第６回CAESAR講演会

性能目標に応じた橋の耐震対策と津波の影響への対応

独立行政法人　土木研究所
構造物メンテナンス研究センター

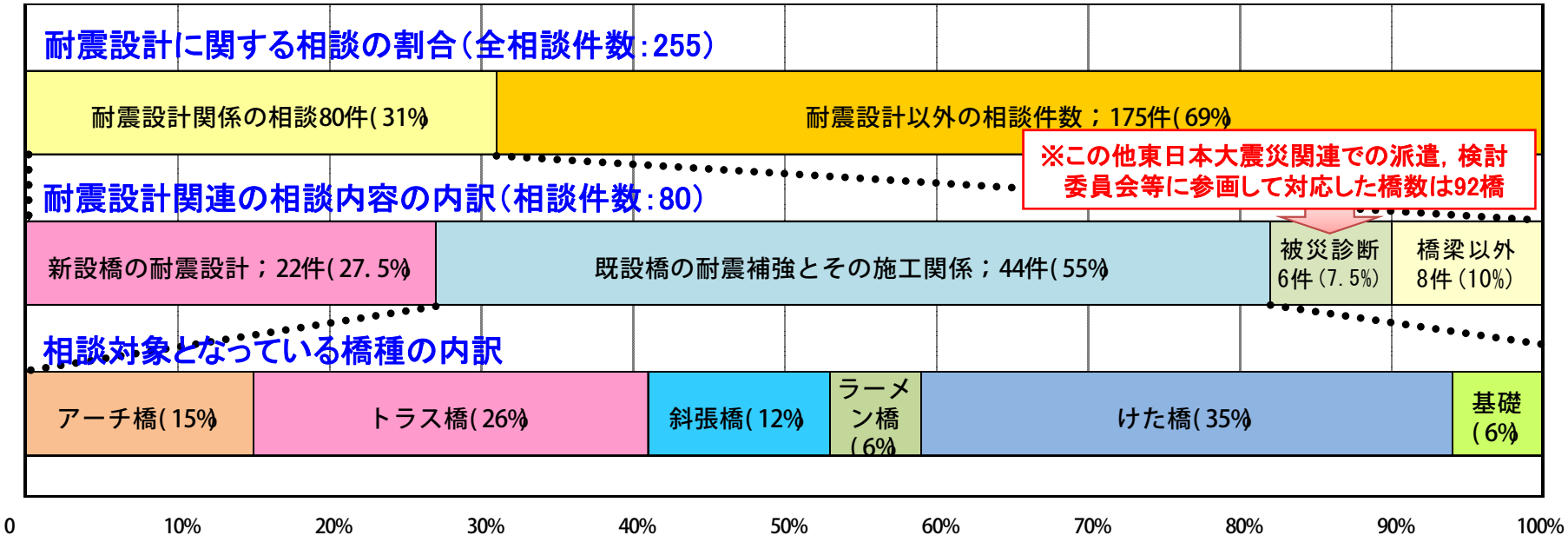
上席研究員　　星隈順一

講演の内容

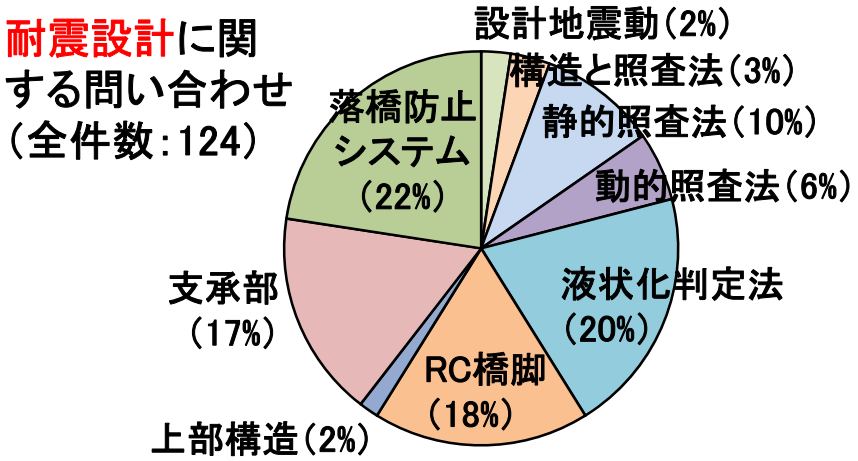
- ✓ 耐震設計関係の技術相談等への対応
- ✓ 橋の耐震性能の評価に関する近年の取り組み
  - ・橋の耐震性能と橋を構成する部材の限界状態の設定
  - ・実験等に基づく部材の限界状態とその評価
  - ・耐震主部材の耐久性
- ✓ 津波の影響を受ける橋に関する近年の取り組み
- ✓ 今後の展望と必要とされる研究・技術開発

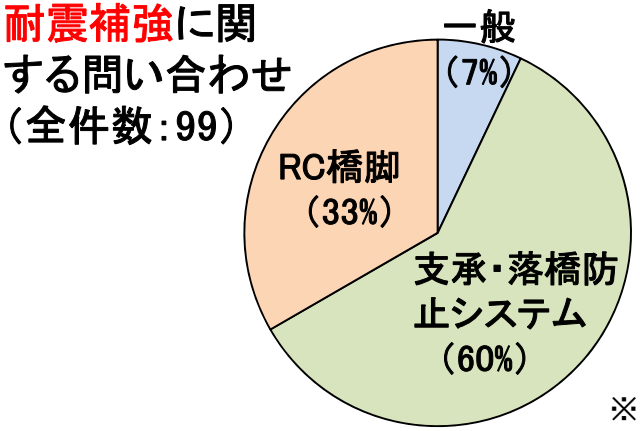
耐震設計関係の技術相談や質問対応の状況

○平成20年度～24年度までの耐震設計・耐震補強に関する個別の技術相談



○平成24年道路橋示方書改定後の耐震設計・耐震補強に関する質問

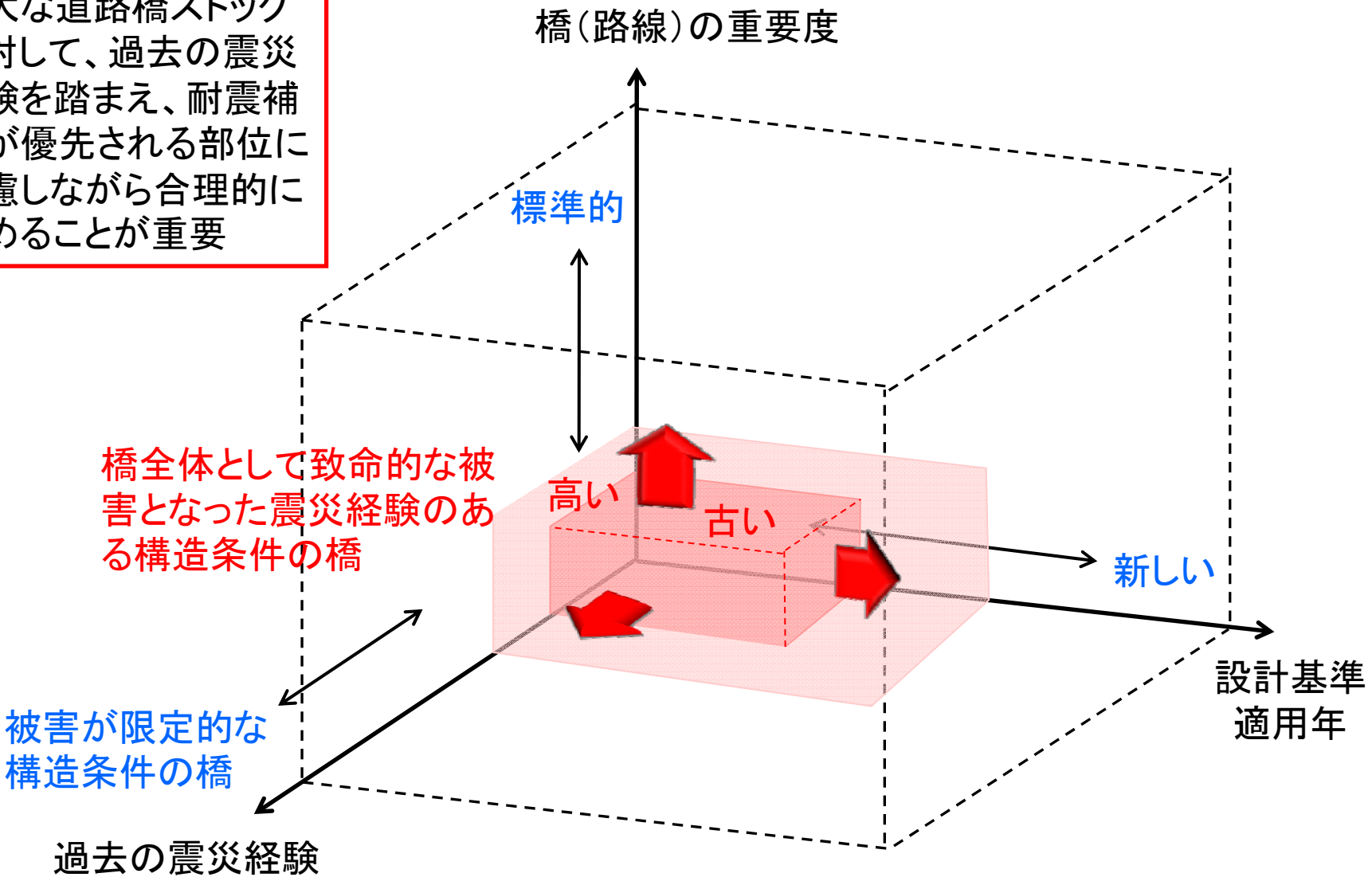




※平成25年8月時点

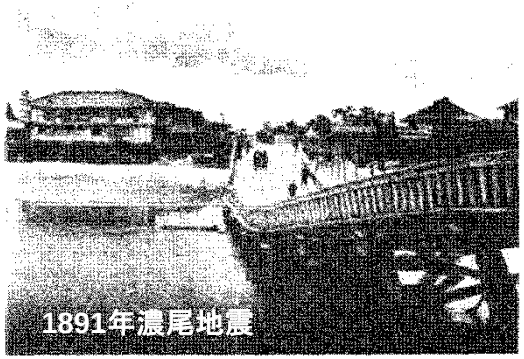
道路橋の耐震補強における３つの軸

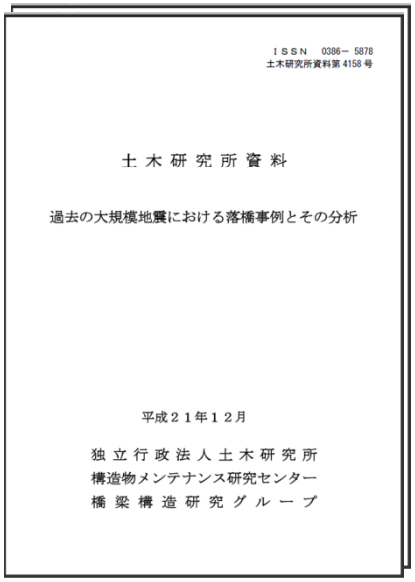
膨大な道路橋ストックに対して、過去の震災経験を踏まえ、耐震補強が優先される部位に配慮しながら合理的に進めることが重要



過去の大地震による落橋事例から学ぶ

1891年濃尾地震から最近までの地震による落橋事例を集約



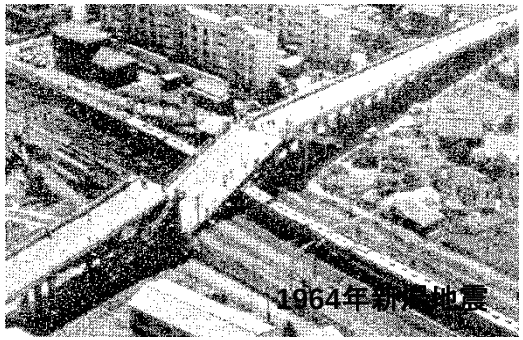

ISSN 0386－5878
土木研究所資料第4158号

土木研究所資料

過去の大規模地震における落橋事例とその分析

平成21年12月

独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ



過去の大地震による落橋事例から学ぶ

1891年濃尾地震から最近までの地震による落橋事例を集約

ｼﾅﾘｵ	被害原因	橋数	径間数
A	下部構造が倒壊	23	200
B	下部構造が大変位	6	15
C	上部構造の橋軸方向への大変位	7	11
D	上部構造の直角方向への大変位	5	7

致命的な落橋を防止するという観点からは，まず

✓ 上部構造を支持する下部構造自身の耐震性の向上
✓ 支承破壊後の桁の下部構造天端からの逸脱防止対策

過去の大地震による落橋事例から学び取った相場感

①過去の震災で地震動により落橋・倒壊につながった橋の構造条件

- ✓ 昭和55年道路橋示方書よりも古い基準を適用した段落し部のある鉄筋コンクリート製単柱橋脚
- ✓ 昭和55年道路橋示方書よりも古い基準を適用した鋼製単柱橋脚
- ✓ 昭和55年道路橋示方書よりも古い基準を適用した段落し部のある鉄筋コンクリート製単柱橋脚以外の橋脚（壁式橋脚・ラーメン橋脚）で連続橋の固定橋脚
- ✓ 両端が橋台でない単純桁
- ✓ ゲルバー桁
- ✓ パイルベント橋脚・基礎
- ✓ 液状化または流動化のおそれのある地盤にあり，かつ，支持層に達していない基礎

②落橋や倒壊には至ってないが大がかりな補修を要するような損傷が生じるおそれのある橋の構造条件

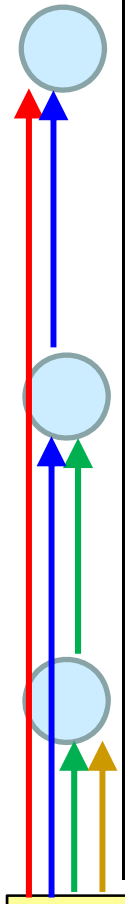
- ✓ 昭和55年道路橋示方書よりも古い基準を適用した曲げ破壊型の鉄筋コンクリート製橋脚
- ✓ 頂版とケーソン本体の接合が不十分なケーソン基礎
- ✓ 液状化のおそれのある地盤や軟弱地盤にある既製コンクリート杭

道示に規定されている目標とする耐震性能とその観点

橋の耐震性能	安全性	供用性	修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
耐震性能1： 健全性を損なわない性能	落橋に対する安全性を確保	地震前と同じ橋としての機能を確保	機能回復のための修復を不要	軽微な修復
耐震性能2： 地震による損傷が限定的で、機能の回復が速やかに行い得る性能	落橋に対する安全性を確保	地震後橋としての機能を速やかに回復	機能回復のための修復が応急修復で対応可能	比較的容易に恒久復旧を行うことが可能
耐震性能3： 地震による損傷が致命的とならない性能	落橋に対する安全性を確保	－	－	－

既設橋の耐震補強で目標とする耐震性能の設定の例

橋の耐震性能	安全性	供用性	修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
地震による損傷が限定的で、機能の回復が速やかに行い得る性能	落橋に対する安全性を確保	地震後橋としての機能を速やかに回復	機能回復のための修復が応急修復で対応可能	比較的容易に恒久復旧を行うことが可能
地震により損傷が生じる部位があり、その恒久復旧は容易ではないが、橋としての機能の回復は速やかに行い得る性能	落橋に対する安全性を確保	地震後橋としての機能を速やかに回復	機能回復のための修復が応急修復で対応可能	恒久復旧を行うことが可能
地震による損傷が致命的とならない性能	落橋に対する安全性を確保	－	－	－



致命的な被害となった震災経験のある構造条件の橋

橋の耐震性能評価に関する最近の研究の取り組み

	新設橋	既設橋
上部構造	特殊橋上部構造部材の地震時限界状態の評価	制震装置を用いた特殊橋の地震応答評価
支承部	ゴム支承，制震装置の性能評価試験方法	変状が生じたゴム支承の診断技術
落橋防止システム	震災経験に基づく落橋防止構造の要件分析	
橋脚	地震時限界状態の評価技術 配筋の合理化	震災経験に基づく耐震補強効果の検証 橋脚躯体，橋座部の応急復旧技術 耐震補強部位の耐久性の検証
橋台	地震時土圧の評価 新形式構造（軽量盛土，補強土壁）	
基礎	動的解析による基礎の耐震照査技術 液状化判定手法の高度化	既設基礎の耐震性判定技術

