

土木研究所講演会

限界状態に挑む ～耐震性能を基盤としたインフラ・システムの 耐震技術の開発～

2016年10月6日

国立研究開発法人 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 大住 道生



限界状態とは？

限界状態: それを超えると**所要の性能を満足できなくなる**限界の状態

限界状態に挑む意義:

- ・構造物の壊れ方のメカニズムを把握(**壊れ方の良否**)
- ・損傷状態で有する性能を直接把握



E-ディフェンスによる
橋脚の振動実験



報告の内容

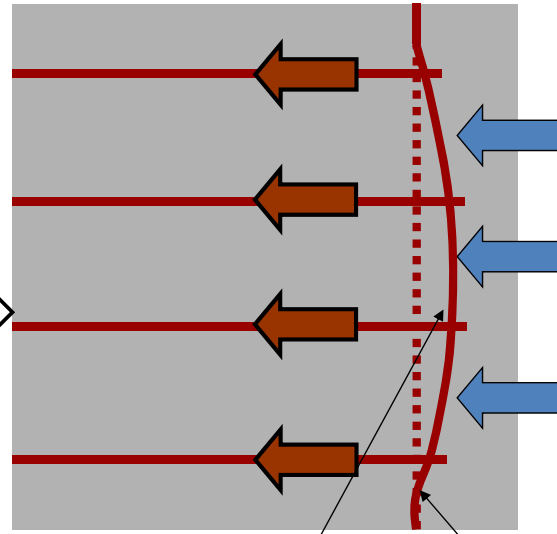
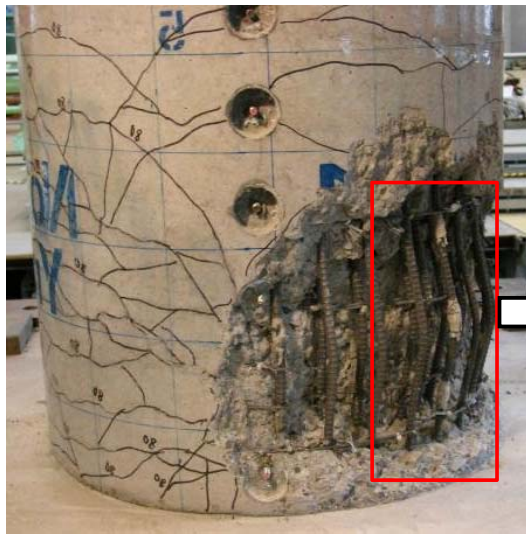
1. 道路橋の限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発
2. 山岳トンネルの限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発
3. 地盤変状を受ける道路橋および道路盛土の耐震性能の検証法と耐震設計法の開発
地盤変状を受ける道路橋の判定手法
道路盛土の耐震補強方法
4. 東日本大震災で被害を受けた構造物の対策方法
液状化判定法の高精度化
津波に対する道路橋の対策

報告の内容

1. 道路橋の限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発
2. 山岳トンネルの限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発
3. 地盤変状を受ける道路橋および道路盛土の耐震性能の検証法と耐震設計法の開発
地盤変状を受ける道路橋の判定手法
道路盛土の耐震補強方法
4. 東日本大震災で被害を受けた構造物の対策方法
液状化判定法の高精度化
津波に対する道路橋の対策

道路橋橋脚の限界状態

軸方向鉄筋のはらみ出し挙動に着目したRC橋脚の地震時限界状態の評価手法



はらみ出し

軸方向鉄筋

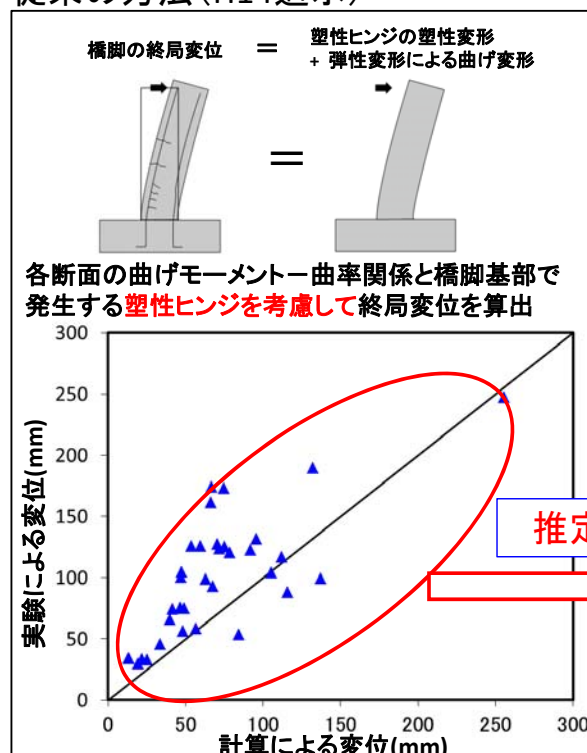
軸方向鉄筋のはらみ出し挙動

- 鉄筋自体のはらみ出しにくさ
- かぶりコンクリートによる抵抗
- 横拘束筋による抵抗

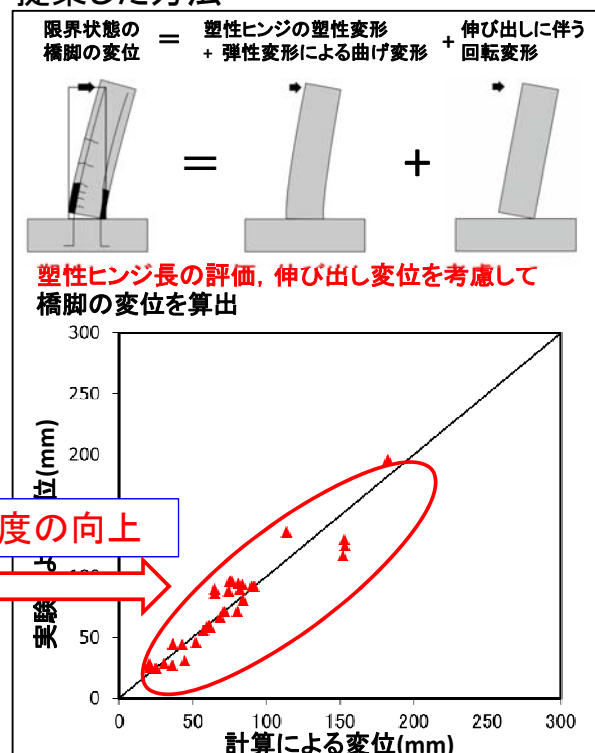
道路橋橋脚の限界状態

軸方向鉄筋のはらみ出し挙動に着目したRC橋脚の地震時限界状態の評価手法

従来の方法 (H14道示)



提案した方法



推定精度の向上

道路橋示方書 V 耐震設計編 (平成24年) に反映

道路橋橋脚の限界状態

出典: 日本道路協会



道路橋示方書 V 耐震設計編 P169,170
(平成24年)

