



第14回 国際圧入学会 圧入工学セミナー in 金沢2024
～能登半島地震からの復興・災害対策～
2024/10/9 16:15～16:45

橋梁基礎の補強・復旧技術

中央大学理工学部 都市環境学科 基礎・地下構造研究室
教授 西岡 英俊

地震及び豪雨により被災された方々に心よりお見舞い申し上げます。



はじめに

- 兵庫県南部地震以降, 新設基礎はレベル2地震動を考慮した耐震設計が行われるようになった。
- それ以前に建設された既設構造物の耐震補強は, 地上部分 (特に柱のせん断破壊対策) が優先的に実施されてきた。
- 本発表では, 過去の橋梁基礎の被害事例と復旧事例を振り返りつつ, 耐震補強で必要な事項と留意すべき事項について説明する。



橋梁基礎・下部構造の地震被害

令和6年(2024年)能登半島地震



志賀町酒見大橋



パイルベント式橋脚の折損による落橋



※令和6年能登半島地震では橋梁基礎が被災事例は比較的少なく、現行耐震基準を満足しない基礎であっても落橋に至った事例は限られているが、地震動の周期特性との関係などの影響については今後慎重に分析すべきと思われる

山栗祐樹, 西岡英俊, 渡邊健治: 令和6年能登半島地震における斜角橋梁の落橋被害について, 地震工学研究発表会, 2024.9



令和6年(2024年)能登半島地震での 杭基礎建物の被害事例(輪島市内)



群杭・ラーメン構造であったが、
杭の破壊or沈下で転倒



液状化による支持力喪失で大きく沈下?



地震時の基礎の被害事例のまとめ

- 転倒にまで至る事例の大半は、液状化地盤上での支持力喪失（直接基礎・木杭基礎）、側方流動や周辺斜面の崩壊などの大規模な地盤変位の発生、構造上の不静定次数が低いパイルベント構造での杭体破壊などであった。
- 能登半島地震での杭基礎建物の倒壊事例からは、不静定次数が高いラーメン構造の群杭基礎であっても、杭体の脆性的な破壊（引抜き破断やせん断破壊）や支持力の喪失等が生じれば、倒壊に至る可能性があることを示している。
- 倒壊に至らずとも、残留変位の発生により、供用不能となる場合や、機能低下を生じる場合もある。



橋梁基礎の応急復旧事例

※地震での被災事例のほか, 水害(洗堀)での復旧事例についても紹介する

平成24年7月九州北部豪雨 JR九州久大本線隈上川橋りょう

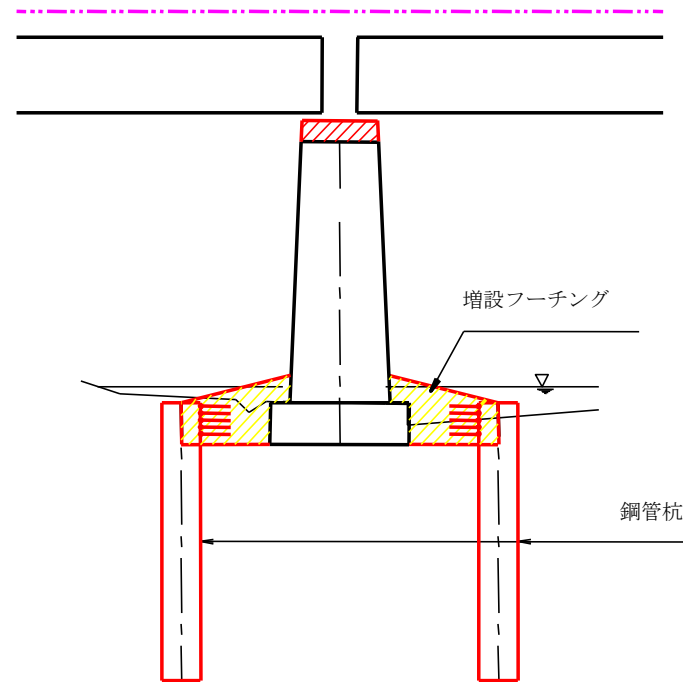


- 昭和6年建設の直接基礎(フーチング寸法4.05m×2.15m)
- ⇒出水期中は仮ベントの設置が困難で半年以上の運休が危惧
- ⇒被災橋脚を再供用して早期(約1.5ヶ月)の応急復旧を実現

出典:土木学会構造工学委員会 既設構造物を対象とした安全性評価研究小委員会報告書および講習会資料, 2017.
角ら, 西岡ら:第48回地盤工学研究発表会概要集, 2013, Kuroki, etc.:Proc. of 1st ICPE, Kochi, 2018



平成24年7月九州北部豪雨 JR九州久大本線隈上川橋りょう 本復旧工事（運行しながら翌出水期までに実施）



- 施工制約（玉石&空頭制限）からジャイロプレス工法の鋼管井筒基礎で本復旧
- 全鉛直荷重を支持できるように剛に接合（スタッド鉄筋）

出典：土木学会構造工学委員会 既設構造物を対象とした安全性評価研究小委員会報告書および講習会資料，2017.
角ら，西岡ら：第48回地盤工学研究発表会概要集，2013，Kuroki, etc.:Proc. of 1st ICPE, Kochi, 2018

令和3年7月の大雨

静岡県沼津市黄瀬川大橋（県道380号, 旧・国道1号線）



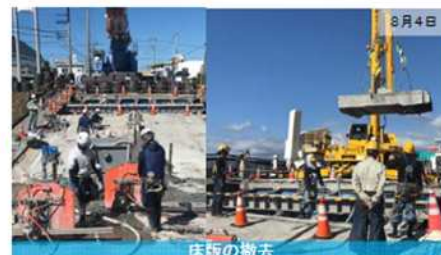
橋軸方向に傾斜しつつ, 大きく沈下

中央大学

県道380号 黄瀬川大橋

応急復旧までの道のり

静岡県沼津市と清水町を結ぶ県道380号富士清水線 黄瀬川大橋は、令和3年7月梅雨前線に伴う大雨により橋脚の一部が沈下し、7月3日から通行止め。国・県・地元建設業者で連携し、作業の安全確保をしながら、損傷した橋梁の床版及び桁の撤去を行い、既存の構造物を活用した形で応急組立橋を設置することで早期の応急復旧を実施。



応急復旧工期 :約2か月

被災した橋脚と桁を撤去
して応急組立桁を仮設

出典:静岡県Webサイト

https://www.pref.shizuoka.jp/_res/projects/default_project/_page_001/046/511/gaiyou.pdf





被災した基礎構造物の応急復旧事例のまとめ

- 残留変位が発生しても転倒・倒壊・落橋に至っておらず、桁が再利用可能な状況であれば、早期の応急復旧にチャレンジする価値がある。
- 応急復旧としては、仮設基礎の設置に限らず、被災基礎の再利用の可能性も検討すべきである。
- 被災基礎の再利用や仮設基礎を用いた応急復旧を目指す場合には、「残留変位をどう処理するか?」「応急復旧中の必要性能をどう考えるか?」「最終的な恒久復旧をどうするか?」等について考える必要がある。

