



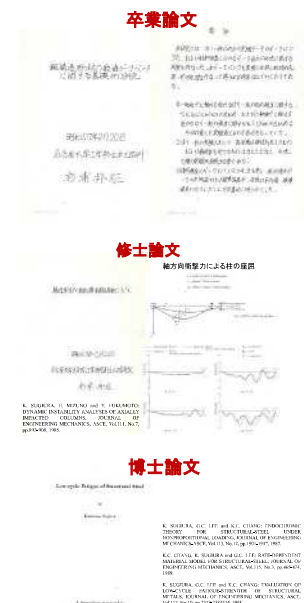
「還暦過ぎたらフォレンジックな思考ができるのか？」 ～材料から構造へのかけはし～

京都大学大学院 地球環境学堂資源循環学廊都市基盤エンジニアリング論分野
併任 工学研究科社会基盤工学専攻 構造工学講座構造力学分野
杉浦 邦征(1960年生まれ61歳)



- 1960年03月 岐阜で生まれる
- 1982年03月 名古屋大学工学部土木工学科卒業
卒業論文：『鋼構造部材の数値データベースに関する基礎的研究』
- 1984年03月 名古屋大学大学院博士課程前期課程土木工学専攻修了
修士論文：『構造部材の動的弾・粘塑性挙動について』
- 1988年08月 米国ニューヨーク州立大学バッファロー校Ph.D.課程修了
博士論文：『Low-cycle Fatigue of Structural Steel』
- 1988年9月: Ph.D.
- 1988年11月 京都大学工学部土木工学科助手
- 1994年04月 京都大学工学部土木工学科助教授
- 1997年02月 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻助教授
- 2003年04月 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻助教授
- 2006年10月 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授
- 2017年04月 京都大学大学院地球環境学堂資源循環学廊教授(5年任期2022年3月まで)
 (併任)工学研究科

現在に至る



名古屋大学学部(4)・大学院在籍時('81~'84)

- 第一講座(構造力学研)に配属され, 構造系学生と懇親を深める. 下宿生活も.
- 研究への取り組み方, 基礎学力の重要性を学ぶ(当時, 伊藤助手)



此花大橋(大阪)



“杉浦”を探せ!

主塔の載荷実験 @名大, 1982年



日本航空JL350, 1982年2月9日

● 米国留学時('84~'88) . . . 福本先生に感謝:若い人は, 旅に出す! ?

