

耐震性能を踏まえた道路橋の 構造計画と研究ニーズ

2013年7月17日

(独)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター
星隈 順一

橋の構造計画の検討において必須な視点

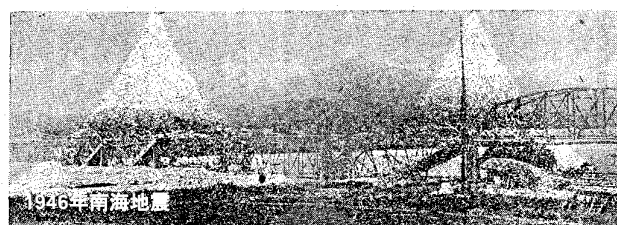
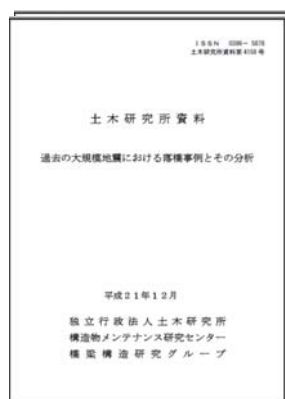
- ✓ 路線線形や地形, 地質, 気象, 交差物件
- ✓ 使用目的との適合性
- ✓ 構造物の安全性
- ✓ 耐久性
- ✓ 施工品質の確保
- ✓ 維持管理の確実性及び容易さ
- ✓ 環境との調和
- ✓ 経済性

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	—	—	—

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2008年岩手・宮城内陸地震までの地震による落橋事例をDB化



地震動による落橋シナリオの分析

シナリオA

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変位	7	11
D	上部構造の直角方向への変位	5	7

注) 被害原因が2つ以上の場合は、いずれにも計上した。



シナリオB



シナリオC



シナリオD



数値計算による具体的な設計としては考慮できていないが現実には生じている地震によるリスク

- ・ 設計で考慮する地震動を上回る強度の地震動
- ・ 大規模な地すべり (2008年岩手・宮城内陸地震)
- ・ 大規模な断層変位 (1999年トルコ・コジャエリ地震, 台湾・集集地震)
- ・ 極めて大きな津波 (2011年東北地方太平洋沖地震)
(2004年インドネシア・スマトラ島沖地震)



**粘り強い構造, 落橋しにくい構造, リスクの回避または道路ネットワークの
確多重化による補完性の確保**などソフト, ハードの両面から総合的に検討



撮影: 株式会社パスコ/国際航業株式会社
(写真提供: 株式会社パスコ)



自然現象を対象とした技術基準における設計外力

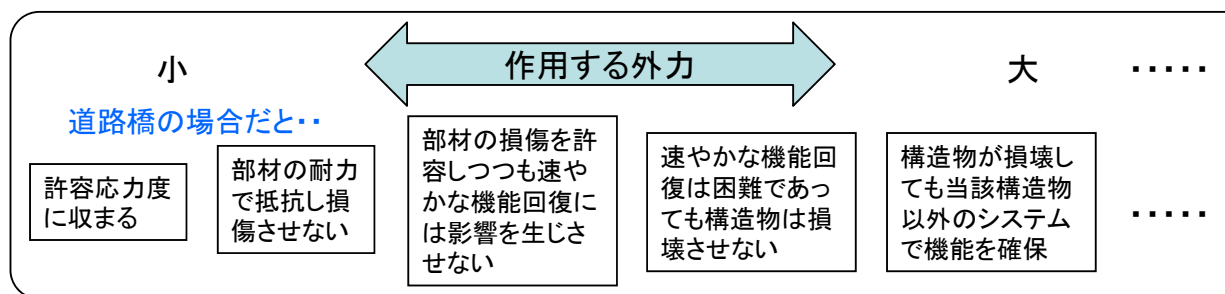
設計外力の大きさの課題だけではない

- 技術基準では、自然災害のような上限がわからない事象に対して「設計外力」を決めている

※「未曾有と想定外」：畑村洋太郎著

- ・人はなにかを企画したり、計画したりといった「考えをつくる」ときは、まず自分の考える範囲を決めます。この境界を設定し、**考えの枠を決めることが「想定」**なのです。
- ・そもそも物事を安全に運営するうえで、「**想定**」するのが専門家の責務である。
- ・想定外のことが起こったのではありません。**何も「考えていなかった」だけ**なのです。