(7) 耐震性能 2 の限界状態は、最外縁の軸方向引張鉄筋位置において軸方向鉄筋の引張ひずみが耐震性能 2 の許容引張ひずみに達するとき又は最外縁の軸方向圧縮鉄筋位置においてコンクリートの圧縮ひずみが限界圧縮ひずみに達するときのいずれか先に生じるときの状態とする。終局水平耐力 P_u は式 (10.3.6) により、耐震性能 2 の限界状態に相当する変位 δ_{ls2} は塑性ヒンジを考慮して式 (10.3.7) により、それぞれ算出する。

$$P_u = \frac{M_{ls2}}{h} \dots\dots\dots (10.3.6)$$

耐震性能2および3の限界状態に相当する変位算出式を反映

$$\delta_{ls2} = \delta_y + (\phi_{ls2} - \phi_y) L_p (h - L_p/2) \dots\dots\dots (10.3.7)$$

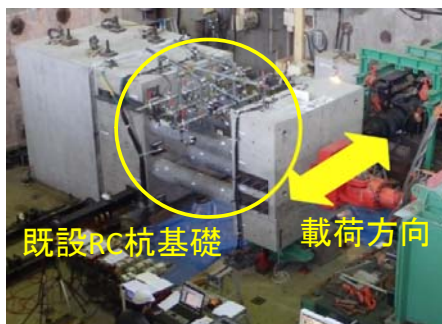
(8) 耐震性能 3 に対する限界状態は、最外縁の軸方向引張鉄筋位置において軸方向鉄筋の引張ひずみが耐震性能 3 の許容引張ひずみに達するとき又は最外縁の軸方向圧縮鉄筋位置においてコンクリートの圧縮ひずみが限界圧縮ひずみに達するときのいずれか先に生じるときの状態とする。耐震性能 3 の限界状態に相当する変位 δ_{ls3} は、式 (10.3.13) により算出する。

$$\delta_{ls3} = \delta_y + (\phi_{ls3} - \phi_y) L_p (h - L_p/2) \dots\dots\dots (10.3.13)$$

道路橋基礎の限界状態

既製RC杭基礎模型を用いた正負交番载荷実験

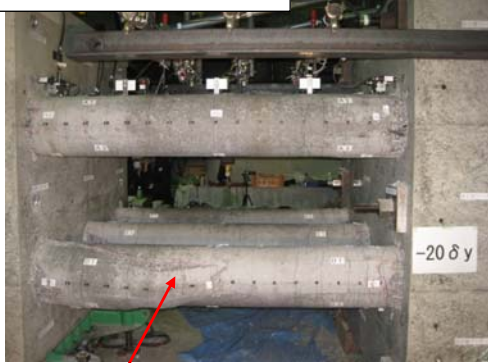
10δyの载荷様子



128倍速の映像

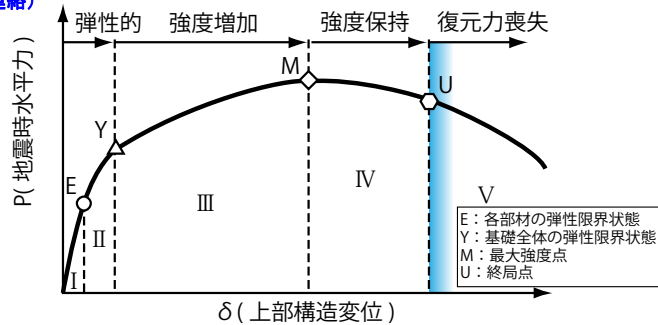
道路橋基礎の限界状態

実験終了後の杭基礎

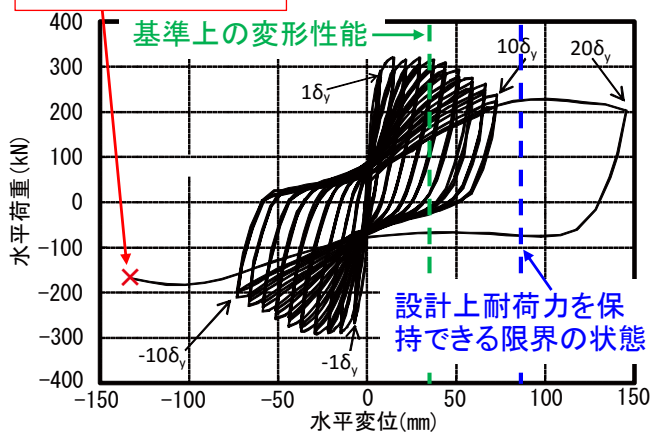


基礎に塑性化を考慮する場合の基礎の限界状態の考え方の例

(道路局事務連絡)



最終的な破壊状態



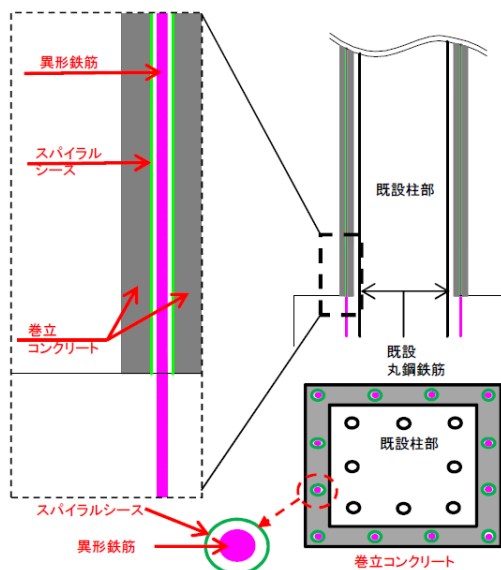
損傷度	復元力特性	定量的指標
I	損傷度低い	弾性範囲内
II		弾性範囲内
III		十分にある
IV		低下
V	損傷度高い	喪失