- 外国人と, 特にアジア系留学生と交流: 日本とは? を再考
- 実験室(試験機)・図書館(世界での研究動向)・オフィス



スペースシャトル:
チャレンジャー号,
1986年1月28日



引張圧縮・ねじり
一軸試験機

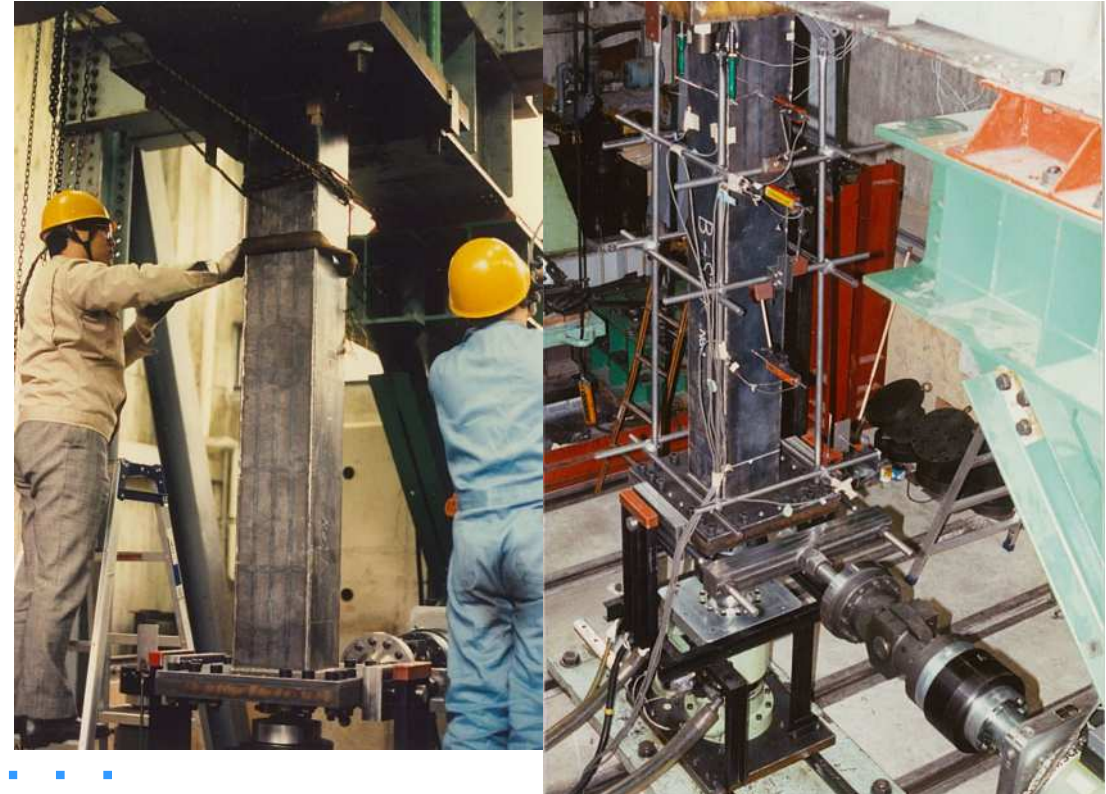
● **京大助手時代('88~'94)** . . . **研究室の担任教授は渡邊先生**

→学生とよく実験, 討論, 交流にあげくれました(当時のD学生, 山口先生が相棒)

→この当時の卒業生が今第一線で活躍し, 実務の情報源です. **“杉浦”を探せ!**



アイルトン・セナの事故死(1994年5月1日)
“1960年3月21日で同じ生まれ日”



● **京大助教授時代('94~'06)** . . .

関西の個性ある先生方(中井・西村・北田・堂垣先生)

→構造力学から複合構造デザイン(小野紘一先生)へ

→学内外の会議で多忙. 学生との距離が開き, 残念

→多様な活動の中で, 言動/行動の不一致, 責任を取らない人の多さを痛感



● 途上国の技術者教育('94~) . . . ケニア・ミャンマーなどでの活動

→ケニア・ジョモケニヤッタ農工大学

1994年～2000年の期間に合計6回技術指導
(JICAが派遣)でケニアを訪問

- ・構造工学関連の研究指導
- ・構造関連講義の担当 など



→ミャンマー・ヤンゴン工科大学/マンダレー工科大学

2013年～2020年の合計○回技術指導/共同研究の実施

数え切れません!

- ・材料の腐食耐久性試験
- ・実橋における載荷実験・振動実験 など



● 京大教授時代('06～現在)...昇任してからの失われた10年？

→学内の教育プロジェクトで振り回される(学部留学生のリクルート)！

※ 中国, 台湾, 韓国, ベトナム, タイ, マレーシア, インドネシア, インド, エジプト, ケニア, サウジアラビア, ミャンマー等

→組織内での合意形成は大変！？





自己紹介はここまで！
Forensic考察の準備はできましたか？

国土・都市など様々なスケールでの社会基盤施設の計画，建設，供用，維持，修理，撤去，再構築などにおける技術開発の推進は？

今後，快適で，安全・安心な社会構築においてどのような技術者が求められているのかを考えてみましょう！

「還暦過ぎたらフォレンジックな思考ができるのか？」
～材料から構造へのかけはし～

0. 自己紹介

1. 法工学とは？ —構造工学の役割—

2. 事例1: 構造材料の非弾性応答

3. 事例2: 構造材料の動的応答

4. 事例3: 複合構造における材料間の相互作用

5. 事例4: 損傷を有する構造部材の残存性能評価

6. 事例5: 変状検知のためのモニタリング・非破壊評価

7. 事例6: 実物大構造物を用いた破壊実験

8. まとめ

展望論文!

