

シナリオデザイン設計法の開発

CAESAR上席研究員 大住 道生



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

CAESAR(シーザー): Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



本講演の構成

- シナリオデザイン設計法とは？
- シナリオデザイン設計法開発の背景
- シナリオデザイン設計法の具体例
- シナリオデザイン設計法を効果的に実現する耐力階層化
- シナリオデザイン設計法の展開



シナリオデザイン設計法とは？

- 世界に先駆けた提案
- 損傷が進展していくシナリオを考慮した設計法
- シナリオを考慮すること自体は新しい
- 設計法として体系化したところが新しい
- 信頼性を確保して効果的に実現するために、
損傷制御技術を利用
- 今後、さらに育てていく必要



シナリオデザイン設計法開発の背景

設計の想定を超える地震動により機能喪失した橋



橋脚の倒壊により機能喪失し、撤去架け替えとなった高架橋



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
CAESAR(シーザー): Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



津波により機能喪失した橋



上部構造が流出して機能喪失した橋

→仮橋設置等**早期に応急復旧をするための**
選択肢が多くなる可能性もある



下部構造の倒壊も伴って機能喪失した橋

→早期応急復旧困難



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

CAESAR(シーザー): Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



洪水(洗掘)により機能喪失した橋



橋台の流失により機能喪失したものの
落橋には至らず、桁下空間を保持した
連続橋

シナリオデザイン設計法開発の背景

地盤変状により機能喪失した橋



橋台の沈下により機能喪失したものの落橋には至らなかったラーメン橋

設計外力を超えても、機能喪失に至りにくい、或いは機能を喪失したとしても早期に機能回復しやすい構造があり得る

➡ 道路橋の崩壊に至るシナリオを検討する必要

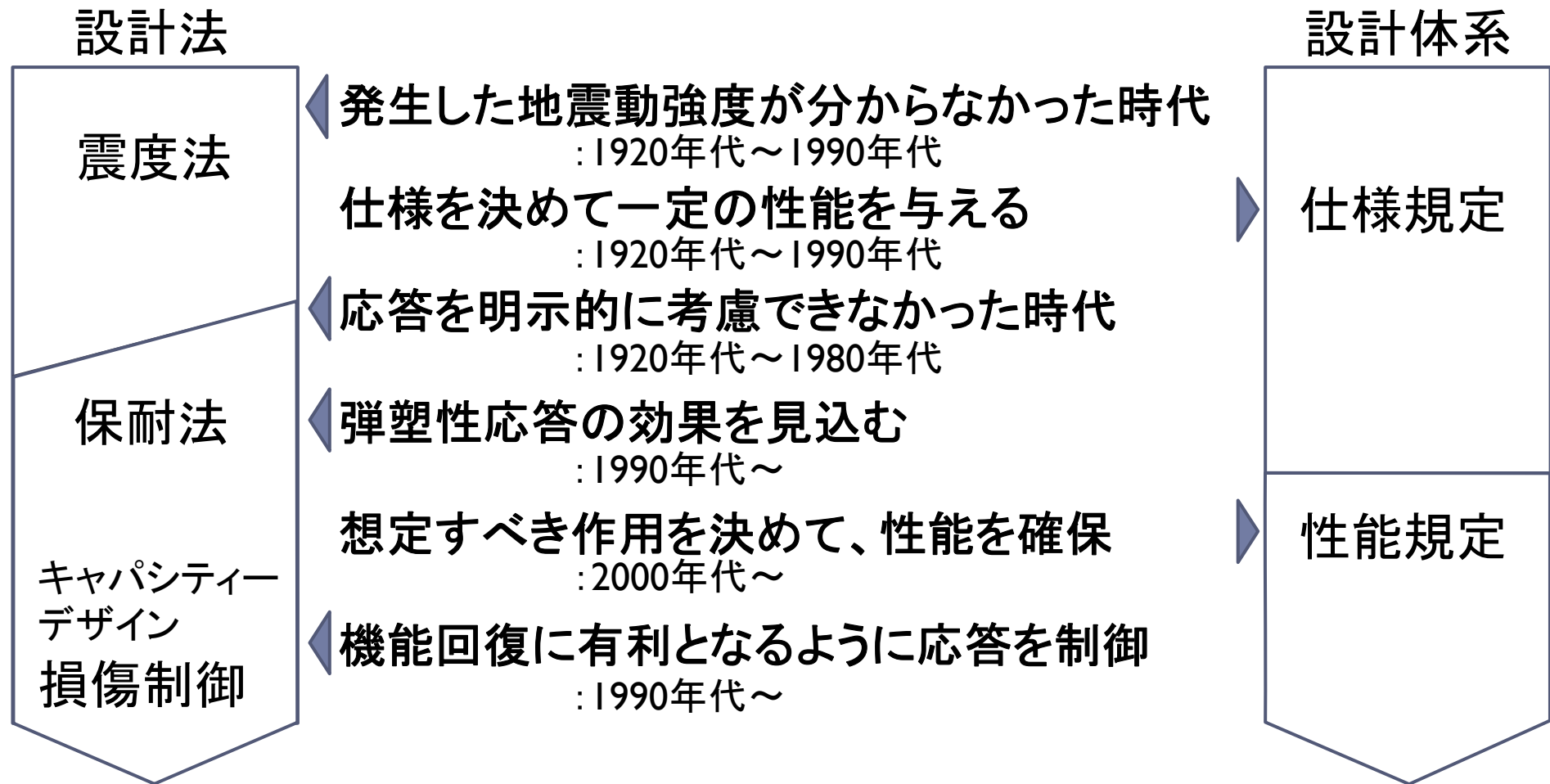


国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー): Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



シナリオデザイン設計法開発の背景

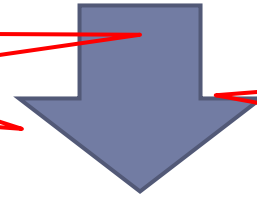
—性能規定型設計法に至る耐震設計法の経緯—



シナリオデザイン設計法開発の背景

性能規定型設計法は想定する作用を決めて、
それに対して性能を確保できるように設計

大きな不確実性



想定外

作用を決められなかったら、どうやって設計？

- 設計基準の規定を超える作用を設定することは可能だが、その根拠は？それを超える可能性はないの？
- 設計基準の規定を超える作用に対して、どんな性能を求めるべきなの？

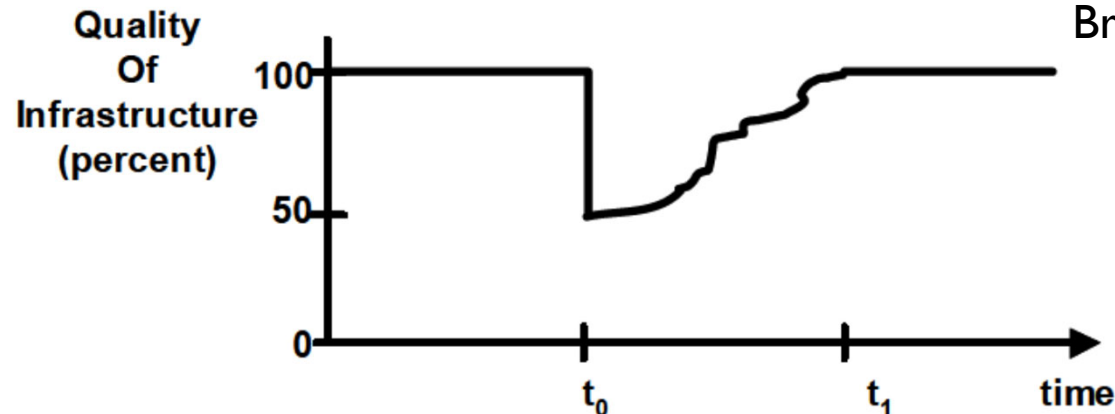
シナリオデザイン設計法開発の背景

- 昔から、構造計画による対応が行われてきた
 - 単純桁より連続桁
 - 一点支持より多点支持
 - 静定より不静定
 - 斜橋、曲線橋より直橋 など
- それで十分？
- 現地条件から採用できない場合はどうしたらよい？
- 余裕を求め続けたら、もはや橋ではない？