照査に用いる既設の橋梁基礎の地震時の限界状態(留めるべき損傷状態)の設定の考え方を提案

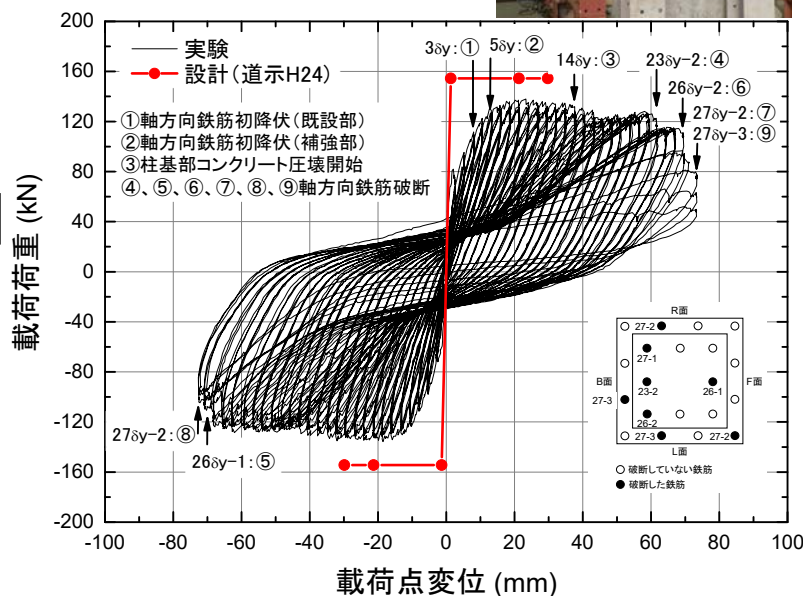
耐震補強における性能目標の応じた道路橋の補強方法の提案

アンボンド補強鉄筋による耐震補強設計法の提案

アンボンドの一例



水平変位—水平荷重の関係



耐震補強における性能目標の応じた道路橋の補強方法の提案

せん断破壊した橋座部に対する応急復旧工法の提案

調達容易なH型鋼材による橋座部の応急復旧工法

東日本大震災による橋座部のせん断破壊との比較

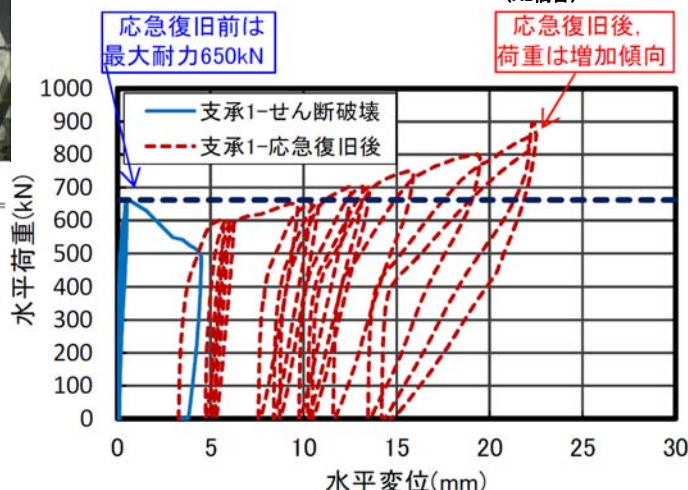
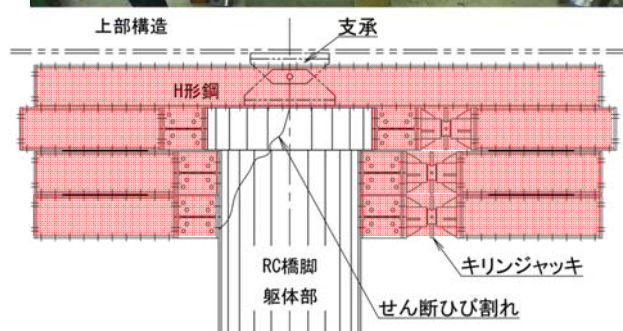


実験

実際の被害



大宮陸橋(国道118号線)
(A1橋台)



提案する応急復旧工法は、1～2日程度でRC橋脚橋座部の応急復旧が可能

報告の内容

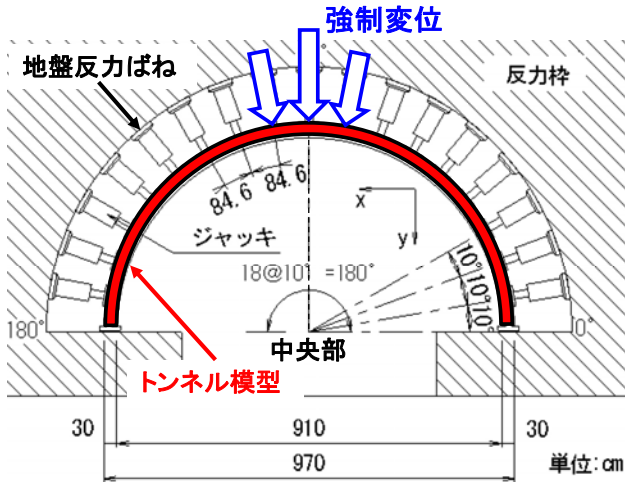
1. 道路橋の限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発
2. 山岳トンネルの限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発
3. 地盤変状を受ける道路橋および道路盛土の耐震性能の検証法と耐震設計法の開発
地盤変状を受ける道路橋の判定手法
道路盛土の耐震補強方法
4. 東日本大震災で被害を受けた構造物の対策方法
液状化判定法の高精度化
津波に対する道路橋の対策

山岳トンネルの限界状態

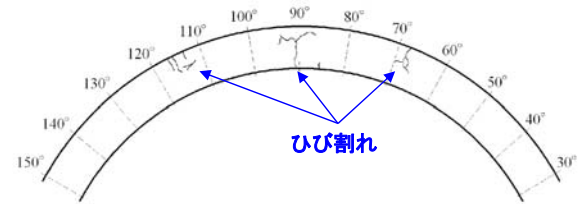
実大規模の載荷実験による、トンネルの破壊メカニズムの検討

曲げモーメントと軸圧縮力が作用する
荷重条件での実験

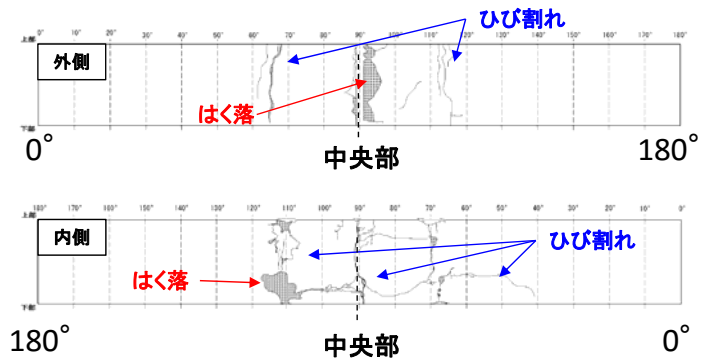
(地山側の拘束がある状態で天端部に
荷重が作用した場合を想定)



覆工構造全体の破壊直前の状況



覆工構造全体の破壊後の状況



山岳トンネルの限界状態

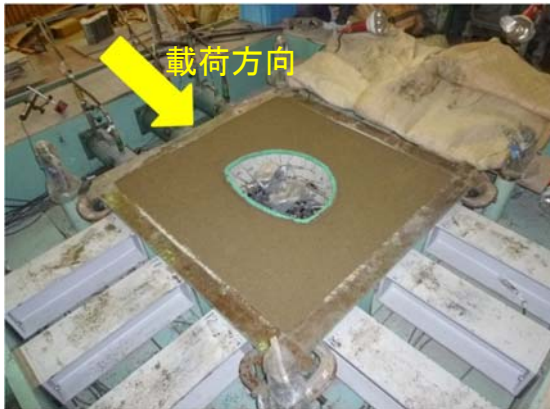
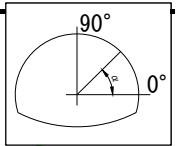
- 仮定した耐震性能に対する**限界状態**の整理
- 供用性**と**修復性**について着目し、想定される地震に対してトンネルの重要度を踏まえた**限界状態**を整理

想定する耐震性能と対応する限界状態の例

	限界状態
耐震性能1	地震によって覆工コンクリートの応力が 弾性挙動範囲内 であるか、 軽微な引張ひび割れ が発生する程度にとどまる
耐震性能2	地震によって覆工コンクリートが圧縮限界に達して破壊に至るのが 局所的なもの であり、 構造全体の耐力としては余裕を残した状態
耐震性能3	地震によって覆工コンクリートに圧縮破壊が複数箇所生じたとしても、 構造全体が崩壊せず、トンネル空間は保持されている状態

