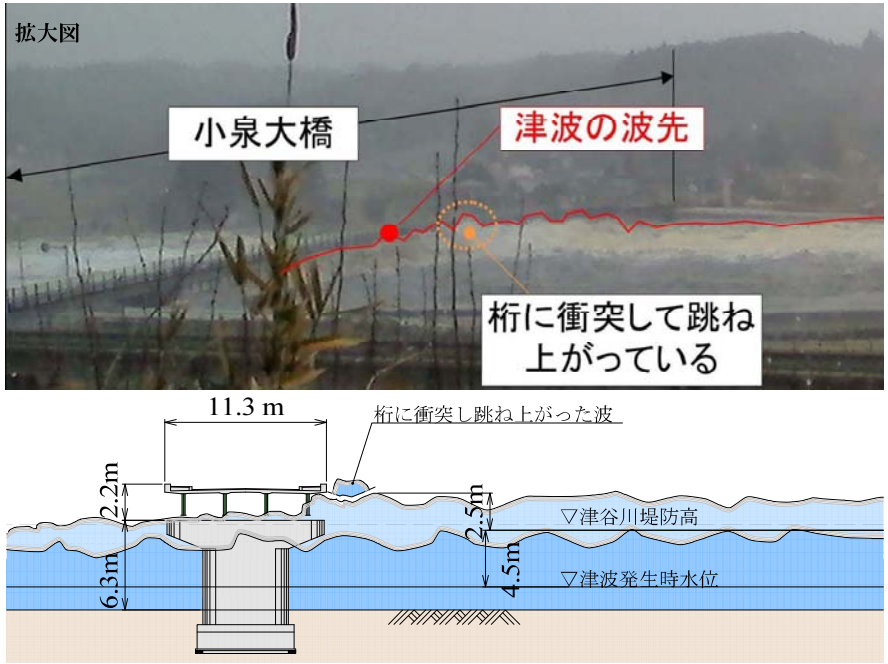
小泉地区の詳細被害分析



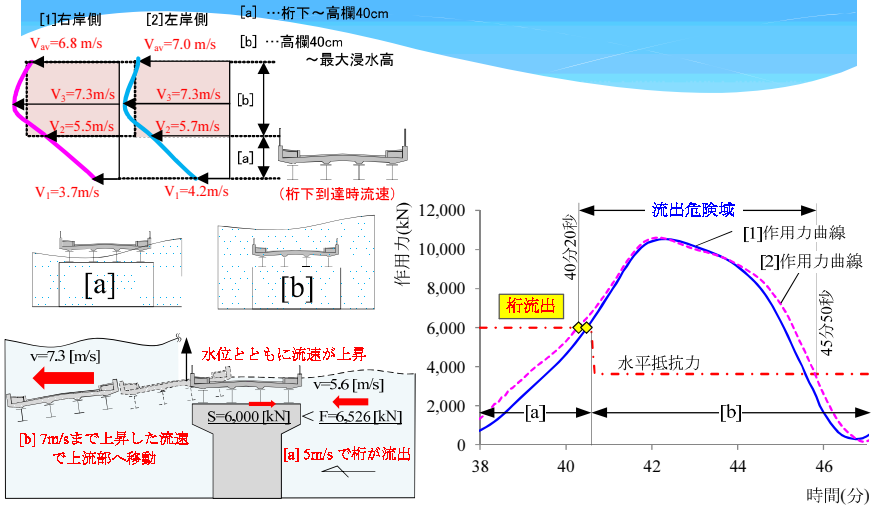
津波伝播遡上解析結果



桁に対して直角に作用



上部構造に作用する津波の流速，作用力と抵抗力



強震動と津波作用の組合せに関する検討

【目的】

小泉大橋地点で推定される津波により上部構造に作用した波力を推定すると、水平方向、鉛直上向きとも、流出抵抗力を下回っていた。

強震動、あるいは橋の動的応答の影響により上部構造の流出に至った可能性を検討した。

【方法】

余震観測記録によりサイト特性を反映した本震の推定地震動を作用させる地震応答解析

津波伝播遡上解析と数値波動水槽解析により推定した波力を作用させる津波応答解析

を順次実施した。

【結果】

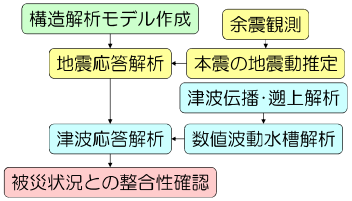
下記の順に損傷、被災状況と矛盾しない結果