- 「設計外力」を決めると、その大小に関わらず「考えの枠」が決まっている
- 「考えの枠」を超えると何が起き、その時に何が求められるのかを考える
想像すること、思考停止しないこと、放棄しないこと、先送りしないこと



「考えの枠」を超える事象への対応

2. 1 耐震設計の基本方針

(1)橋の耐震設計は、設計地震動のレベルと橋の重要度に応じて、必要とされる耐震性能を確保することを目的として行う。

- ✓設計で考慮する地震動を上回る強度の地震動、極めて大きな津波、橋の周辺地盤における大規模な断層変位の発生、地すべりなどに対する考え方

- ・耐震設計では考慮していないが想定されうる地震に伴って生じるリスクの影響が小さくなるような路線計画
- ・減災機能が強化されるよう、道路ネットワークの多重化による補完性を確保できるような計画とすること等を、当該地域の防災計画と一体となって検討
- ・仮に橋に機能的な損失が生じる場合に対して、構造計画の観点から、ソフト及びハードの両面から総合的に検討することが重要

- ①できる限り早期に復旧できるような構造形式を採用
- ②その復旧のための計画や資材等の整備について事前に検討

過去の震災経験を生かした橋の構造計画

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。**

これまでの様々な震災経験等を踏まえ、より確実に耐震性能を確保できる構造が計画されていくようにする観点からは……



構造計画の初期の検討段階が極めて重要

- ✓ 構造計画が固まり、詳細設計にまで進むと、その段階では構造計画の見直しが難しい場合も実務的には多い
- ✓ 既設橋の耐震補強では、既設の構造計画ありきの中での検討

より耐震性能に優れた橋の構造計画を目指して

1. 地形・地質・地盤条件に応じた橋の構造計画
2. 構造特性上落橋しにくい橋の構造計画
3. 地震後の点検・修復がしやすい橋の構造計画
4. 津波の影響を受けるリスクのある橋の構造計画

地形・地質・地盤条件は橋の構造計画を検討する際の重要な判断材料

路線計画段階から地形・地質・地盤の情報を活用して、合理性を失わない範囲でリスクを回避

丘陵及び山地部で注意すべき地形・地質等の条件に該当する場合



地震によって生じた地滑りによる橋の落橋
[平成20年岩手・宮城内陸地震]

地震による斜面地盤変状に伴う橋台の傾斜
[平成23年長野県北部の地震]

地震による斜面地盤変状パターンと地形・地質的特徴

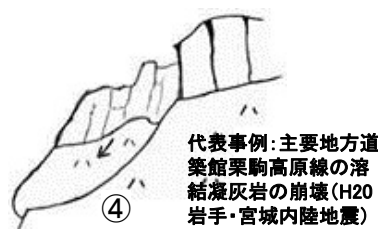
- ①古い地すべりなどにより形成された崩積土のすべりまたは崩壊 ②厚い風化層あるいは未固結堆積層のすべりまたは崩壊



- ③流れ盤の層理面・節理面・断層面・薄い脆弱層によるすべり



- ④下部の脆弱層の変形による上部の岩盤の変状または崩壊



- ⑤柱状節理の発達した岩盤の節理面からの変状または崩壊



「斜面上の深礎基礎設計施工便覧」(平成24年、日本道路協会)

橋と土工の境界(橋台位置)をどう設定するか

高盛土にして橋長を短くした構造計画とすると……



コスト縮減を追求した新形式構造の出現

橋長の短い橋梁や連続高架構造に代わる新しい構造として、コストの低いカルバートを大型化・連続化した形式の構造が出現



↓
分割した部材を工場で製造し、現場で組み立てる
プレキャスト工法

↓
たわみ性ヒンジ式アーチカルバート

構造特性を踏まえた耐震性能
の評価の検討必要

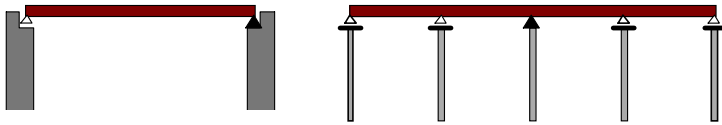


構造特性上落橋しにくい橋の構造計画

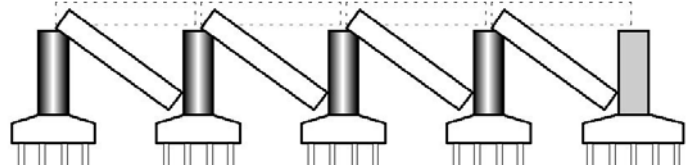
落橋防止の観点から、多径間連続／ラーメン構造を推奨

1923年関東地震～
2008年岩手・宮城内陸地震までの
大地震による落橋事例を分析

両端橋台の橋，連続桁橋
→ 地震動による落橋事例なし
(ただし，下部構造が倒壊した場合を除く)