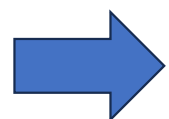


橋梁基礎の補強技術



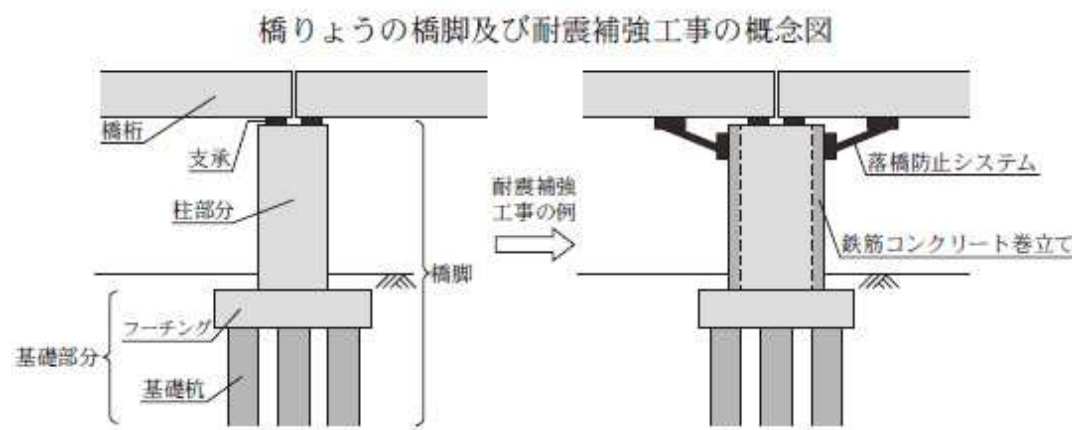
橋梁下部構造の補強設計の難しさ

- 弱点を叩いても別の弱点が表れてくる恐れ(いたちごっこ)
- 地上部分を補強したことで基礎の耐震性が低下する場合も



会計検査院 平成24年度決算検査報告

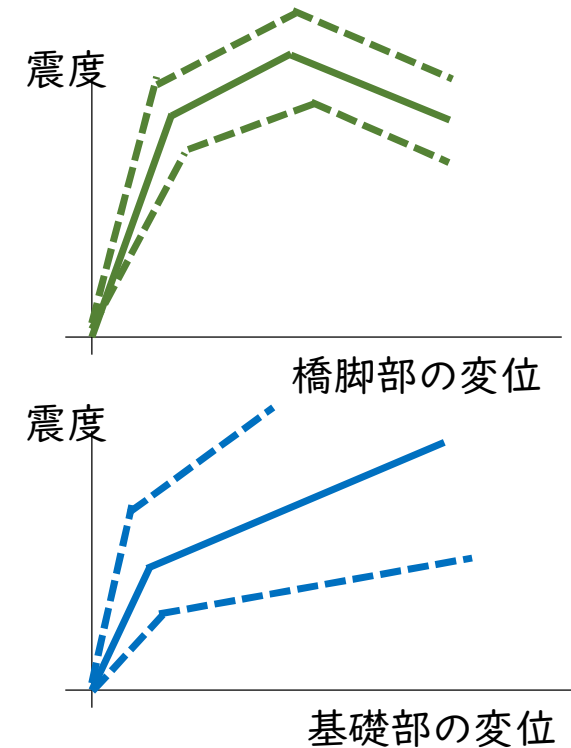
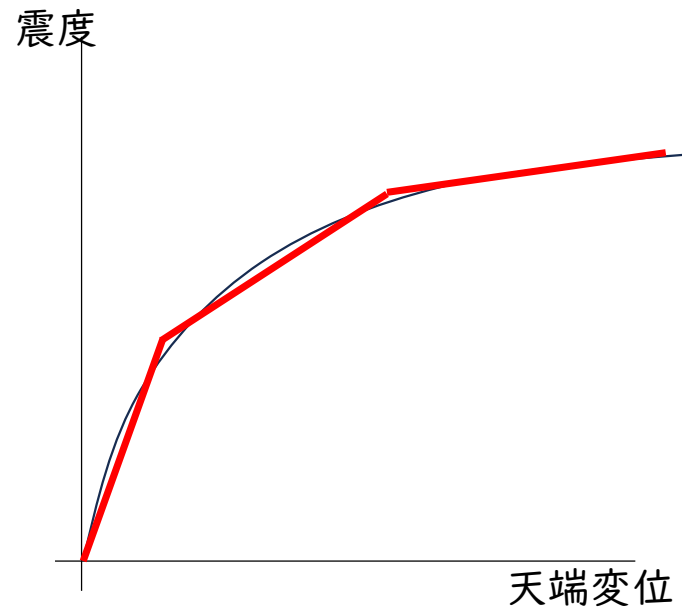
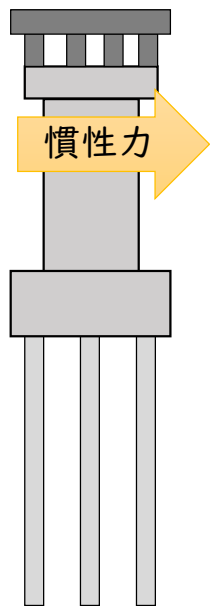
既設橋りょうの耐震補強工事の設計について、橋脚の基礎部分に与える影響を考慮した工法選定を行うことなどにより、橋脚の基礎部分を含めて橋りょう全体としての耐震性能を確保できるよう適宜の処置を要求し及び是正改善の処置を求めたもの



橋脚の基礎部分については、鉄筋コンクリート巻立てなどにより橋脚の自重が増加することによる影響により、レベルⅠ地震動に対する耐力が確保できていない計算結果となっていた



レベル2地震動に対する基本的な設計思想

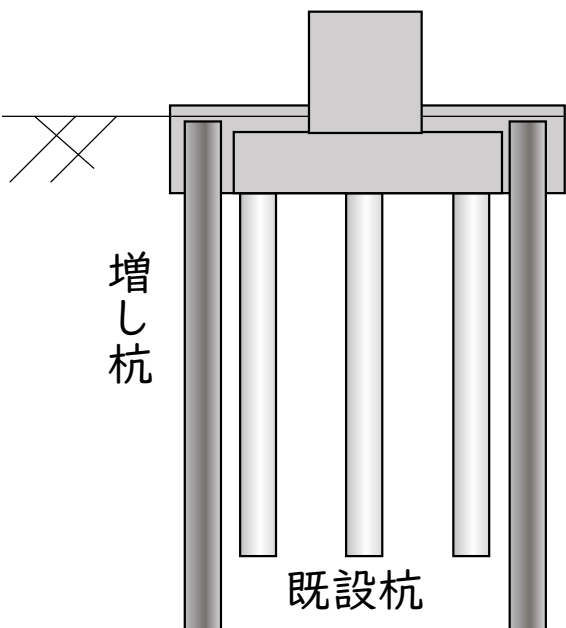


- どこからどのように壊れていくのかを考える。
- 少なくとも上下部一体（理想は橋梁全体系）で考える必要がある。
- 実務上, 上下部を分離して設計する場合には, 相互の強度の大小関係に注意する。
- その際, 人工部材と自然地盤で推定精度が大きく異なることに注意する。



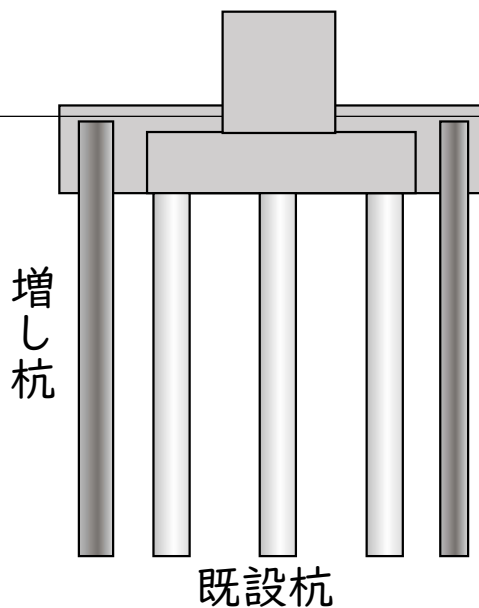
橋梁基礎の主な補強工法と設計法のパターン

新しい基礎部材を増設し、
新部材のみで抵抗する



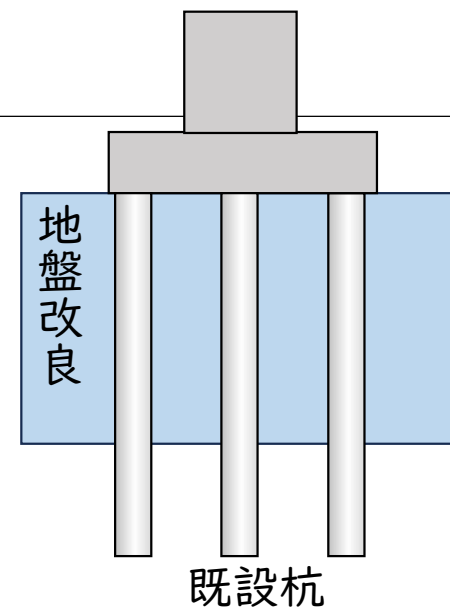
既設杭の抵抗を無視すれば
設計計算は容易
(直接基礎や木杭ならそれほど不合理ではない)