①地震作用により大部分の支承が損傷

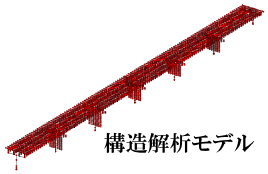
②地震作用によりP3橋脚基部が若干塑性化

③津波作用により全支承が損傷、ほぼ同時にP3橋脚がせん断破壊

上部構造と橋脚1基が流出した小泉大橋

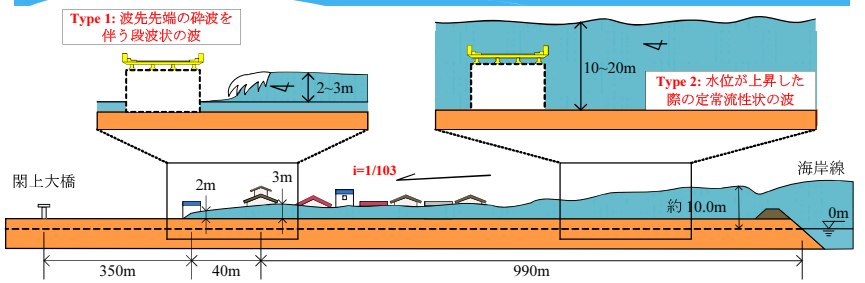


地震・津波被害再現解析の流れ

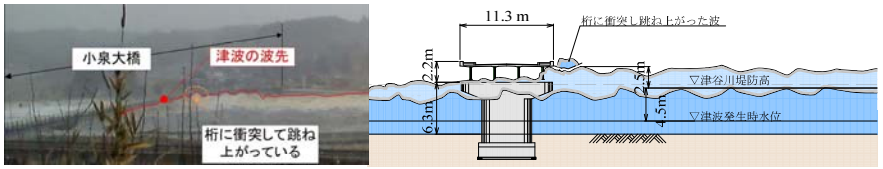


構造解析モデル

実験検討SWG-2 橋桁に作用する波形状



映像分析から模式化した仙台市若林区の津波形状



小泉大橋に作用する津波の形状

実験検討SWG-1

津波が橋梁構造物に与える影響の実験的検討

●目的

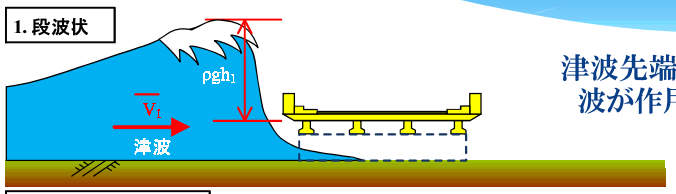
設計法の提案において，津波の作用力と抵抗力，それぞれのメカニズムの理解が重要である．