過去の大地震における落橋は，
すべて複数径間の単純桁橋で
生じている。



幾何学的に回転が可能な特性を有する橋のリスク

1995年兵庫県南部地震による
斜橋・曲線橋の被害



2010年チリ地震による回転可能な斜橋の落橋

上下線分離構造となった隣接橋は直橋で損傷なし



比較的新しい
斜橋

1990年代半ばまでのもと
もとのチリ基準による直橋

チリ公共事業省による

2010年チリ地震による斜橋の挙動

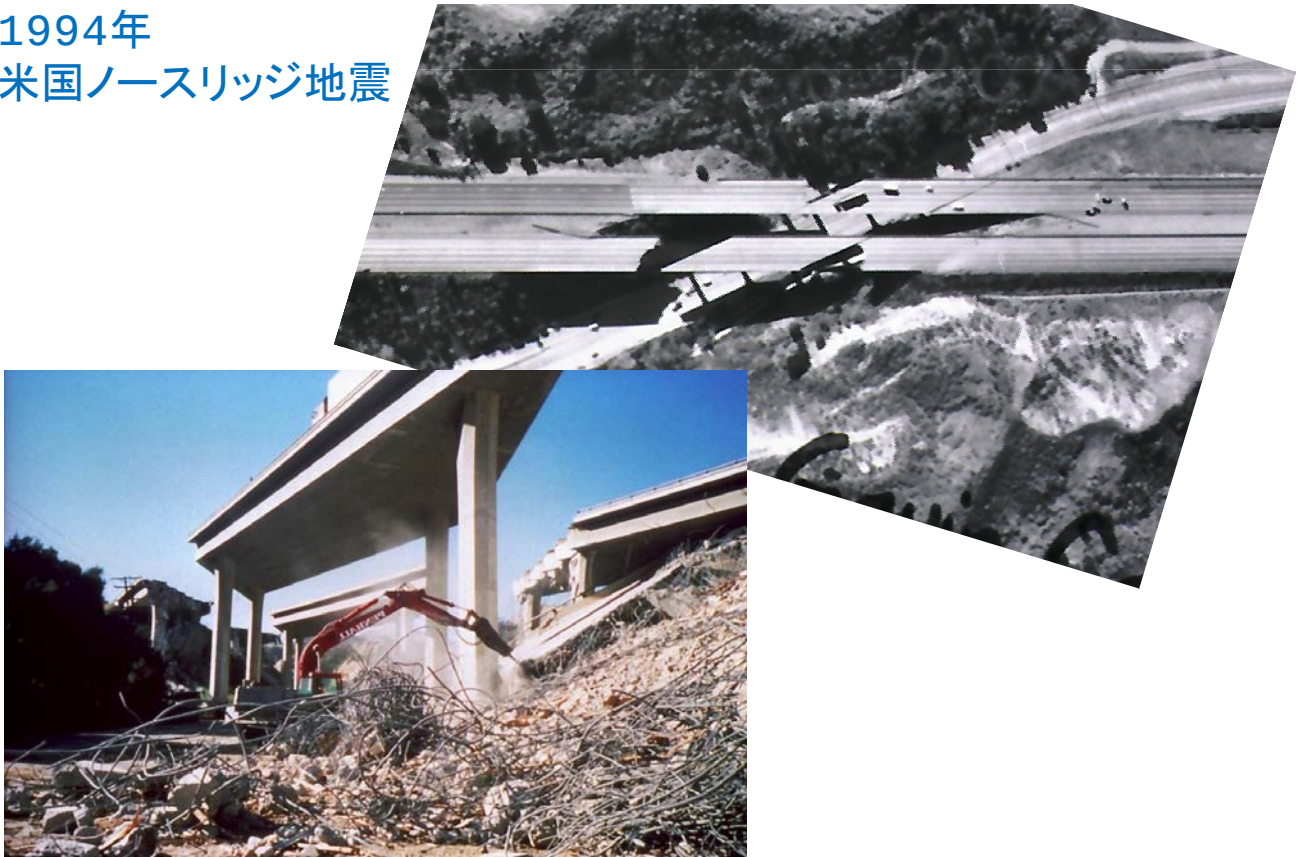
斜橋は橋台や桁どうしで衝突すると、回転しやすい



チリ公共事業省による

過去の地震でも落橋している斜角の小さい斜橋

1994年
米国ノースリッジ地震



平成23年東北地方太平洋沖地震でも確認されている 斜角の小さい斜橋の回転挙動

斜角の小さい跨道
鉄道橋の被害事例



構造特性上落橋しにくい橋の構造計画

上部構造が幾何学的に回転可能な構造形式の採用は避ける

- ・斜角の小さい斜橋
- ・曲率半径の小さい曲線橋



予備設計の段階から橋台等の下部構造の位置と向き等の構造計画において十分に配慮しておくことが重要

設計の与条件を踏まえ橋の構造計画を総合的に検討した結果として、上部構造が幾何学的に回転してしまうような構造を採用せざるを得ない場合

- ✓ 支承部の破壊に対する補完性又は代替性を高めることによって、落橋しにくい構造系を計画（上部構造を4基以上の下部構造で支持させた3径間以上の連続構造を計画する等）
- ✓ 横変位拘束構造を設置するとともに、回転しない橋のケースよりも桁かかり長を長く確保する等して入念な落橋防止対策を検討

耐震設計上重要な支承部周辺の構造計画

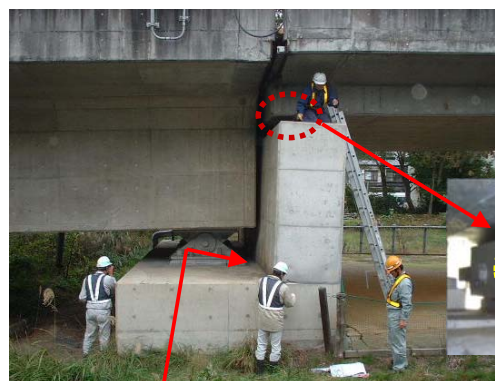