新しい基礎部材を増設し、
現部材の破壊を回避する



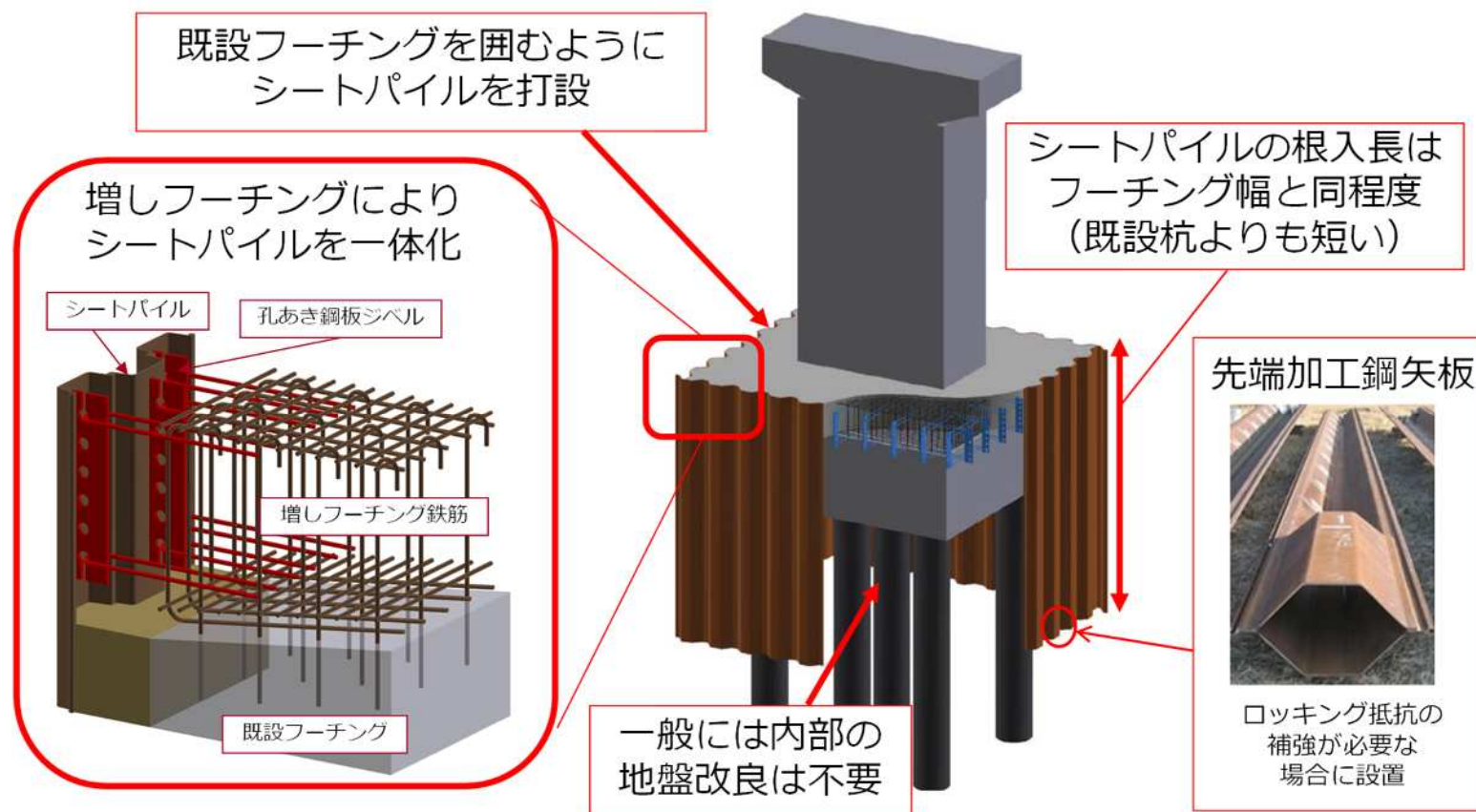
設計計算の難易度大
(既設杭と増し杭での荷重負担
割合や群杭効果の評価等)

地盤を強化する
(主に液状化対策)



「液状化させない」こと以外の
効果を定量評価しにくい

圧入技術を用いた耐震補強工法の例 シートパイル補強工法



平成29年度 地盤工学会賞(技術開発賞) シートパイル補強工法 ―シートパイルによる既設構造物基礎の耐震補強技術―
受賞者: 神田政幸, 西岡英俊, 佐名川太亮(鉄道総合技術研究所) 喜多直之, 光森章(大林組) 妙中真治, 乙志和孝(新日鐵住金)

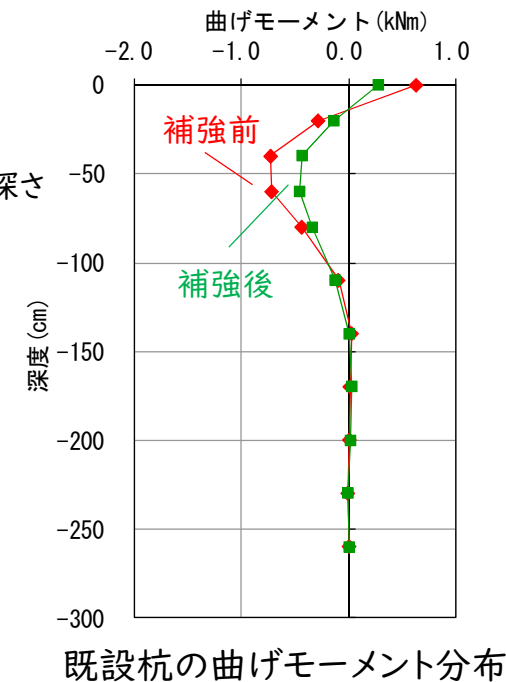
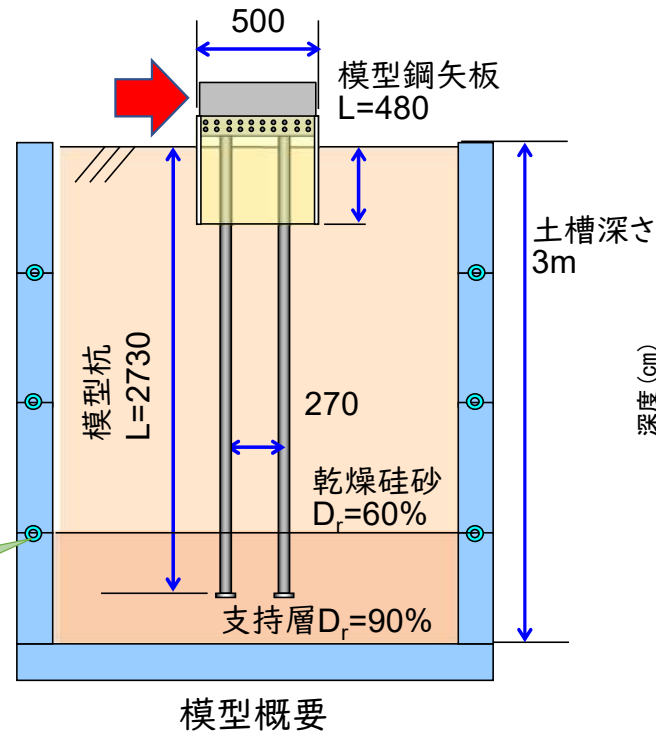