実験的検討SWGでは，実現象を模擬した水理実験から得た知見や課題を紹介する．

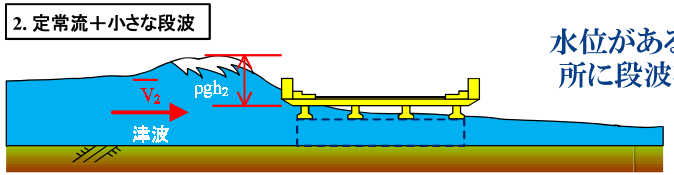
●着目点

* 津波によって桁に生じる波力とその発生メカニズム
* 断面形状の違いが作用力に与える影響
* 橋梁の抵抗力

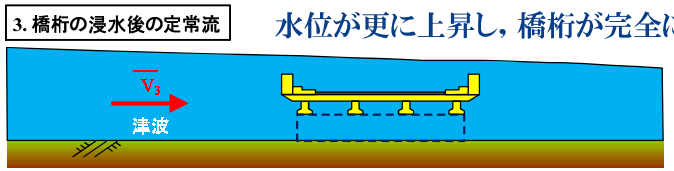
実験検討SWG-3 模擬する波形状のパターン



津波先端の段波状の波が作用する想定

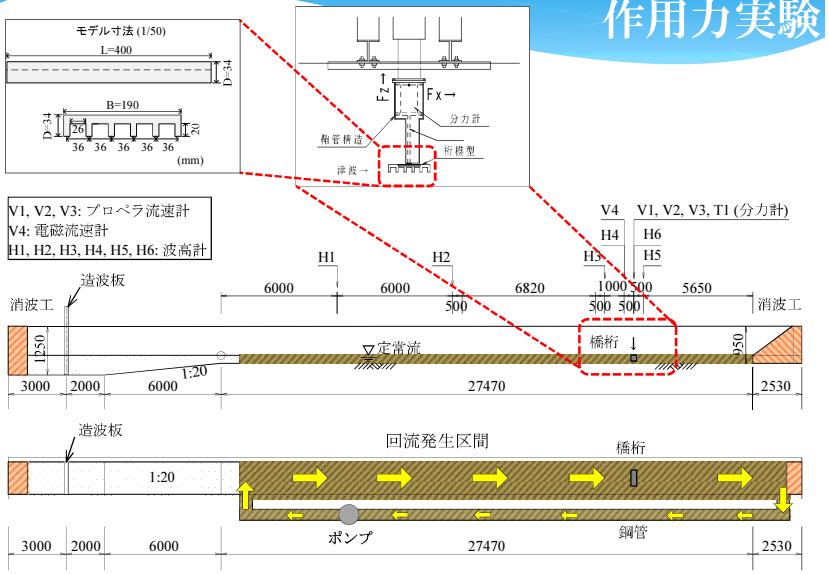


水位がある程度上昇した所に段波状の波が作用

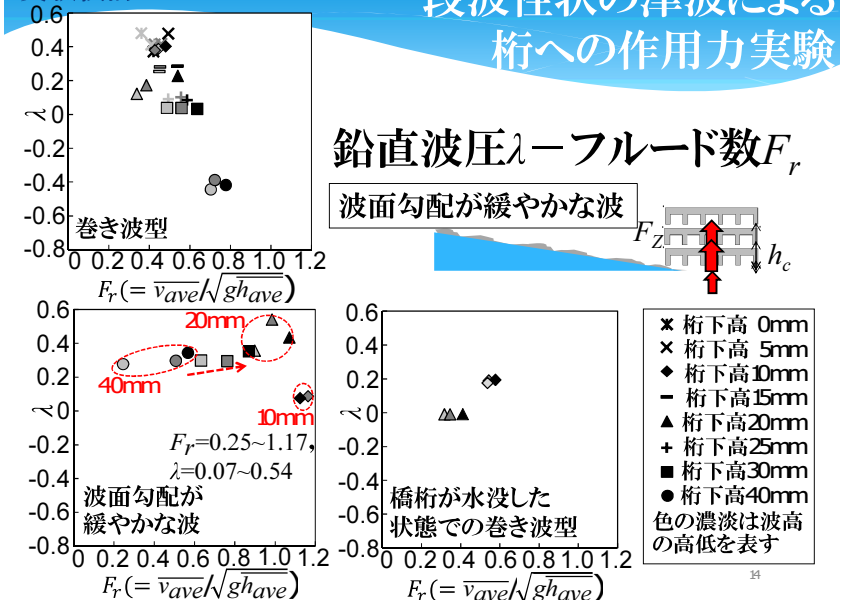


水位が更に上昇し，橋桁が完全に浸水した状態

実験検討SWG-4　孤立波性状の津波による桁への作用力実験



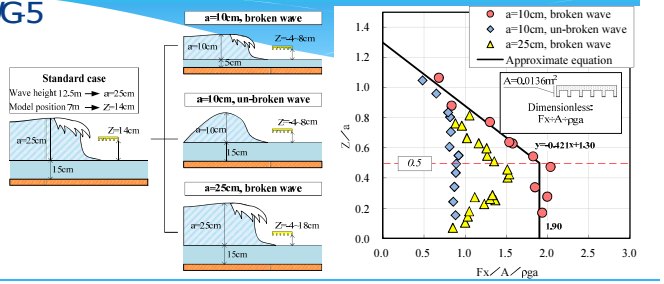
実験検討SWG-6　段波性状の津波による桁への作用力実験



孤立波性状の津波による桁への作用力実験
実験検討SWG-5

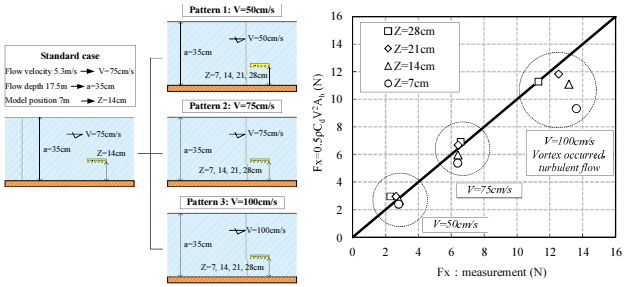
●孤立波性状

波高をパラメータとした作用力算定式



●定常流性状

流体力として流速から算出した作用力と概ね一致

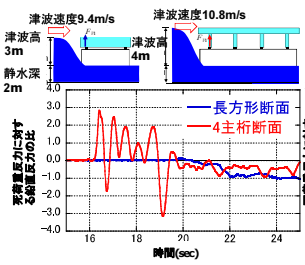