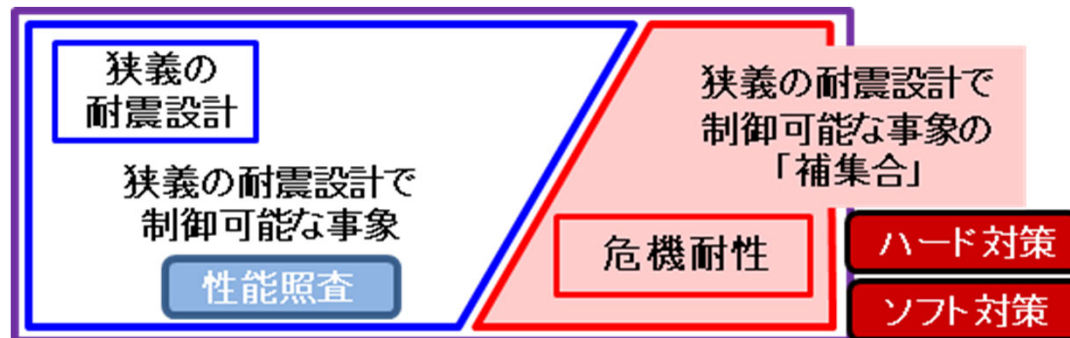
シナリオデザイン設計法開発の背景

—危機耐性の概念形成—



Bruneau et. al (2003)のレジリエンスカーブ

- 単体の構造物orシステム
 - 強靱さor復旧体制
 - 地震or豪雨 etc.
- 一元的に評価可能に

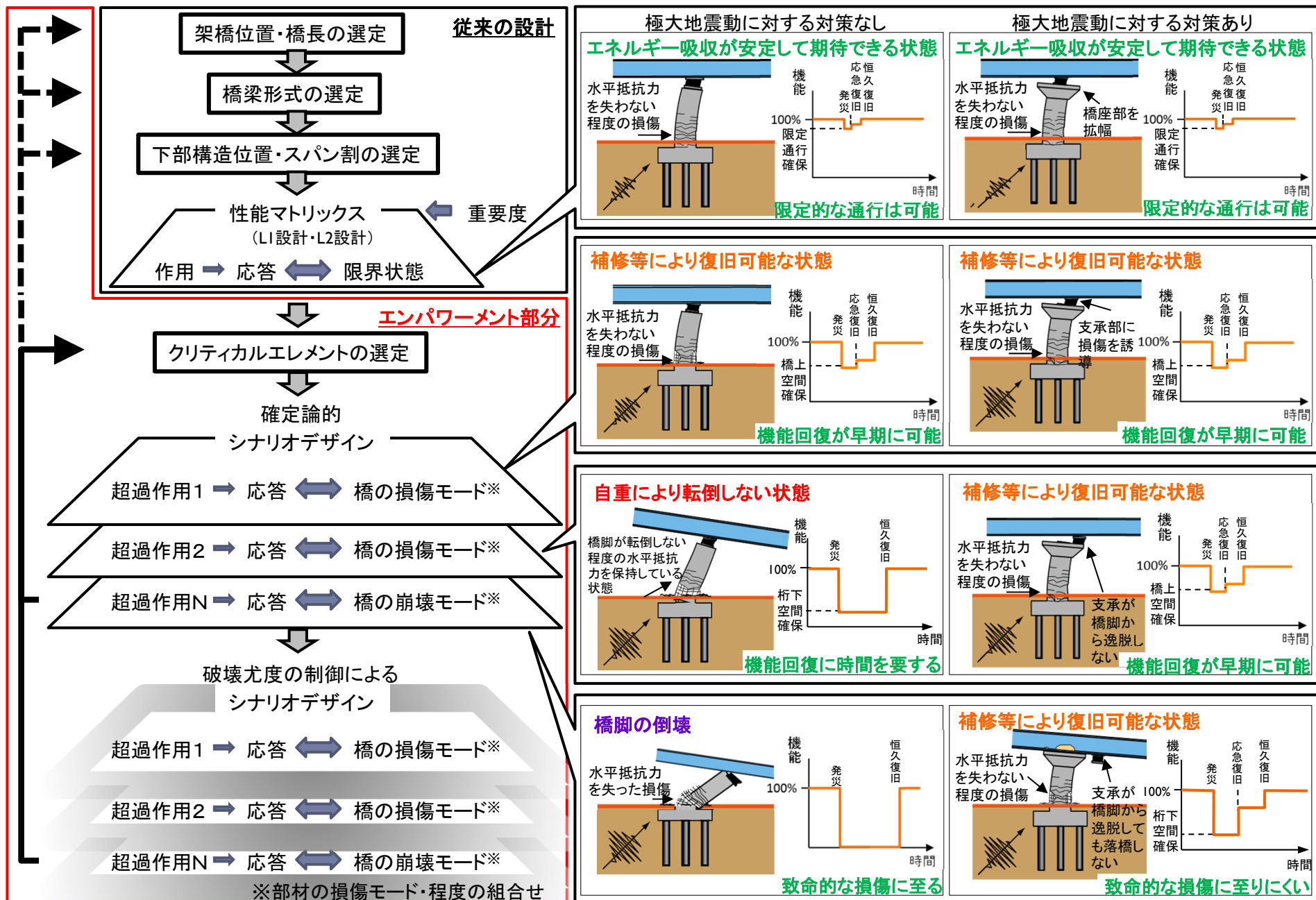


室野 (2015)の危機耐性の概念図

狭義の耐震設計で性能を確保しつつ、狭義の耐震設計で制御ができない補集合の部分を考慮すること

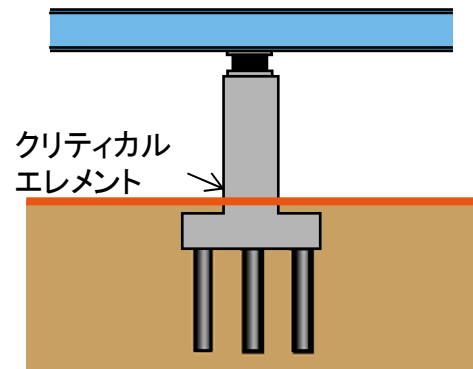
➡ 概念形成はなされたが、具体の構造設計法に還元されていない

シナリオデザイン設計法の具体例



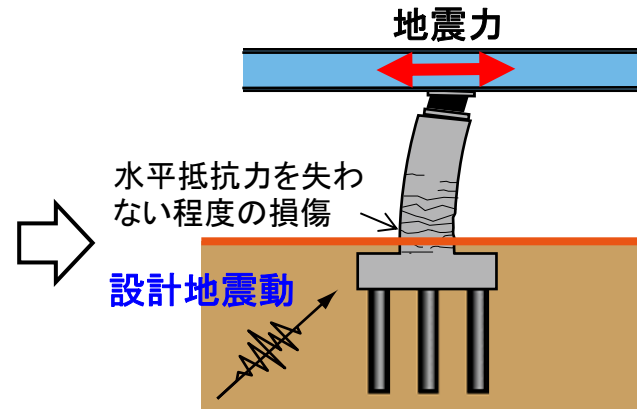
桁橋に対するシナリオデザインの具体例

設計地震動に対する設計



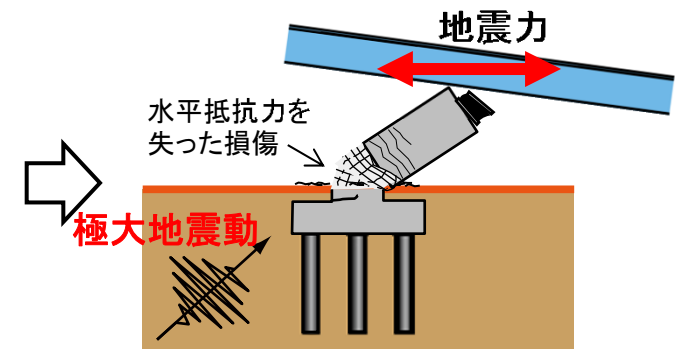
橋脚基部が
クリティカルエレメント

設計地震動が作用する場合



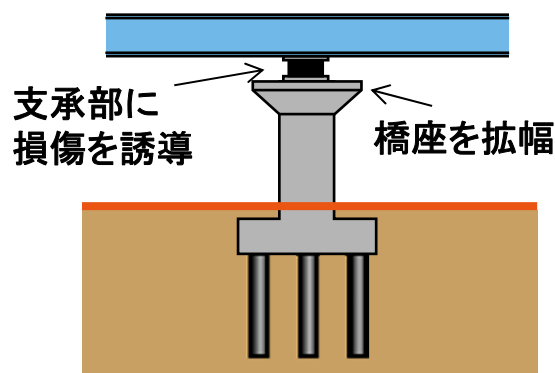
橋脚基部の塑性化に
よりエネルギーを吸収

極大地震動が作用する場合



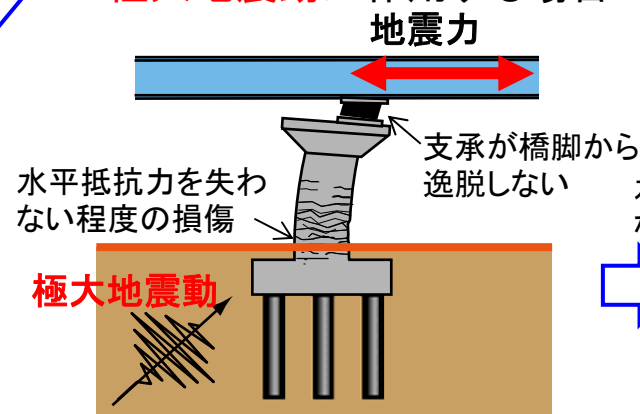
橋脚の倒壊 →
致命的な損傷に至る

崩壊シナリオデザイン



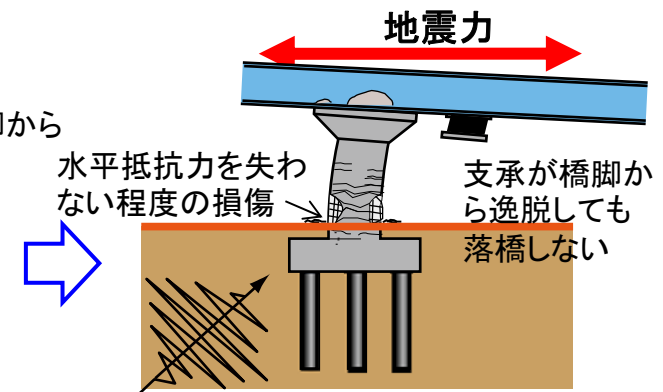
クリティカルエレメントが
橋脚基部から支承部に
転換するように設計

極大地震動が作用する場合



機能回復が早期に可能

更に超過

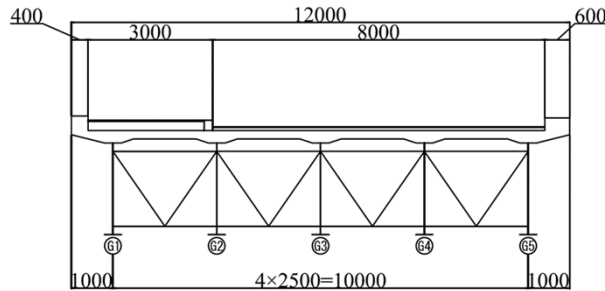
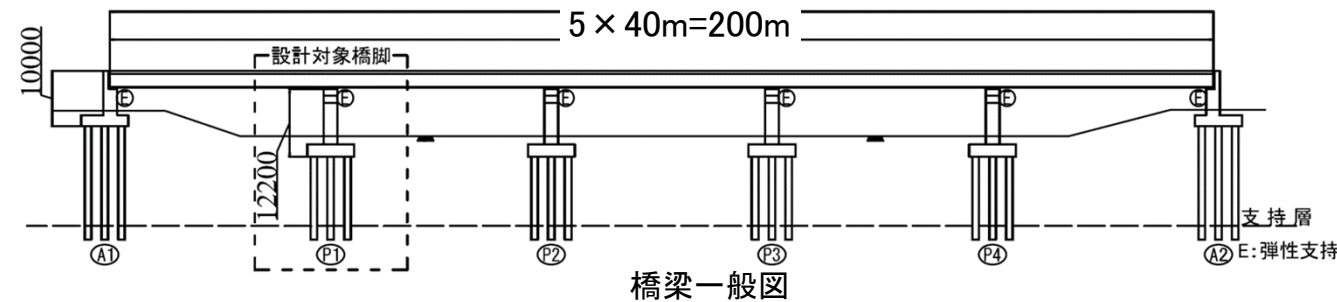


致命的な損傷に至りにくい

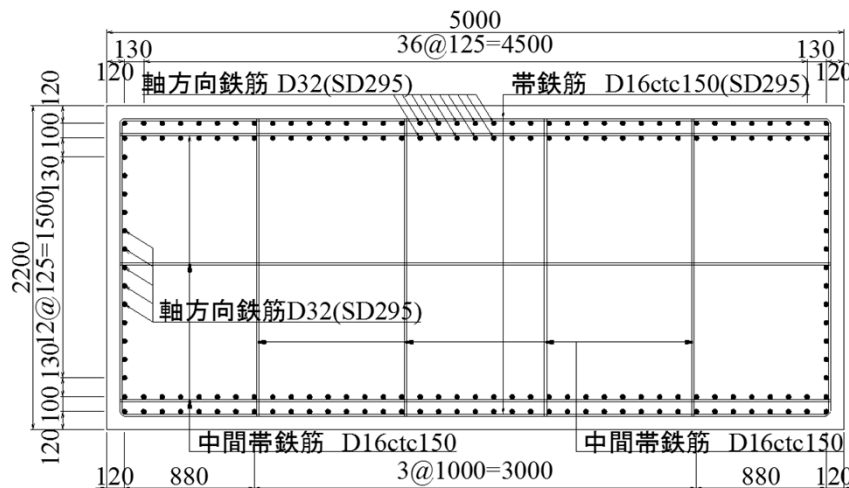
← 破壊尤度の制御により実現性確保

桁橋に対するシナリオデザインの具体例

分析対象とするモデル橋梁の選定



上部構造断面図



橋脚断面図

橋梁条件

5径間連続鋼I桁橋
地震時水平力分散支承
RC橋脚
杭基礎

○ 道路橋の耐震設計の代表的なモデル

○ 道路橋示方書に基づいて設計

- ・レベル2地震動に対して、RC橋脚基部の塑性化を期待
- ・レベル2地震動に対して、限界状態2を超えない

材料条件

主鉄筋: D32(SD295)