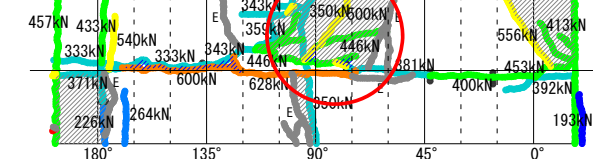
山岳トンネルに要求される耐震性能に応じた耐震対策の選定手法

山岳トンネルに対するはく落対策

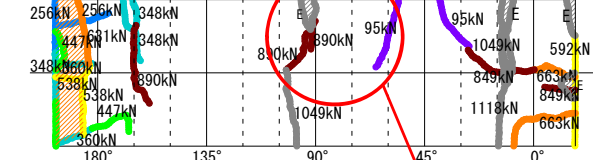


ひび割れ展開図

インパートの設置



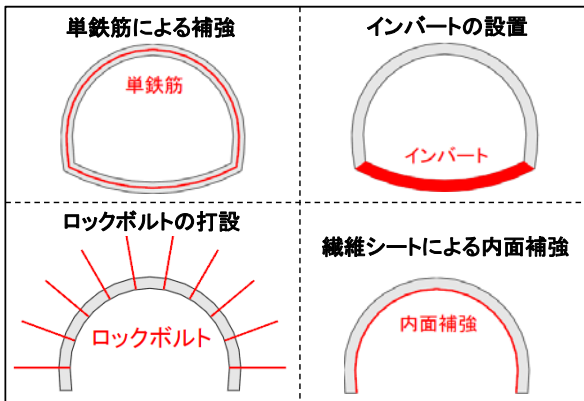
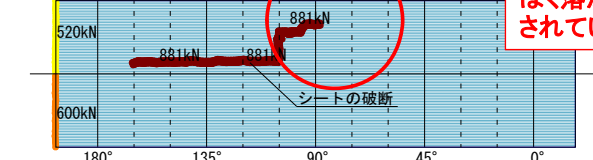
単鉄筋による補強



ロックボルトの打設



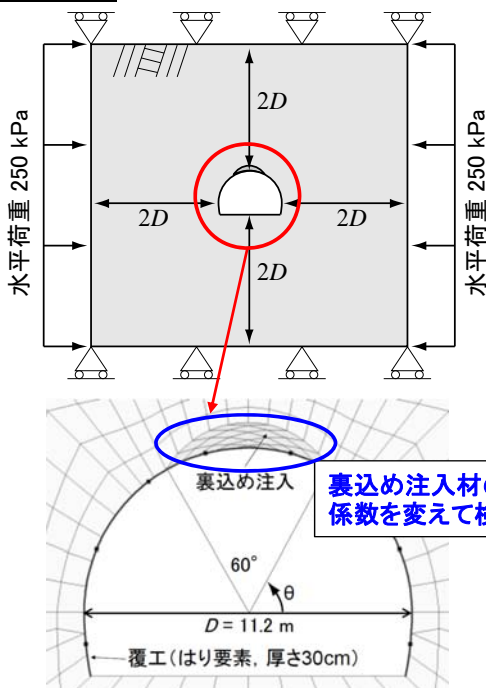
繊維シートによる内面補強



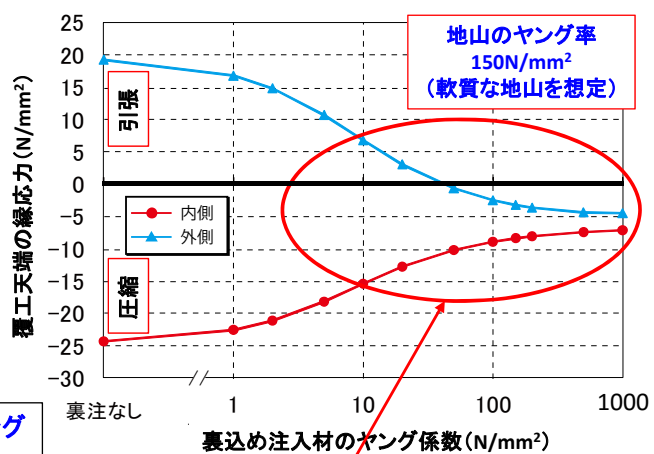
山岳トンネルに要求される耐震性能に応じた耐震対策の選定手法

覆工背面空洞の影響と裏込め注入による効果検証

解析モデル



覆工天端の縁応力に及ぼす裏込め注入材のヤング係数の影響



裏込め注入材のヤング係数を上げることで
覆工外側の引張応力が減少→圧縮側に転じる
覆工内側の圧縮応力が減少



山岳トンネルに要求される耐震性能に応じた耐震対策の選定手法

出典：日本道路協会



道路トンネル維持管理便覧【本体工編】P280 (平成24年)

③ 設計基準強度と配合

セメント系注入材の圧縮強度の目標値は、一般に 28 日圧縮強度で $1.0 \sim 1.5\text{N/mm}^2$ の例が多い。施工時には湧水がある場合や、過度に注入材が流動したりすることが考えられるため、注入後のばらつきを考慮し、設計基準強度を検討する必要がある。

非セメント系注入材（発泡ウレタン）の場合には、材料の単価が高く、配合（発泡倍率）による単価のばらつきも大きい。緩み土圧等の外力対策を目的とした注入なのか、空洞があっても長期間安定していた地山での、将来の突発性崩壊の防止を目的とした注入のかなどの対策の目的を明確にし、個別に設計基準強度を設定し、薬液の配合比率を定める必要がある。既存の材料には数倍から 40 倍発泡までの材料があるが、外力対策が必要な場合には、12 倍から 30 倍程度の材料が用いられている。

外力(地震含む)対策の場合の
背面空洞裏込め注入における
留意点を記載



報告の内容

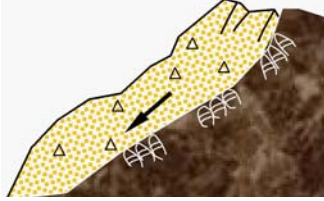
1. 道路橋の限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発
2. 山岳トンネルの限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発
3. 地盤変状を受ける道路橋および道路盛土の耐震性能の検証法と耐震設計法の開発
地盤変状を受ける道路橋の判定手法
道路盛土の耐震補強方法
4. 東日本大震災で被害を受けた構造物の対策方法
液状化判定法の高精度化
津波に対する道路橋の対策