法『構造』工学のススメ

杉浦 邦征¹

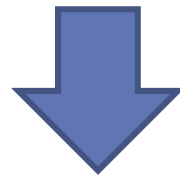
¹正会員 京都大学教授 地球環境学堂資源循環学廊都市基盤エンジニアリング論分野
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

複合構造の分野における技術の体系化や今後の技術の発展に寄与する課題を系統的に挙げる「展望論文」に対して、ふさわしいテーマを絞り込んだ結果、論文タイトルとしては『法“構造”工学/臨床“構造”工学』をキーワードと定め、これまでの10数年の思いをまとめることとした。生活の質向上に向けて整備されてきた膨大な量の社会基盤施設のストックに対して、設計・製作・架設・維持管理において、「技術の質保証・持続性」、「事故(災害)調査」、「新技術の受容性とリスク」等を考えると、土木構造を専門とする研究者・実務者のみならず行政の専門家あるいは法曹実務家との協働作業、すなわち『法工学』が重要となってきた。本展望論文が、専門分野の横断的な新分野として展開のきっかけとなれば幸いである。

Key Words: forensic engineering, structural engineering, construction materials, failure, fault

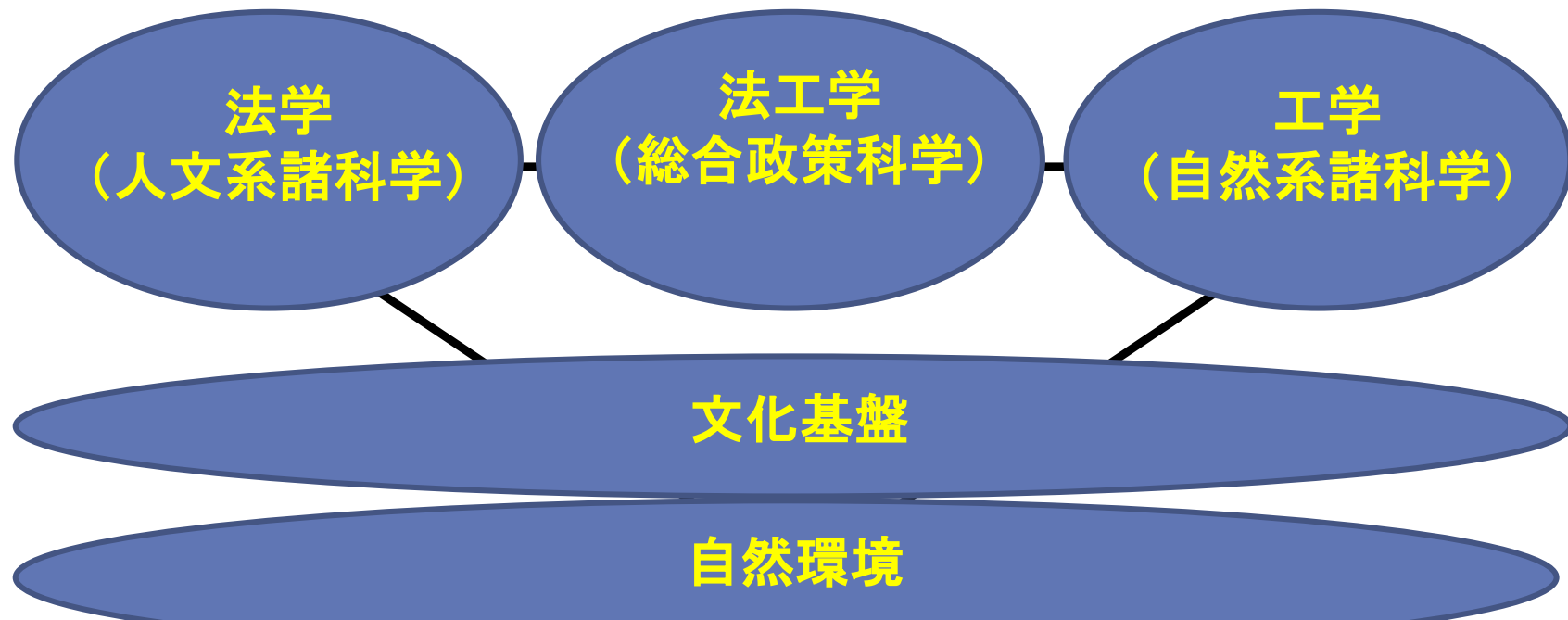
法工学とは、事故(災害)調査のみならず、技術の安全・安心を確保するために、どのような法のあり方が望ましいかということも考える学問領域です。また、裁判における工学鑑定の扱い方や工学鑑定を行う者が専門知識を悪用することのないような法をどのように構築するか、ということも対象としています。さらに、技術革新を促進するための知的財産法なども扱われています。(Forensic engineering, Clinical Engineering)