帯鉄筋: D16(SD295)

中間帯鉄筋: D16(SD295)

コンクリート強度: 21N/mm²

道路橋の耐震設計に関する資料(1997)

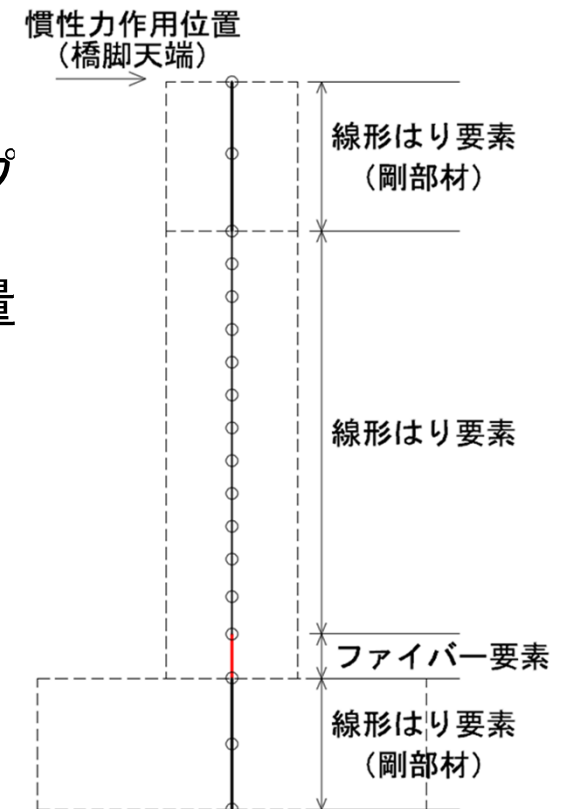
桁橋に対するシナリオデザインの具体例

(1)解析条件

- ・解析手法: 変位制御による荷重漸増解析
- ・鉛直荷重を与えた後、橋脚天端に0.05mm/ステップの橋軸方向強制変位: Newton-Raphson法 1.0×10^{-6}
- ・橋脚基部の軸力: 0.9N/mm^2 、死荷重: 上部構造重量として橋脚天端に6963kN、橋脚自重として3087kN

(2)RC橋脚のモデル化: 多質点骨組みモデル

- ・塑性ヒンジ: ファイバー要素
その他の部分: 線形はり要素
- ・ファイバー部の要素長: 道示 V に基づく塑性ヒンジ長 L_p
- ・ファイバー要素の断面内分割数: 約50分割



多質点骨組みモデル

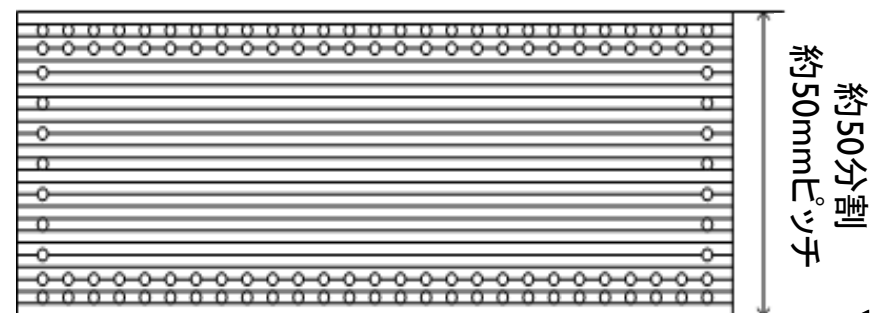
$$L_p = 9.5\sigma_{sy}^{\frac{1}{6}}\beta_n^{-\frac{1}{3}}\varphi', \quad \text{ただし, } L_p \leq 0.15h$$

σ_{sy} : 軸方向鉄筋の降伏強度 (N/mm^2)

β_n : 軸方向鉄筋のはらみ出しに対する抵抗を表すばね定数 (N/mm^2)

φ' : 軸方向鉄筋の直径 (mm)