耐震対策のために設置した部材や装置が**作動すべき時に確実に機能するよう、装置本体だけでなくその取付部の設計・施工に留意**

- ✓ レベル2地震動に対して抵抗・機能する部材： 支承部、制震装置
→ レベル2地震動を超えると、本体／取付部が破損する可能性
- ✓ 取付部は、落橋防止構造の取付部に近接している事例が多い。
→ 支承部の取付部の破壊により、落橋防止構造の取付部も損傷
→ 落橋防止構造の機能への悪影響の可能性



地震応答変位が大きく異なる掛け違い部での留意点

〔 桁高が高い上部構造の慣性力を支持する下部構造に生じる水平変位 〕 > 〔 桁高が低い上部構造を支持する可動支承の移動可能量 〕



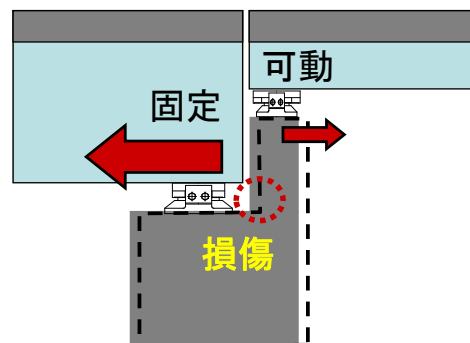
移動制限装置との接触痕



写真提供：日本支承協会



写真提供：日本支承協会



鉄道橋における事例

写真提供：早稲田大学 秋山教授

地震応答変位が大きく異なる掛け違い部での留意点



写真提供：NEXCO東日本



写真提供：NEXCO東日本

隣接する上部構造に大きな応答変位が発生

- 伸縮装置を介して水平変位が上部構造に伝達
- 設計で考慮している振動単位とは異なる状態となるリスク



レベル2地震動による上部構造の変位に対して、伸縮装置等を介した隣接する上部構造を含む設計振動体への影響に留意

地震後の点検・修復がしやすい橋の構造計画

支承部周辺の部位

維持管理の確実性及び容易さに配慮が必要

桁端部の点検, 塗装の作業空間の確保, 排水の流末処理

支承部周辺に取り付く部材

支承部(水平力／鉛直力を分担する構造)

落橋防止構造, 横変位拘束構造

段差防止構造 etc.