地震の影響を支配的に受ける部材の限界状態の評価

５．５　地震の影響を支配的に受ける部材の基本　（道示Ⅴ）

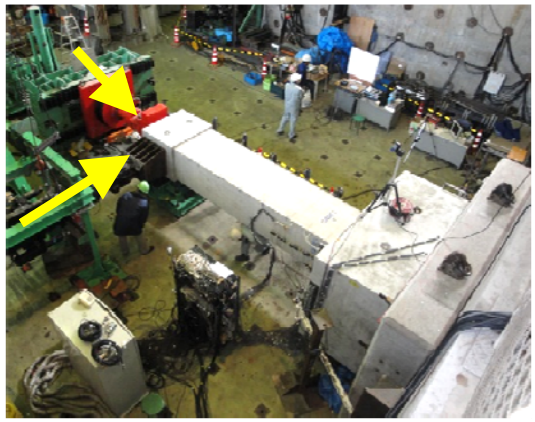
(1) 地震の影響を支配的に受ける部材については，実験等の検証により次の事項を満たすことが明らかでなければならない。

1) 破壊形態が明らかであり，破壊形態に応じて破壊に対する安全性が確保できること

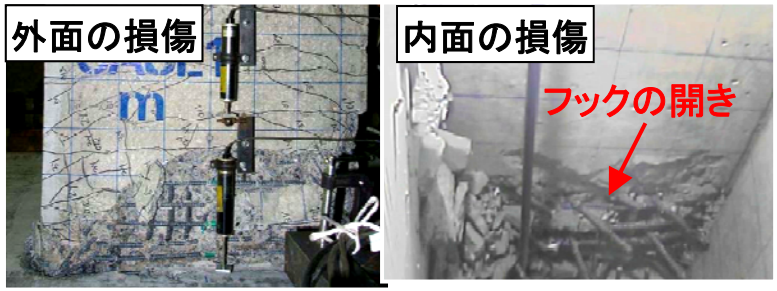
2) 耐震設計で設定する限界状態までの範囲においては，供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動すること

(2) 地震の影響を支配的に受ける部材については，地震による作用を考慮した実験等の検証により，部材の抵抗特性を評価する方法が明らかでなければならない。

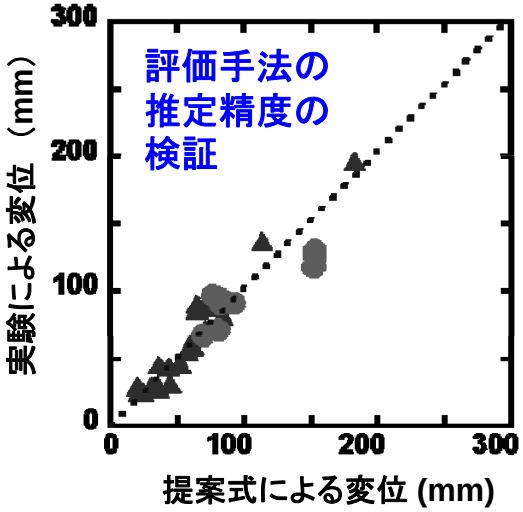
RC橋脚の正負交番載荷実験による限界状態とその評価の検証



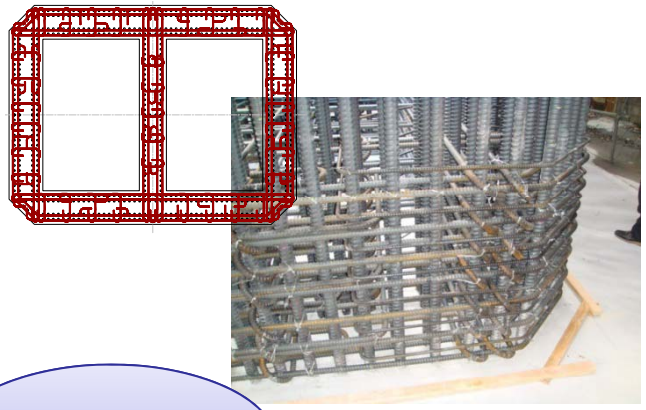
<例>中空断面橋脚の最終的な破壊形態



<例>充実断面RC橋脚の変形能



構造条件によって変わってくるRC橋脚の地震時限界状態



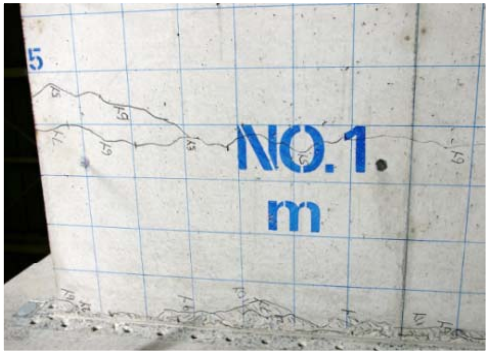
軸方向応力度

中空断面

一般的な充実断面
RC橋脚

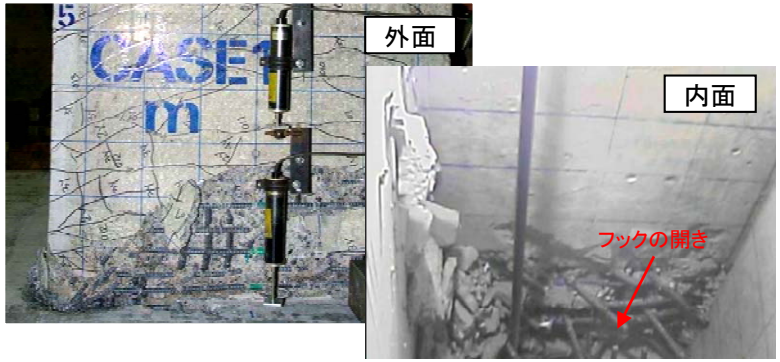
大断面
低鉄筋

軸方向鉄筋比



軸応力0.8N/mm^2，軸鉄筋比0.2%

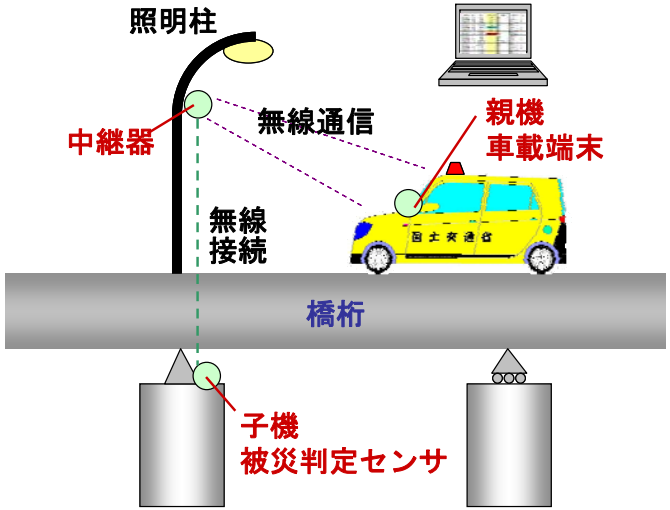
軸応力1.0N/mm^2，軸鉄筋比1.2%



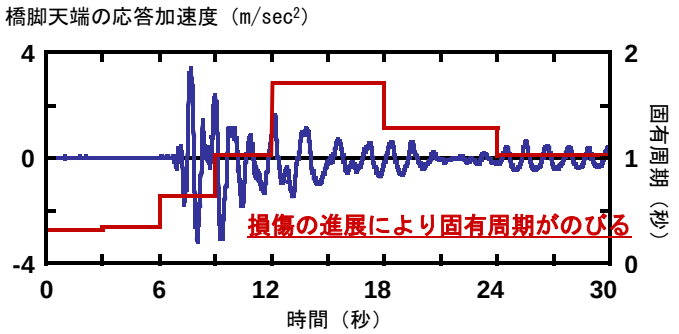
軸応力4.4N/mm^2，軸鉄筋比6.4%

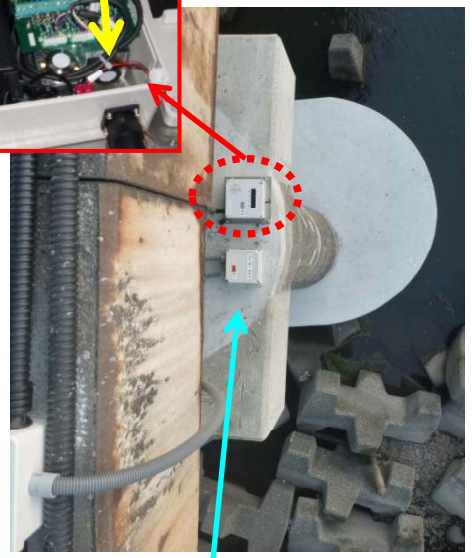
橋梁の地震時被災度判定システムの開発とその応用

土木研究所で開発したセンサー技術を震災後に応急復旧した橋の監視対策としても活用



応答周期の変化から応答塑性率を推定

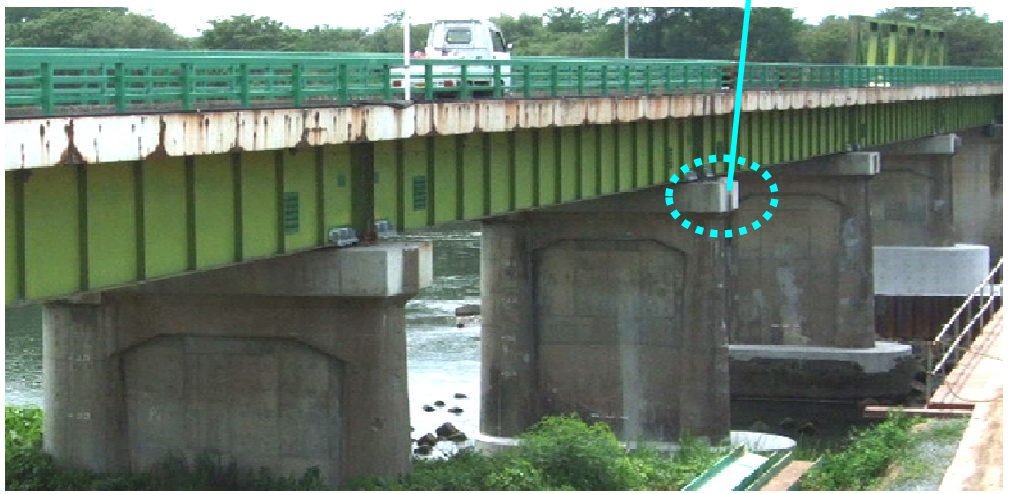




記憶型検知センサーによる地震被害判定システムを開発

地震の揺れに伴う周期の変化を感知し、その変化によって橋脚の変状を無線通信により端末に伝送するシステム

被害状況の把握の迅速化に貢献



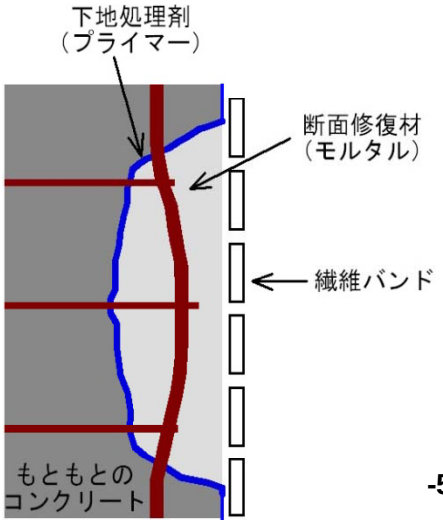
東北地方太平洋沖地震により下部構造に被災が生じた橋への適用

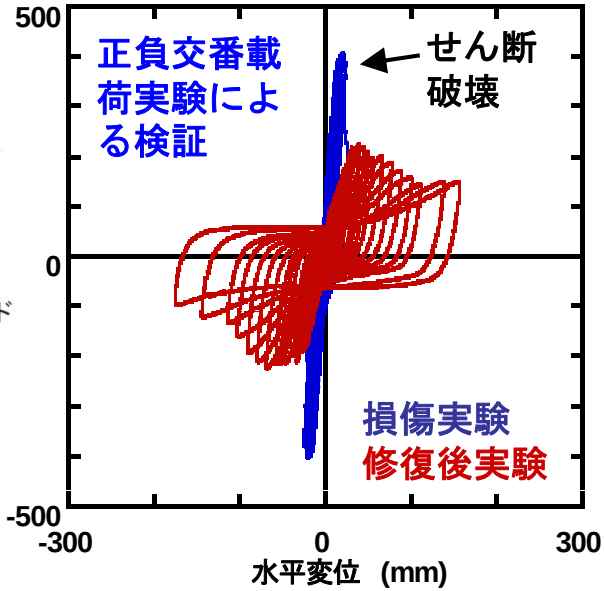
せん断損傷が生じたRC橋脚に対する応急復旧技術の開発

機械式定着繊維バンド巻立て工法を開発

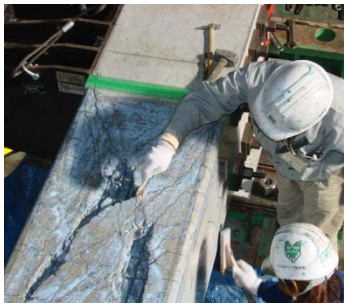
開発目標

- 余震に対する耐震性の応急的確保（せん断破壊の防止）
- 震災後でも入手しやすい材料と資材
- ハンドリングがよく短時間で施工可能
- 本復旧に影響を及ぼさない