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

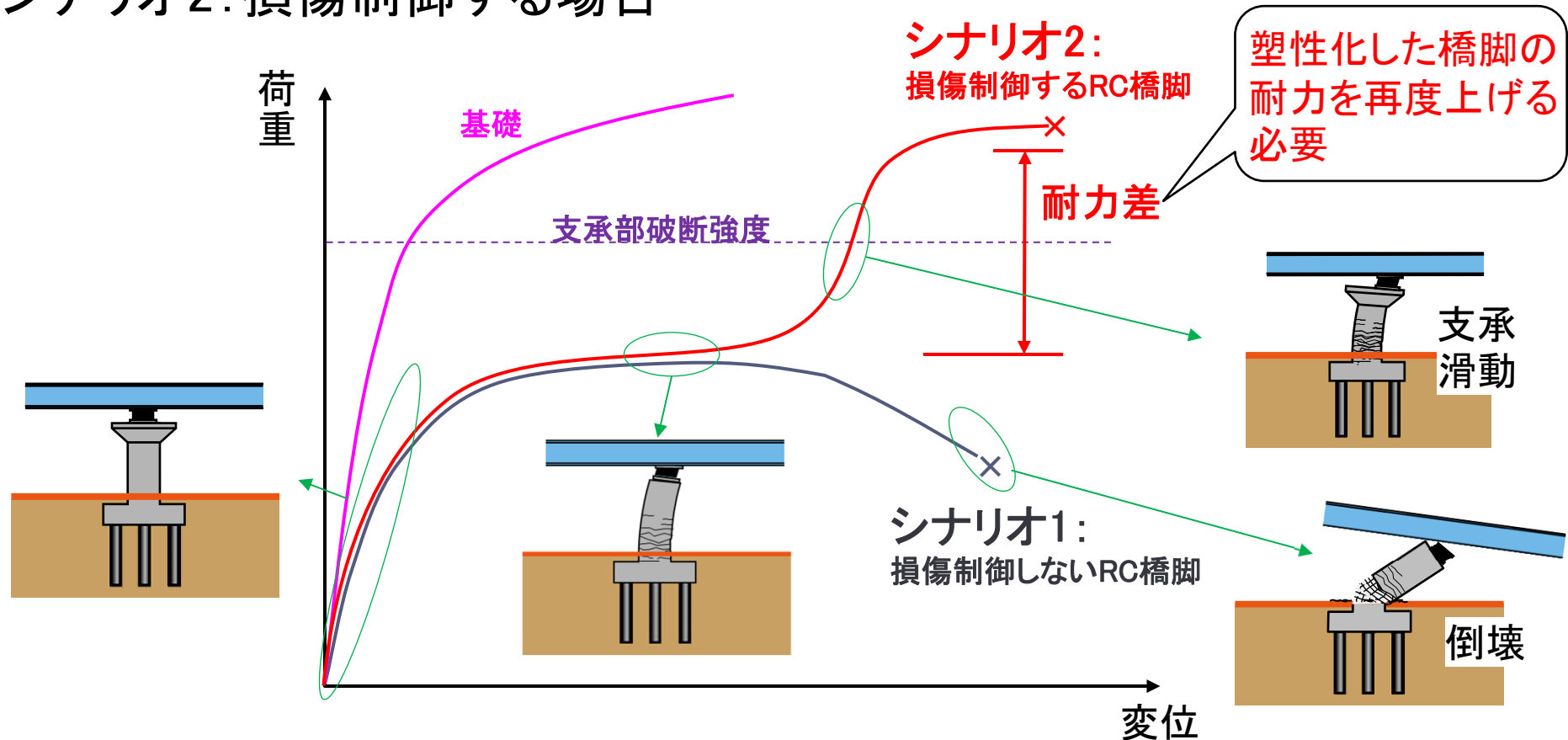


ファイバー要素の分割イメージ

桁橋に対するシナリオデザインの具体例

シナリオ1: 損傷制御しない場合

シナリオ2: 損傷制御する場合

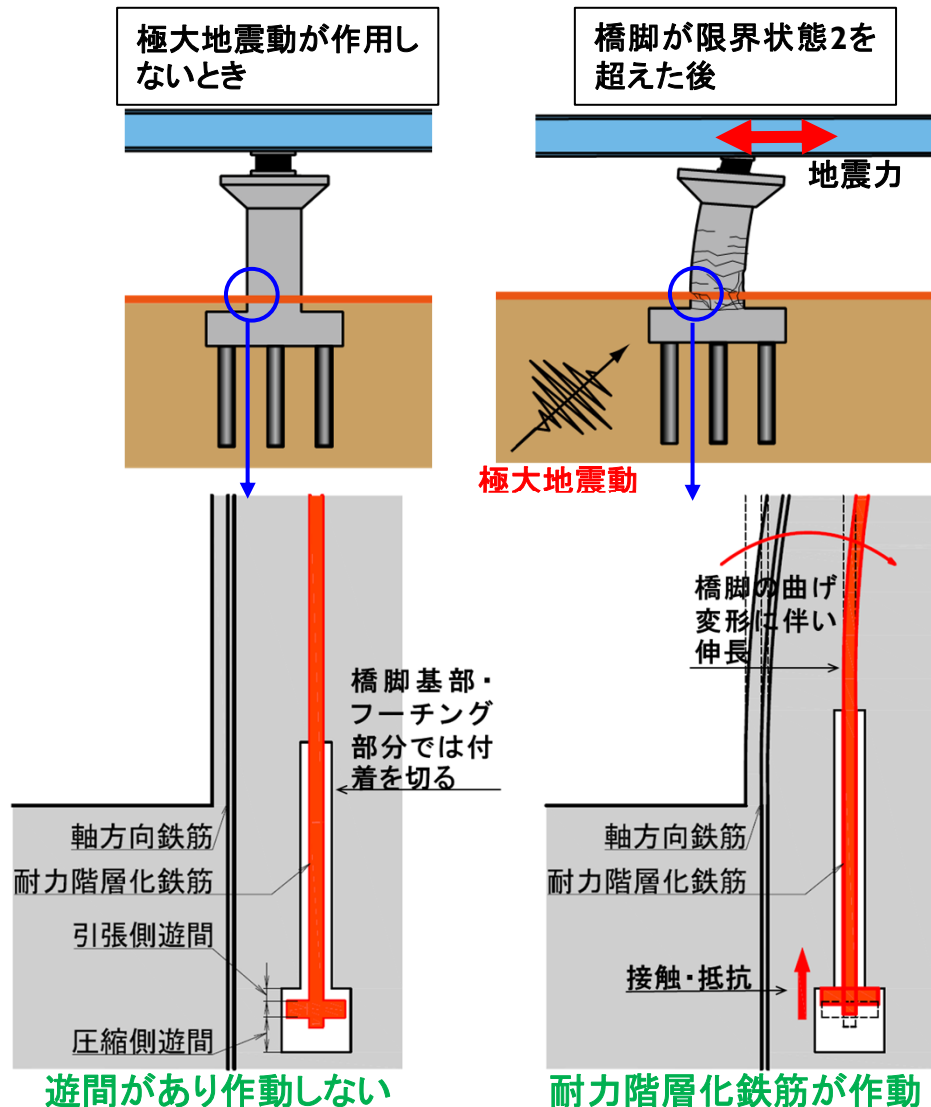


レベル2地震動に対しては、橋脚基部を塑性化させて性能を確保。それを超えた場合には、**クリティカルエレメント**を橋脚基部から支承部へ転換したい

耐力階層化鉄筋を配置することで、塑性化した橋脚の耐力を再度上げる

桁橋に対するシナリオデザインの具体例

クリティカルエレメントを橋脚基部から支承部へ転換するための構造

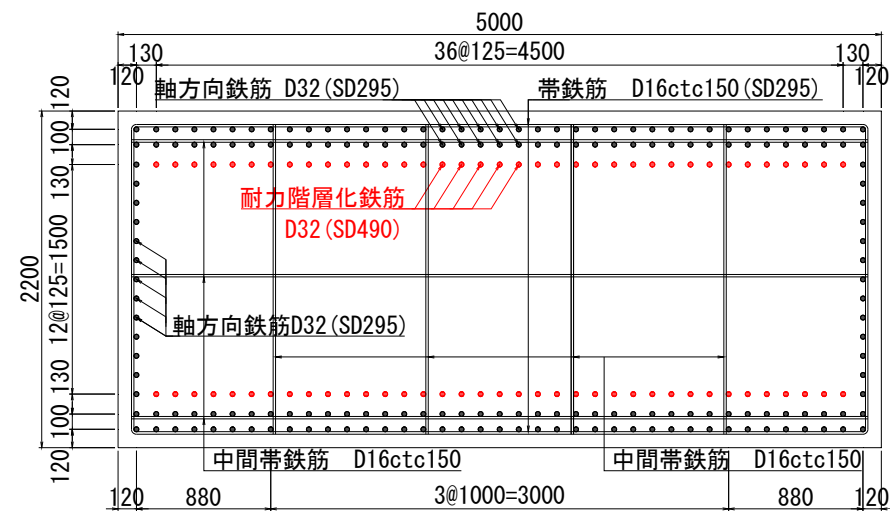


レベル2地震動に対しては抵抗せず、極大地震動に対して曲げ耐力を上げる必要

材料条件

耐力階層化鉄筋: D32(SD490)

その他は損傷制御しない場合と同じ



橋脚断面図(耐力階層化鉄筋あり)

耐力階層化鉄筋の機構イメージ

桁橋に対するシナリオデザインの具体例

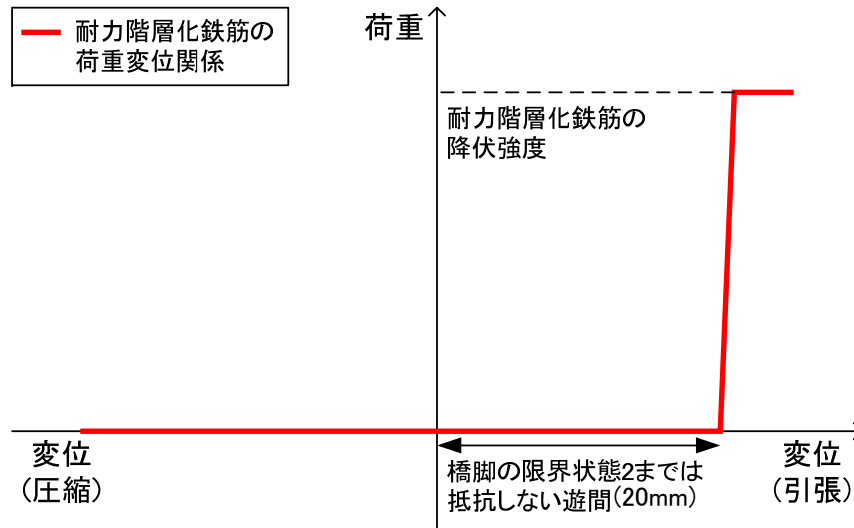
シナリオ2: 損傷制御する場合 : 耐力階層化鉄筋のモデル

(1) 解析条件

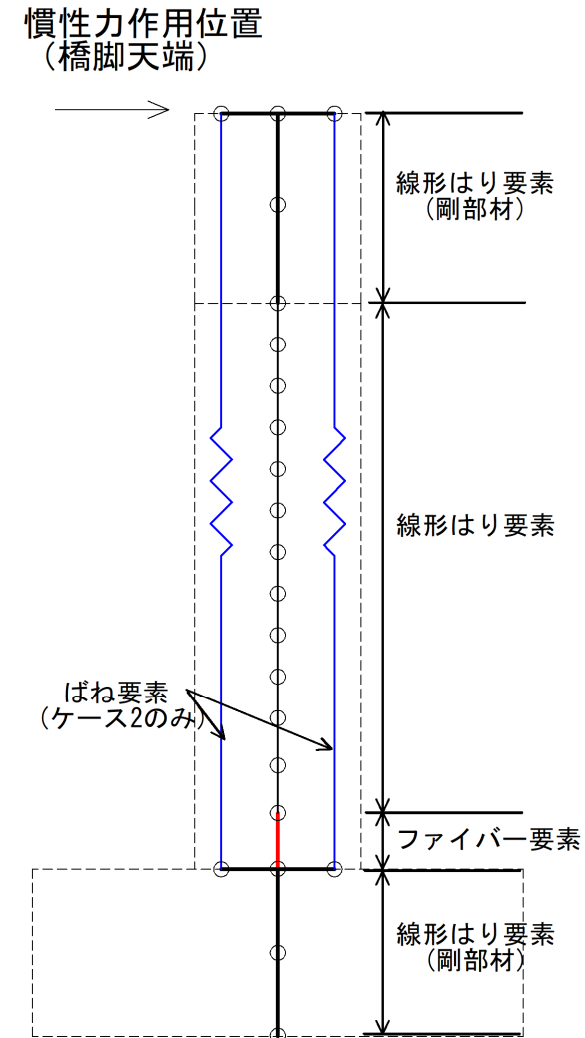
- ・ 損傷制御しない場合と同じ

(2) モデル化

- ・ 耐力階層化鉄筋を非線形バネにモデル化
(圧縮側は抵抗せず、引張側は限界状態2に相当する変位を超えた後、速やかに抵抗)
- ・ その他は損傷制御しない場合と同じ



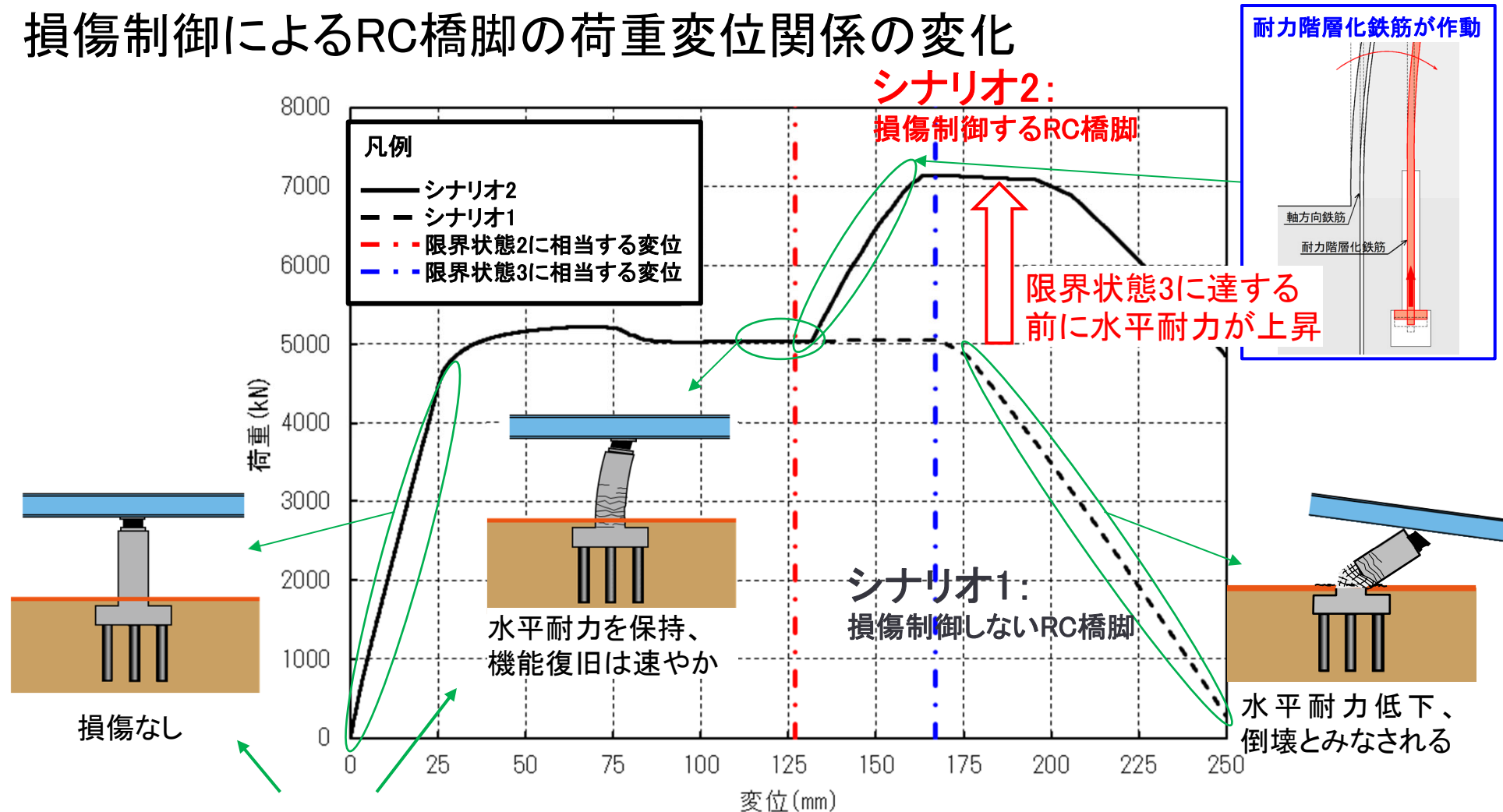
耐力階層化鉄筋の荷重変位関係



多質点骨組みモデル
(耐力階層化鉄筋あり)