十分な空間が確保できていない事例



地震後の点検・修復がしやすい橋の構造計画

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



機能が確保できる状態であることを確認するために、
地震後速やかに点検ができるための備えも必要



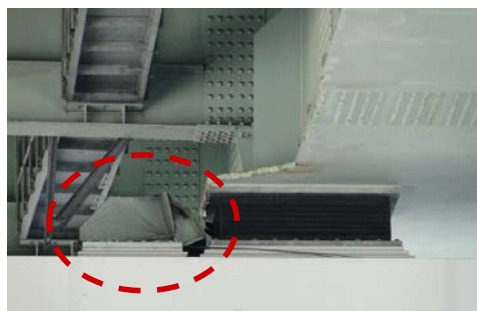
支承部の近接点検がしにくい



検査路により支承部の近接点検が容易

第三者被害を防止するための構造計画

破損した部材の落下等による**第三者被害の防止のための配慮**



→ 伸縮装置自体がレベル1地震動に対して機能を確保できることを基本とし、**ジョイントプロテクターの規定を削除**（14.4 上部構造端部構造）



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

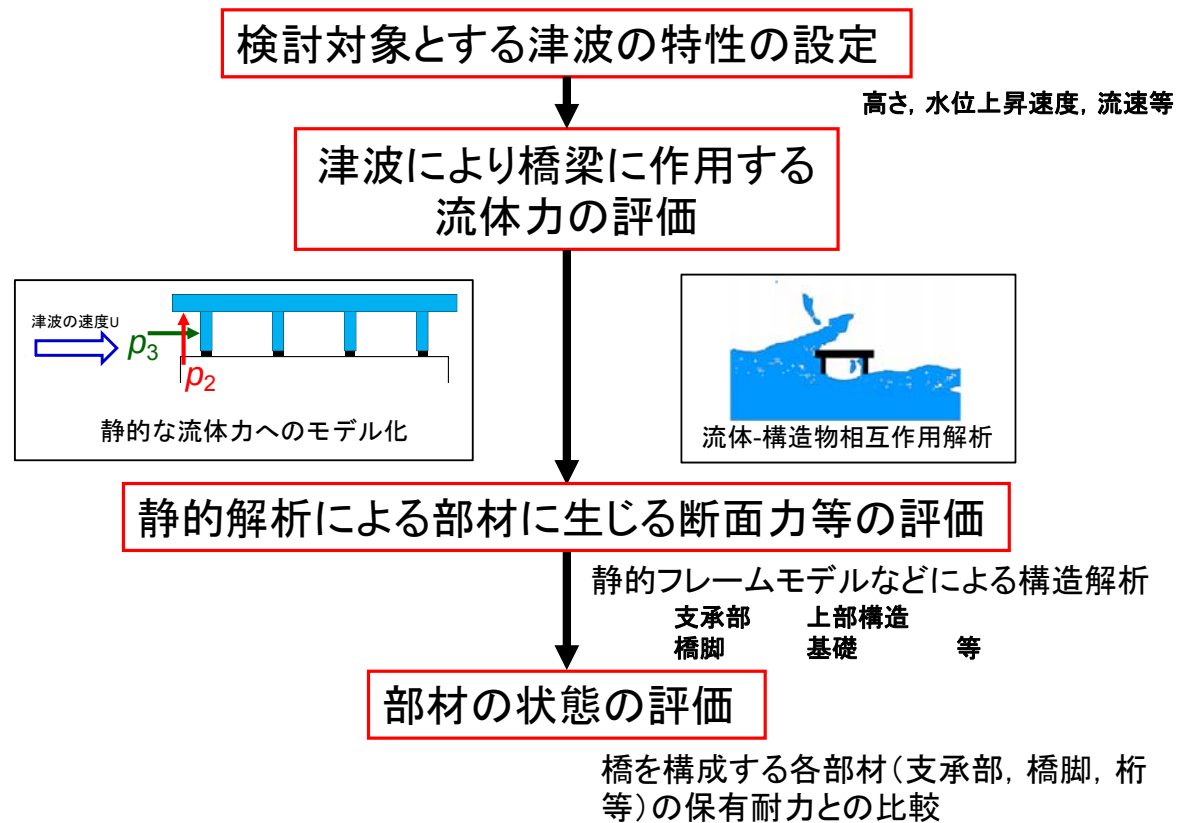
- ・津波に関する地域の防災計画等を参考にしながら津波の高さに対して桁下空間を確保する
- ・**津波の影響を受けにくいような構造的工夫を施す**
- ・**上部構造が流出しても復旧しやすいように構造的な配慮をする**