1) 鋼矢板による既設基礎の補強メカニズム解明

- 1/10スケールの模型を用いた静的水平載荷実験を実施
- 補強により既設杭の断面力が低減
- 複合基礎としての抵抗メカニズムを解明



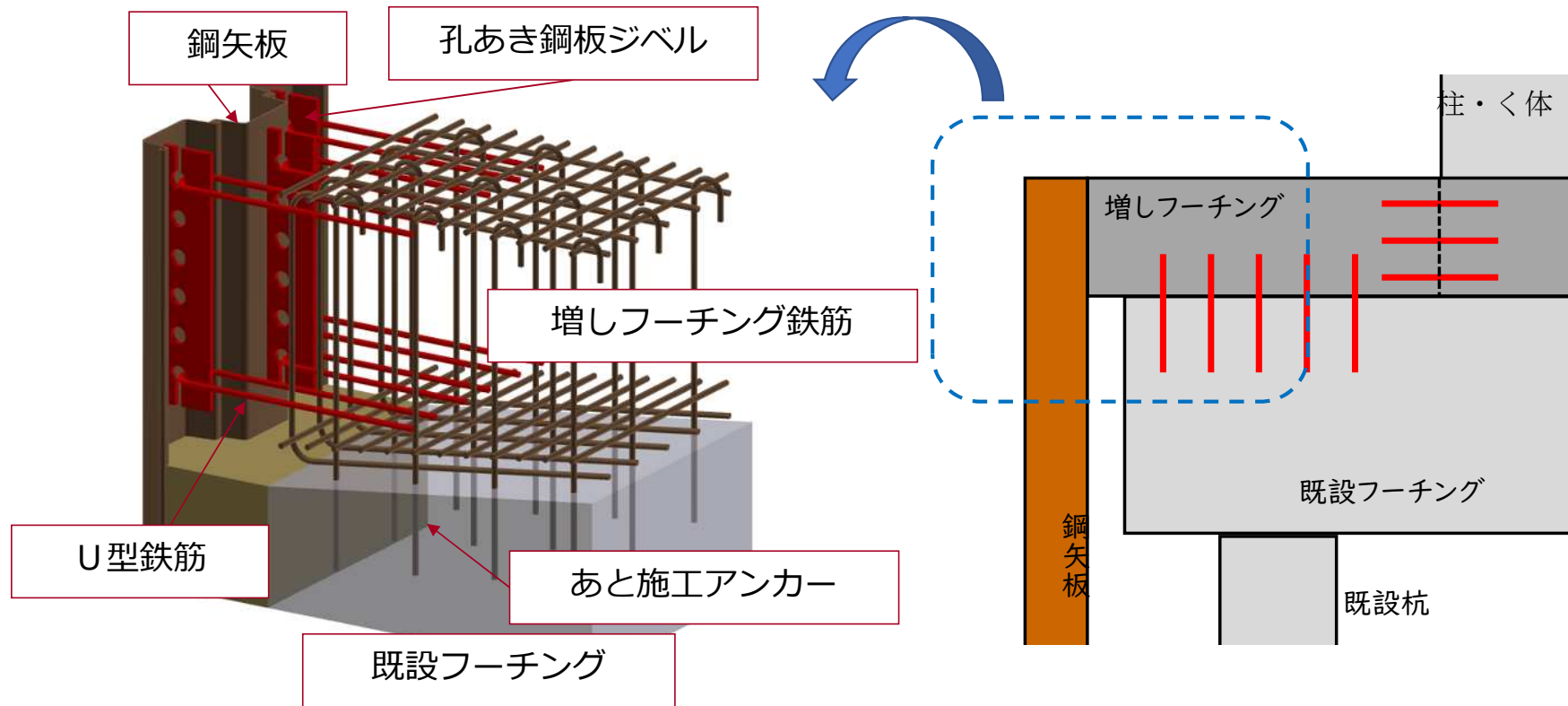
「既設杭の断面力を減らして、杭体の折損を回避する」



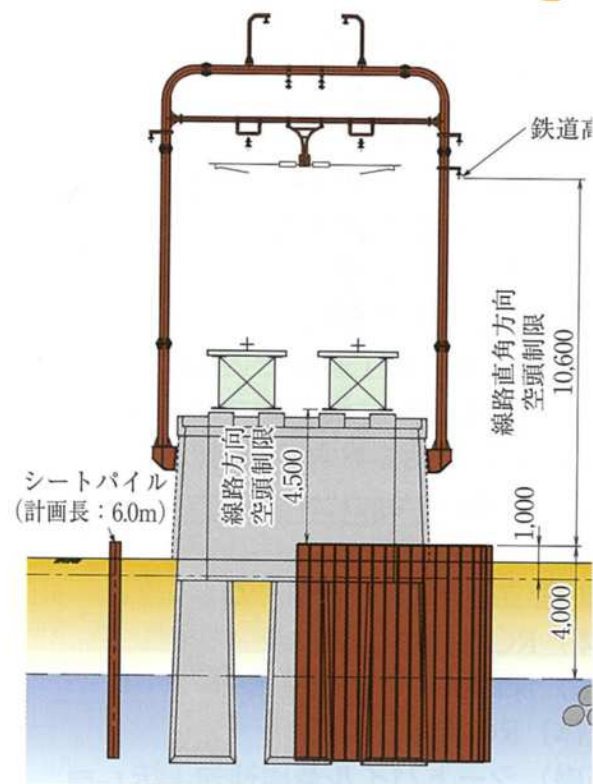
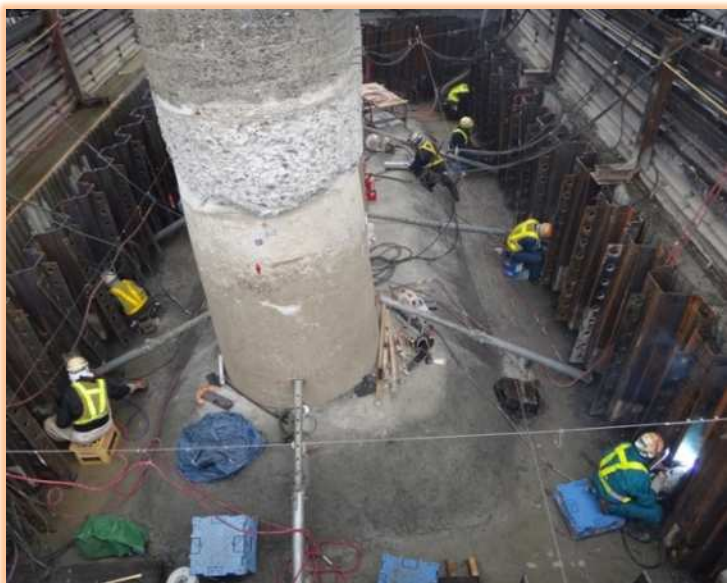


2) 鋼矢板と増しフーチングの接合技術（評価と設計法）

- 孔あき鋼板ジベルを活用することで接合部の配金の煩雑性を解消し, 施工性を改善
- 補強による基礎寸法の拡幅量を最小限に抑制



シートパイル補強工法の施工事例 京王線多摩川橋梁

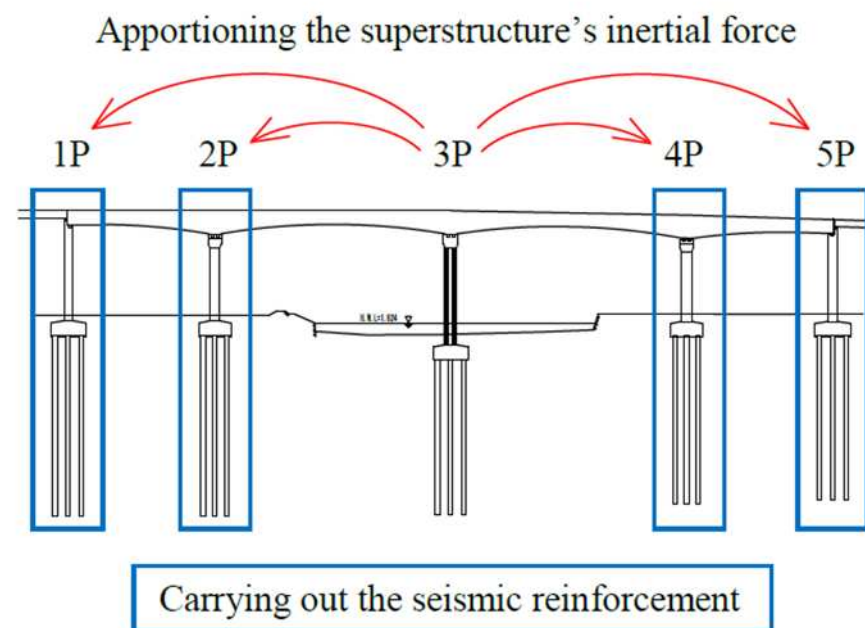


3本×1列の群杭基礎（井筒基礎）を耐震補強

基礎工（2016年5月号）参照



シートパイル補強工法の施工事例 本四備讃線大東川橋梁



- 4径間連続PC橋の耐震補強に際して、施工難易度が高い河川内橋脚の補強を回避するため、地上部の橋脚を補強・剛性増加により、慣性力負担を分散させることを目指した。