桁橋に対するシナリオデザインの具体例

損傷制御によるRC橋脚の荷重変位関係の変化

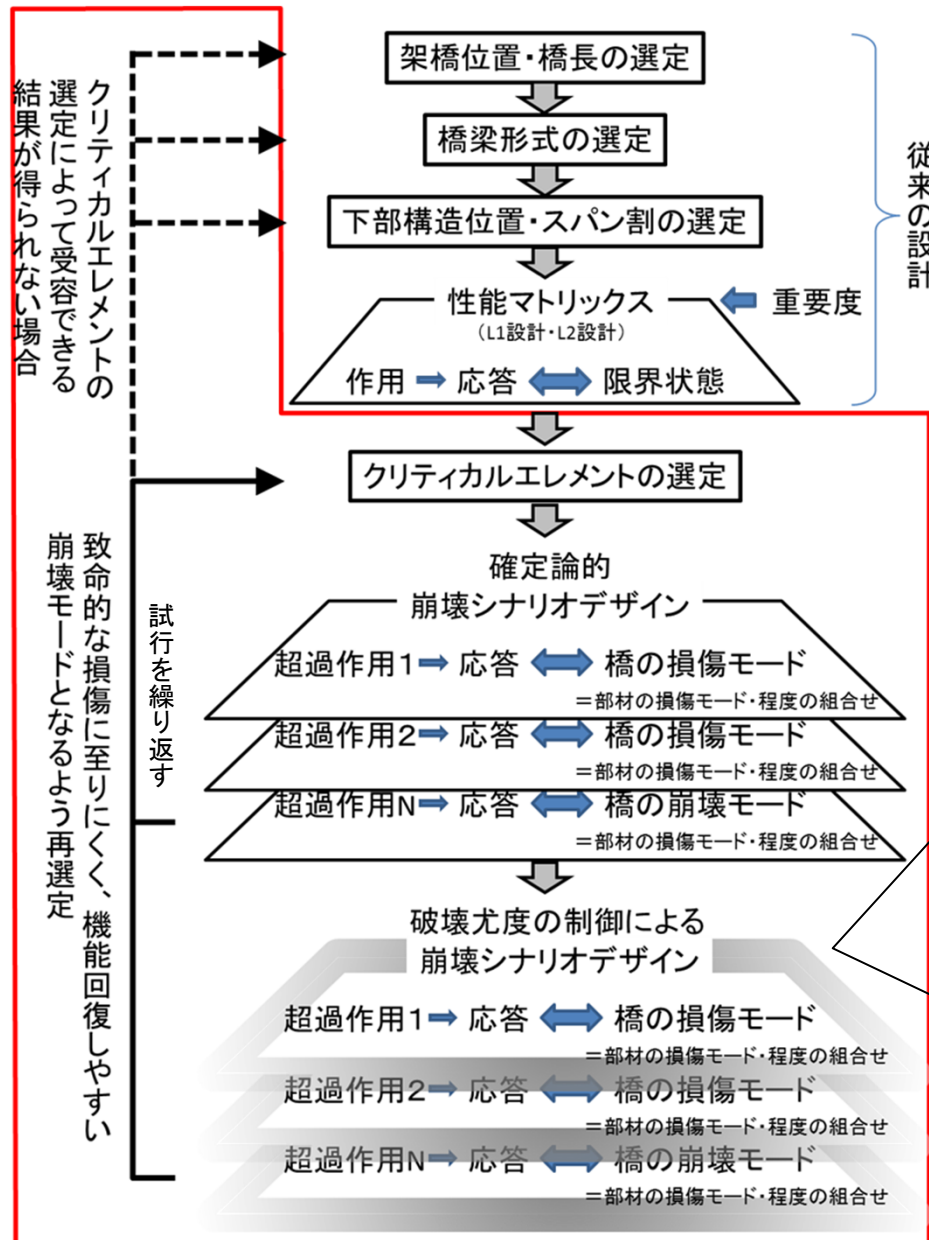


限界状態2まではシナリオ1、シナリオ2に差は無い
→レベル2地震動に対しては従来と同じ性能を確保

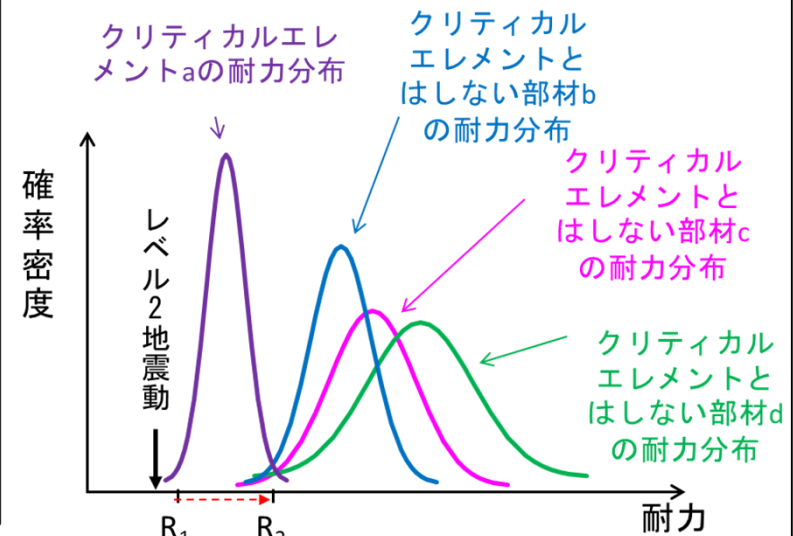
耐力階層化鉄筋を配置することで、クリティカルエレメントを橋脚基部から支承部へ転換できることを確認
＝橋脚は限界状態3に達しない

崩壊シナリオを誘導できることを確認

シナリオデザイン設計法を効果的に実現する耐力階層化



部材耐力等にはばらつき
→ 確定論的崩壊シナリオデザイン
により選ばれたシナリオの実現性？



$$R_2 \geq c_d \cdot R_1$$

ここに、

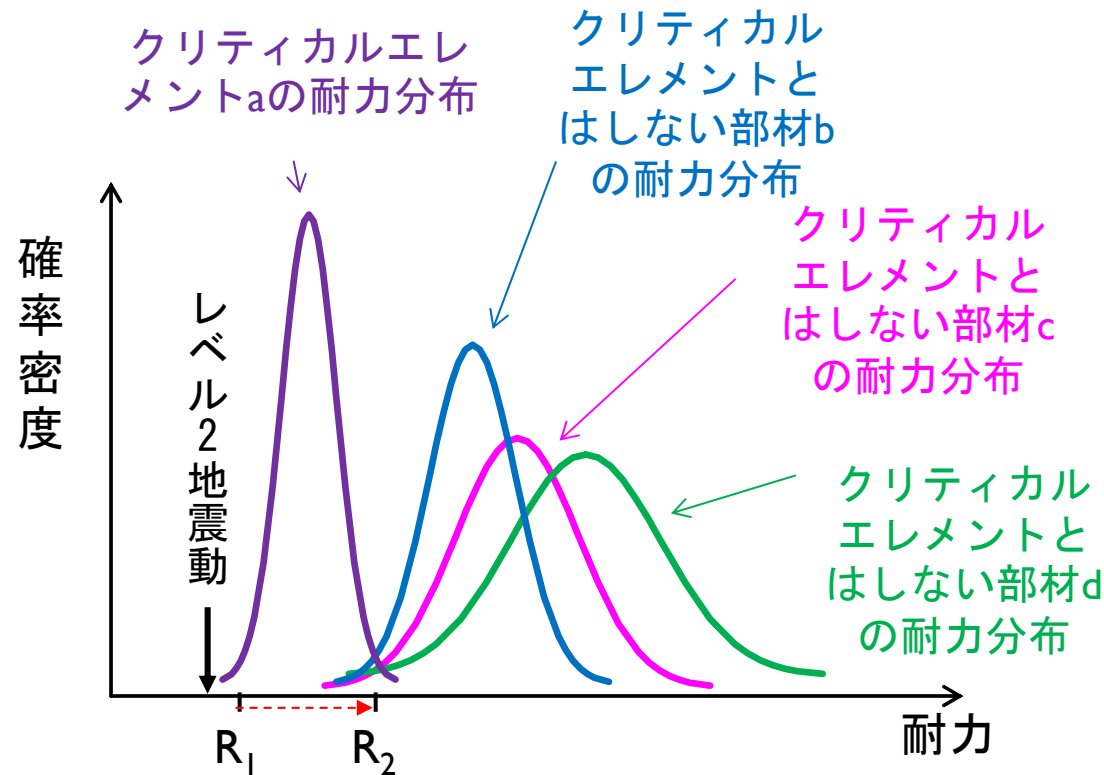
R_1 : 損傷を誘導する部材の耐荷力

R_2 : 損傷を防ぐ部材の耐荷力

c_d : 損傷を誘導させない部材の
照査に用いる補正係数
(耐力階層化係数)

設計の実現性を確立

シナリオデザイン設計法を効果的に実現する耐力階層化



$$R_2 \geq c_d \cdot R_1$$

ここに、

R_1 : 損傷を誘導する部材の耐荷力

R_2 : 損傷を防ぐ部材の耐荷力

c_d : 損傷を誘導させない部材の
照査に用いる補正係数
(耐力階層化係数)