上部構造の断面特性が津波作用力に及ぼす影響実験
実験検討SWG-7

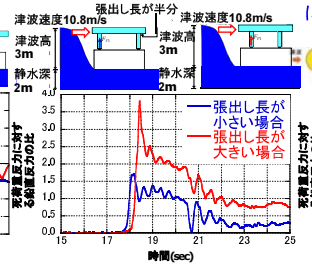
縮尺1/20

上部構造に作用する鉛直反力の比較

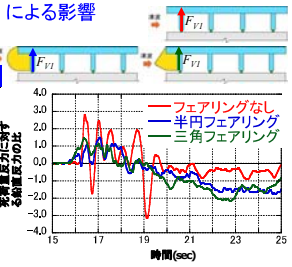
構造形式の違いによる影響



張出し長の違いによる影響



フェアリングの有無による影響



フェアリングの有効性の検討

実験検討SWG-8

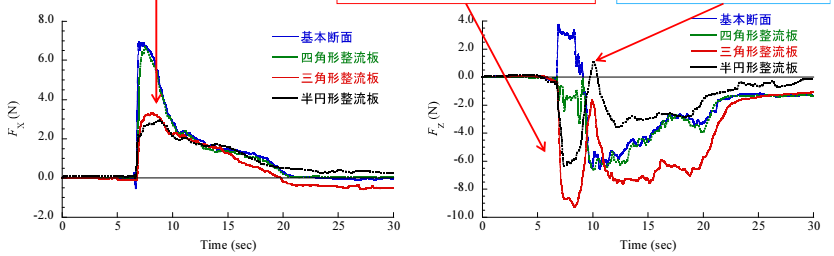
基本断面　三角形

四角形　半円形

三角形・半円形プレートの設置で，水平力を半分に．

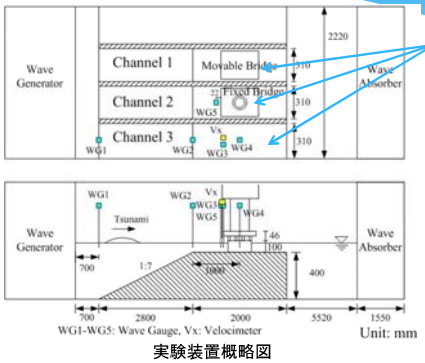
四角形・三角形プレートの設置で，上向き鉛直力をゼロに．

半円形プレートの設置で，鉛直力を1/4に．



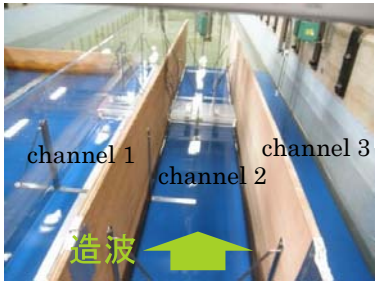
桁の流出限界に関する実験

実験検討SWG-9



実験装置概略図

3つの水路を設置（channel1,2,3）



・channel1固定していない桁を設置
　➡ 流出の有無を記録
・channel2固定した桁を設置
　➡ 波力・波圧を計測
・channel3桁を設置しない水路
　➡ 通過波の水位変動・桁前面位置の流速を計測

➡ 流出限界時の波力を測定

解析SWG-1 数値波動水槽解析における課題