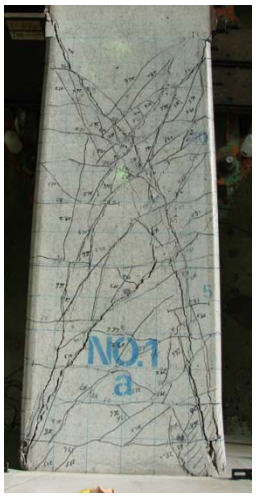
はつり落とし

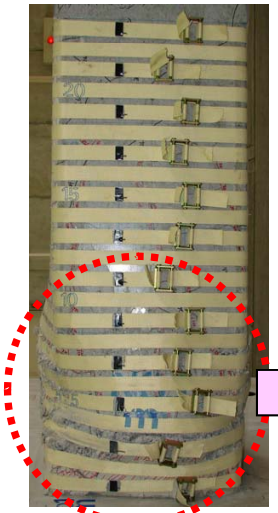


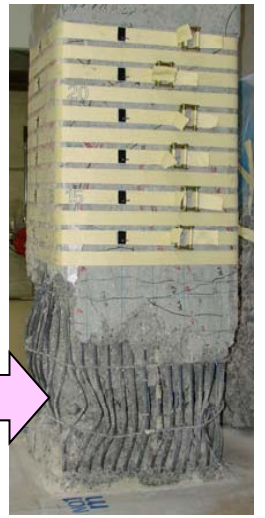
プライマー塗布

断面修復

繊維バンド巻立て





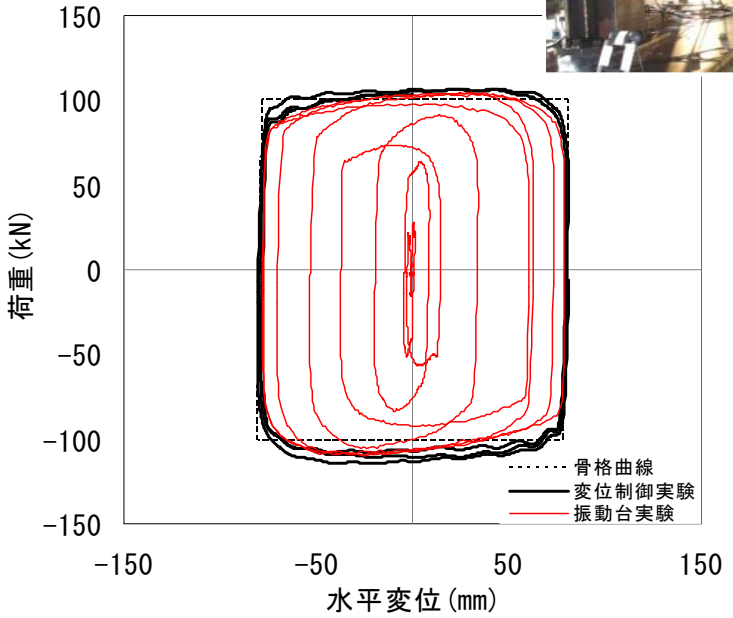


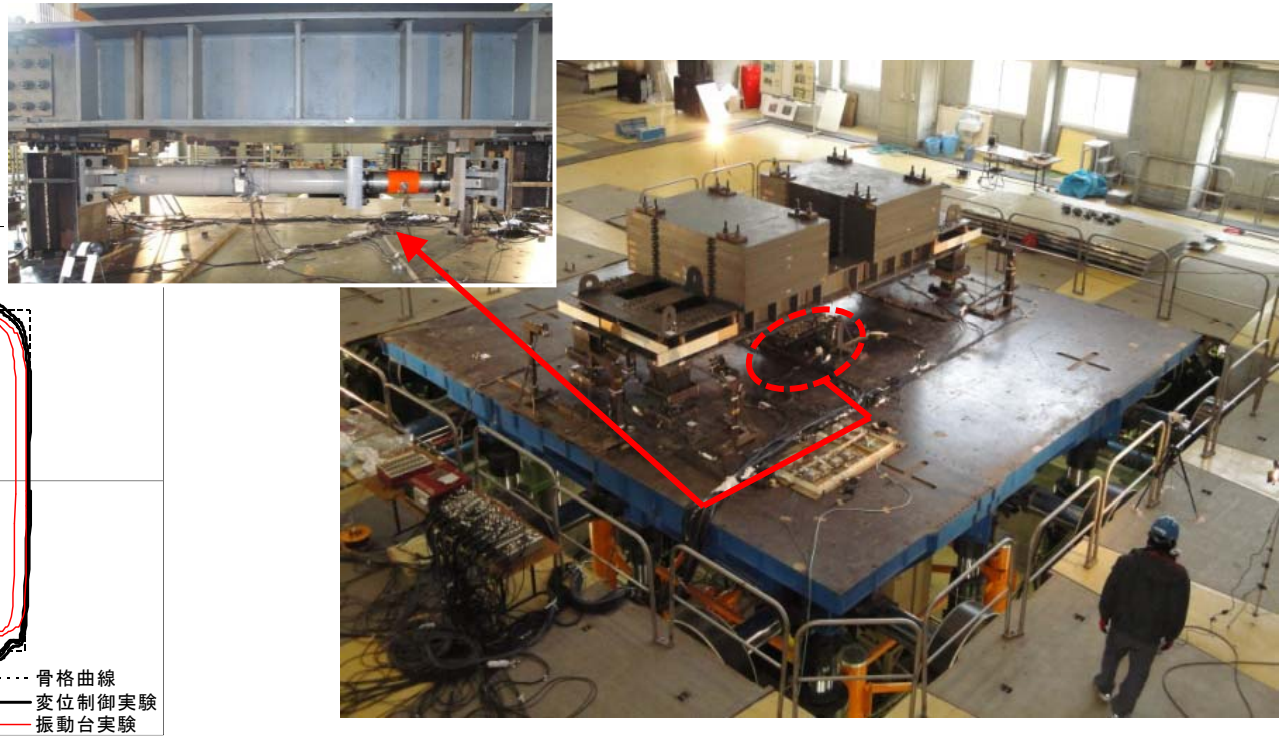
せん断破壊 ⇒ 粘りのある曲げ破壊へ

民間の技術力を適切に橋に活用できるようにするための共同研究の実施

橋梁に用いる制震ダンパーの性能検証法及び設計法に関する共同研究

- ✓ 制震装置の地震時応答特性を踏まえた橋の耐震設計への反映のさせ方
- ✓ 制震装置が取り付けられた側の部材の耐震設計
- ✓ 制震装置の維持管理の条件



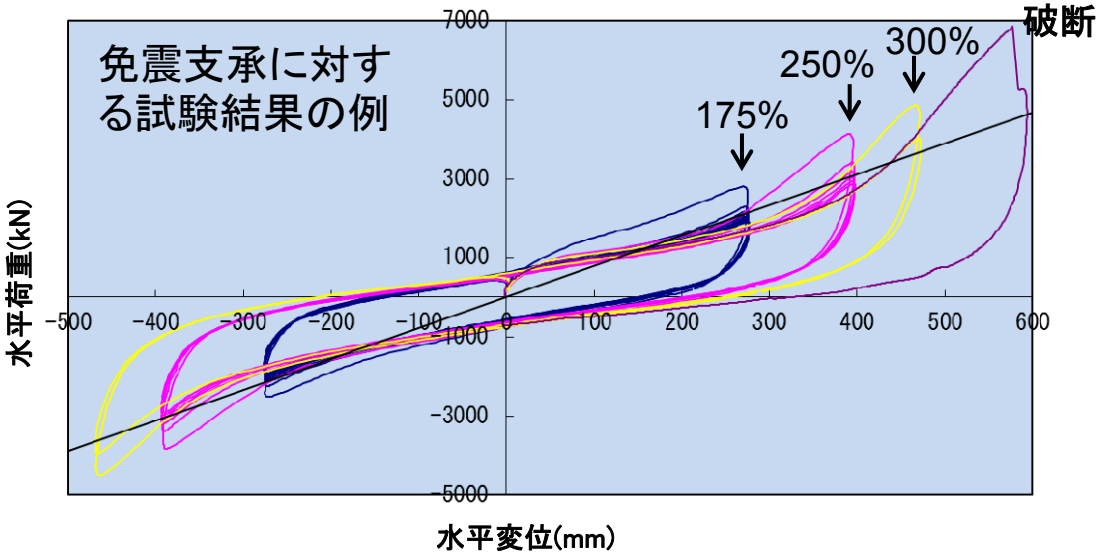


土木研究所が所有する三次元大型振動台に基づく制震装置の性能評価

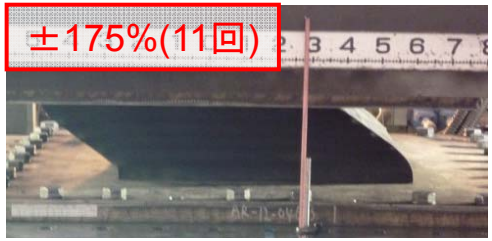
民間の技術力を適切に橋に活用できるようにするための共同研究の実施

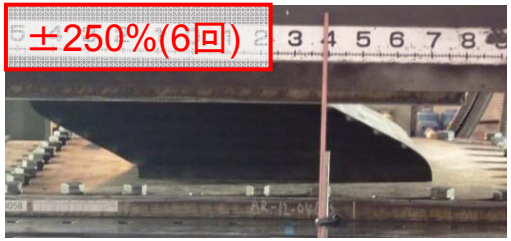
ゴム支承の地震時の性能の検証方法に関する研究（H25～H26.3）

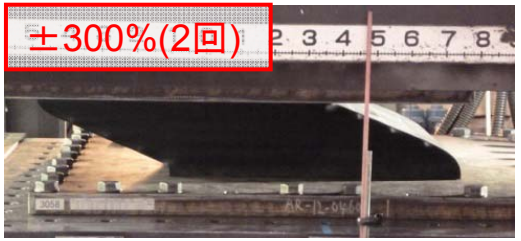
せん断変形能の評価

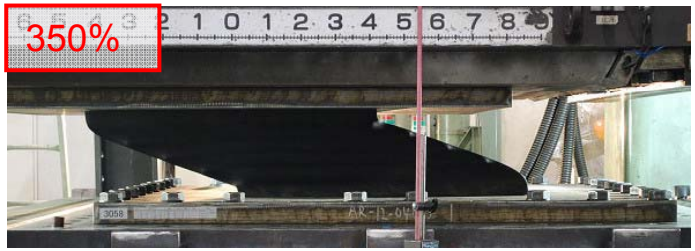


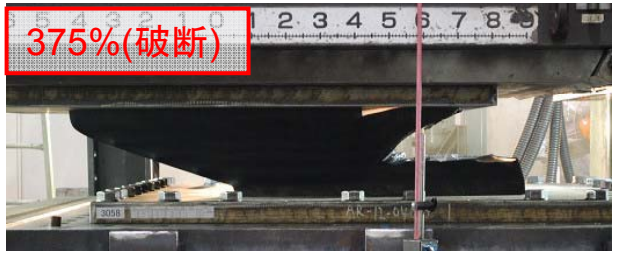
最終的な破壊に対して安全性が確保できるようにばらつきを考慮して許容値を設定







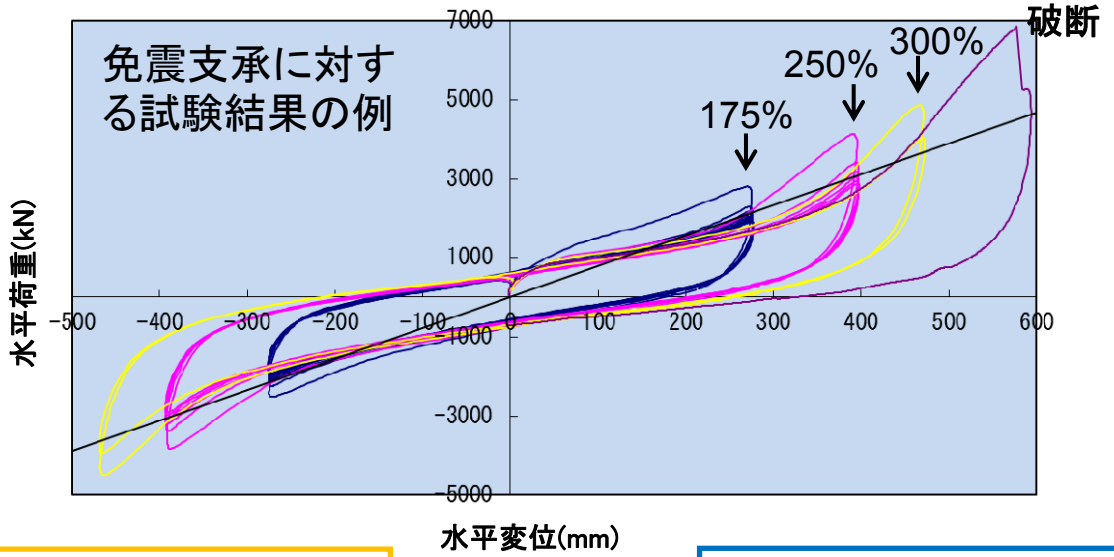


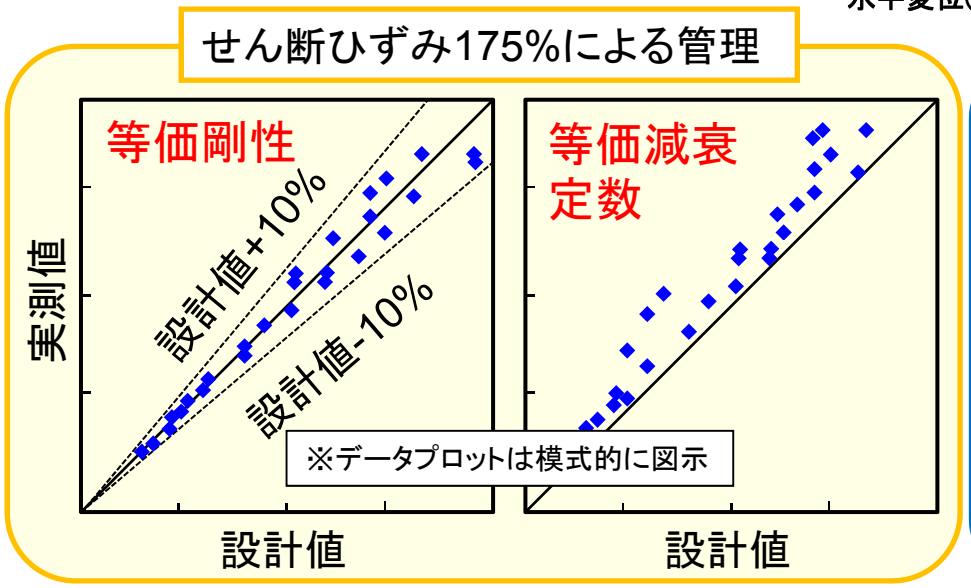


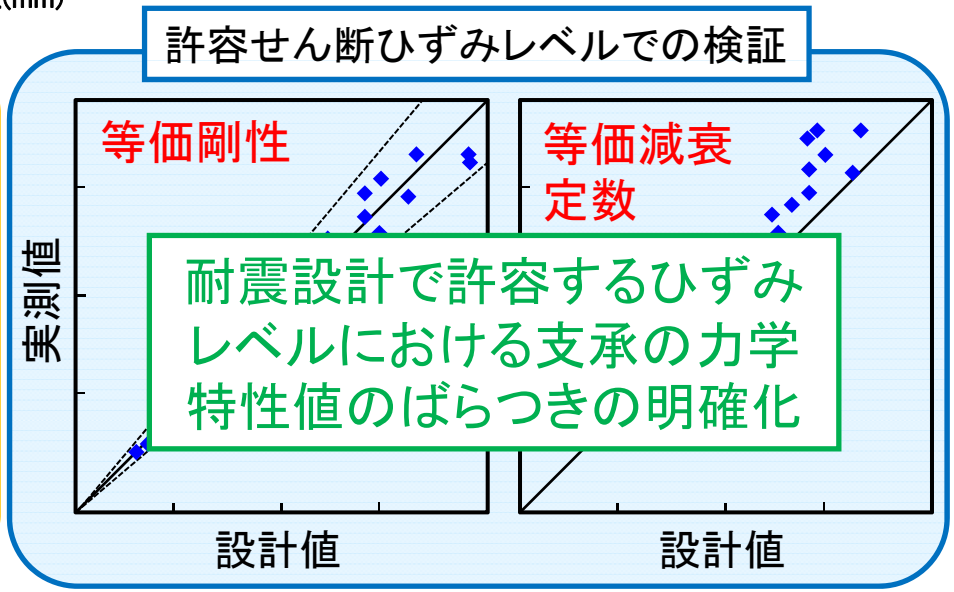
民間の技術力を適切に橋に活用できるようにするための共同研究の実施

ゴム支承の地震時の性能の検証方法に関する研究（H25～H26.3）

剛性，減衰特性の評価







支承部に生じた変状や損傷に対する耐震診断技術

経年劣化の影響による変状

地震動の影響による損傷

求められている研究項目

- ✓ 支承の材料特性に応じた経年変化のメカニズム
- ✓ 経年劣化や地震による部分的な損傷が耐荷力や変形能に与える影響
- ✓ 支承の変状や損傷状態に応じた点検・診断方法、補修方法

撤去部材を活用した耐震補強効果の持続性の検証

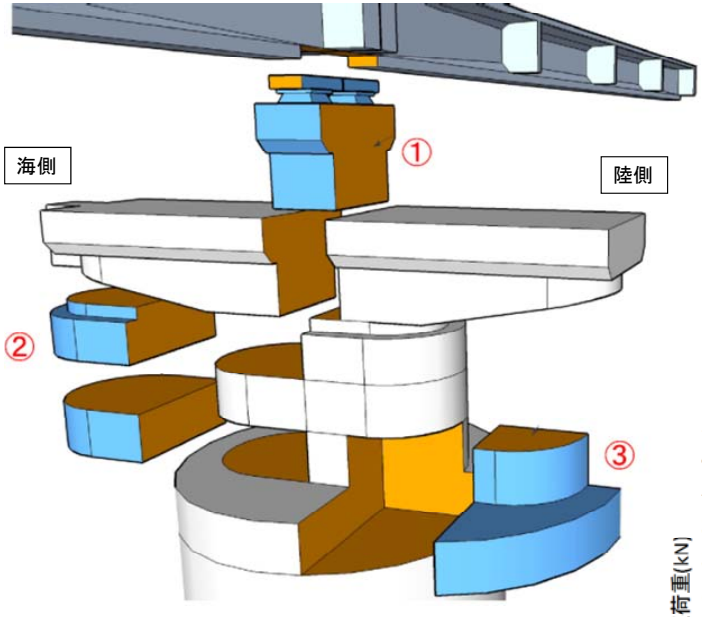
厳しい塩害環境下に長期間曝されてきた耐震補強済みのRC橋脚を対象として耐荷力試験等を実施