構造計画を検討する上での課題

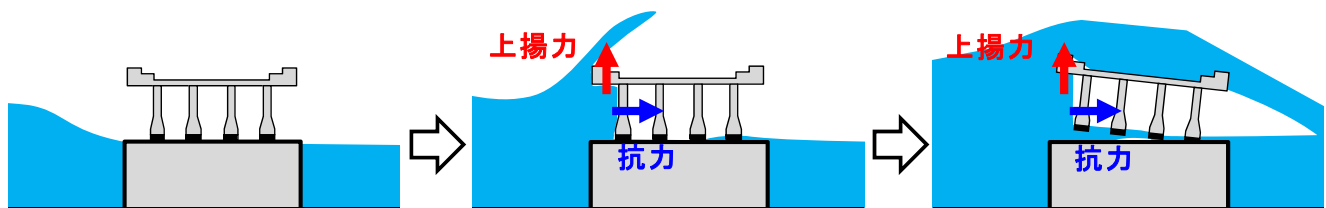
- ・津波により橋が受ける影響度合いの評価手法
- ・津波による影響低減のための構造的な配慮の具体策

津波により橋が受ける影響の評価手法の流れ

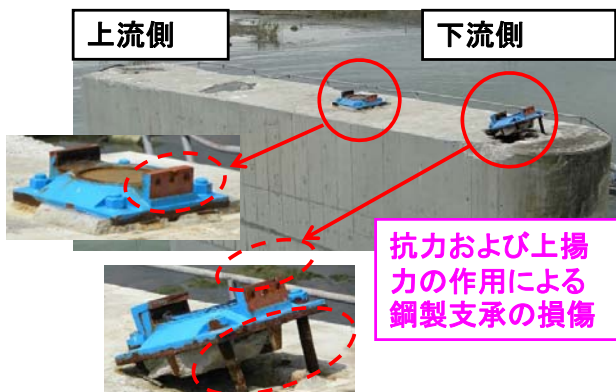


上部構造の被害状況から想定される上部構造の流出形態

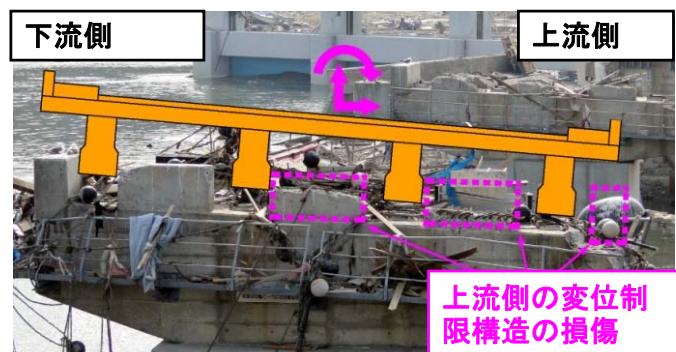
1) 津波による流体力の影響が大きい場合 (段波状の津波)



小泉大橋(国道45号)

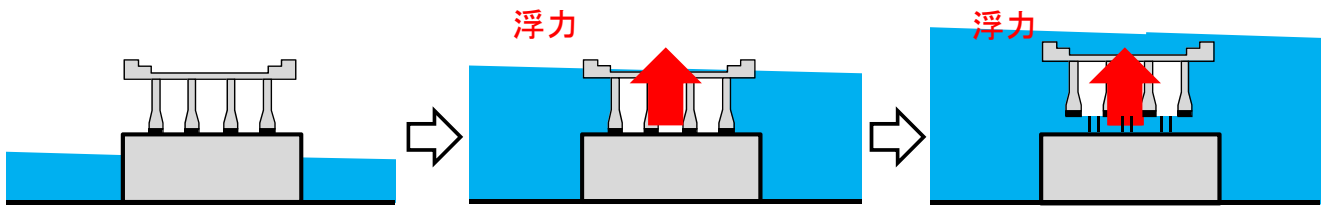


歌津大橋(国道45号)