基礎の耐震補強工法に関する最近の研究事例紹介

- アルミ棒積層体を用いた既設杭・補強矢板間の相互作用に着目した模型実験

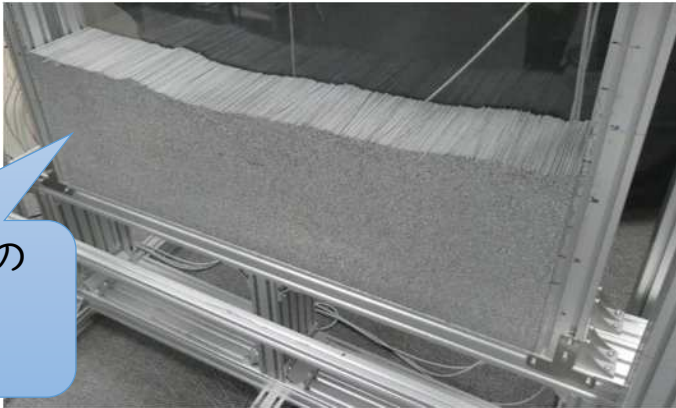
※本研究は, 鉄鋼連盟「鋼構造研究・教育助成事業」の助成を受けて実施した

アルミ棒積層模型地盤とは？

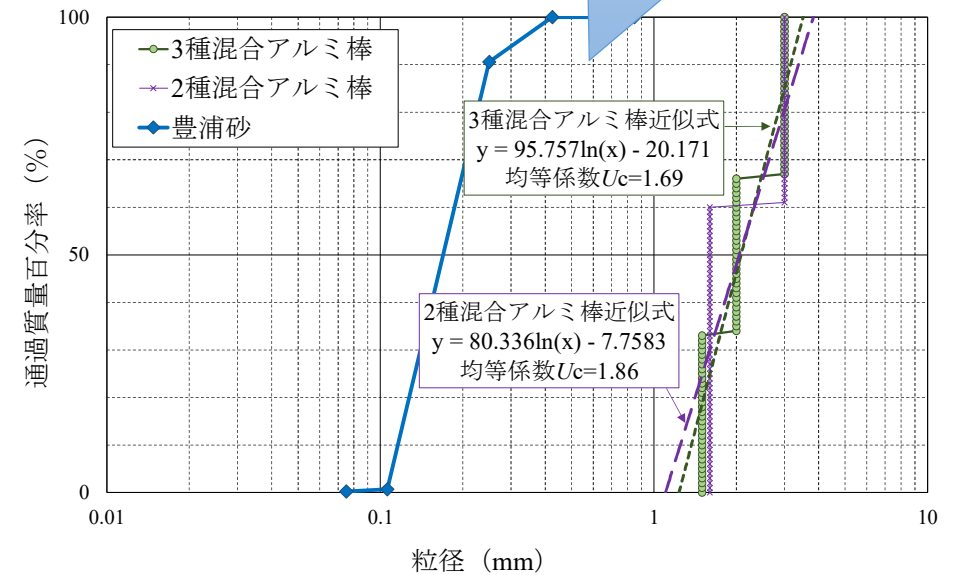


アルミの比重=2.71
≒土粒子の比重

模型地盤全体での
単位体積重量
≒21kN/m³



均等係数が豊浦砂と
同程度となるように
複数の径を混合



- 径の異なるアルミ棒を人力で積み重ねたもの
- アルミ棒一つが土粒子一つに相当する2次元の模型地盤と解釈できる
- 昭和40年代からある古典的な実験手法の一つ



アルミ棒積層模型地盤を用いた2次元模型実験の狙い

主な実験パラメータ

- ✓ 既設杭-補強矢板の離隔距離
- ✓ 既設杭-補強矢板の剛性比

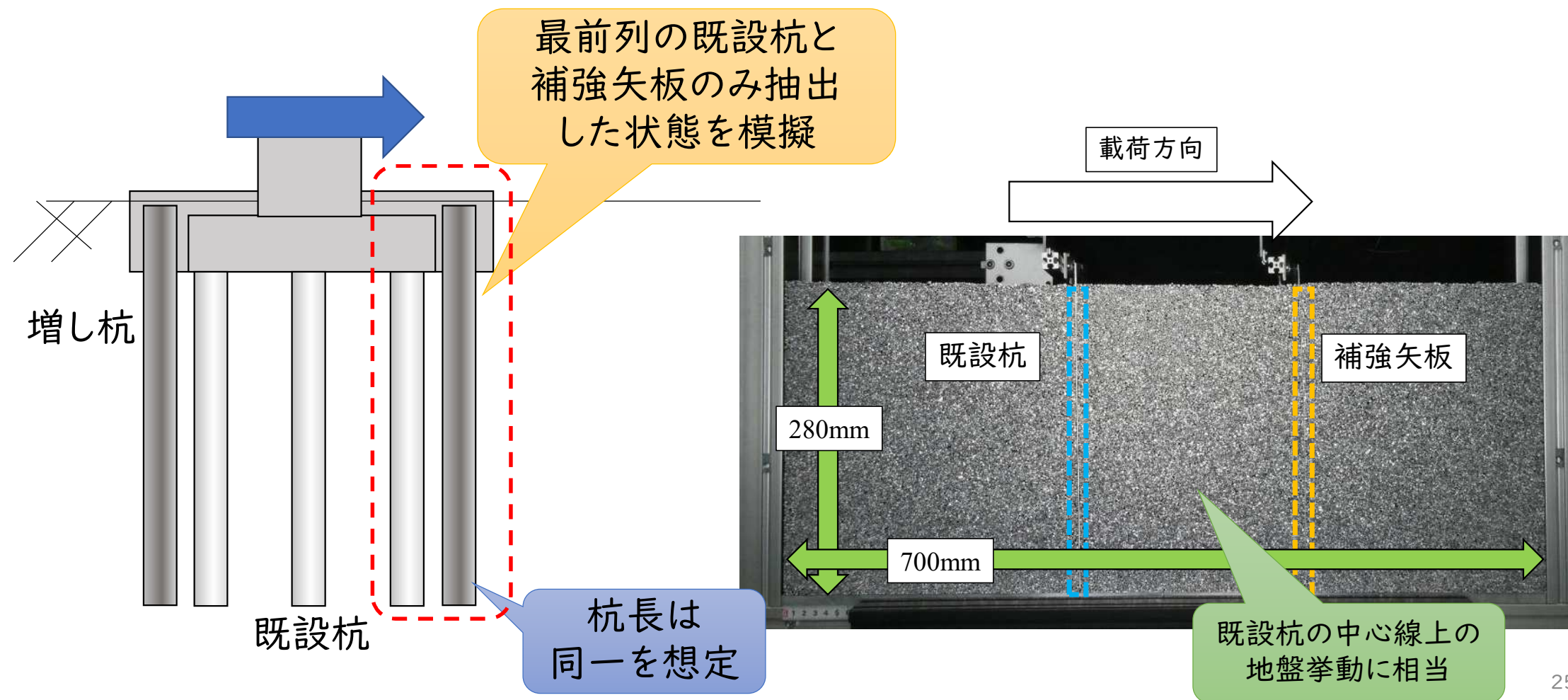


- 荷重変位関係の比較
- 地盤挙動の画像解析

- ◆ 既設杭が負担する荷重への低減効果
- ◆ 低減効果と地盤挙動との関連性



模型と実構造物との対応





2次元模型実験 実験ケース

模型杭	補強矢板	既設杭に対する $1/\beta$ の比	離隔距離
□ アルミ板 • $t=1.5\text{mm}$ • $1/\beta=73.4\text{mm}$ $\rightarrow \beta L=3.81$ 一般的な杭の値	□ アルミ板 • $t=2.0\text{mm}$ • $1/\beta=88.7\text{mm}$	1.2	30mm ~210mm
	□ アルミ板 • $t=1.5\text{mm}$ • $1/\beta=73.4\text{mm}$	1.0	30mm ~210mm
	□ アルミ板 • $t=0.8\text{mm}$ • $1/\beta=48.1\text{mm}$	0.7	30mm ~210mm

高剛性
矢板補強

同剛性
矢板補強

低剛性
矢板補強

※実物の杭径Dの $1/\beta$ に対する比は1/4程度
⇒ 離隔距離を考える際の模型杭の杭径Dは20mm程度

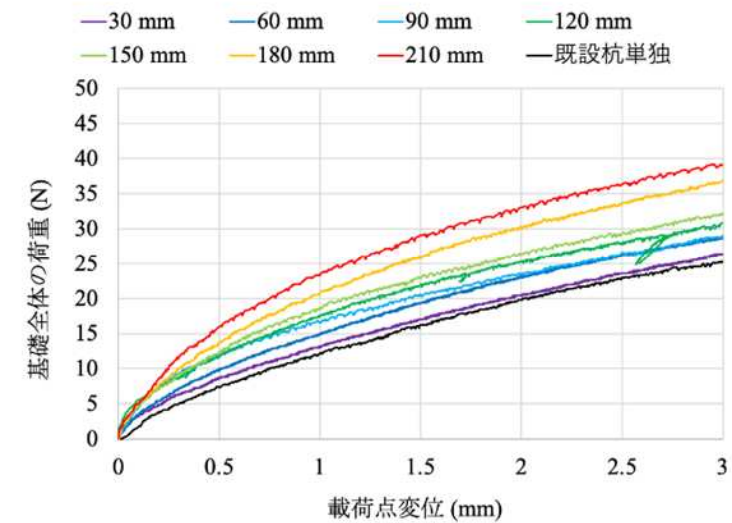
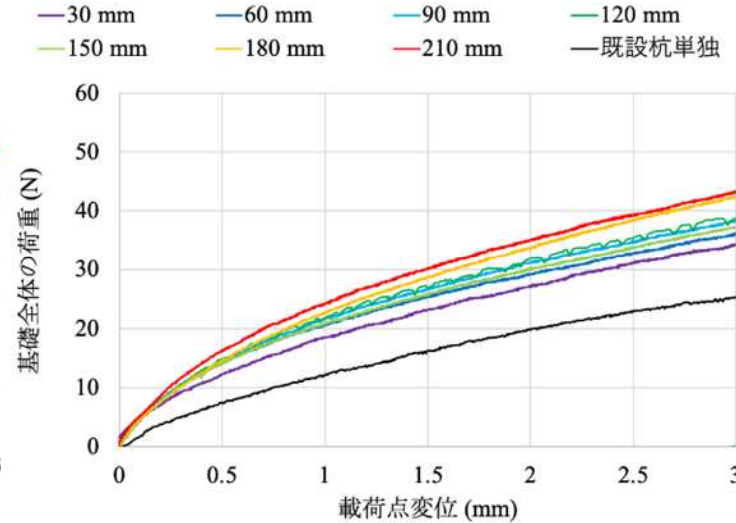
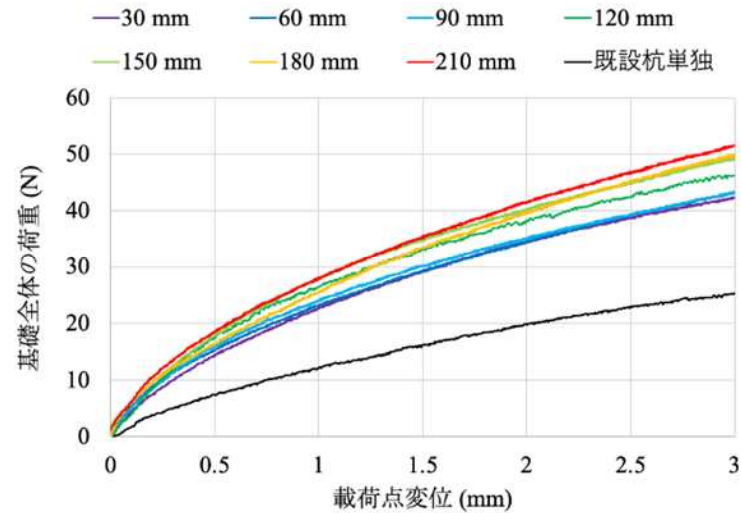