- ・ものづくりの規制法(基準類など)の体系
- ・管理者(行政府など)の構造, 体制
- ・現場に関連する規格・技術基準・技術標準



自然・生活環境を保護し, 人々の健康と安全を確保することが必要

法律家と技術者が同じ土俵で活動ができる『協働の場』を整備し, 法学・工学・政策を一体とした総合政策科学としての法工学の確立が望ましい!



米国土木学会 (ASCE) で Forensic Engineering委員会が2001年9月に設置される！

構造物の事故(破壊, 損傷や機能異常)の調査における工学諸原理の適用に関することとし, これらの調査結果の法定証言も別途行う。



恩師：福本先生から新しい分野があると教えられる！

【主な活動】

- ①事故の数を減らすための実践と手順の開発
- ②事故とその原因に関する情報の周知
- ③事故調査を実施するためのガイドラインの構築
- ④法工学における倫理的行動のガイドラインの構築

法医学(Forensic Medicine)があるように 『法工学(Forensic Engineering)』も必要では？

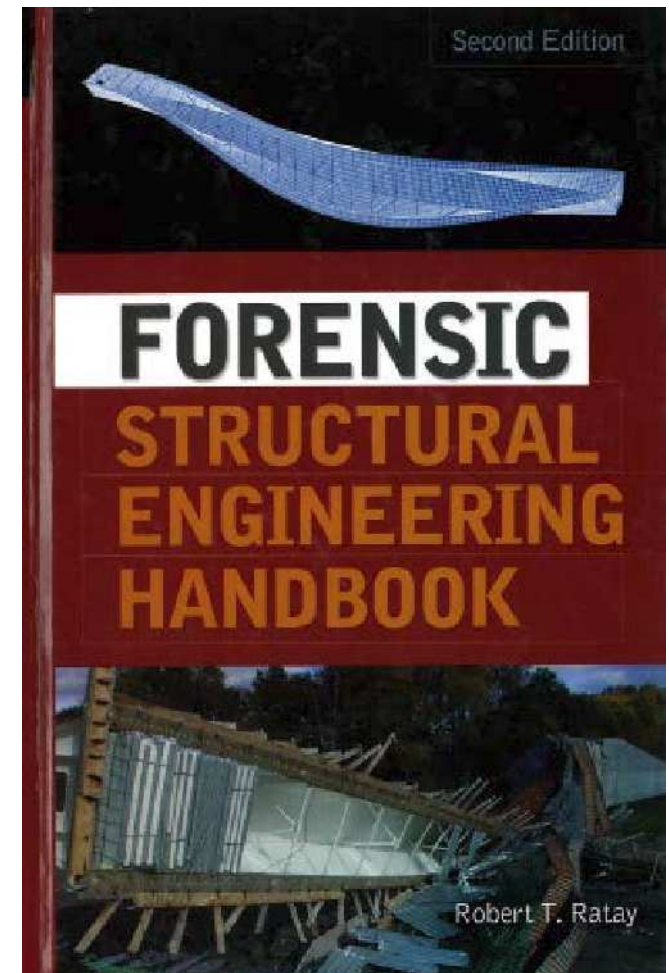
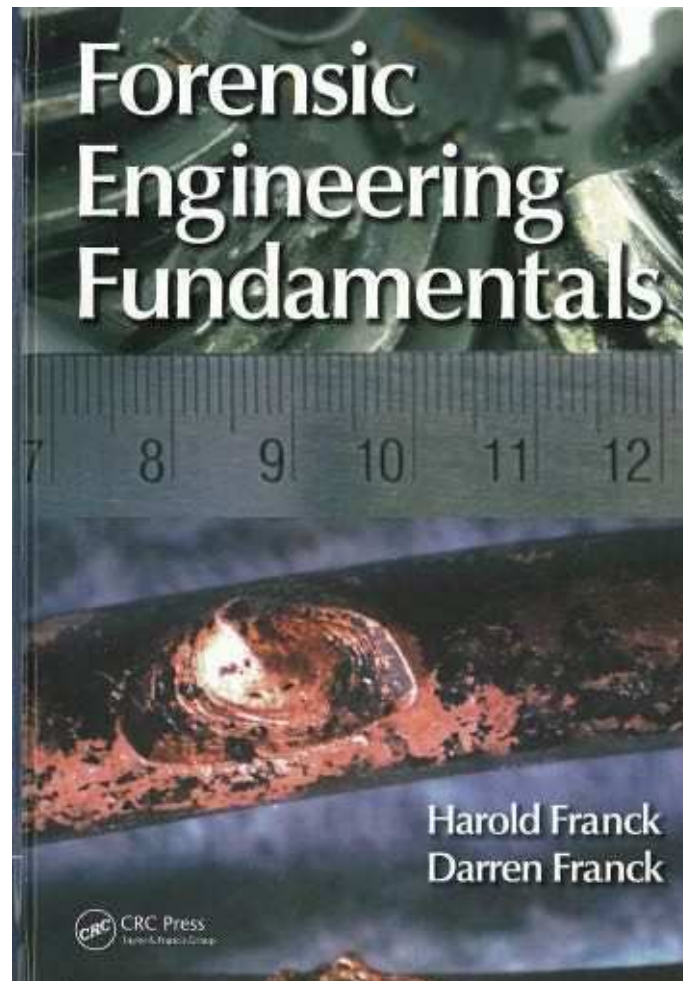