上部構造の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)



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)



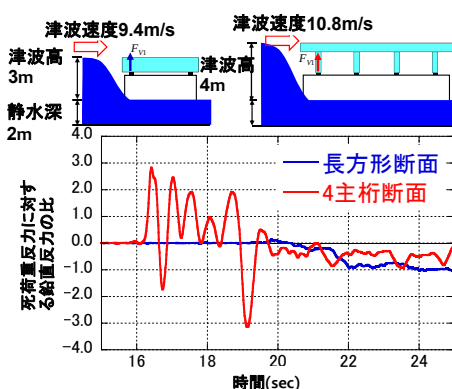
損傷痕跡のない変位制限構造
(アンカーバーは、ほぼ真直ぐの状態)

上部構造の断面特性が津波作用力に及ぼす影響実験

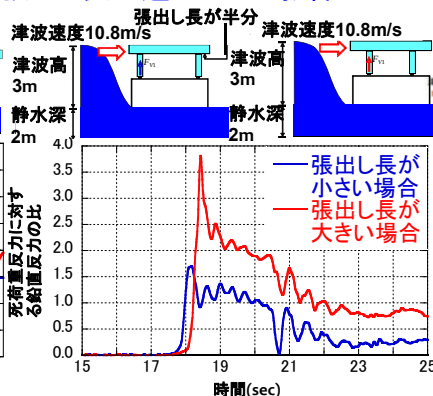


上部構造に作用する鉛直反力の比較

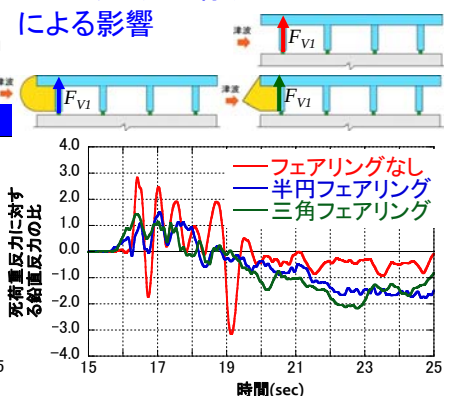
構造形式の違いによる影響



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



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

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

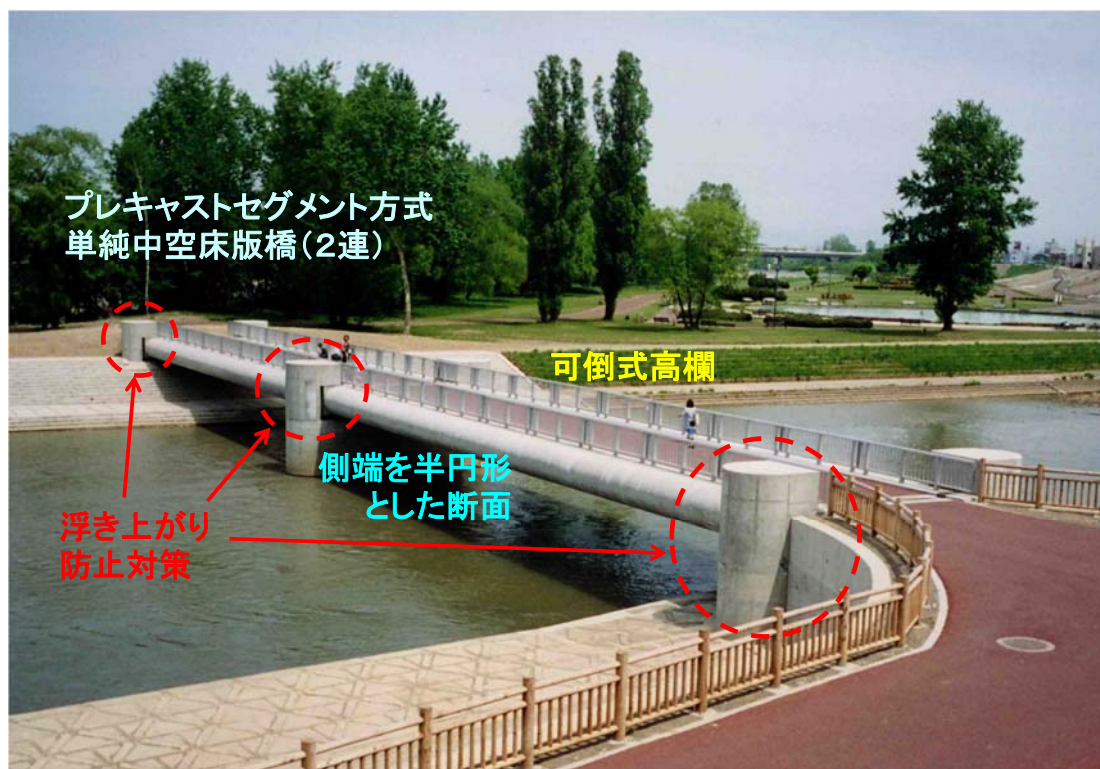
- ・主桁数を多くし、桁高さを小さくした構造形式
- ・最外縁の主桁から床版を大きく張出した構造としない
- ・通気等により浸水時の床版底面での空気溜まり(浮力の発生)を抑制
- ・フェアリングの取り付け等により水圧が橋に作用しにくくする構造的工夫
- ・他の施設との協働により、橋の立地位置に到達する際の津波の水位、流速を抑制