シナリオの実現性確保の観点では、損傷を誘導する部材の耐荷力はばらつきが小さい方が耐力差を大きくしなくて済む

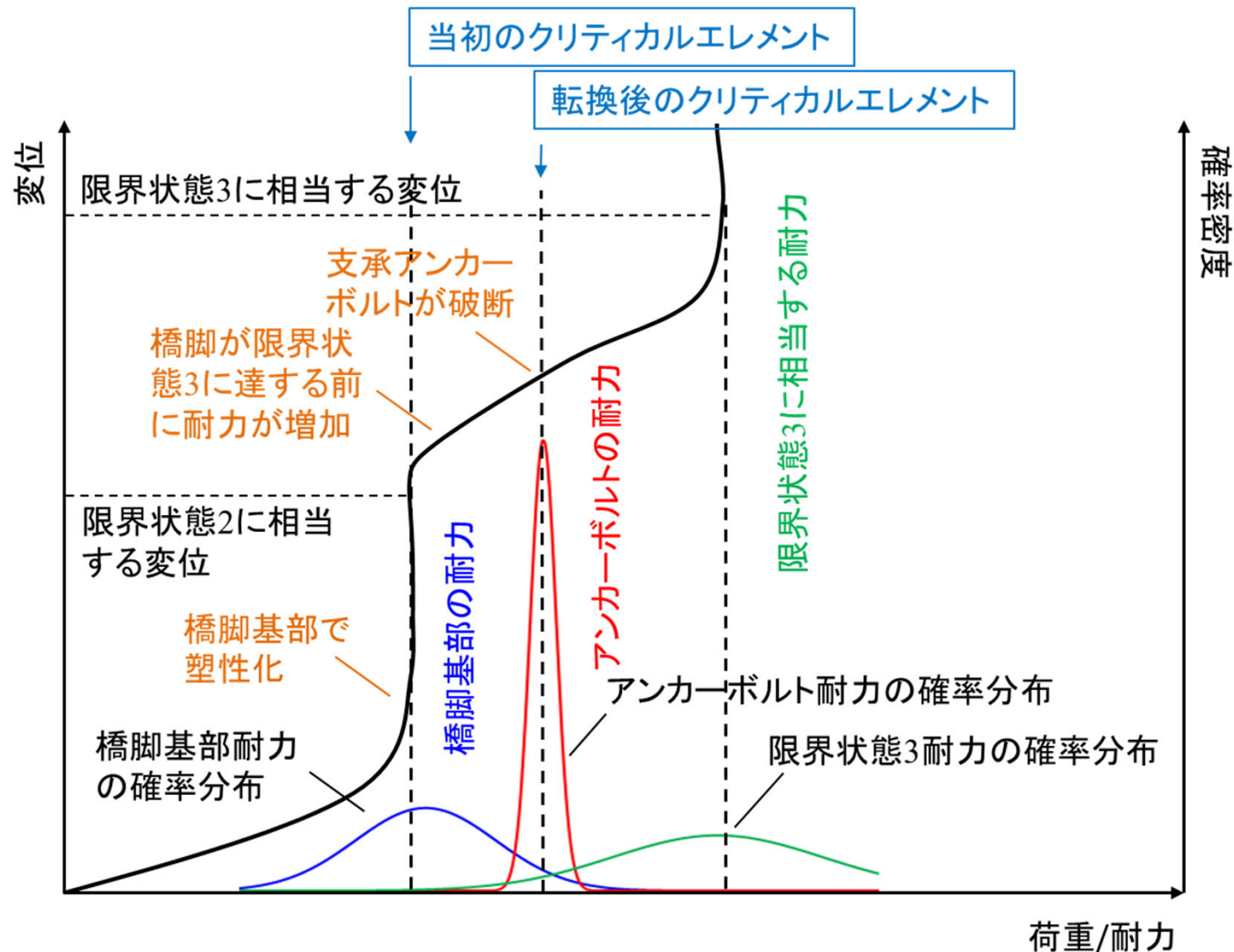
従来は荷重と耐力設計値の差

→ 本研究は部材間の破断強度による階層化



桁橋を例に破壊尤度を制御した設計を行うことで実現性を確立する

シナリオデザイン設計法を効果的に実現する耐力階層化



各部材耐力の確率密度分布に基づき破壊を制御

単柱式RC橋脚の水平耐力のばらつき

橋脚耐力のばらつきは、使用する材料の強度のばらつきや断面寸法のばらつき、配筋位置のばらつき等が考えられる。



34体のRC橋脚の載荷実験で得られたデータを基に耐力のばらつきを再分析

載荷方法は全て正負交番繰返し漸増載荷（降伏変位の整数倍、繰返し回数3回）

曲げ破壊型のRC橋脚

断面寸法：400mm ～ 2400mm

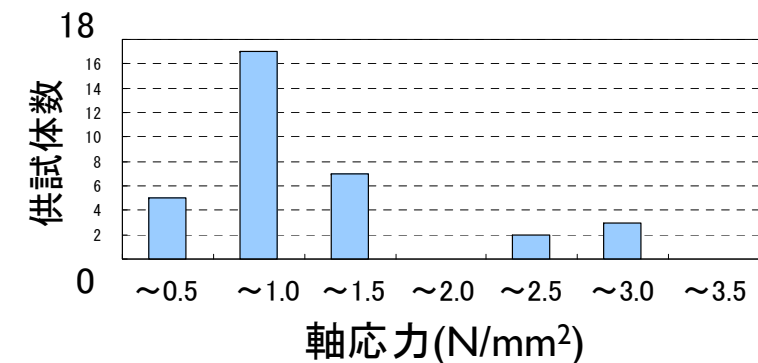
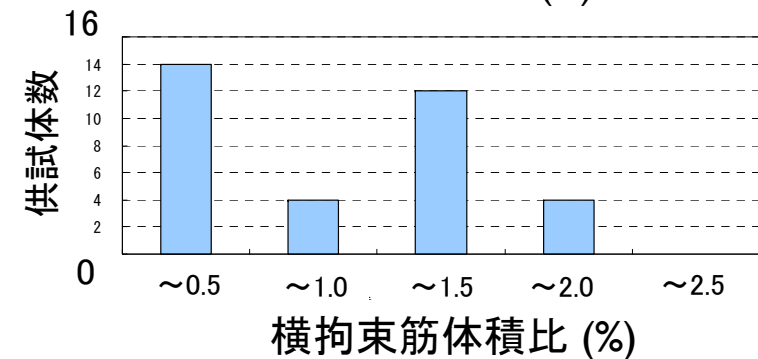
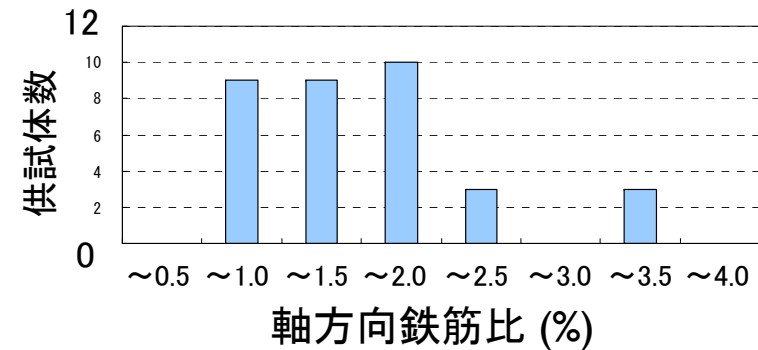
矩形28体、円形5体、インターロッキング1体

鉄筋規格：SD295、SD345、SD390、SD490

コンクリート強度：30.0 ～ 50.8 (N/mm²)

各実験の原著は以下の通り

長屋・運上(1997)、堺・運上(2006)、仲谷ら(1999)、星隈ら(1998)、星隈ら(1998)、
土木研究所共同研究報告書(1999)、武村ら(1997)、北村ら(2010)、北村ら(2012)、
浅井ら(2004)、村田ら(2010)、運上ら(2000)



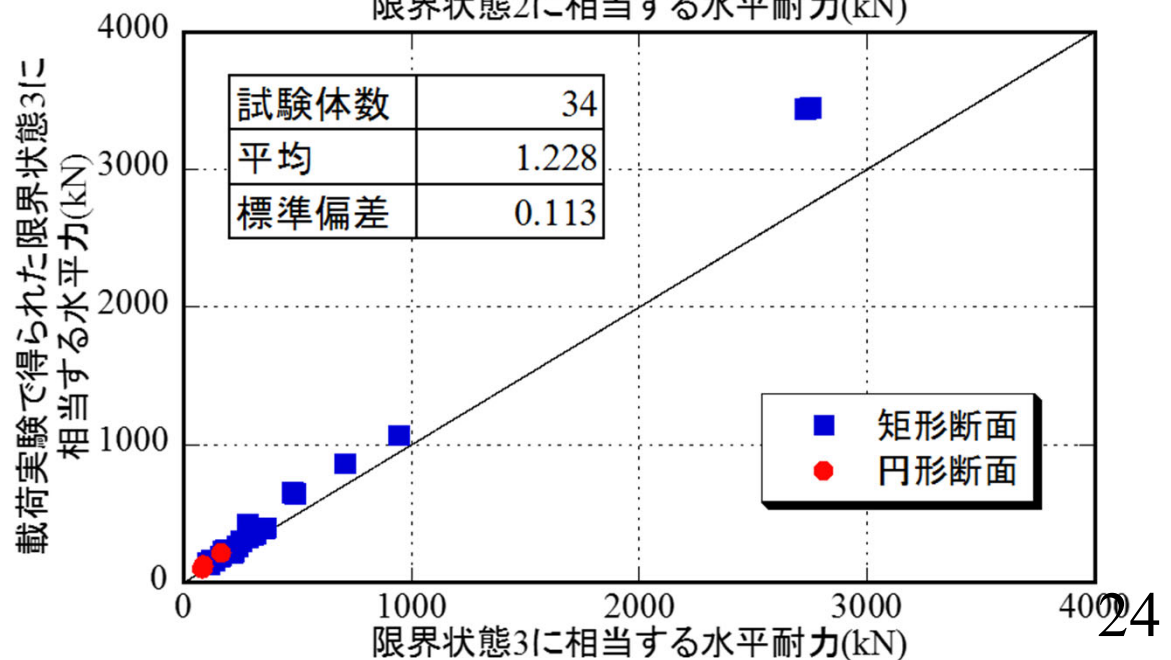
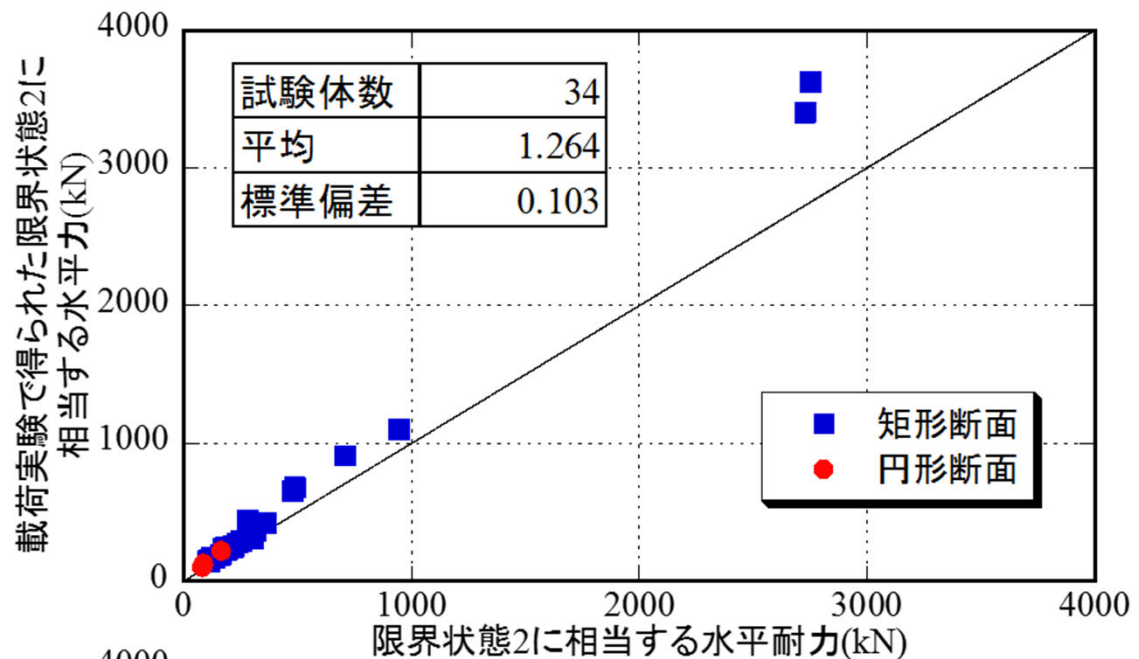
単柱式RC橋脚の水平耐力のばらつき