2次元模型実験 基礎全体の荷重と変位の関係

高剛性
矢板補強

同剛性
矢板補強

低剛性
矢板補強



補強矢板の剛性が高いほど全体抵抗が増加

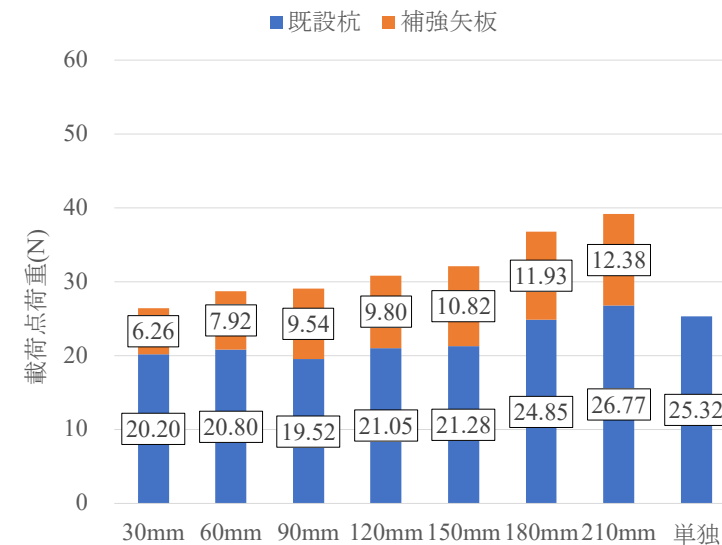
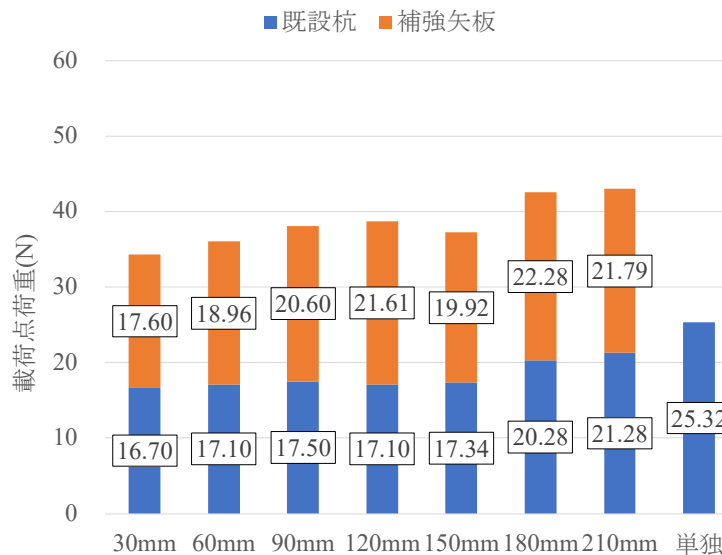
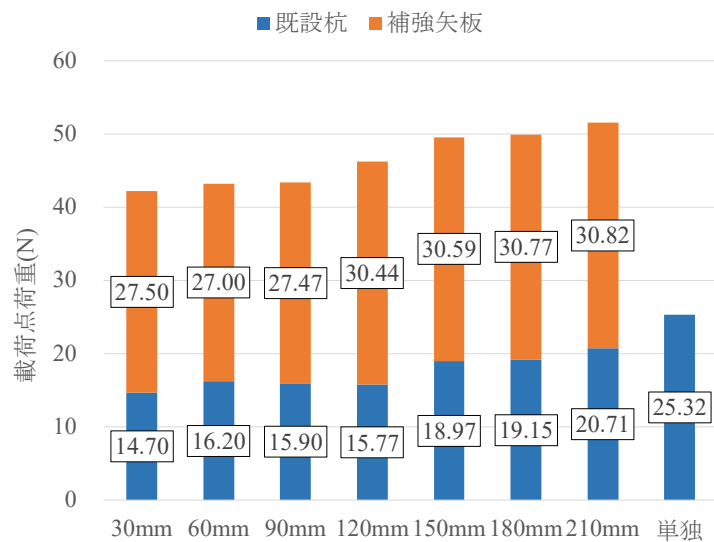