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
最終的には支承を破壊させ下部構造は確実に守る設計思想

減災

洪水時に水没する中空床版橋の構造計画の例



写真提供: PC建設業協会

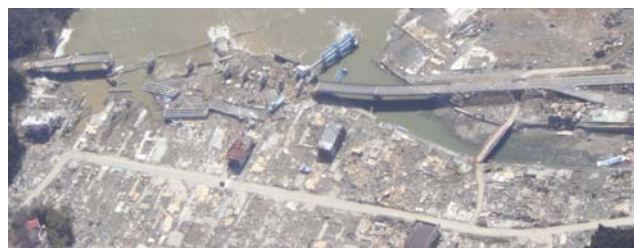
応急的な機能回復を速やかにするための復旧対応 ＜応急復旧では機能の観点から最速な方法を選択＞

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

橋梁の耐震技術に関する最近のニーズ

1. 既設橋の耐震補強

- ・既設部材に優しい(削孔やアンカー一定着箇所が少ない)耐震補強技術
→ 施工の確実性、劣化損傷が生じている部材への対応
- ・既設基礎の耐震性能評価と補強技術
→ 震災事例を踏まえ合理的に(橋全体系からの評価)
- ・耐震補強効果の持続性
→ 免震・制震デバイス系の経年変化の影響有無, 塩害・腐食等への予防保全

2. 維持管理の確実性・容易さに配慮した耐震設計

- ・ゴム支承やダンパーの点検、診断、予防保全技術
→ 地震時に生じた変形を自己記録する機能
- ・アンカーバー形式の支承の点検、診断、予防保全技術

3. 土工構造物の耐震性能評価技術

- ・新形式構造への対応

4. 津波の影響に対する評価技術

- ・東日本大震災の経験を反映した橋の流出判定手法
- ・既設橋への対策技術(特に, 既設部位との取り合い部)

5. 設計成果の品質確保

耐震性能を踏まえた道路橋の構造計画を目指して

1. 路線計画

- ・様々な観点から計画案が作成されるが、耐震技術者の関与も必要
- ・地形・地質的な観点からのリスク回避
→ 橋梁区間と土工区間の適材適所な選定

2. 予備設計

- ・橋梁形式の選定, 下部構造の位置と向き
→ 落橋しにくい構造計画
→ 一つの部位の破壊が全体破壊につながりにくい構造計画
- 地震後の修復性、維持管理の確実性・容易さに配慮した構造計画

3. 詳細設計

- ・要求性能に応じて地震後の点検手法、アクセスのしかた、応急復旧方法を考慮して設計
- ・第三者被害防止への配慮

耐震性能を踏まえた道路橋の構造計画を目指して

- ✓ 実際の橋の設計では、耐震性だけでなく、維持管理の確実性や容易さ、耐久性、施工性、経済性等、個々の橋の条件に応じて様々な観点から総合的に判断しながら構造計画が検討
- ✓ 既設橋の構造においてこれまで生じた事象や経験、さらにはそこから得られた教訓を、これから設計する橋の構造計画に活かしていくことが重要であり、それこそが、橋梁に携わる技術者の役割
- ✓ 橋の構造計画や設計の意図が、施工の段階、さらには維持管理の段階に適切に引き継がれていくことも重要