公称値を用いて設計式から算出される水平耐力と載荷実験から得られた水平力との関係

限界状態2に相当する
実耐力は設計値の1.2
倍以上大きい

➡ 確率密度を考慮した
耐力階層化が必要

土木研究所資料 (2013) を基に再分析



地震時水平力分散型ゴム支承を構成するエレメントの耐力のばらつき

地震時水平力分散型ゴム支承本体の耐力のばらつき

必要なアンカーボルトとゴム支承の耐力の関係

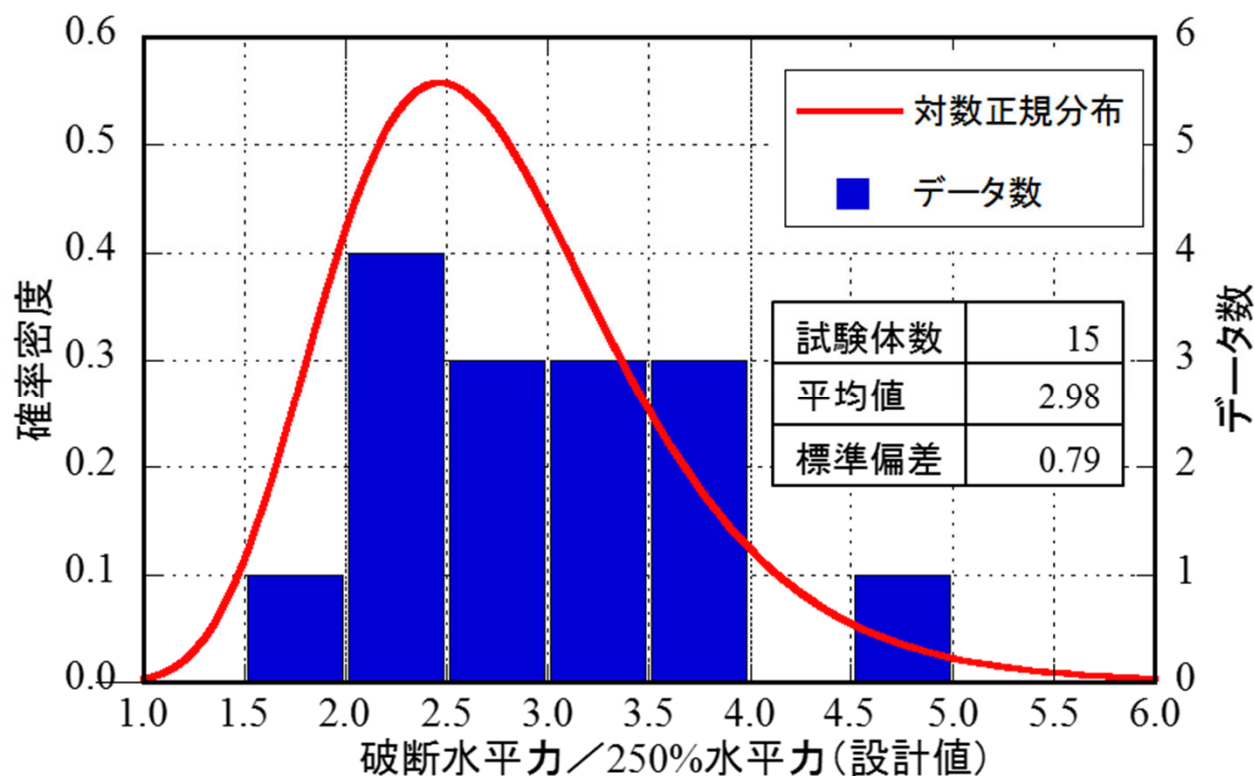
ゴム支承の250%ひずみにおける水平力 < アンカーボルトの耐力 < ゴム支承の破断水平力

15体のゴム支承の载荷実験で得られたデータを基に耐力のばらつきを再分析

ゴム支承の载荷実験



ゴム支承の破断水平力は250%ひずみにおける水平力に対して2.98倍の耐力差



土木研究所共同研究報告書(2020)

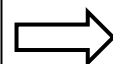


耐力差は十分大きく、制御不要

地震時水平力分散型ゴム支承を構成するエレメントの耐力のばらつき

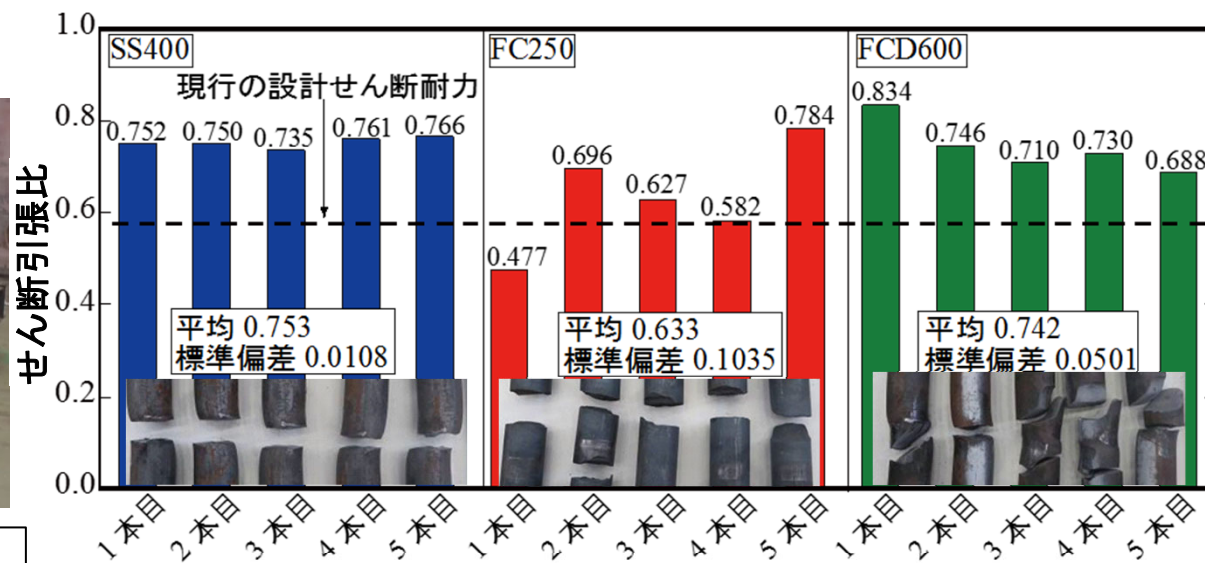
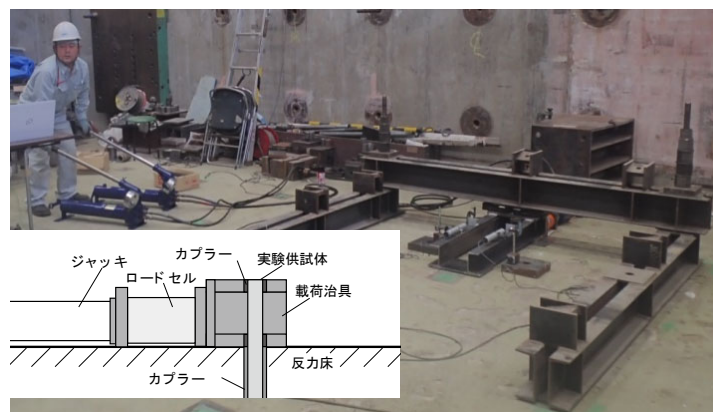
クリティカルエレメントとする支承アンカーボルトせん断耐力のばらつき

耐力のばらつきが小さい材料を選定する必要



SS400を設計の対象とした

アンカーボルトのせん断载荷実験



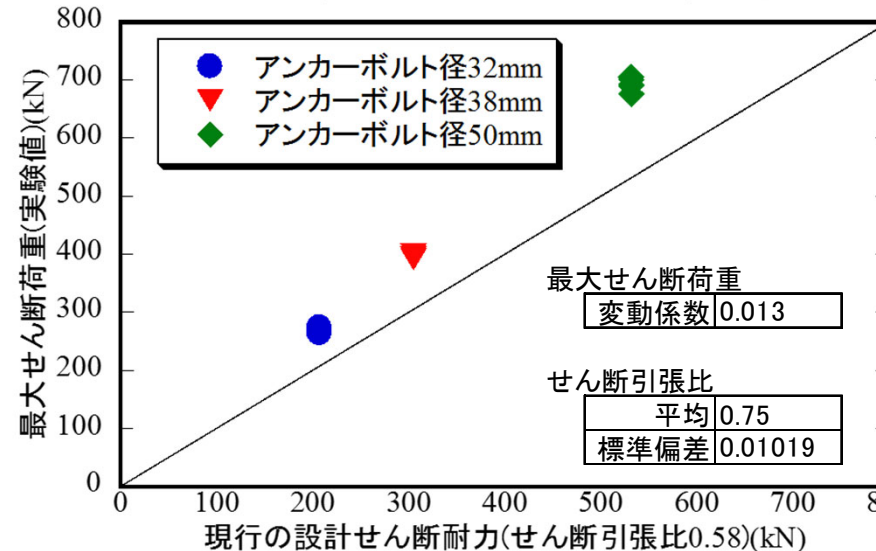
径によるばらつきの違いを確認



径によらず対数正規分布を仮定し
平均、変動係数を設定

現行の設計せん断耐力より1.3倍程度大きい

橋脚の限界状態2に相当する耐力を上回り、限界状態3に相当する耐力を下回するために、確率密度を考慮した耐力階層化が必要

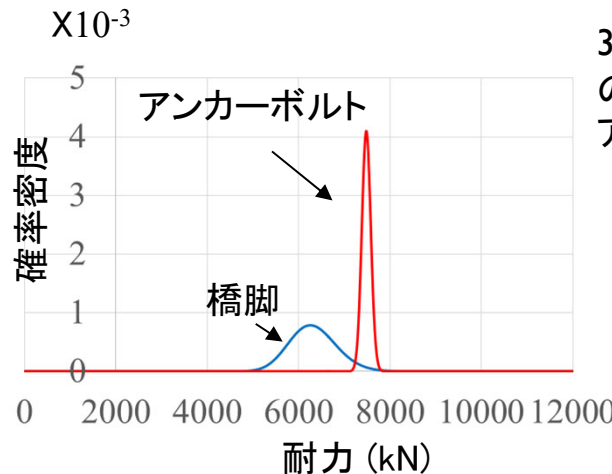


シナリオデザイン設計法を効果的に実現する耐力階層化

アンカーボルト耐力の設定

橋脚基部で塑性化するときの耐力がアンカーボルトの耐力を上回る確率(超過確率)を設定

設定した超過確率以下となるようなアンカーボルトの耐力を求める



3章でモデルとした桁橋の橋脚に平均値のバイアスとばらつきを考慮

$$\frac{\text{耐力比 } \alpha - 1}{\sqrt{\alpha^2 \beta_A^2 + \beta_Y^2}} = \Phi^{-1}(1 - P_f)$$

変動係数 β_A β_Y α 耐力比 Φ^{-1} 逆正規分布関数 P_f 超過確率

耐力階層化鉄筋の設定

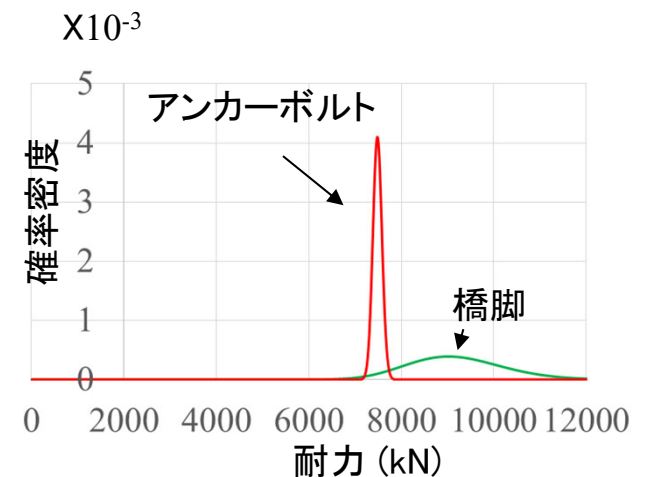
アンカーボルトの耐力が耐力階層化鉄筋が降伏するときの耐力を上回る確率(超過確率)を設定