研究対象橋梁の全景（1967年竣工）

塩害による損傷を受けた主桁

塩害による損傷を受けたRC橋脚

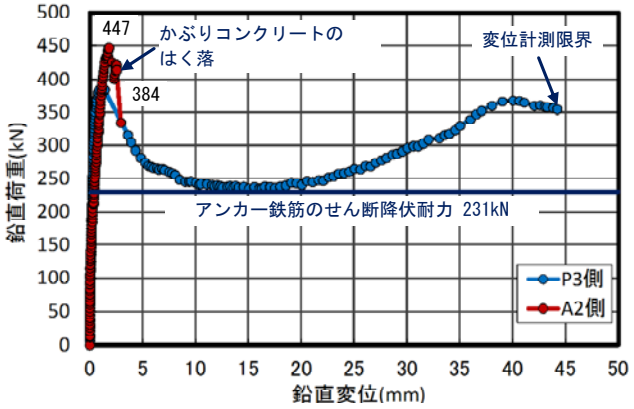
①沓座部の縁端拡幅補強部（施工後35年）
②，③躯体部のRC巻立て補強部（施工後8年）



採取部材と主な検証項目

①：縁端拡幅部の耐荷性能
②：RC巻立て部と既設部の健全性
③：RC巻立て部の軸方向鉄筋の定着性能

縁端拡幅部の載荷試験の状況

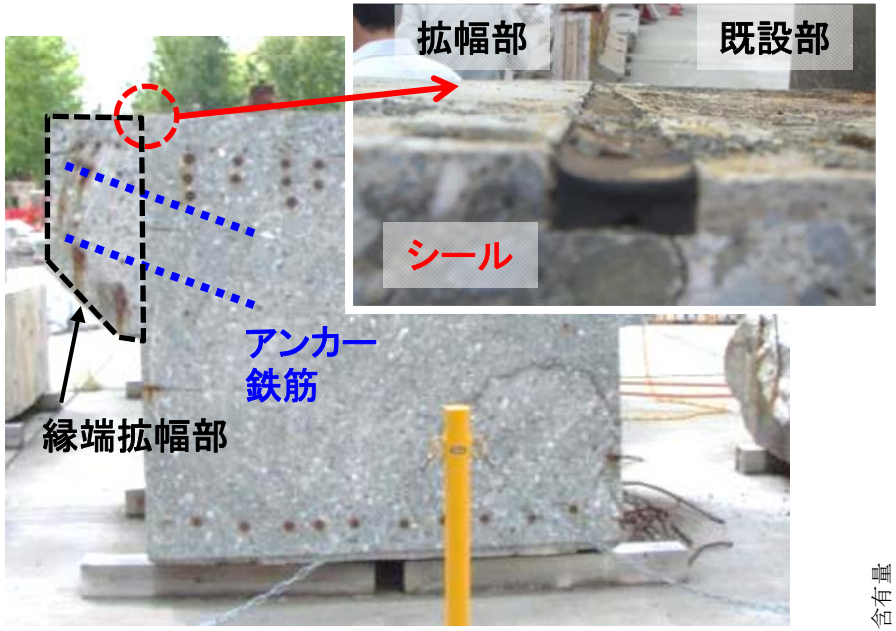


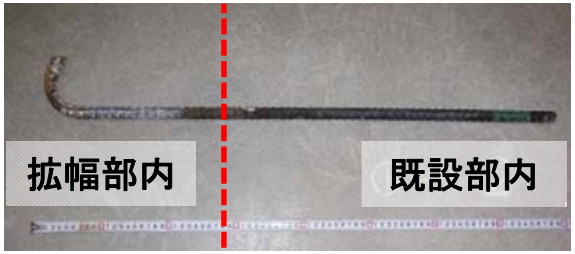
荷重－鉛直変位関係

撤去部材を活用した耐震補強効果の持続性の検証

- ◆ 縁端拡幅部：既設部と縁端拡幅部の境界上面のシールに機能低下をもたらすような損傷が生じてなく，アンカー鉄筋の保護に貢献
- ◆ RC巻立て部：適切なかぶりと鉄筋にエポキシ樹脂鉄筋の使用

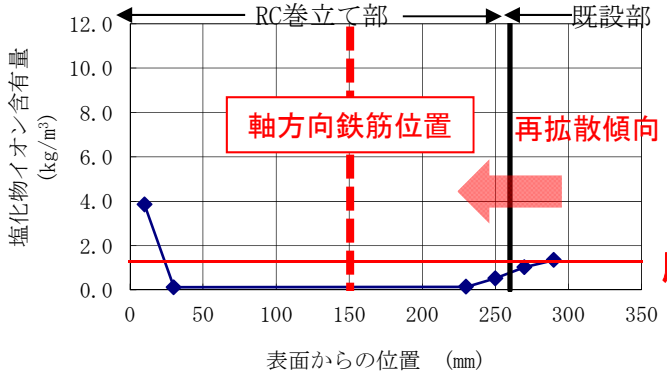
→ 塩害環境下における耐震補強効果の持続性の観点から検証





はつり出したアンカー鉄筋

はつり出したエポキシ樹脂鉄筋



腐食発生限界濃度（1.2kg/m³）

塩化物イオン含有量（柱基部）

津波の影響を受けるリスクのある橋の構造計画

２．１　耐震設計の基本方針

(2) 耐震設計にあたっては，地形・地質・地盤条件，立地条件，津波に関する地域の防災計画等を考慮した上で構造を計画するとともに，橋を構成する各部材及び橋全体系が必要な耐震性を有するように配慮しなければならない。

構造計画の考え方の例

- 津波に関する地域の防災計画等を参考にしながら津波の高さに対して桁下空間を確保する
- 津波の影響を受けにくいような構造的工夫を施す
- 上部構造が流出しても復旧しやすいように構造的な配慮をする

構造計画を検討する上での課題

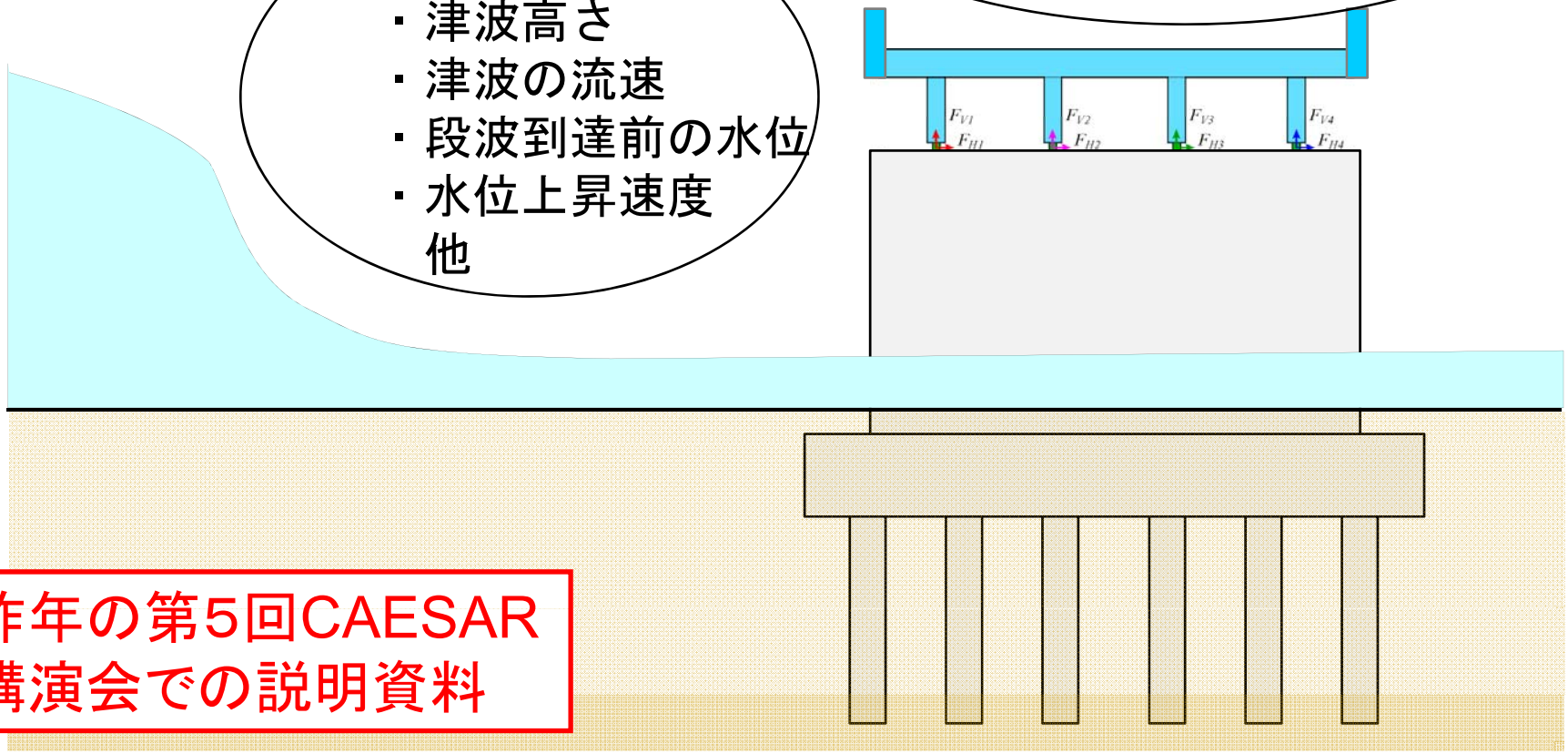
- 津波により橋が受ける影響度合いの評価手法
- 津波による影響低減のための構造的な配慮の具体策

津波の影響を受けた時の橋の挙動に関する課題

○数値解析シミュレーション
・橋梁構造への適用性

○構造特性による影響
・桁高さと幅員、高欄
・耳桁からの床版張出し長
・主桁間隔（本数）
・桁間の空気溜まりの影響
・並列側道橋の影響　他

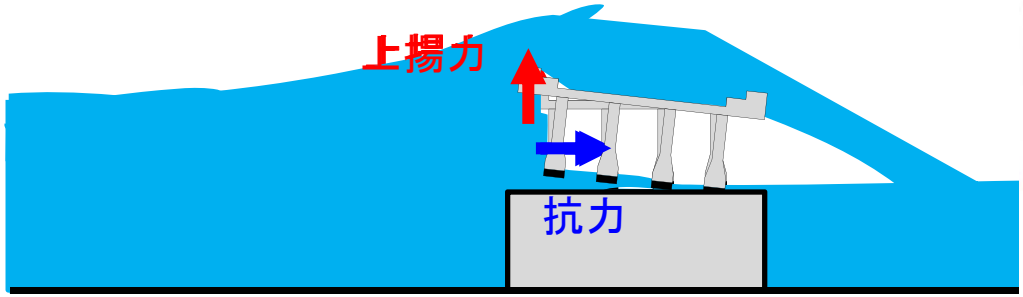
○津波の与え方
・津波高さ
・津波の流速
・段波到達前の水位
・水位上昇速度
他



昨年の第5回CAESAR講演会での説明資料

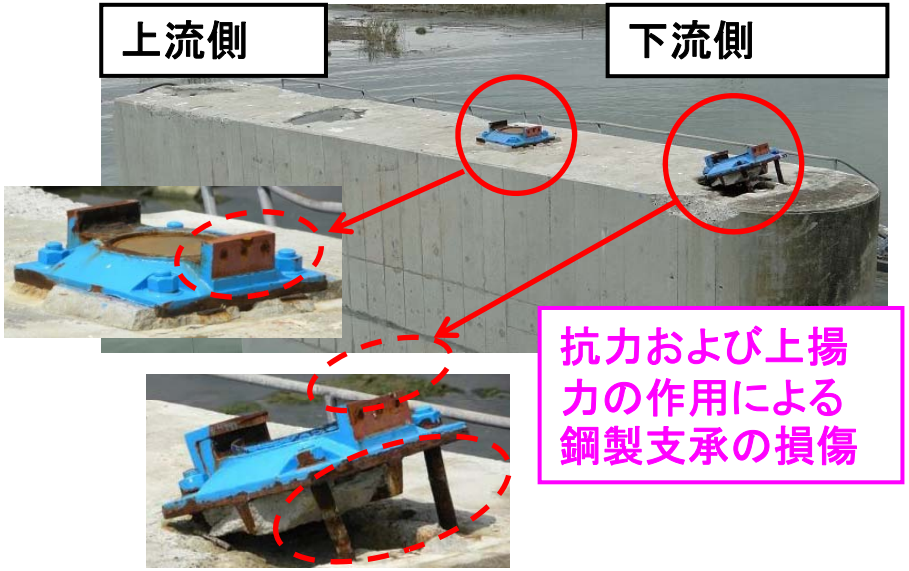
被害状況から想定される上部構造の流出形態

1) 津波による流体力の影響が大きい場合（段波状の津波）

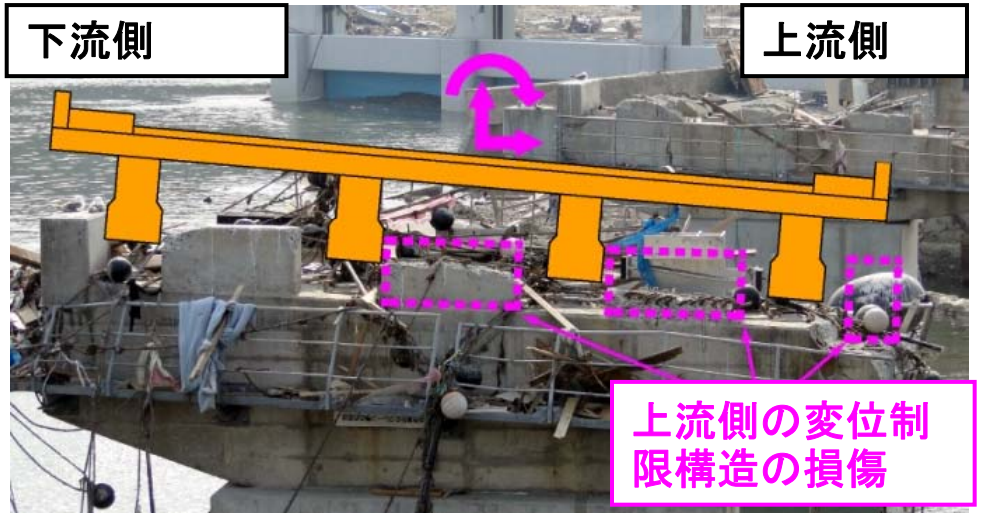


出典：九州工業大学　幸左研究室

小泉大橋(国道45号)

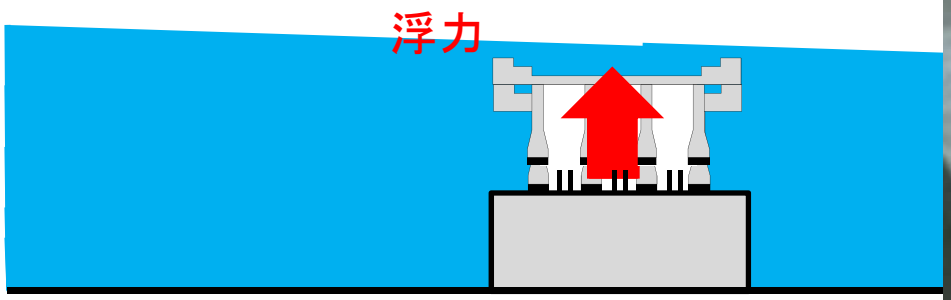


歌津大橋(国道45号)



被害状況から想定される上部構造の流出形態

2) 浮力の影響が大きい場合
（津波により水位が徐々に上昇する場合）



出典：幸左ほか，映像解析による歌津大橋の流出メカニズムの推定，
第15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，2012

歌津大橋(国道45号)