地盤変状を受ける道路橋の判定手法

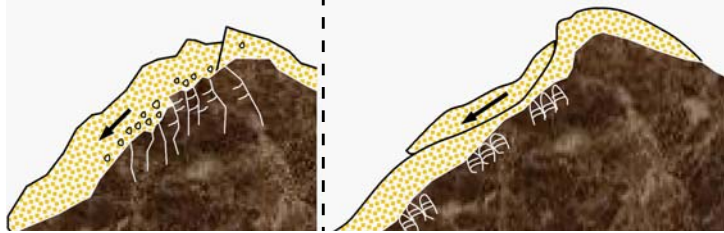
地震時の斜面地盤の主な変状パターンの把握

地震による斜面盤変状事例(42事例)を収集・分析し、地形・地質的特徴と変状パターンを整理

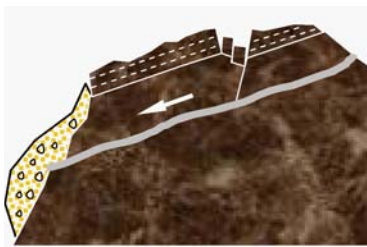
①古い地滑りなどにより形成された崩壊土のすべり又は崩壊



②厚い風化層あるいは未固結堆積層のすべり又は崩壊 (厚い風化層) (未固結堆積層)



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・崩壊



④下部の脆弱層の変形による上部の岩盤の変状又は崩壊



⑤柱状節理の発達した岩盤の節理面からの変状又は崩壊



斜面上の深基礎設計施工便覧(平成24年)に反映



地盤変状を受ける道路橋の判定手法

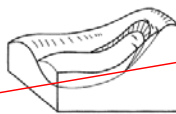
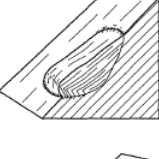

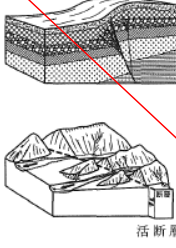
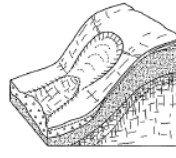
斜面上の深基礎設計施工便覧

斜面上の深基礎設計施工便覧(平成24年)P26-30

出典: 日本道路協会

懸念される現象に「地震」を追加

表-Ⅱ.1.4 設計・施工上注意すべき主な地形・地質 (その2)

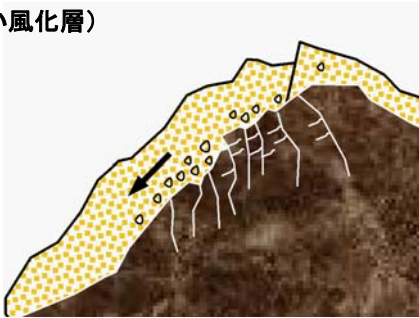
注意すべき地形・地質		懸念される現象 及び主な調査項目
地すべり 地形	 <ul style="list-style-type: none">等高線がすべり土塊の部分で開くような地形上部から下部に向かって滑る崖、緩斜面、舌端部を有する地形緩斜面での凹地形、湿地などの存在する地形	<p>【懸念される現象】</p> <ul style="list-style-type: none">時間をかけて地すべり土塊が移動したり、現在動いていない場合でも地震時に変動するなどの場合がある <p>【主な調査項目】</p> <ul style="list-style-type: none">災害履歴地すべり指定地の有無地すべり土塊の分布(平面、深度)地下水分布現在の活動度
岩盤クリープ 地形	 <ul style="list-style-type: none">岩盤斜面が重力により垂れ下がるように変形した地形	<p>【懸念される現象】</p> <ul style="list-style-type: none">時間をかけて岩盤斜面が移動したり、現在動いていない場合でも地震時に変動するなどの場合がある <p>【主な調査項目】</p> <ul style="list-style-type: none">移動速度、安定性の把握のための調査
流れ盤の地形、地質構造	 <ul style="list-style-type: none">地層の傾斜が地形(切土)の傾斜と同一方向に傾斜している地盤	<p>【懸念される現象】</p> <ul style="list-style-type: none">将来的な斜面崩壊、地すべり、地震時に変動する可能性がある <p>【主な調査項目】</p> <ul style="list-style-type: none">近傍の災害履歴対策工の有無地層の傾斜方向、割れ目、層構造湧水の有無
断層地形	 <ul style="list-style-type: none">過去の断層作用の結果生じた直線性のある地形破碎岩石、断層粘土、断層破砕帯に注意が必要地下水の流れや貯留に関連する	<p>【懸念される現象】</p> <ul style="list-style-type: none">施工時の湧水、崩壊の発生、地震時の断層変位の可能性がある <p>【主な調査項目】</p> <ul style="list-style-type: none">断層の分布(平面、傾斜方向)断層破砕帯の安定性、湧水の有無断層の活動度
未固結の地層が厚く堆積する斜面	 <ul style="list-style-type: none">火山灰、非溶結の火砕流堆積物など固結の進んでいない堆積物が厚く堆積している斜面深くまで風化が進んだ斜面	<p>【懸念される現象】</p> <ul style="list-style-type: none">時間をかけ徐々に変動したり、現在動いていない場合でも地震時に変動するなどの場合がある <p>【主な調査項目】</p> <ul style="list-style-type: none">未固結層又は風化層の分布(平面・深度)地盤の硬軟地下水分布

地盤変状を受ける道路橋の判定手法

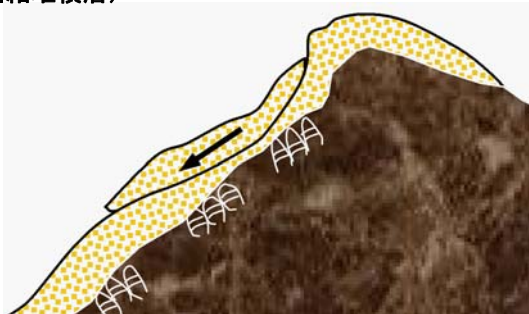
熊本地震による地盤の被害

②厚い風化層あるいは未固結堆積層の
すべり又は崩壊

(厚い風化層)



(未固結堆積層)



俵山大橋



地盤変状を受ける道路橋の判定手法

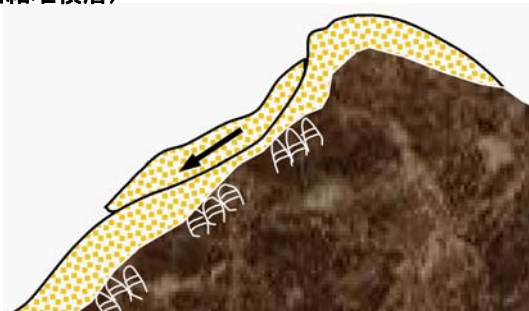
熊本地震による地盤の被害

②厚い風化層あるいは未固結堆積層の
すべり又は崩壊

(厚い風化層)



(未固結堆積層)