設定した超過確率以下となるようなアンカーボルトの耐力を求める

道路橋示方書が標準としている超過確率5%に準拠

超過確率: 5%

1.645

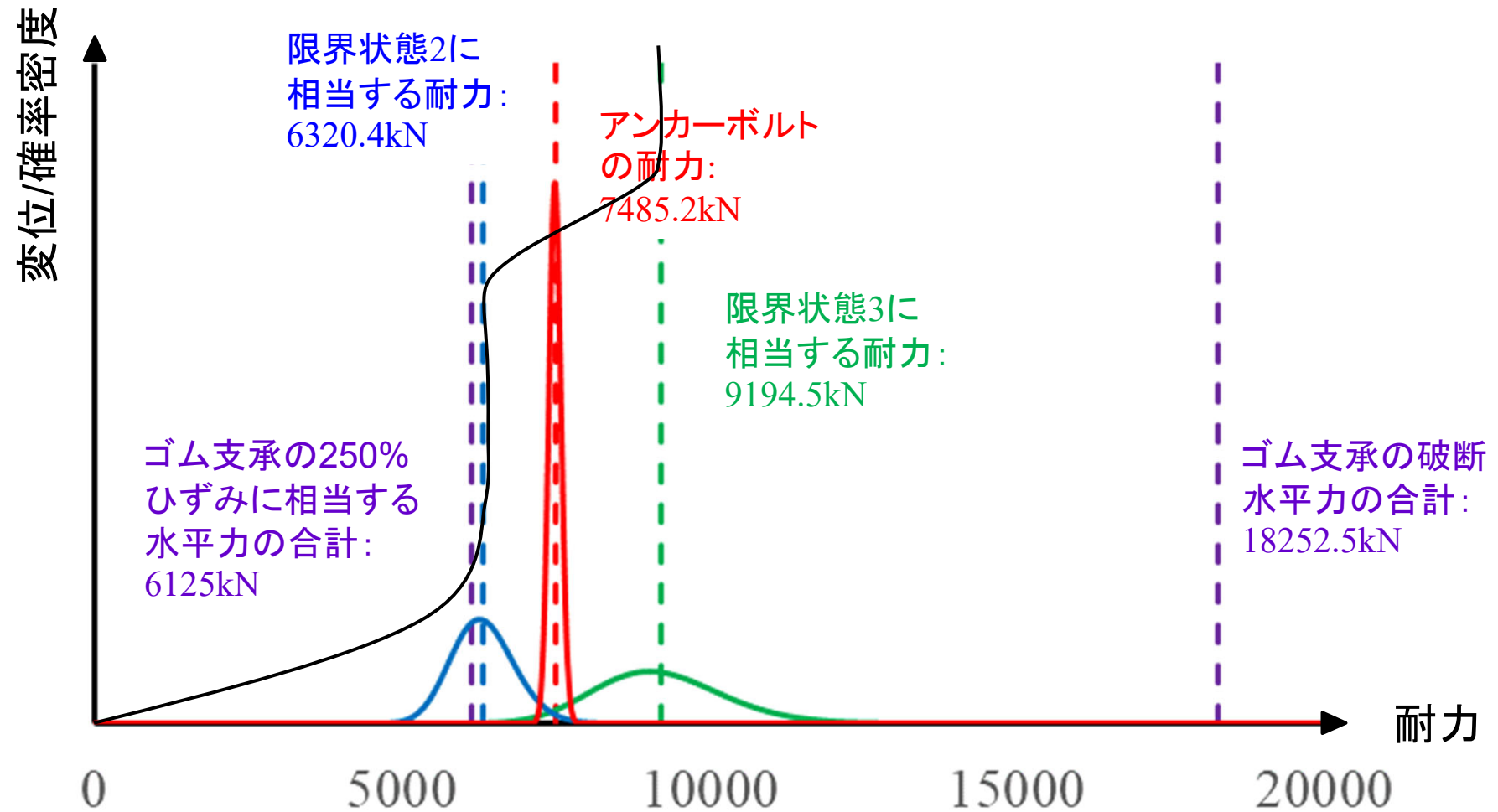


➡ アンカーボルトの径: 38mm

➡ 耐力階層化鉄筋の径: 32mm→35mm

シナリオデザイン設計法を効果的に実現する耐力階層化

各部材耐力の関係



設計の実現性が確認された

シナリオデザイン設計法の展開

事例研究を通じて分かったこと

- 必ずしも大変形問題のように難しい解析を行って、連続的に破壊過程を追うのではなく、断続的に状態が特定できれば良い。
- 卓越する応答モードが複数ある場合は、それぞれ想定が必要。
- 耐力階層化を信頼性をもって実現し、損傷モードを誘導するためには、力の伝達経路それぞれの損傷のばらつきデータが必要。
- どのような損傷モードに持ち込むのが、よりレジリエントか、アイディア勝負。



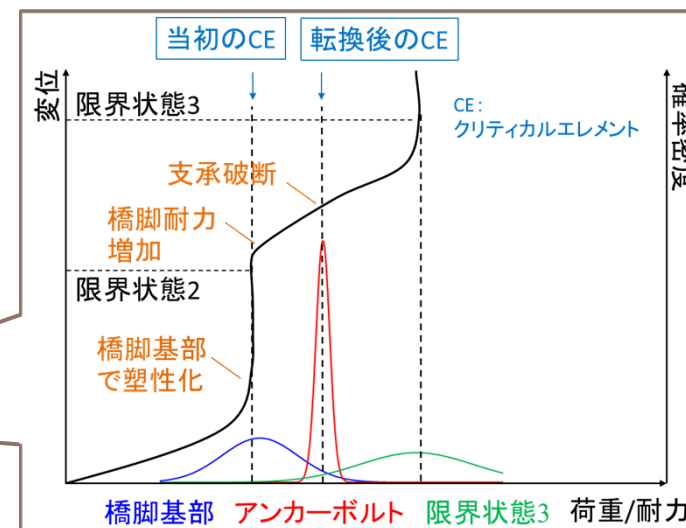
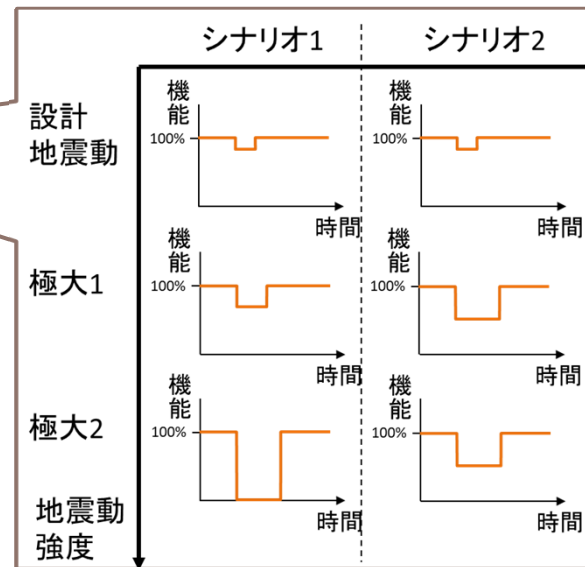
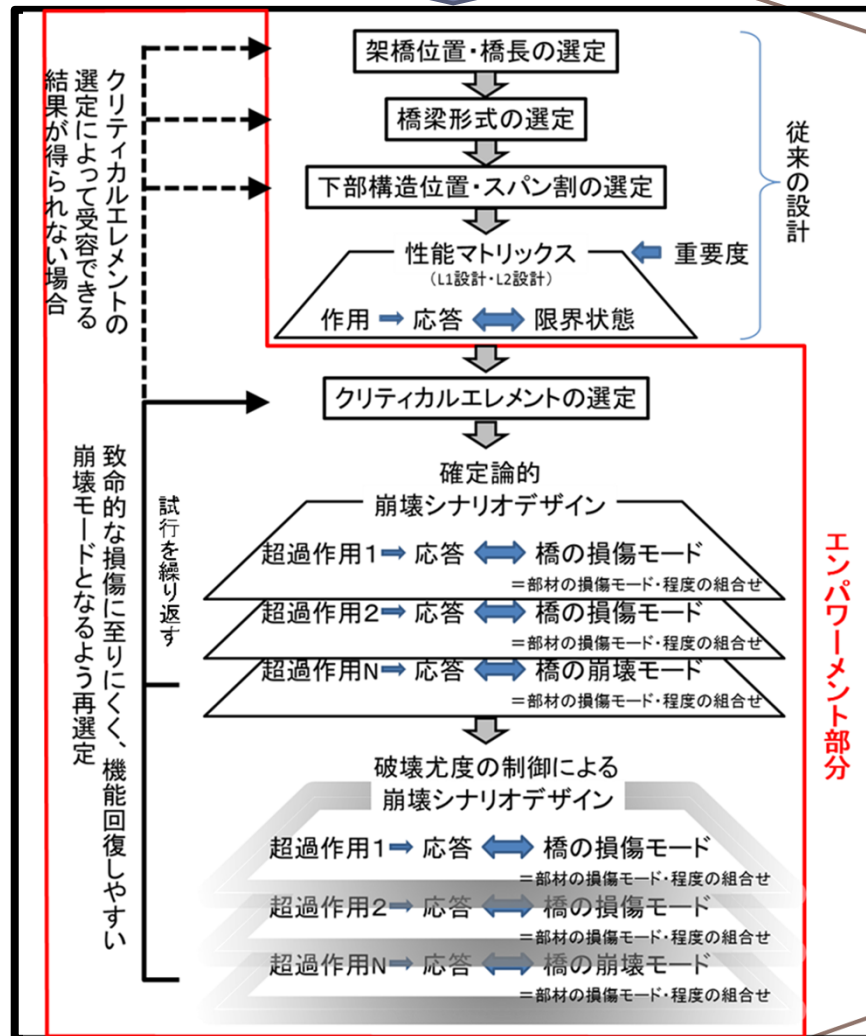
シナリオデザイン設計法の展開

今後の研究の展開

- 橋にどのように力がかかるのかを想定できれば、地震動以外の作用でも適用可能と考えられ、引き続き検討予定。
- 既設橋、損傷を受けた橋でも、シナリオを考慮すること、それを踏まえて対策を行うことは重要。本手法の適用性を引き続き検討予定。
- 設計内容の検証と妥当性確認(V&V)、社会的な合意形成ともセットで考える必要。



社会的な合意形成



検証と妥当性確認

ご清聴ありがとうございました

本講演に関連する話題が土木研究所講演会でも取り上げられます。
詳しくは、以下へ。

<https://www.pwri.go.jp/jpn/about/pr/event/2021/1020/index.html>



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
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research