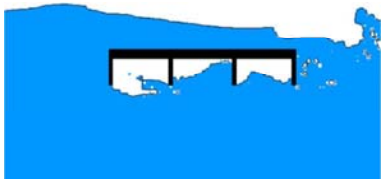
●**目的**：流体解析における流体・構造連成の重要性を鑑み，津波と橋梁の連成を解析できる研究事例を紹介し，どの解析手法を採用するかの判断の一助となる情報を提供する．（津波特性を把握するための平面2次元計算は取り扱わない．）

①造波

・如何に実現象に近い波を再現するか
（実現象において橋梁に衝突する津波はどのようなものか）
・流速、波高等のパラメータをどのようにコントロールするか

②二相計算

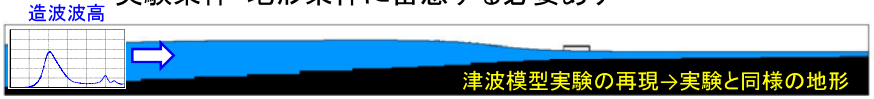
・桁間の空気塊が波力にどのような影響を及ぼすか
・オーソライズされた二相計算の数値波動水槽解析が理想
・CADMAS-SURF/3D（公開版）では空気塊の簡易的な計算のみ



解析SWG-2 造波方法

①任意の造波

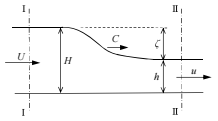
・実験の再現・津波伝播・遡上解析結果の使用　etc
・実験条件・地形条件に留意する必要あり



②段波の関係式（福本ら）による造波

・初期水位・波高・流速が一定の関係をもつ造波（水平床）
・波高・流速を制御しやすいが関係式による制約あり

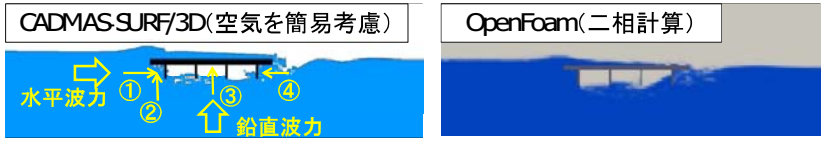
$$U = \frac{C\zeta}{H}\sqrt{\frac{gH(H+h)}{2H(H-\eta\ \zeta)}}$$