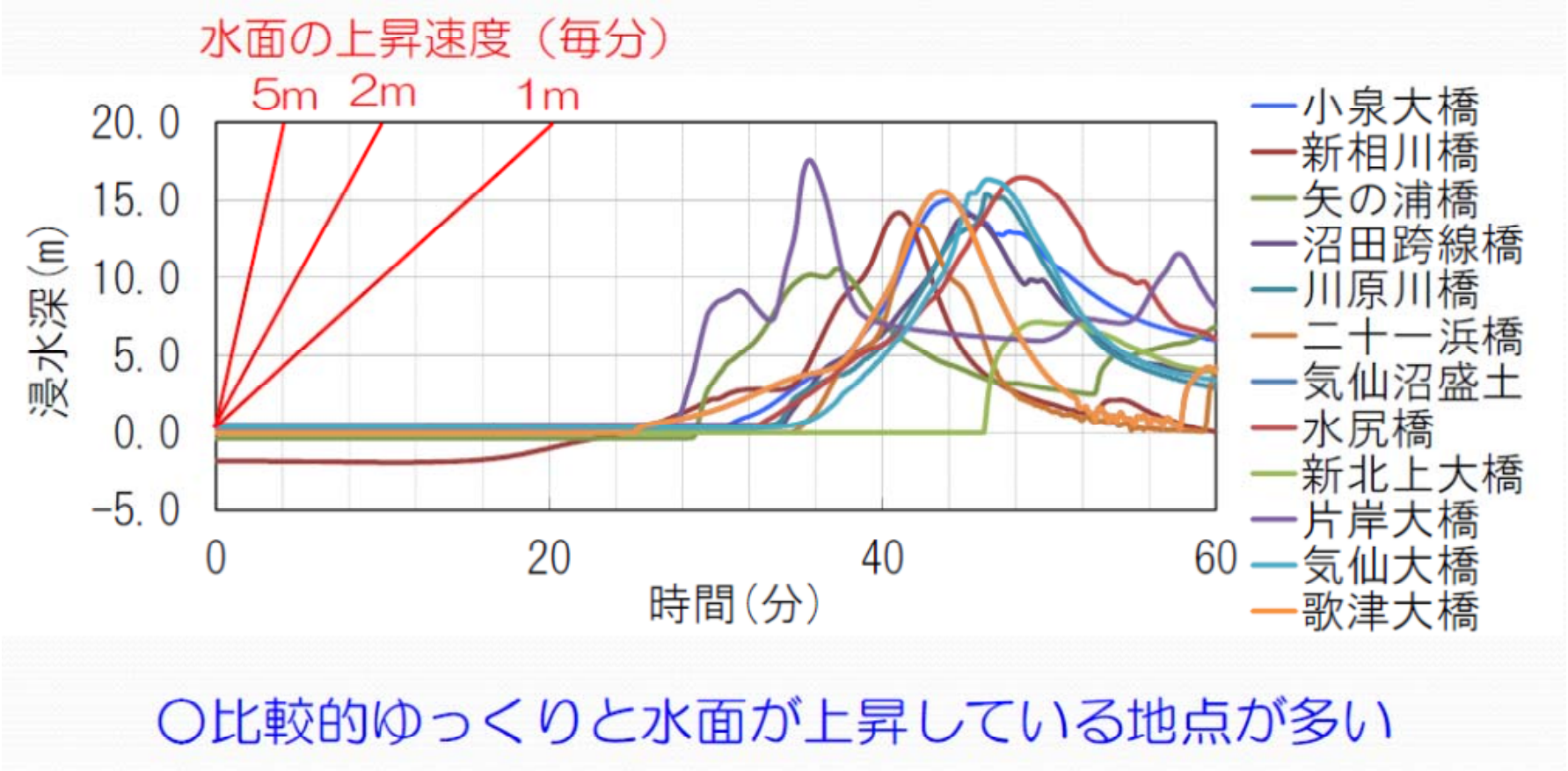
上部構造が裏返しにならずに流出

沼田跨線橋(国道45号)

損傷痕跡のない変位制限構造
（アンカーバーはほぼ真直ぐの状態）

津波の影響を受けた道路橋に作用した津波の特性

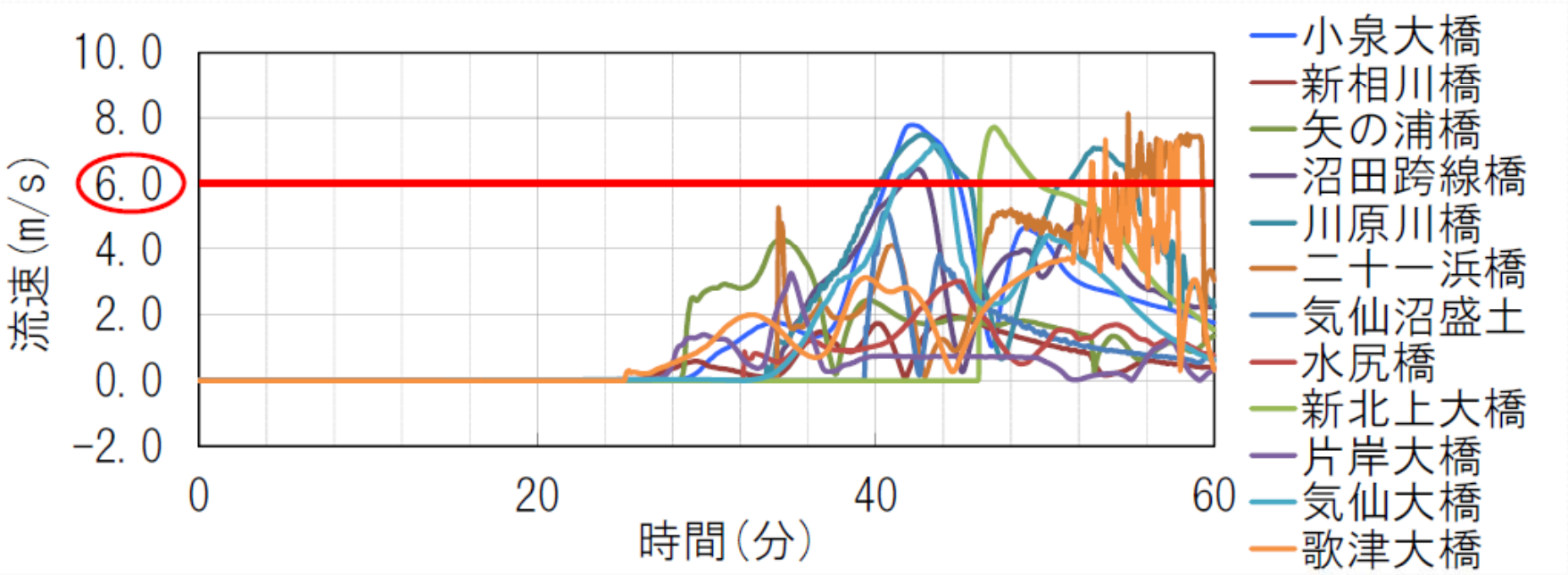
水位上昇



【出典】国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室：
構造物に対する津波作用の研究と今後の展望，東日本大震災報告会～震災から2年を経て～
平成25年3月19日

津波の影響を受けた道路橋に作用した津波の特性

津波の流速



○流速は大きいところで6～8m/s
○漂流物のビデオ計測による陸域での津波遡上速度
　平均6.0m/s (Kosa, 2012)とも整合

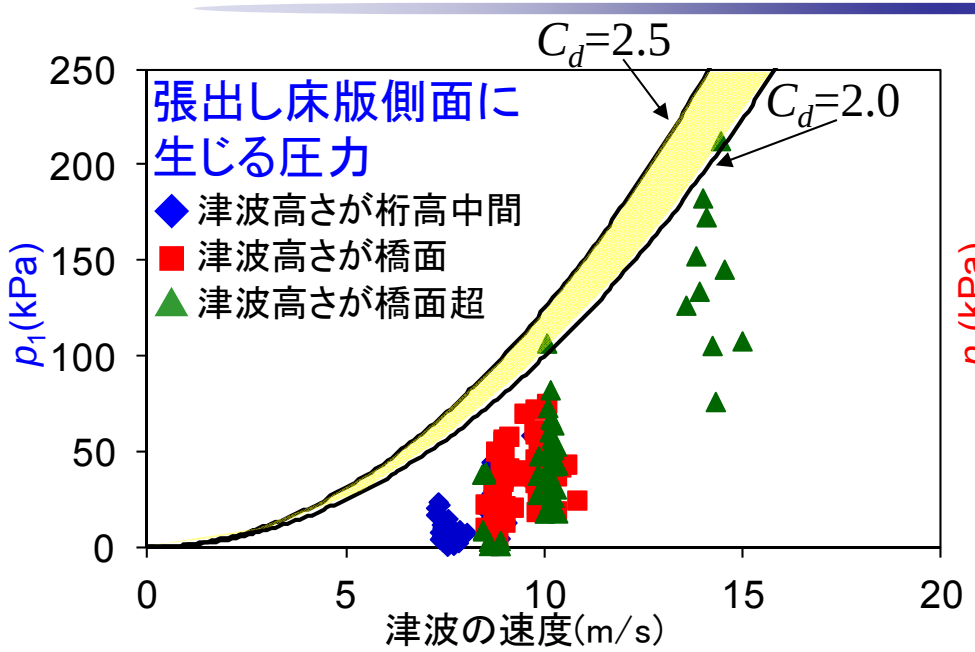
【出典】国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室：
構造物に対する津波作用の研究と今後の展望，東日本大震災報告会～震災から2年を経て～
平成25年3月19日