2次元模型実験 変位3mm時の荷重分担

高剛性
矢板補強

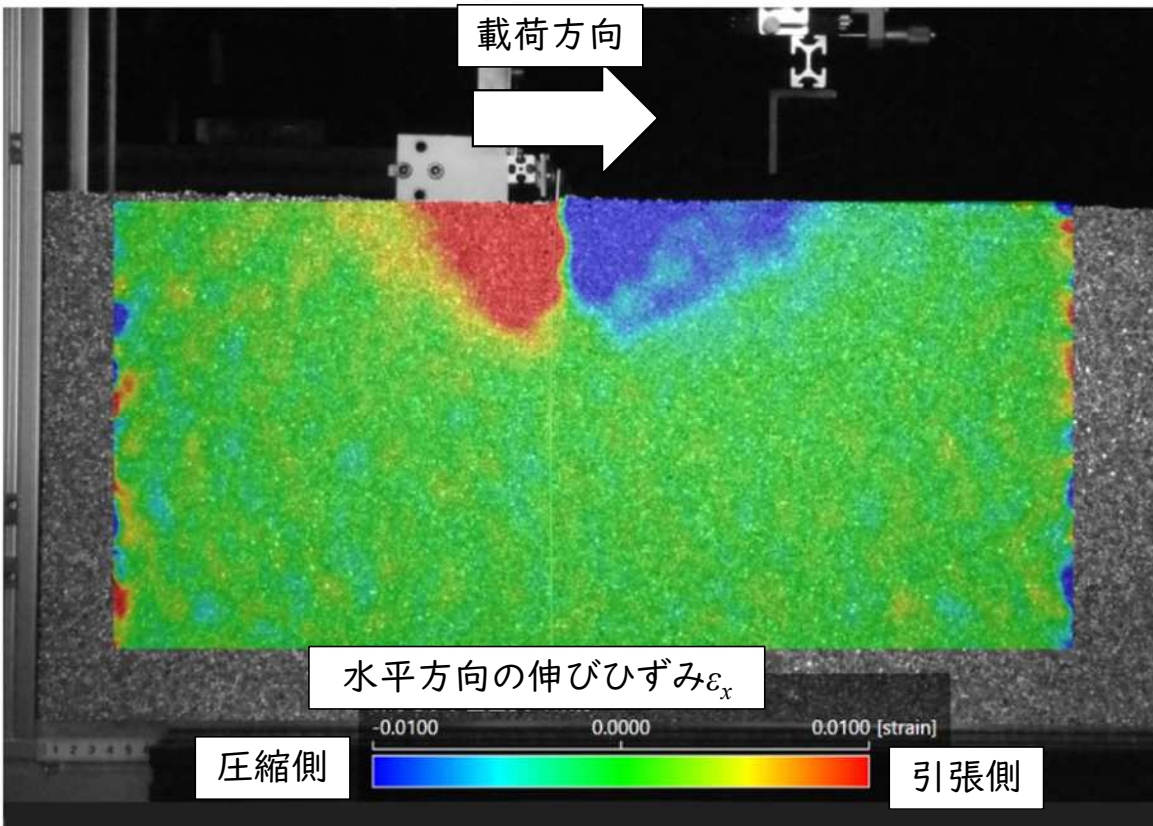
同剛性
矢板補強

低剛性
矢板補強

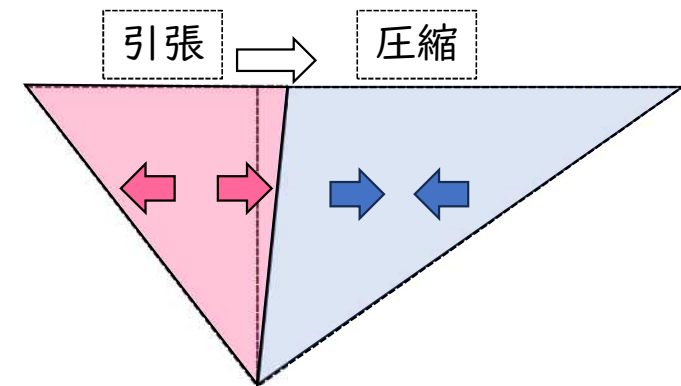


補強矢板の剛性が高いほど, 既設杭の断面力低減効果=補強効果は大きくなる

画像解析によるひずみ計測結果（単独杭）



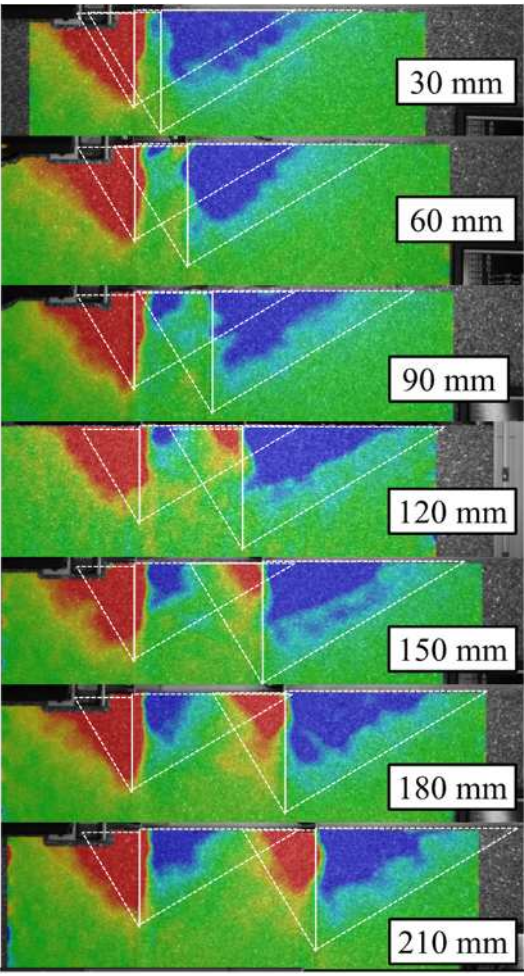
(例) 板厚1.5mm単独のケース



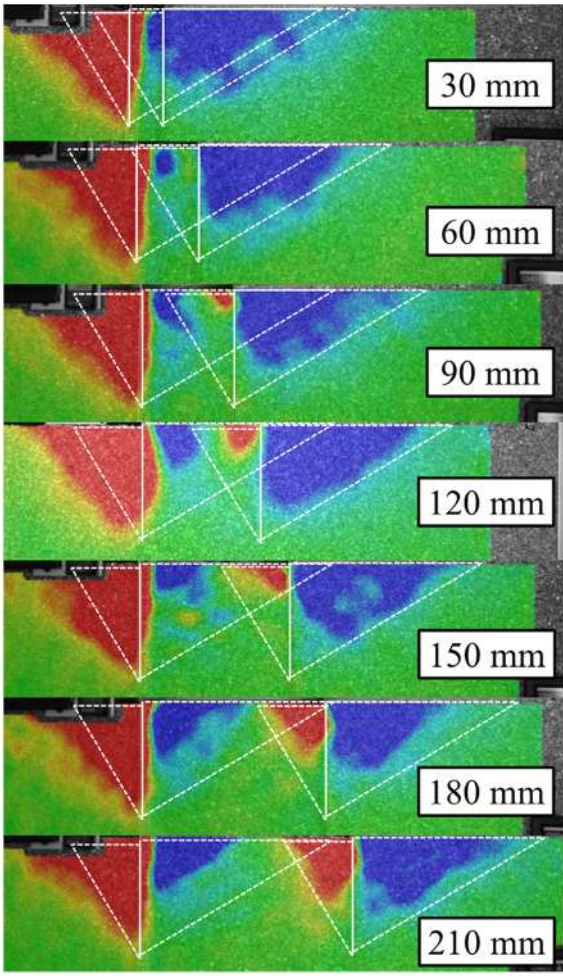
杭の変形に伴い、受働側（前面側）に圧縮ひずみ、主働側（背面側）に引張ひずみが生じている

一般的なせん断ひずみ γ_{xy} 表示とすると受働側と主働側が判別しにくくなるため、ここでは水平方向の伸びひずみ ε_x で図示している

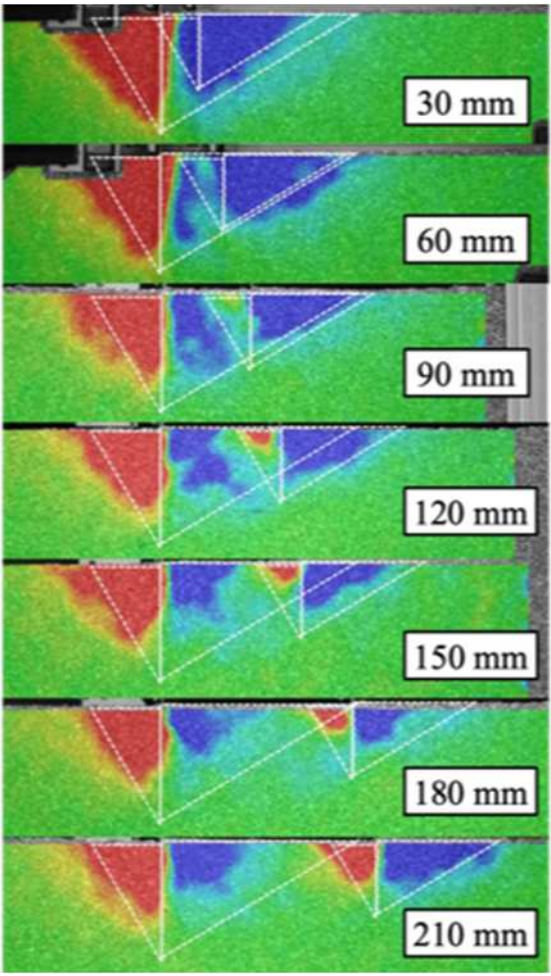
高剛性矢板補強



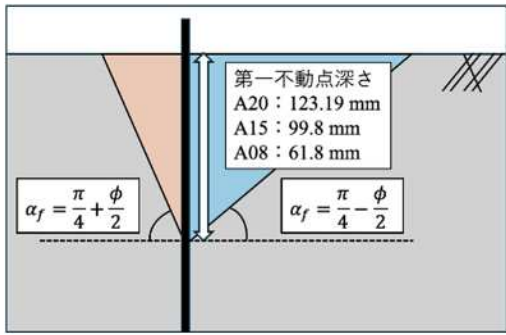
同剛性矢板補強



低剛性矢板補強



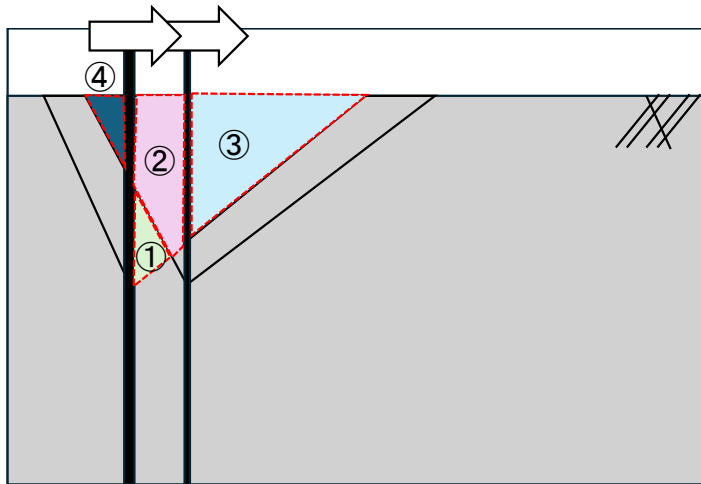
Changの式の
第一不動点深さから
すべり土塊範囲を
白点線で併記



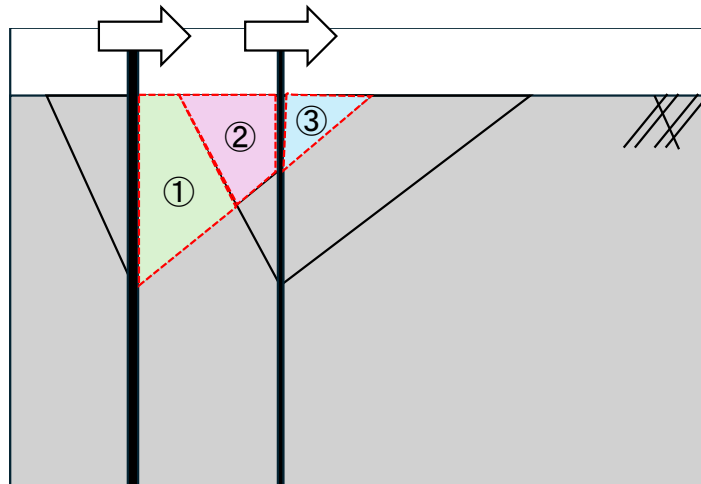
※離隔が小さくなると既設杭前面の受働すべり土塊と補強矢板背面の主働すべり土塊が重複