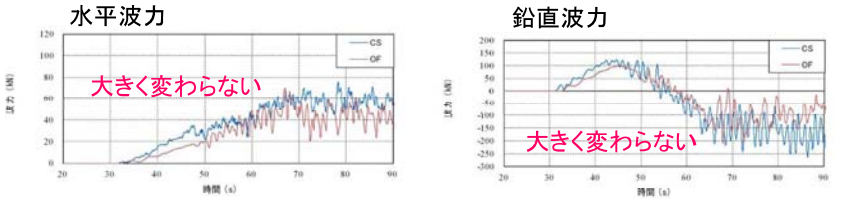


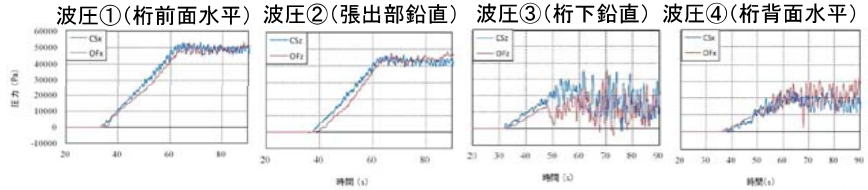
I とⅡ断面の流量一定

解析SWG-3 CADMASによる簡易的な二相計算

CADMAS（空気を簡易考慮）と二相計算の比較（水位が漸増）

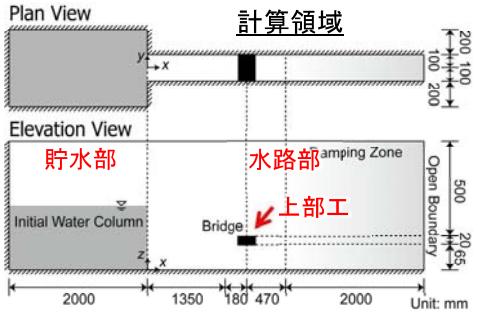


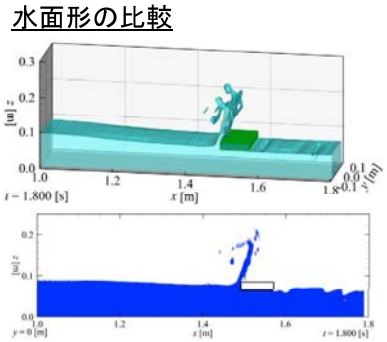




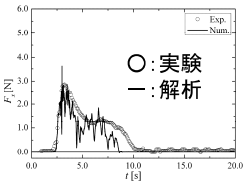
解析SWG-4 二相流モデルによる解析

再現性の検証と津波力の発生機構の検討（桁固定）

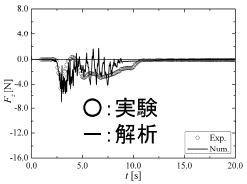




水平力Fxの比較



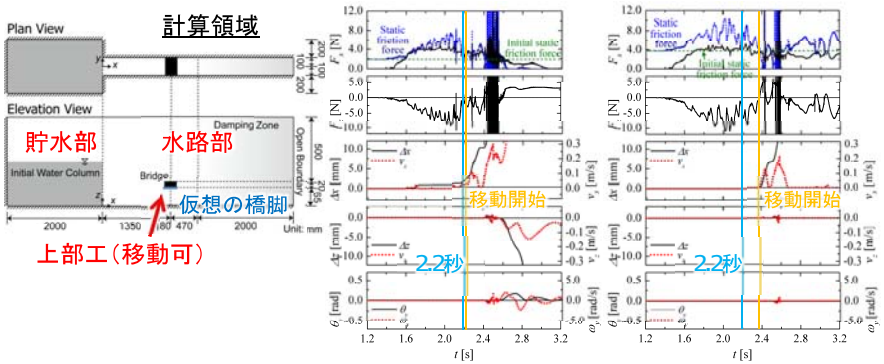
鉛直力Fzの比較



→水理実験を概ね再現

解析SWG-5 二相流モデルによる解析

桁の移動に与える津波力の影響の検討



密度1.0×10³ kg/m³のとき　密度2.0×10³ kg/m³のとき

2.2秒過ぎ

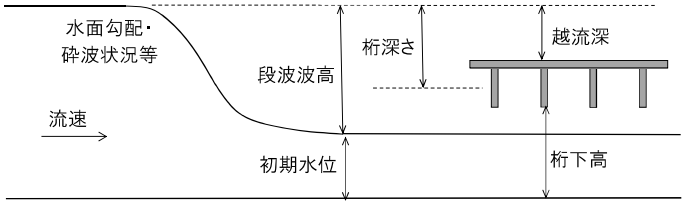
- ρ_Lが小さいとき：F_2の増加とともに静止摩擦力が減少し，F_1がそれを上回る ⇒ 上部工が大きく移動し始めた
- ρ_Lが大きいとき：静止摩擦力が大きいために，約2.4秒まで移動が生じず ⇒ F_2が正となり少し移動