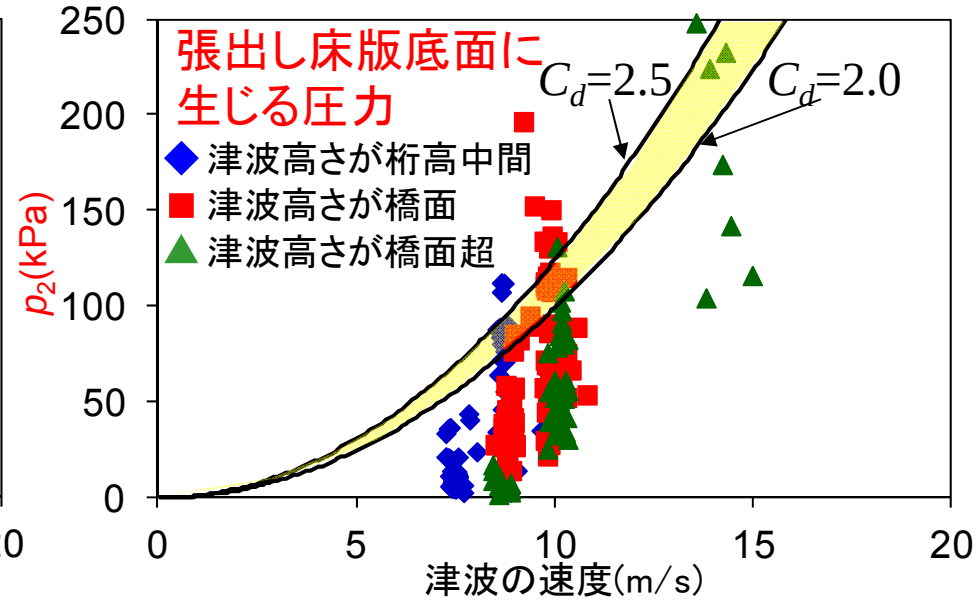
段波状の津波の影響を受ける橋に作用する圧力と支承部の挙動に関する水路実験

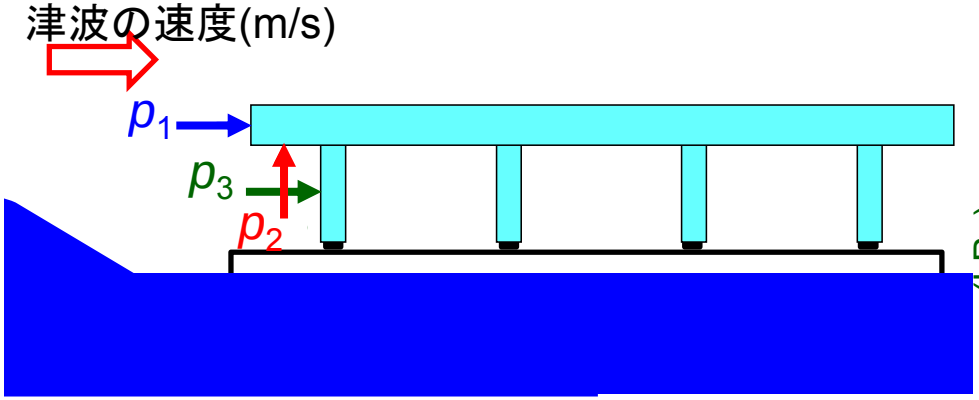
水路全長30m，幅1m

橋に対する水路実験としては既往最大規模の1/20スケール

津波の速度と上部構造の部位に生じる圧力の関係

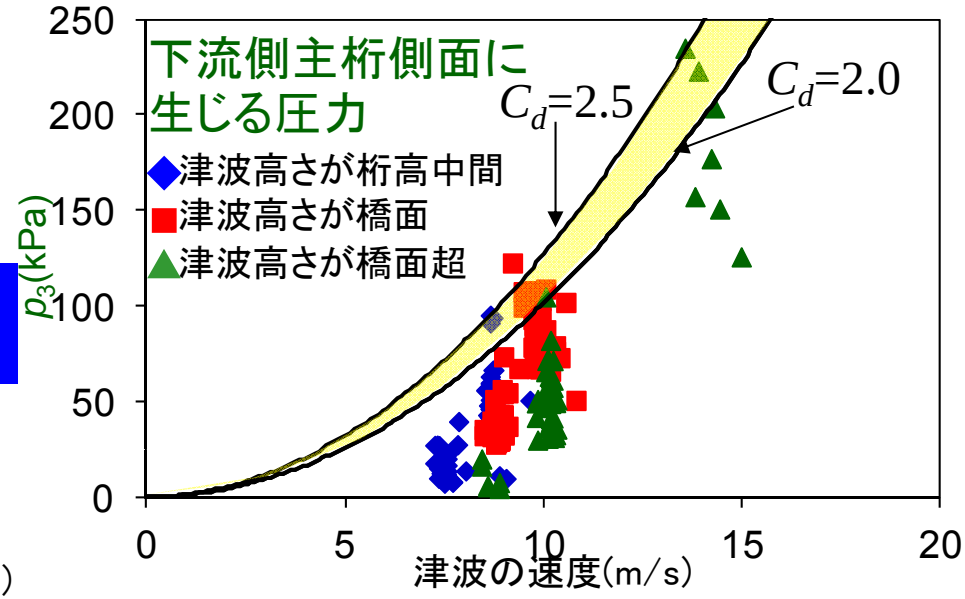






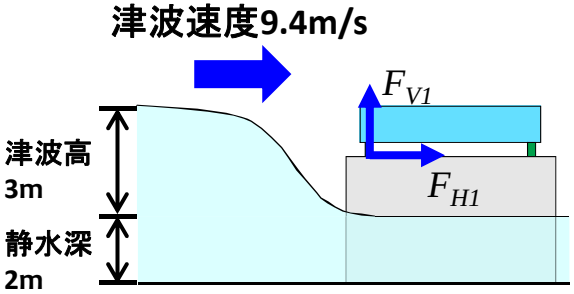
$$p = \frac{1}{2}\rho U^2 C_d G$$

(Gはガスト応答係数（ここでは1.0））

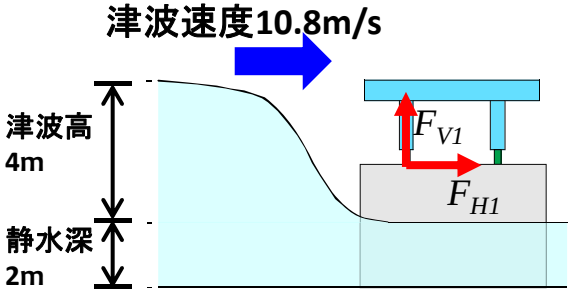


上部構造の断面形式の違いが支承反力に及ぼす影響

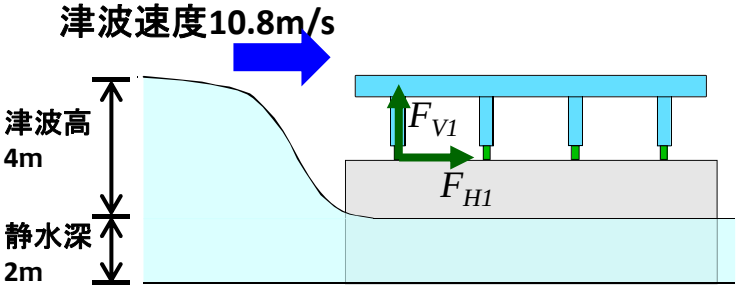
長方形断面



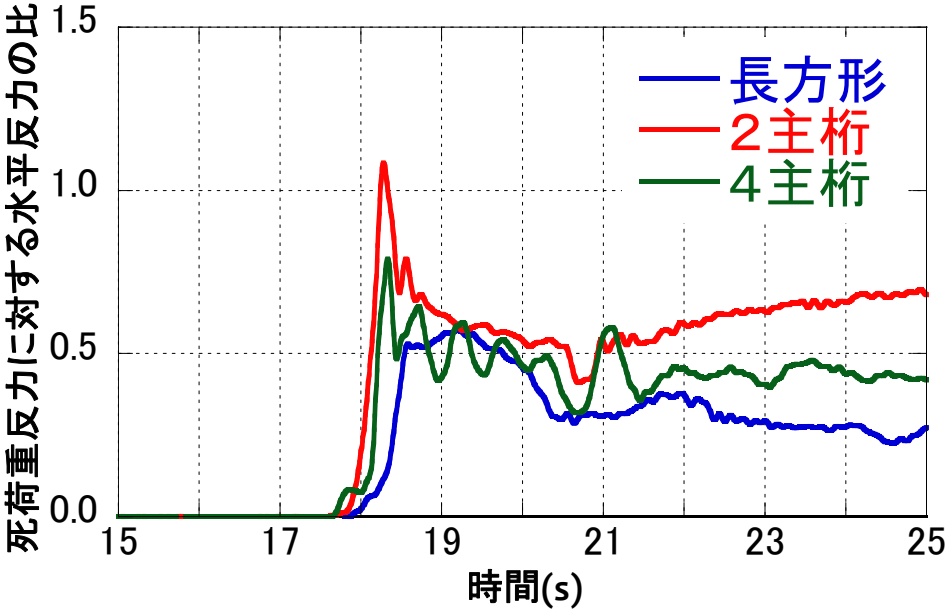
2主桁断面



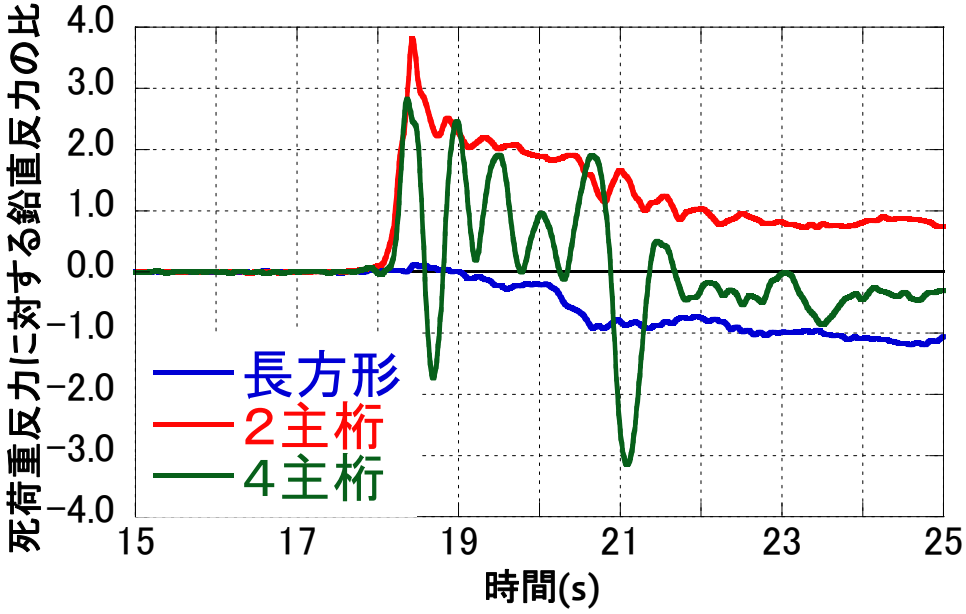
4主桁断面



支承部に生じる水平反力

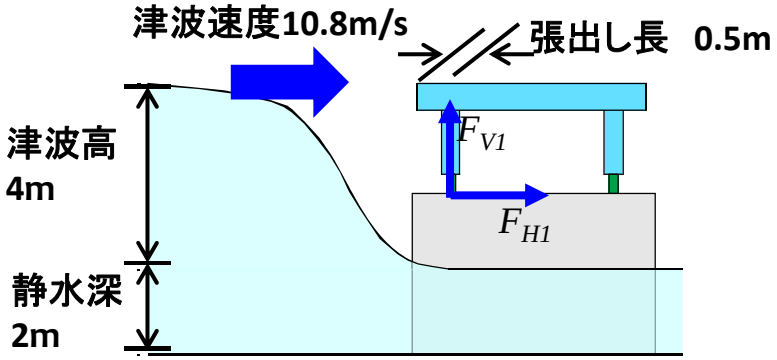


支承部に生じる鉛直反力

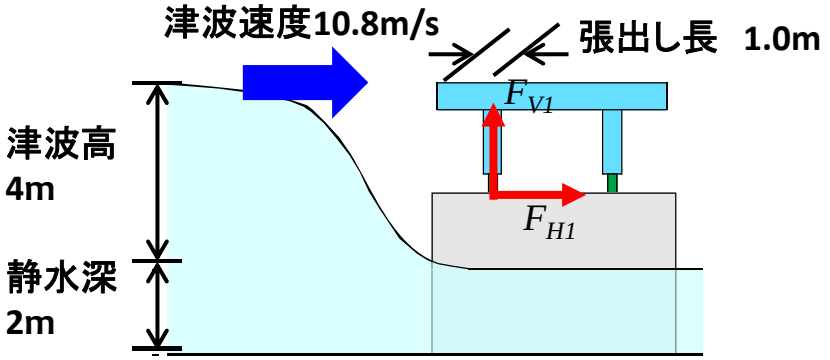


床版の張出し長さが支承反力に及ぼす影響

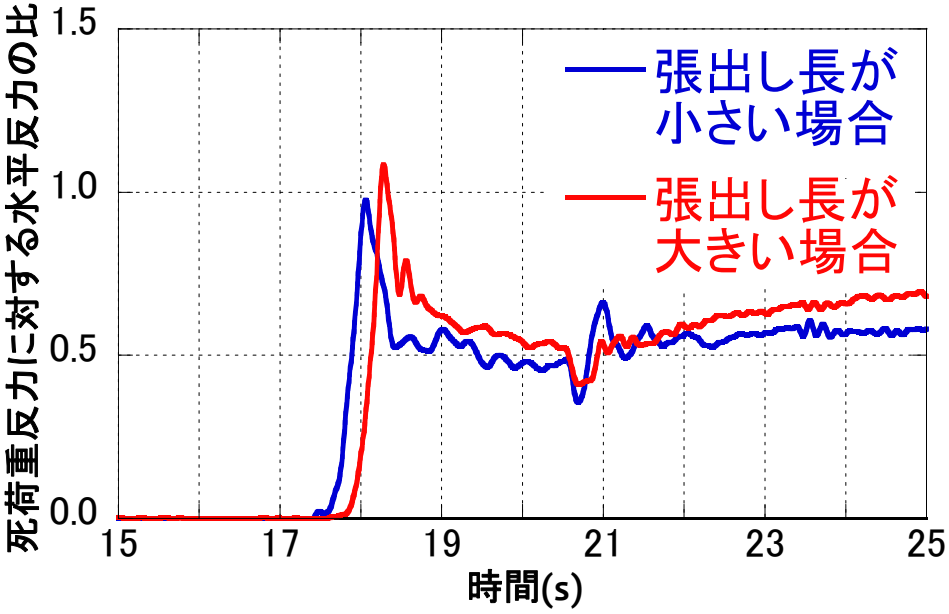
張出し長が小さい場合



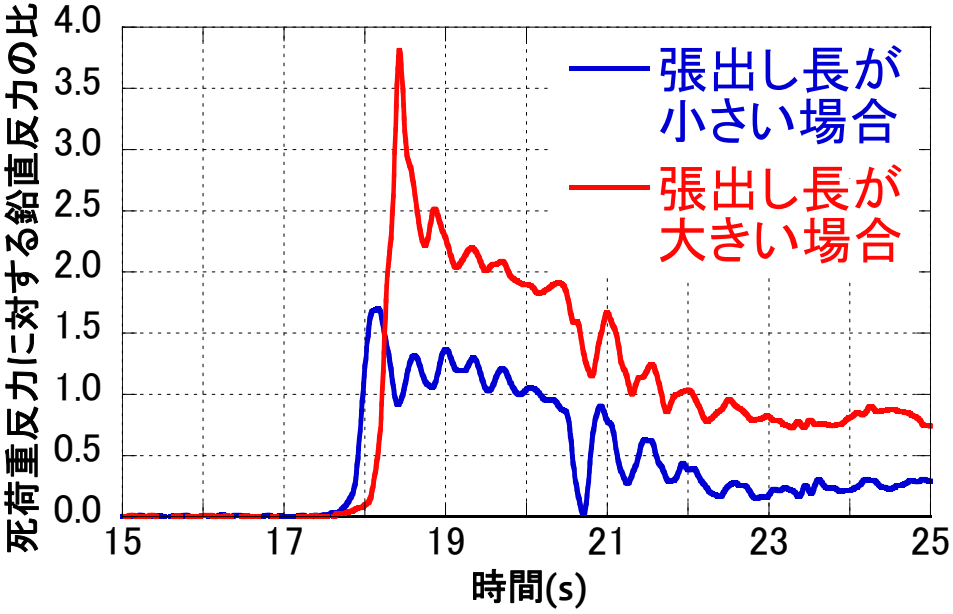
張出し長が大きい場合



支承部に生じる水平反力

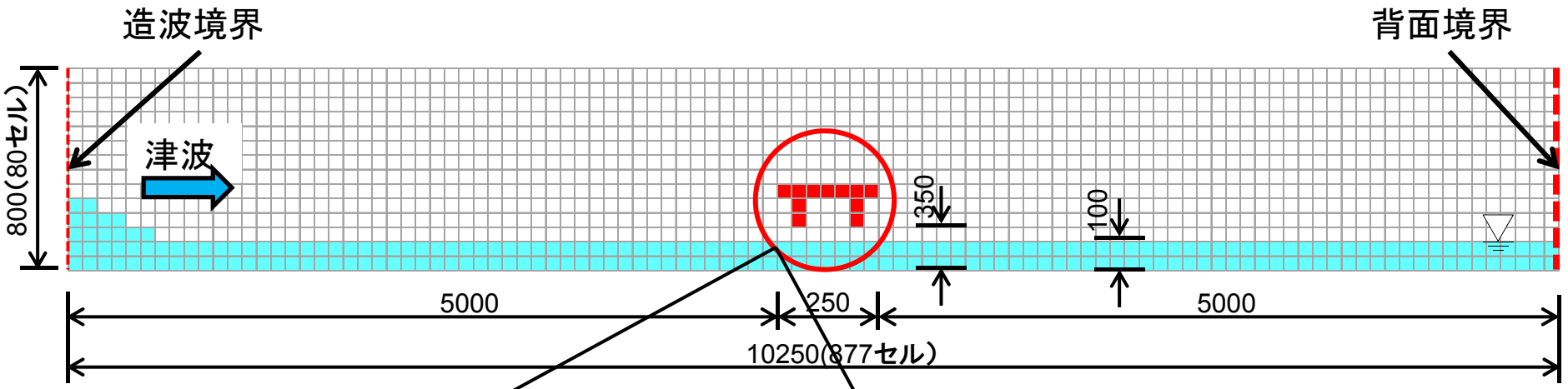


支承部に生じる鉛直反力

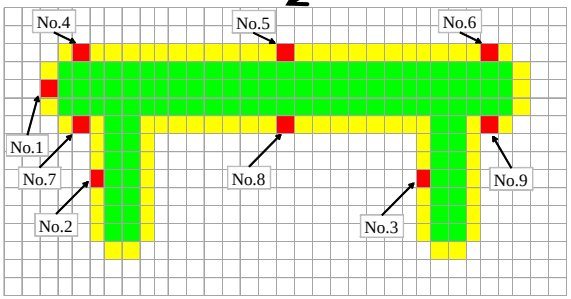


水路実験データを活用した数値解析技術の適用性の検証

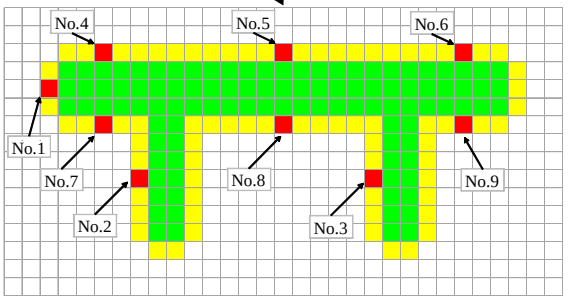
解析モデル



ケース1



ケース2



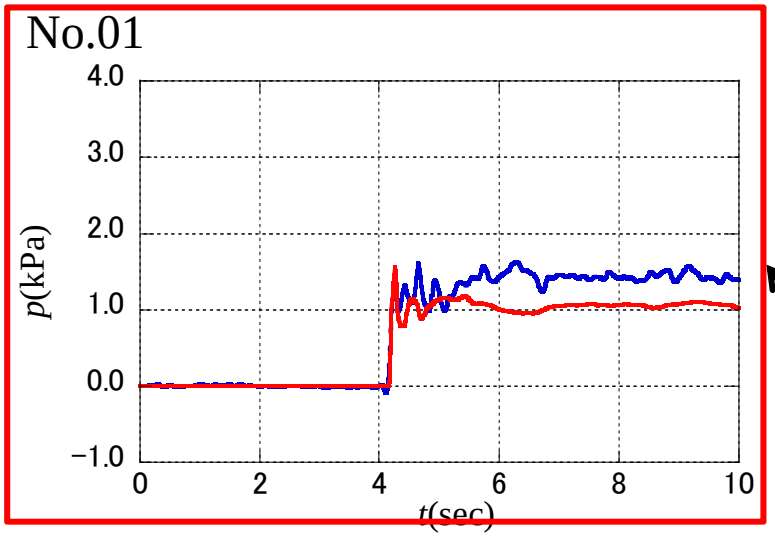
流体解析ソフトCADMAS-SURF/3D

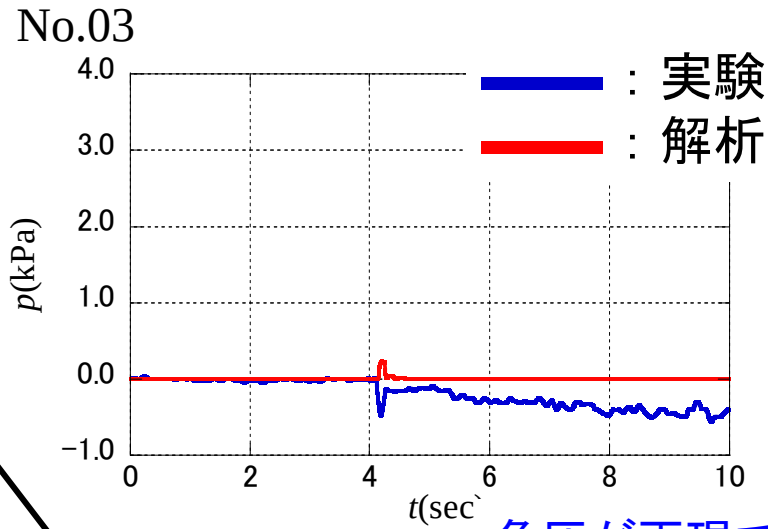
橋桁周辺の流況解析結果との比較

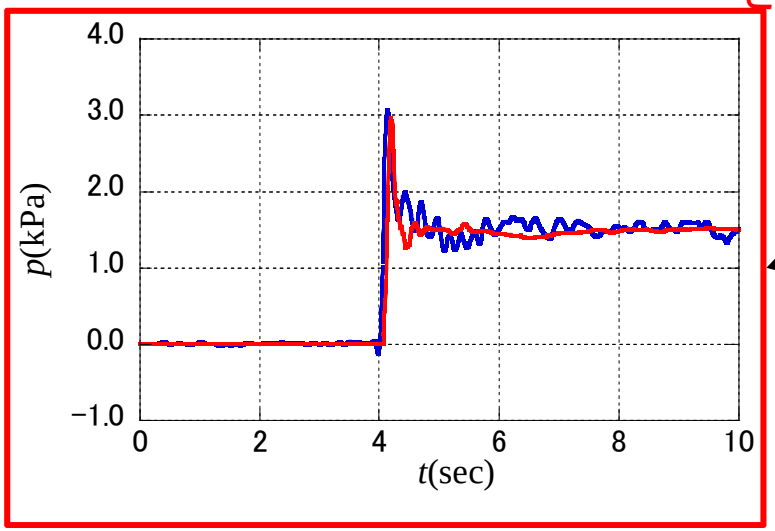
解析動画

実験映像

橋桁に作用する圧力の計測値と解析結果との比較

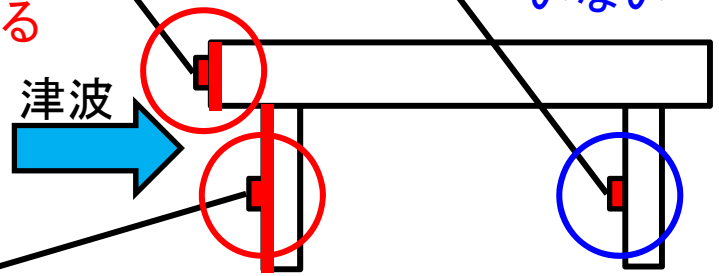


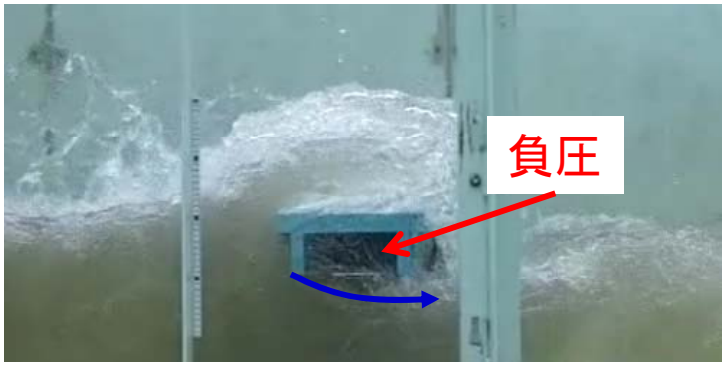




概ね再現できている

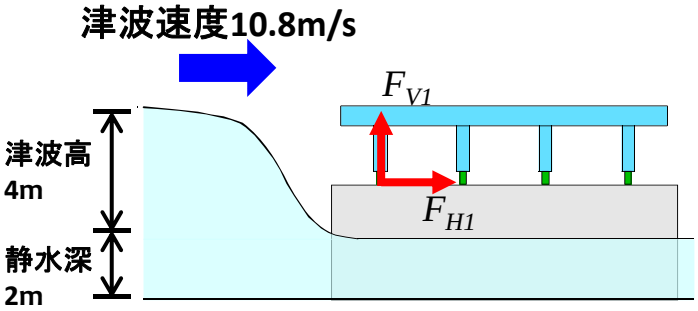
負圧が再現できていない



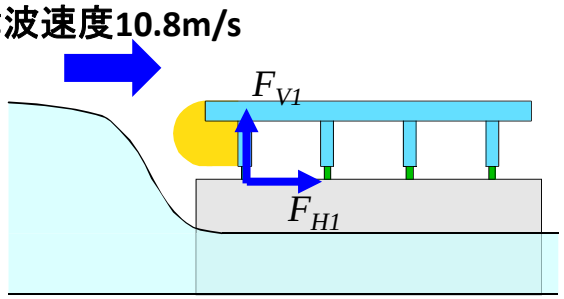


フェアリングの取り付けによる支承反力の軽減効果