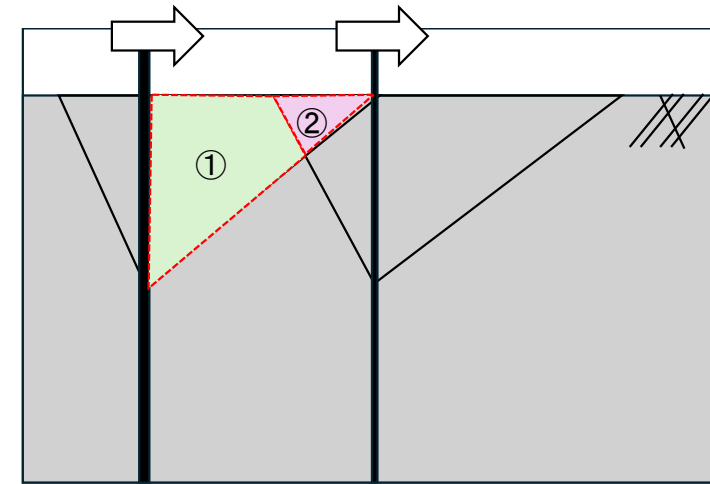
くさび領域の影響範囲（重複パターン）



離隔距離：小



離隔距離：中



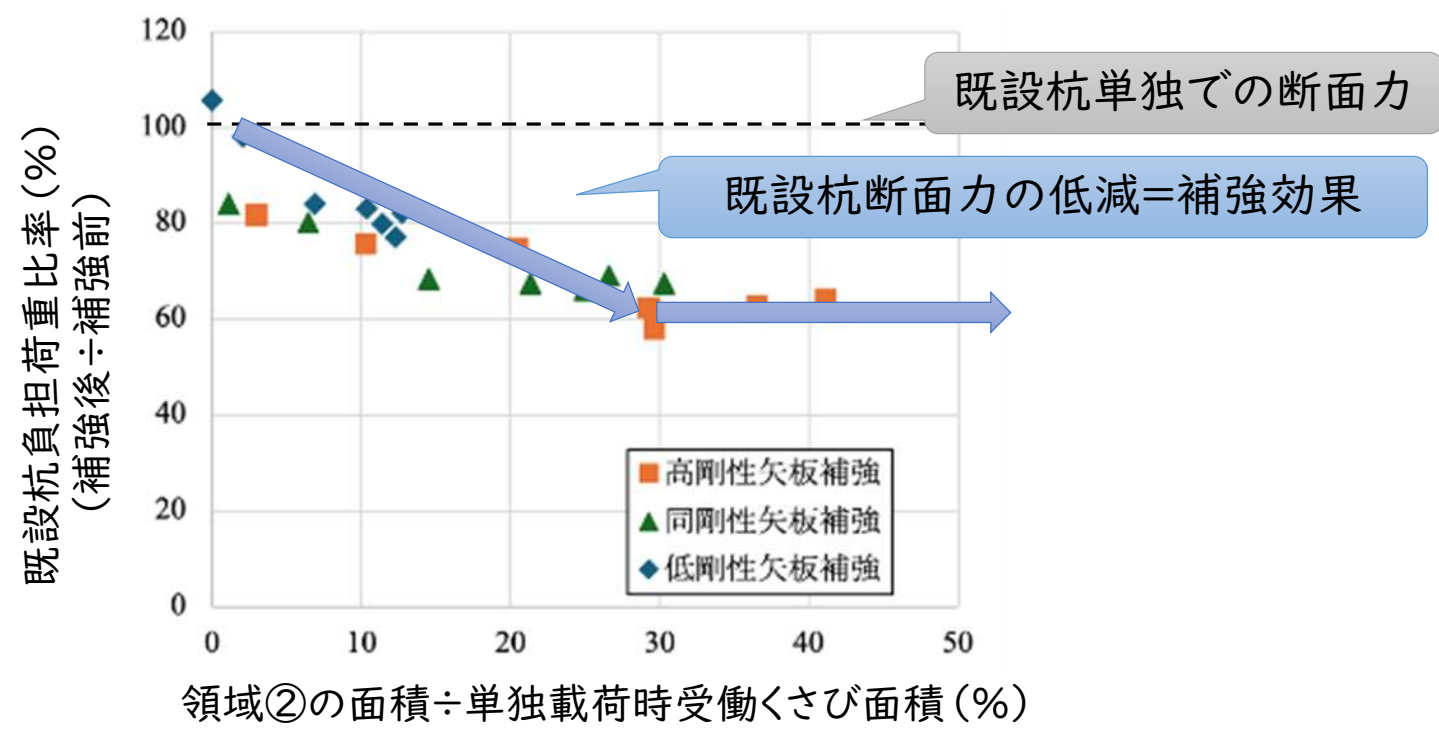
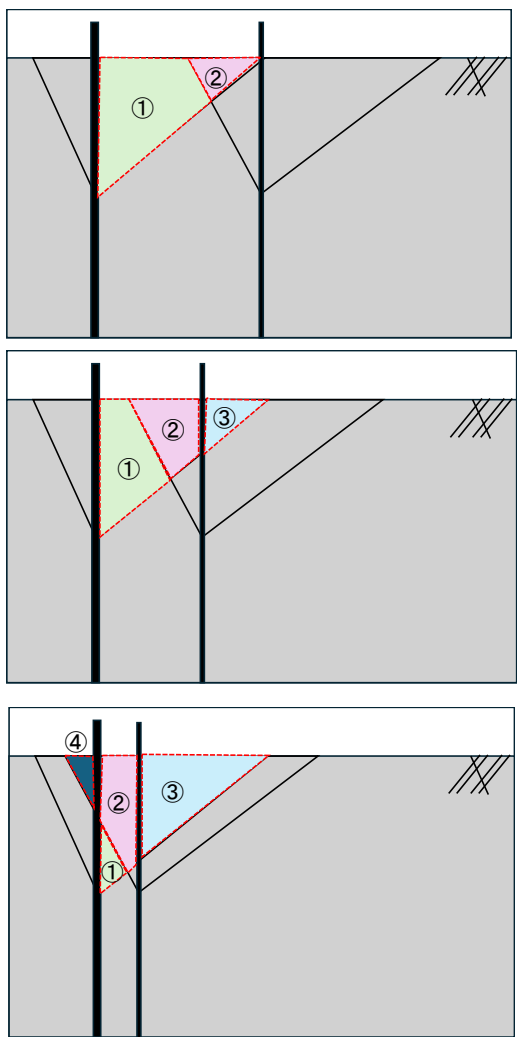
離隔距離：大

これらのうち②の面積と既設杭の抵抗力の関係を調べてみた

両杭の特性値 β と離隔距離から幾何学的に計算可能



影響範囲(②の面積)と既設杭負担荷重の関係



前後に並んだ杭同士の群杭効果は、従来の杭間隔比ではなく、両杭の特性値 β と離隔距離を用いて評価できると考えられる。



橋梁基礎の補強技術のまとめ

- どのような補強工法を取るかを考えるには、現状の耐震診断を正しく行い、何が弱点なのかを把握することが重要。
- 一部を補強したことで、新たな弱点が現れることに十分注意する（補強したことが裏目に出てしまわないように）。
- 「既設基礎を無視する」ことは、基礎だけでみれば一般的には安全側になるが、橋梁全体系では荷重負担バランスが変化するなど、危険側になる恐れもある。
- 過去の被災事例や模型実験などの情報を収集し、「どのように壊れるのか？ 地震後にどのような状態になるのか？」をイメージすることが重要。
- とはいっても、必要な補強については、安全側と思われる方法で順次進めていくことが求められる。