阿蘇長陽大橋

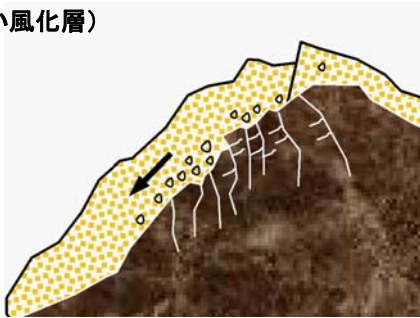


地盤変状を受ける道路橋の判定手法

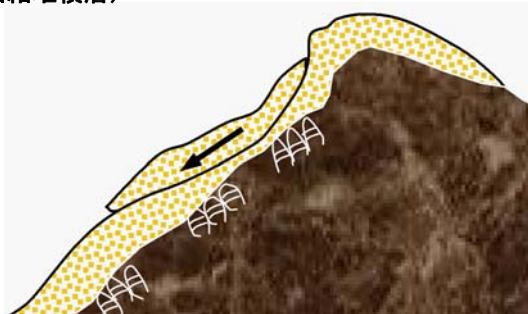
熊本地震による地盤の被害

- ② 厚い風化層あるいは未固結堆積層のすべり又は崩壊

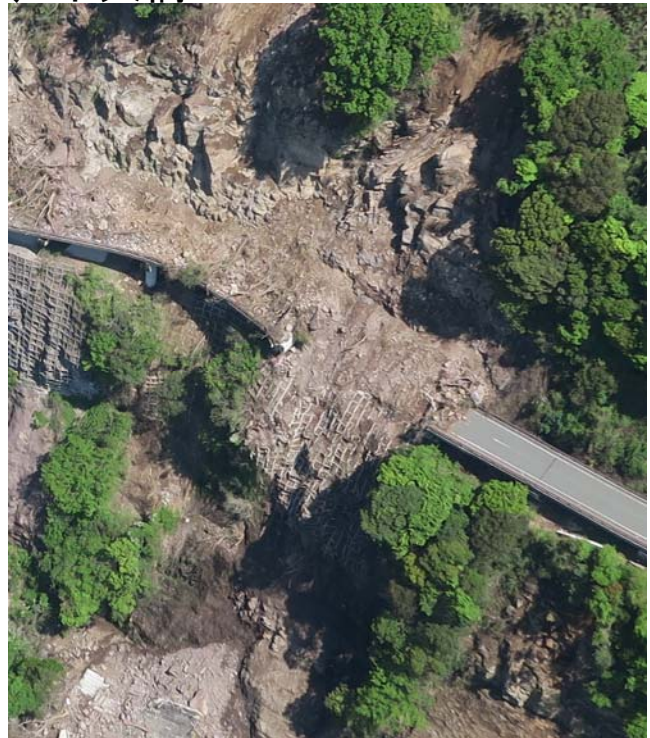
(厚い風化層)



(未固結堆積層)



戸下大橋



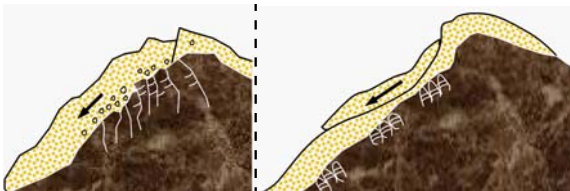
地盤変状を受ける道路橋の判定手法

熊本地震による地盤の被害

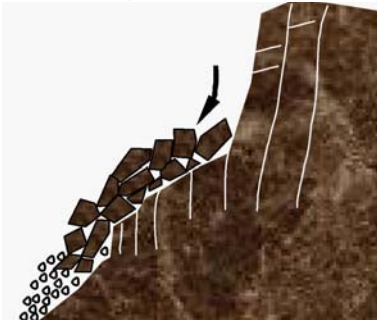
- ② 厚い風化層あるいは未固結堆積層のすべり又は崩壊

(厚い風化層)

(未固結堆積層)



- ⑤ 柱状節理の発達した岩盤の節理面からの変状又は崩壊



(複合的な地盤の被害)

阿蘇大橋



橋台



地盤変状を受ける道路橋の判定手法

平成28年熊本地震を踏まえた橋の耐震設計に関する留意点について

事務連絡(平成28年9月13日)

1. 道路橋示方書V 耐震設計編(以下、道示V という)2. 1(2)の規定において、**斜面変状**及び**断層変位**が橋に及ぼす影響については、**その影響を最小化できるように**、橋の架設位置や構造形式に配慮して構造計画等を行うこと。

断層変位: 地震によって断層を境に地盤がずれることによって生じる変位

斜面変状: 地震などによって斜面の崩壊やゆるみに伴う地盤の変位が生じている状態

斜面変状及び断層変位が生じると考えられる場合の橋の構造計画及び橋の耐震設計に関して、特に留意すべき点

(1) 斜面変状が生じると考えられる場合の橋の構造計画及び橋の耐震設計に関する留意点

- ① 斜面変状の発生の有無・規模・範囲を推定するための山地部における地形・地質・地盤調査
- ② 斜面変状の種類・範囲とそれに応じた下部構造の設置位置、形式・形状の選定等

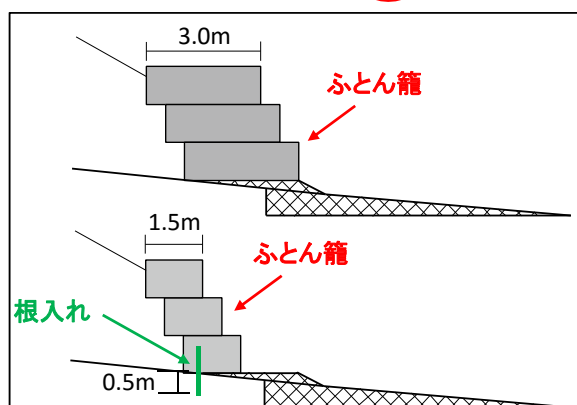
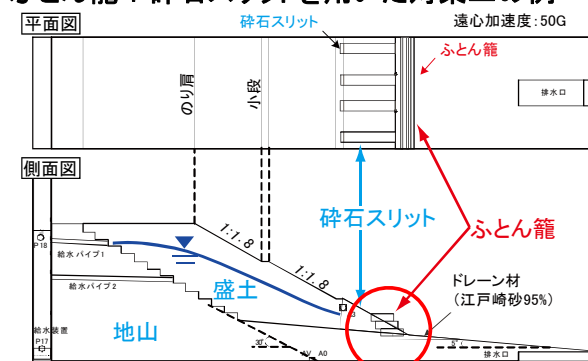
(2) 断層変位が生じると考えられる場合の橋の構造計画及び橋の耐震設計に関する留意点