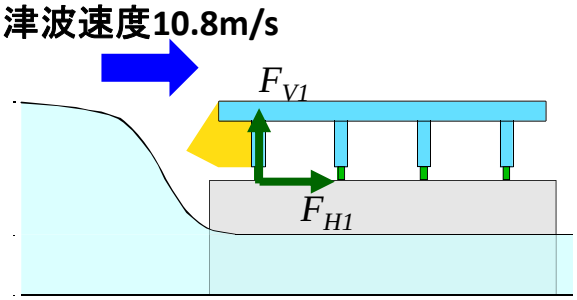
フェアリングなし



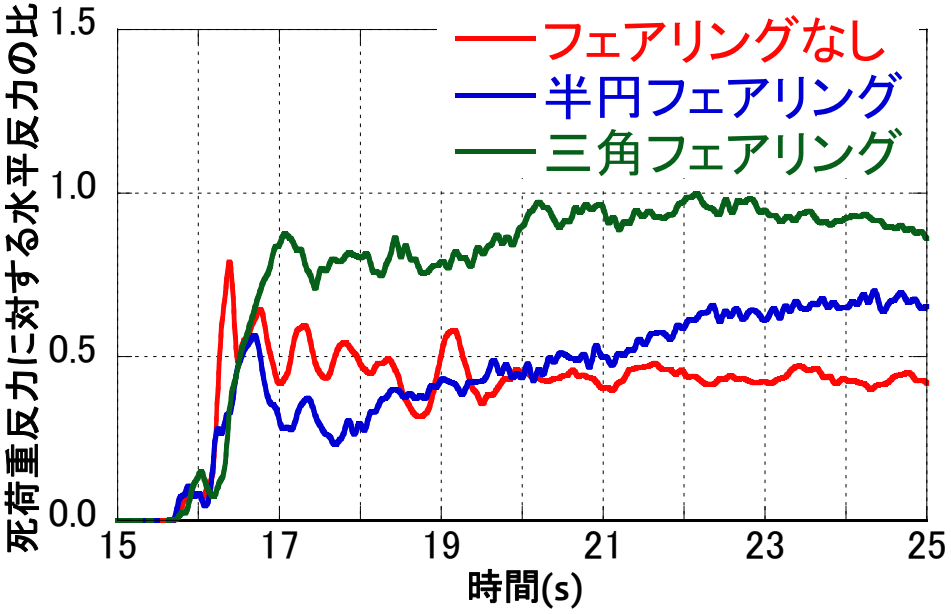
半円フェアリング



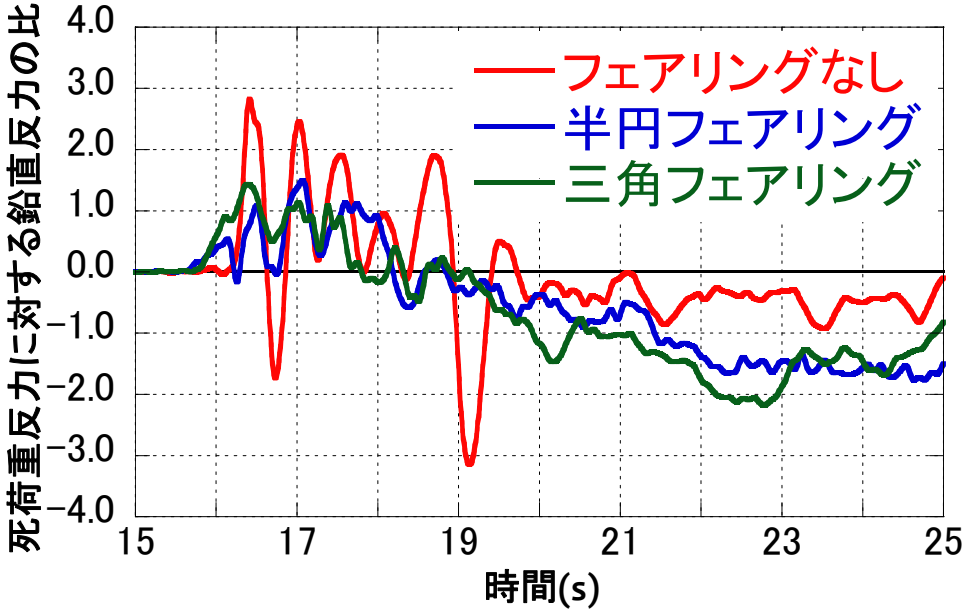
三角フェアリング



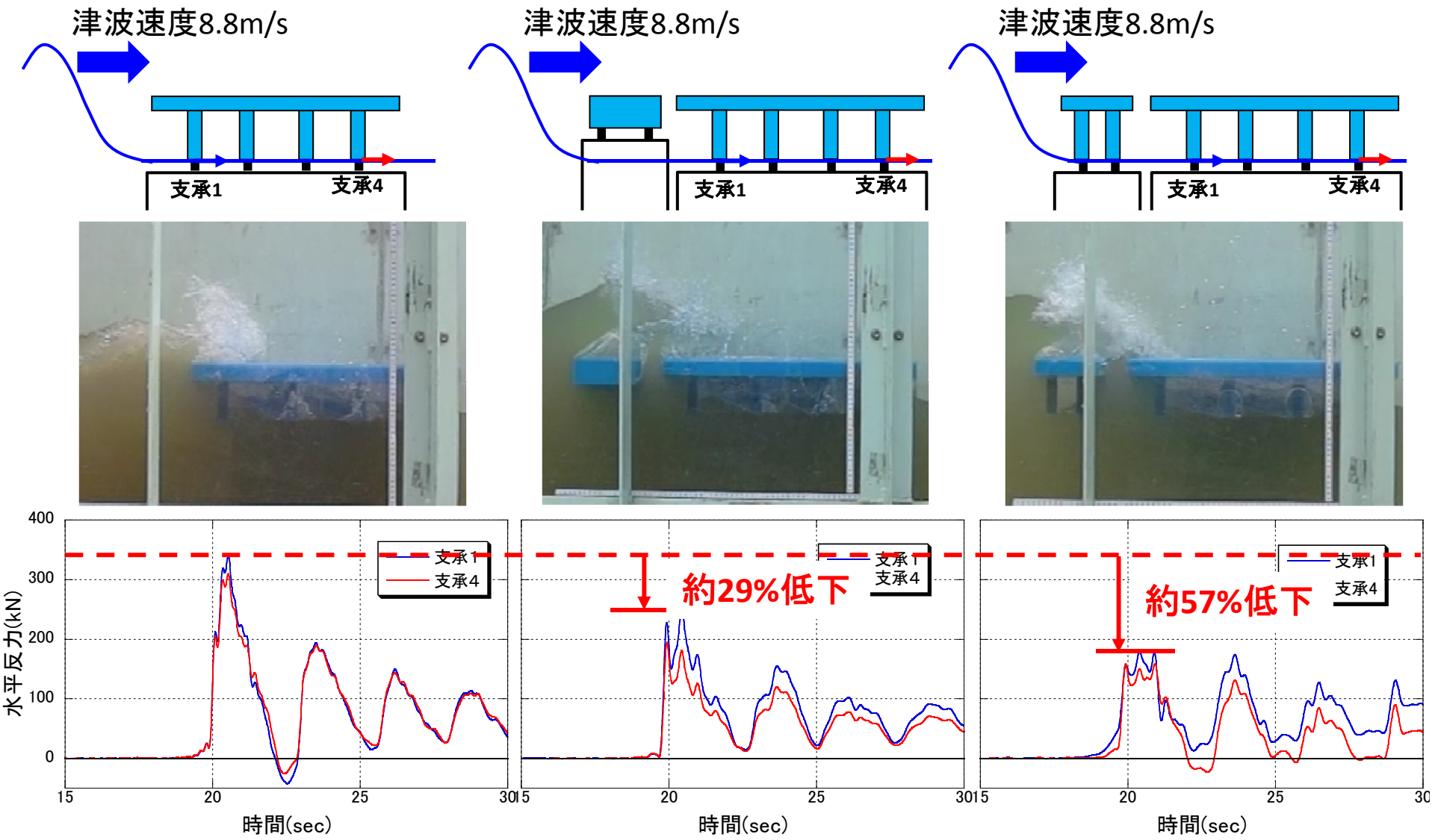
支承部に生じる水平反力



支承部に生じる鉛直反力

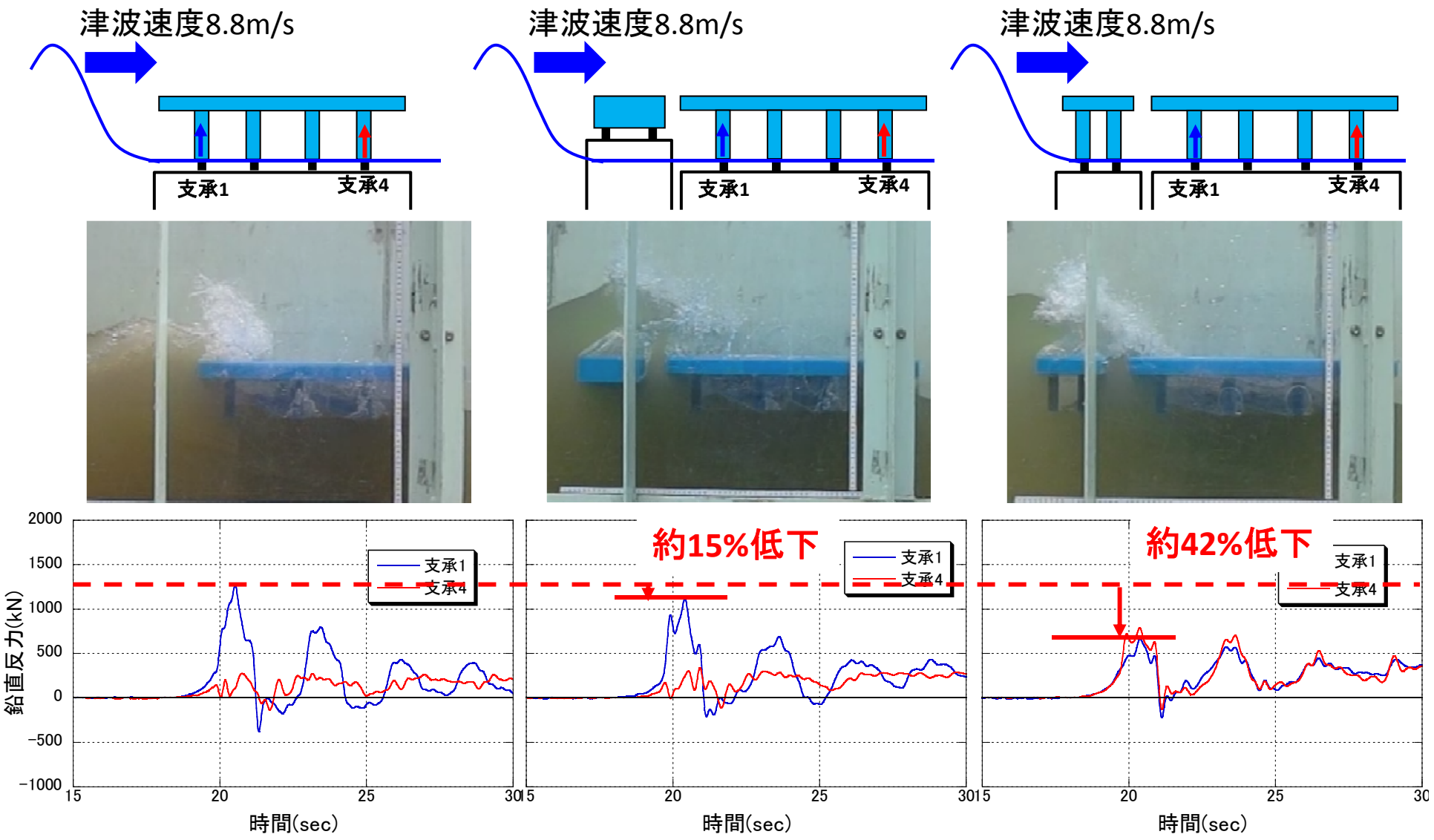


側道橋が本線橋の挙動に及ぼす影響



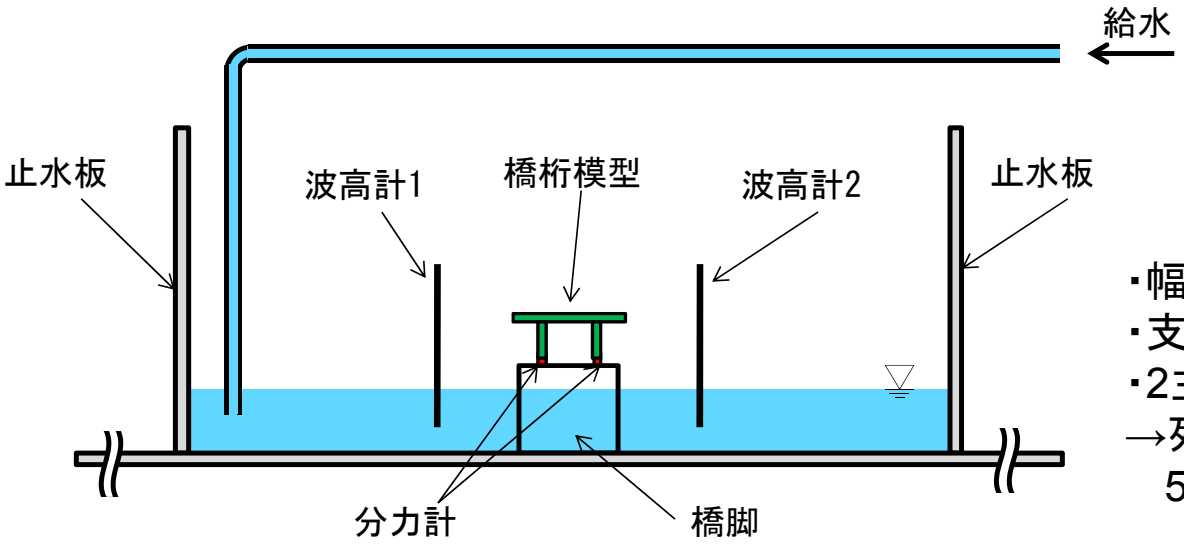
数値は実物換算値

側道橋が本線橋の挙動に及ぼす影響



数値は実物換算値

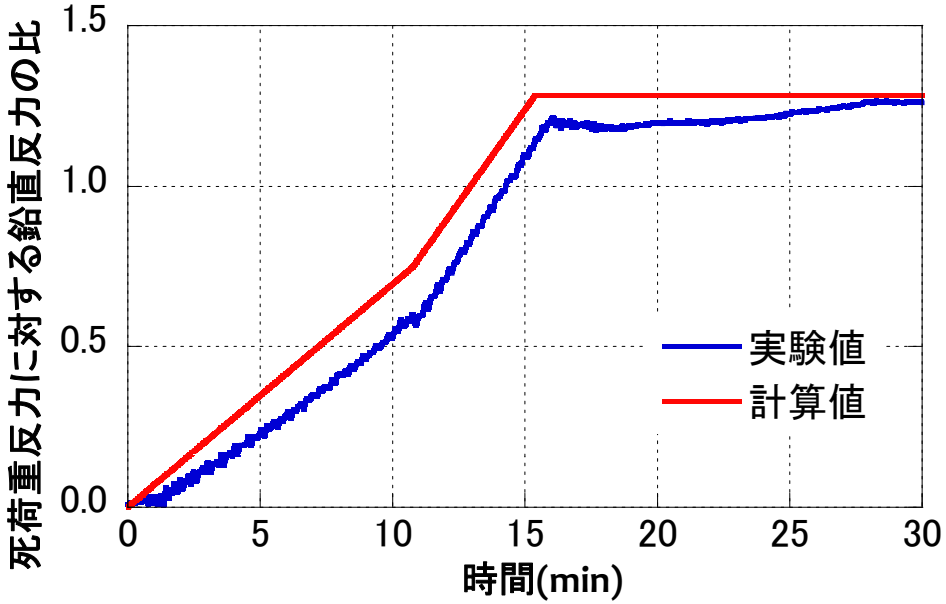
水位が徐々に上昇して橋が浸水する時に受ける影響



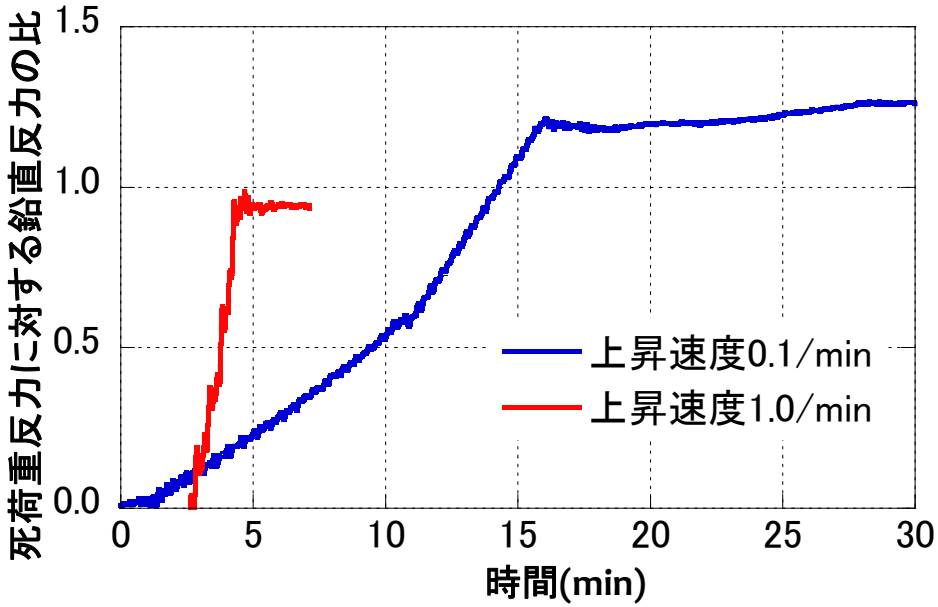
・幅員5m
・支間20m
・2主桁
→死荷重反力
550kNを想定

※参考
東北地方太平洋
沖地震における
鳴瀬川(野蒜)の
平均上昇速度
0.8m/min

水位上昇速度0.1/minの実験結果



水位上昇速度による比較



津波の影響を受ける一般的な
桁橋における構造計画の考え方（案）

防災

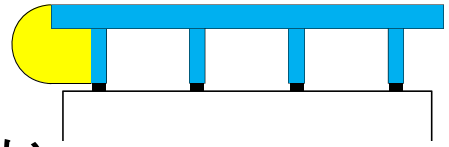
減災

津波により橋に生じる作用力に対する抵抗を高める観点

・地震の揺れで支承部に損傷したとしても上向き抵抗力を確保できる機能分散機構

・支点を多く確保した構造（短支間，一支承線上の支承数を多くした構造）

津波の影響を低減させる観点



・主桁数を多くし、桁高さを小さくした構造形式

・最外縁の主桁から床版を大きく張出した構造としない

・通気等により浸水時の床版底面での空気溜まり（浮力の発生）を抑制

・フェアリングの取り付け等により水圧が橋に作用しにくくする構造的工夫

・他の施設との協働により，橋の立地位置に到達する際の津波の水位，流速を抑制

機能回復のための応急復旧のしやすさの観点

・応急復旧計画を考慮した構造計画

応急復旧橋の設置を念頭に置いた支間割の計画，直橋で計画

応急復旧のしやすさの観点から最終的な破壊部位を設計で制御

応急的な機能回復を速やかにするための復旧対応
＜応急復旧では機能の観点から最速な方法を選択＞

迂回路の確保

沼田跨線橋の例

歌津大橋の例

写真・図提供：国土交通省東北地方整備局

橋桁や橋台背面土が流出した橋の応急復旧
＜構造条件がマッチする応急復旧橋を速やかに架設＞

応急復旧橋の緊急架設

水尻橋の例

自衛隊の架橋機材の活用
による短時間での架設
（3月19日に1車線確保）

仮橋の架設
（7月6日に2車線確保）

川原川橋の例

北陸地方整備局所有の
応急復旧橋の活用によ
る短期間での架設
（3月25日に2車線確保）

写真・図提供：国土交通省東北地方整備局

津波により橋が受ける影響の評価手法の流れ

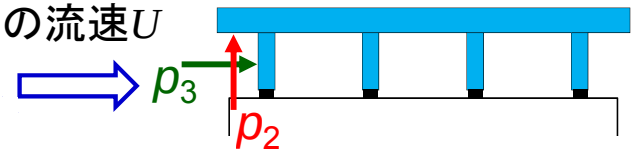