⇒ 静止摩擦力を評価する際におけるF_2の考慮の重要性

解析SWG-6 解析によるパラメータスタディ

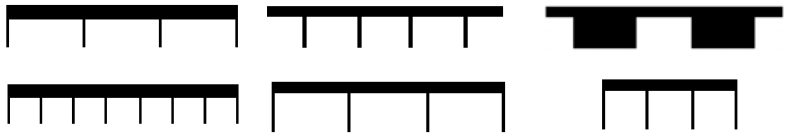
①津波特性

・波形、波高、流速、越流深さ、桁下高 etc

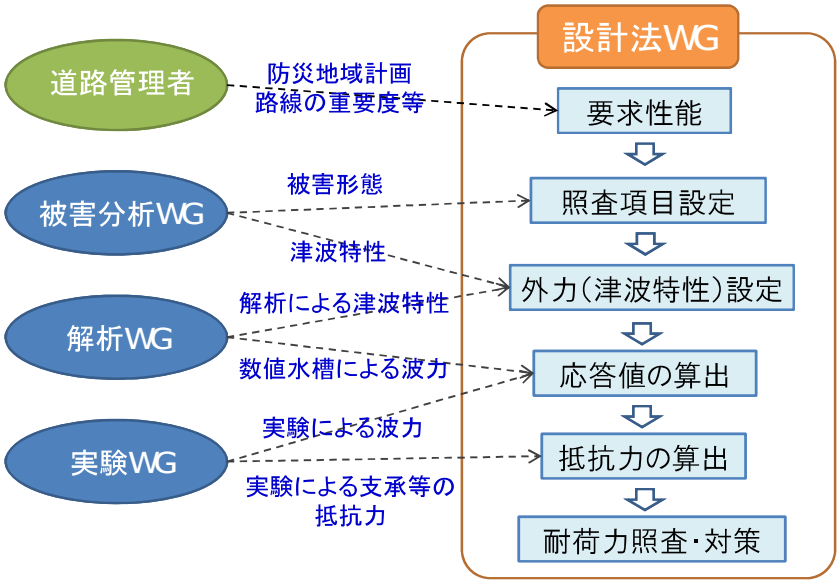


②構造特性

・桁高、幅員、張出し形状、桁下形状 etc



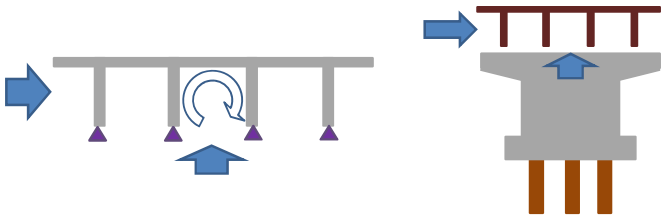
設計法SWG-1　設計法SWGの位置付け



設計法SWG-3　被害形態と照査項目

・被害形態を踏まえ、照査項目を設定

・支承部反力、下部工・基礎の安定 etc



設計法SWG-4　想定する津波外力

・津波特性を算定

→流速・波高・流向・水面の時間変化 etc

・津波波形の設定

→段波 or 漸増波、砕波の有無 etc

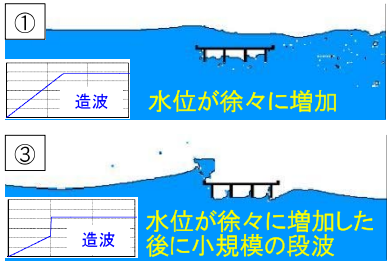
⇒津波特性は橋梁の波力に影響するため重要

・東日本太平洋沖地震で観測された津波映像解析による津波特性を検証と、その再現方法を検討

⇒設計で考慮すべき津波特性（ケース）を設定

設計法SWG-5　想定外力と津波による応答値の算出

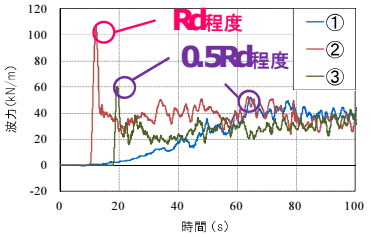
造波の勾配（水面上昇速度）を変化させたときの波力の変化