- ① 活断層の位置等の調査
- ② 橋の位置、橋梁形式・構造の検討

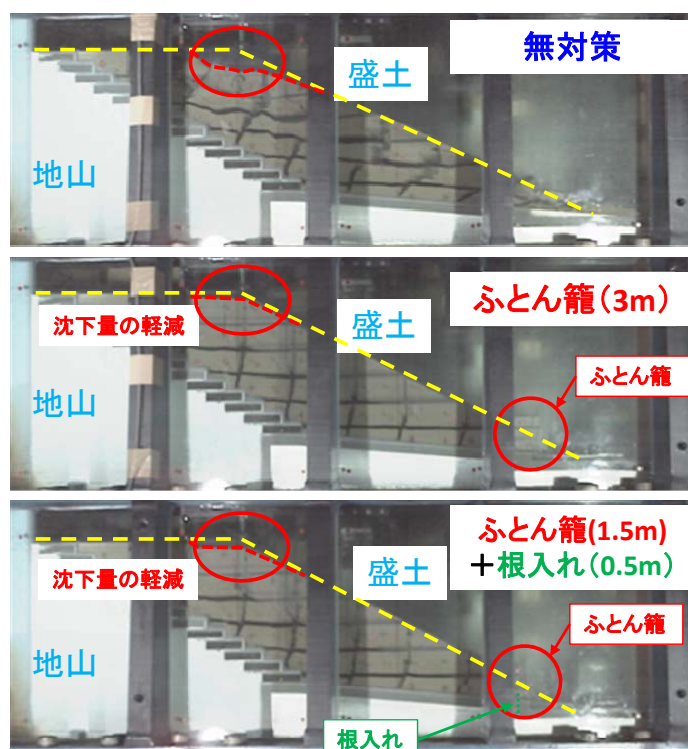
道路盛土の耐震補強方法

降雨等の影響を考慮した道路土工構造物の耐震補強手法の提案

ふとん籠+碎石スリットを用いた対策工の例



粘性土における遠心力載荷模型試験による加振後の盛土の変形状態



報告の内容

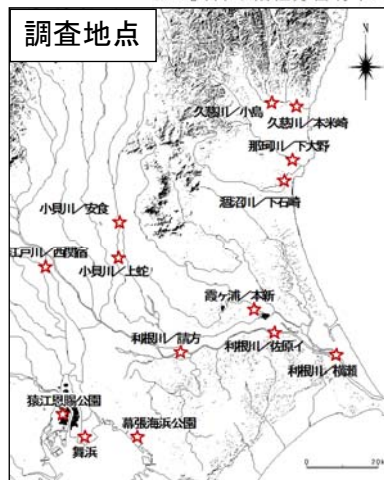
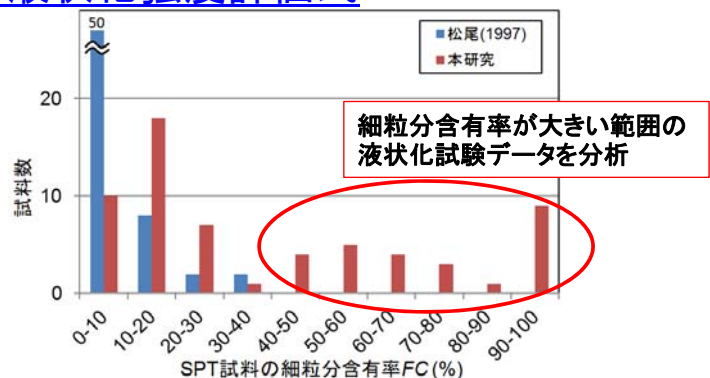
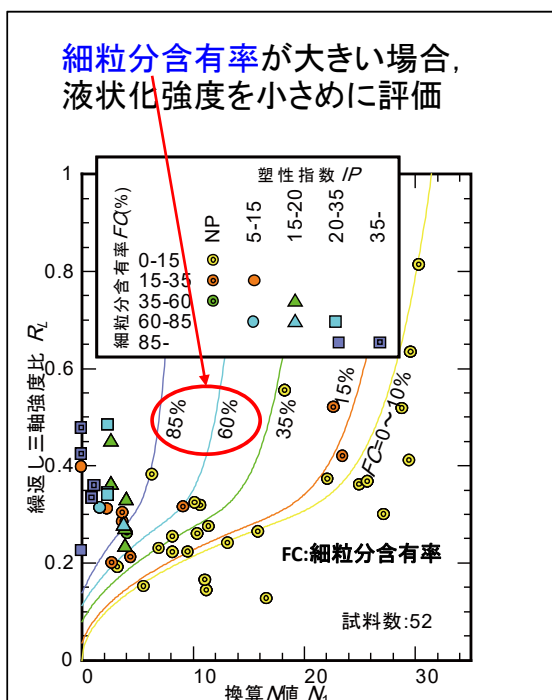
1. 道路橋の限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発
2. 山岳トンネルの限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発
3. 地盤変状を受ける道路橋および道路盛土の耐震性能の検証法と耐震設計法の開発
地盤変状を受ける道路橋の判定手法
道路盛土の耐震補強方法

4. **東日本大震災**で被害を受けた構造物の対策方法
液状化判定法の高精度化
津波に対する道路橋の対策

液状化判定法の高精度化

細粒分を含む砂に関する新たな液状化強度評価式

現行式

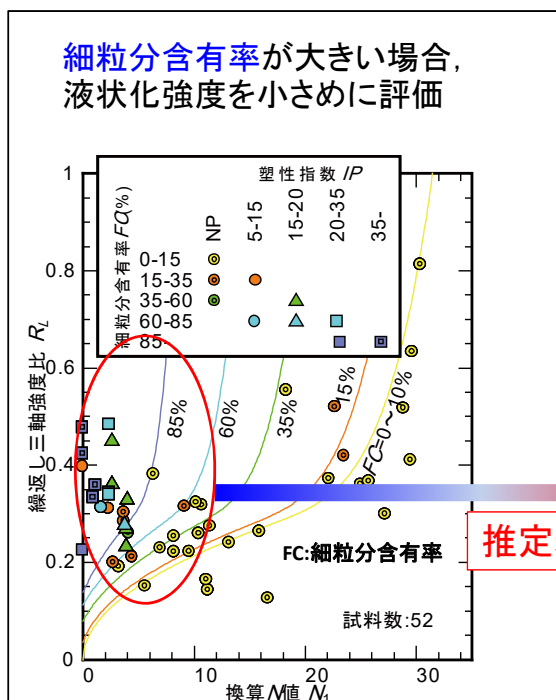


数多くの原位置試験データの液状化試験データを分析し、細粒分を含む砂に関する新たな液状化強度評価式を提案

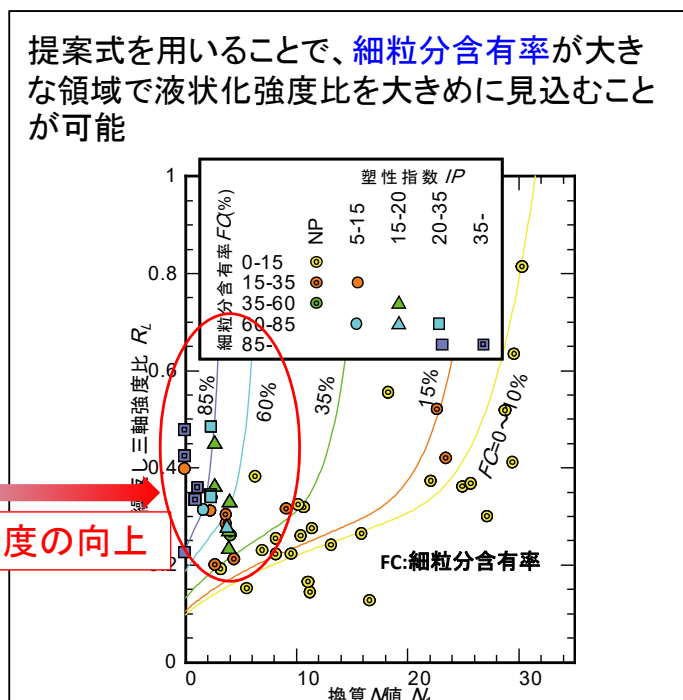
液状化判定法の高精度化

細粒分を含む砂に関する新たな液状化強度評価式

現行式



提案式



推定精度の向上

河川構造物の耐震性能照査指針(平成28年)に反映



液状化判定法の高精度化

出典: 国土交通省

河川構造物の耐震性能照査指針 P14-15
(平成28年)