検討対象とする津波の特性の設定

高さ，水位上昇速度，流速等

津波により橋梁に作用する
流体力の評価

$$p = \frac{1}{2}\rho U^2 C_d$$

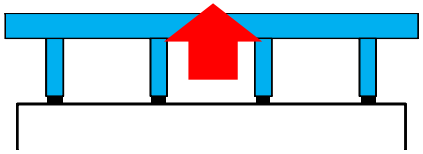
津波の流速U



段波状の津波に対する静的な
作用力へのモデル化

$$B = \rho g V$$

浮力B



V：浸水する
上部構造
の体積

津波により上部構造が浸水した
状況における浮力のモデル化

静的解析による部材に生じる断面力等の評価

・静的フレームモデルなどによる構造解析

支承とその上下部構造側の取り付け部
橋脚（横梁，躯体），基礎　等

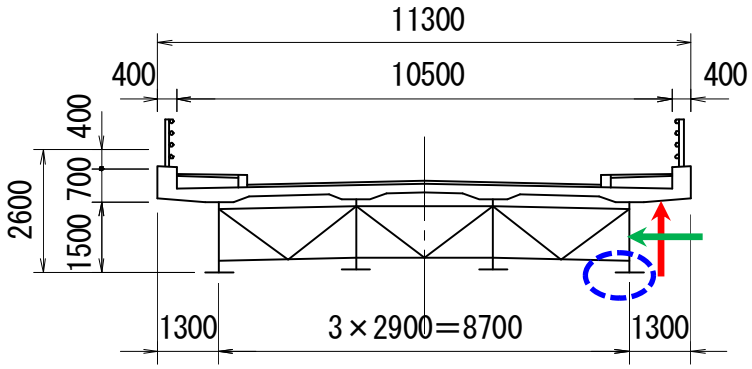
部材の状態の評価

・津波が作用する前の地震動の影響により
部材に生じる損傷度合いを考慮

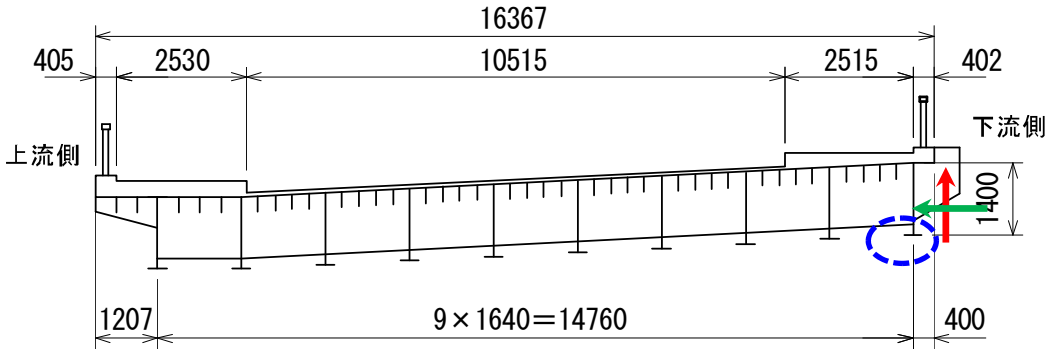
実橋に対する試算と実際の被害状況との関係

津波により橋桁が流出した小泉大橋
（気仙沼市）

津波により橋桁高さまで浸水したが
流出しなかった矢の浦橋（釜石市）



2連3径間連続鋼鈑桁橋（1径間長：約30m）

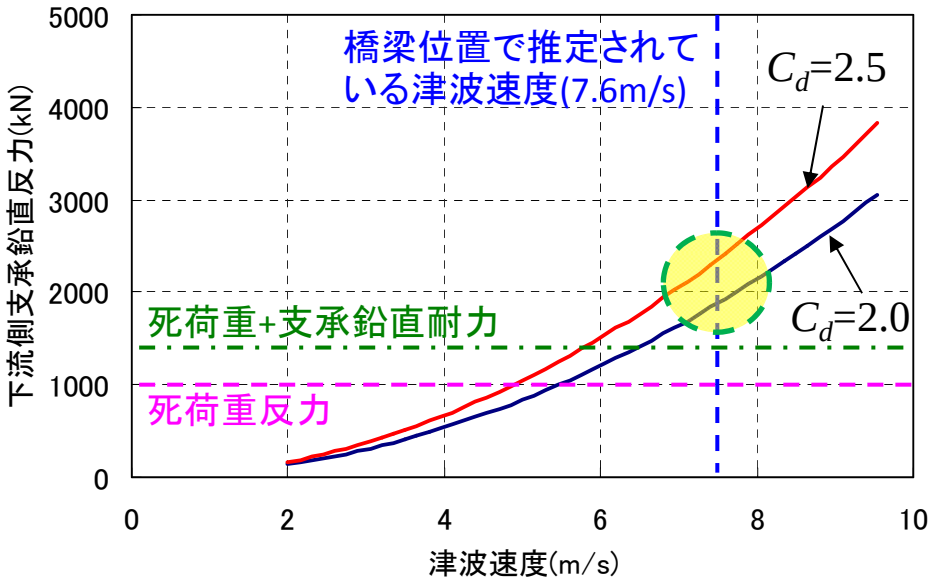


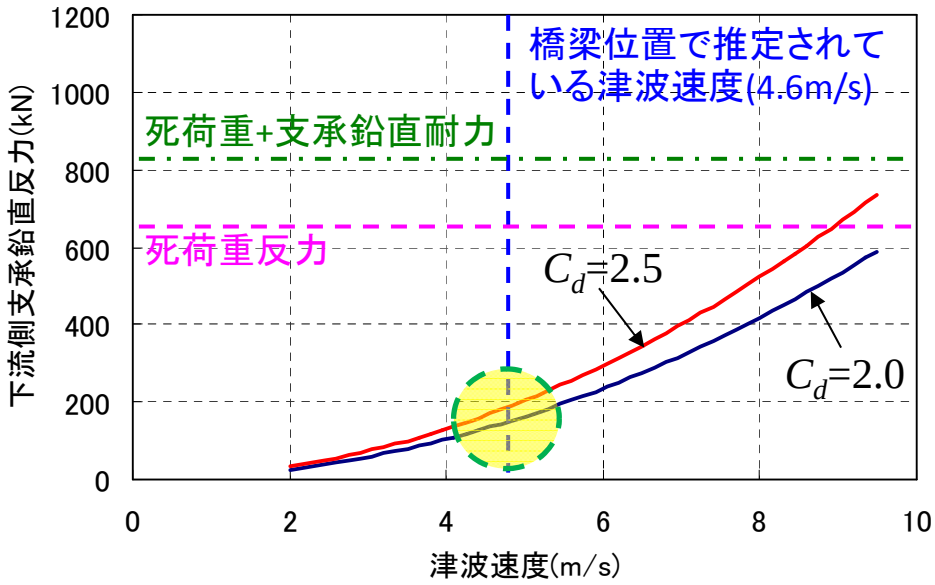
3径間連続鋼床桁I桁橋（1径間長：約36m）

実橋に対する試算と実際の被害状況との関係

津波により橋桁が流出した小泉大橋
（気仙沼市）

津波により橋桁高さまで浸水したが
流出しなかった矢の浦橋（釜石市）





CAESARにおける今後の研究の取り組みの方向性

1．既設橋の耐震性能とその評価技術

①東日本大震災における被災データのマクロ分析

被災橋の分析だけでなく、強震地域に架かる橋で耐震性能が確保できていた既設橋からも学ぶ

- 震災経験の観点から、古い既設橋でも大きな被害が生じていない橋とその構造条件、地盤条件等との関係
- 従来の計算式による性能評価との違いの分析
- 既設橋が保有している耐震性能のレベルの多段階化と既設橋用の評価手法

②既設橋脚の部材特性を考慮した耐力，変形能評価技術と対策

- 大断面低鉄筋比橋脚
- 高軸力、高鉄筋比となった薄肉RC中空断面橋脚
- 震災経験に基づく応急復旧技術

③既設基礎の構造特性を踏まえた橋の耐震性能評価技術

（→　次の報告）

CAESARにおける今後の研究の取り組みの方向性

2. 津波の影響に対する評価技術と対策技術

①津波の影響を受ける既設橋の流出判定手法の構築

・東日本大震災における実橋での被災及び被災の生じなかったメカニズム，模型による水路実験結果等を踏まえた判定手法を構築

②津波の影響を受けにくくするための構造的工夫

・津波により橋に力が作用するメカニズムに応じた構造的工夫の考え方の提示とその実証

③既設橋への対策技術に求められる事項の明示

・対策後の構造系における最終的な破壊部位
　→減災（復旧のしやすさ）の観点から最終的な破壊モードを制御可能な技術

・地震動の影響によって生じる損傷が原因で対策効果が低下する機構でない

・削孔箇所，アンカー定着箇所数が少ない工法