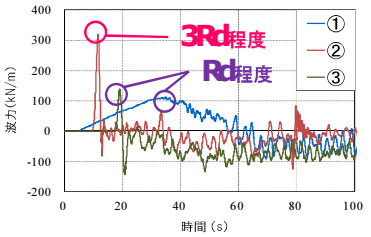
津波特性により波力が大きく異なる

（最大流速は全て5m/s、4主桁の例）

水平波力　（イメージ）

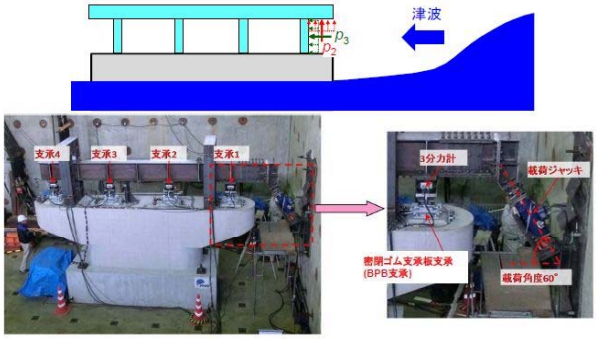


鉛直波力　（イメージ）



設計法SWG-6　津波に対する抵抗力

- 支承部：弾性範囲or降伏耐力or破断耐力、
  水平力と鉛直力の連成、各個撃破、
  支承耐荷力に支配的となる部位　etc
- 下部工・基礎：安定性照査、各部位の耐力照査 etc



土木研究所による支承部の耐荷力実験の例

設計法SWG-2　津波に対する橋梁の設計法の提案

①橋に求める耐津波性能の整理
→海岸構造物のようにL1、L2を設定して、防災か減災かの
組み合わせ等を整理。防災計画ともリンク。

②設計波力を用いて、耐荷力の評価事例（フレーム等）を提示
→簡易式による評価と詳細解析評価による試算例を例示

③対策の考え方と例示
→どの程度の対策でどの程度の性能が向上するか・・等

[その他設計上の留意事項]

①津波に随伴して生じる現象について
- 船舶、瓦礫等の漂流物の衝突に対する考え方
- 基礎の洗掘に対する考え方

②耐震設計との関係性の整理
- 対策優先度、複合応答、塑性化程度、機能分離型支承構造 etc

③津波を考慮した橋梁計画
- 応急復旧しやすい支間割、線形 etc