液状化判定法の改定原案の作成

(3) 繰返し三軸強度比

繰返し三軸強度比 R_L は式(解6.3.10)により算出するものとする。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \dots\dots\dots (解6.3.10) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7 + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5}} & (14 \leq N_a) \end{cases}$$

ここで、

< 礫質土以外の場合 >

$$N_a = c_{FC}(N_1 + 2.47) - 2.47 \dots\dots\dots (解6.3.11)$$

$$N_1 = 170N / (\sigma'_v + 70) \dots\dots\dots (解6.3.12)$$

$$c_{FC} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \dots\dots\dots (解6.3.13) \\ (FC - 16)/12 & (40\% \leq FC) \end{cases}$$

< 礫質土の場合 >

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\} N_1 \dots\dots\dots (解6.3.14)$$

ここに、

R_L : 繰返し三軸強度比

N : 標準貫入試験から得られる N 値

N_1 : 有効上載圧100kN/m²相当に換算した N 値

N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

c_{FC} : 細粒分含有率による N 値の補正係数

FC : 細粒分含有率 (%) (粒径75 μ m以下の土粒子の通過質量百分率)

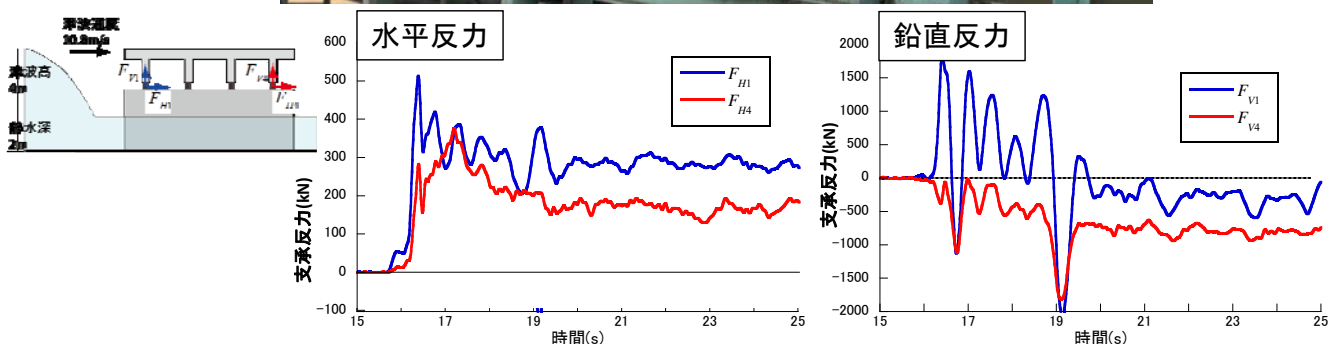
D_{50} : 50%粒径 (mm)



津波に対する道路橋の対策

津波に対する橋の挙動メカニズム

水路実験の様子



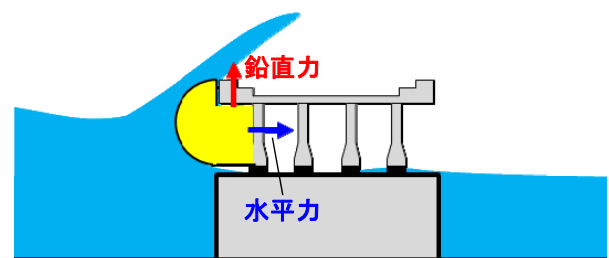
津波に対する道路橋の対策

フェアリングの取付による支承反力の軽減効果

長大橋の耐風対策としての活用事例



津波対策としての設置例



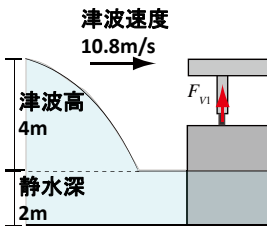
フェアリングによる整流効果により
津波による橋桁に作用する圧力を低減
→支承部に作用する水平力, 鉛直力の
軽減を期待

津波に対する道路橋の対策

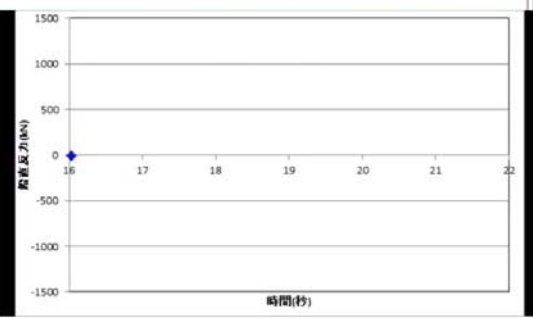
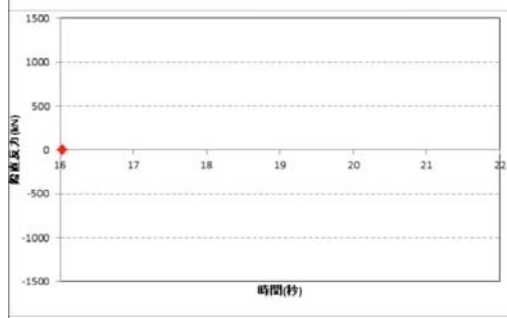
フェアリングの取付による支承反力の軽減効果

フェアリングなし

半円フェアリング



支承部に生じる鉛直反力



まとめ

1. 道路橋の限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発

- 軸方向鉄筋のはらみ出し挙動に着目したRC橋脚の地震時限界状態の評価手法を提案
- 既成RC杭基礎模型を用いた載荷実験に基づく照査に用いる限界状態の検討

2. 山岳トンネルの限界状態の設定法の提示と耐震設計法の開発

- 山岳トンネルの限界状態と対策の考え方を整理
- 山岳トンネルの供用性と修復性に着目し、重要度を踏まえた耐震性能に応じた限界状態を整理

3. 地盤変状を受ける道路橋および道路盛土の耐震性能の検証法と耐震設計法の開発

- 地震時に地盤変状を起こしやすい斜面地盤条件の判定手法の提案

4. 東日本大震災で被害を受けた構造物の対策方法

- 水路実験により橋桁の断面特性の違いを踏まえた津波の影響を受ける橋の挙動メカニズムの解明
- 細粒分を含む砂の新たな液状化強度評価式を提案

研究成果を反映

- 道路橋示方書V耐震設計編(平成24年)
- 道路トンネル維持管理便覧【本体工編】(平成24年)
- 斜面上の深基礎設計施工便覧(平成24年)
- 河川構造物の耐震性能照査指針(平成28年)
- 既設橋の耐震補強設計に関する技術資料(土研資料第4244号)(平成24年11月)
- 津波が作用したときの橋梁上部構造の挙動に関する研究(土研資料第4318号)(平成28年1月)