“例: 橋梁技術者は, 橋梁を診るお医者さん! ?

技術者倫理と 法工学

清水 克彦 / 著

- ◆ 技術者倫理と倫理規定の制定 ◆ ポーダレスエコノミーと国際整合の進展 ◆ 倫理規定と法 ◆ 規制行政のあり方 ◆ 新たな対応と法工学の必要性 ◆ 英国の行政構造改革の考え方 ◆ EC/EUの新政策 ◆ 法規制とマネジメントシステムの相互関係 ◆ 専門的力量向上の必要性 ◆ マネジメントシステム・自主的活動と技術者倫理 ◆ 法工学の全体像 ◆ 技術者の使命と法工学の役割

共立出版株式会社



衝撃的な重大事故の例

インフラ 施設関連	1991	広島新交通システム橋桁落下事故①
	1995	阪神高速道路高架橋の地震による倒壊②
	2001	米国ニューヨーク市のWTCビル崩壊③
	2012	笹子トンネル天井板落下
	2016	新名神橋桁落下事故
エネルギー 施設関連	1986	チェルノブイリ原発事故
	2011	福島原発事故④
交通施設 関連	1985	日航ジャンボ機墜落
	1994	中華航空140便墜落事故⑤
	2000	コンコルド墜落
	2005	JR福知山線脱線事故⑥
宇宙関連	1986	チャレンジャー爆発
	2008	コロンビア帰還失敗



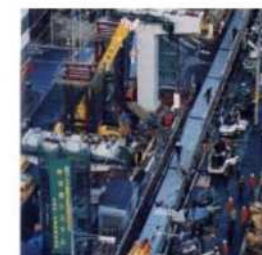
浸水した電源室の様子



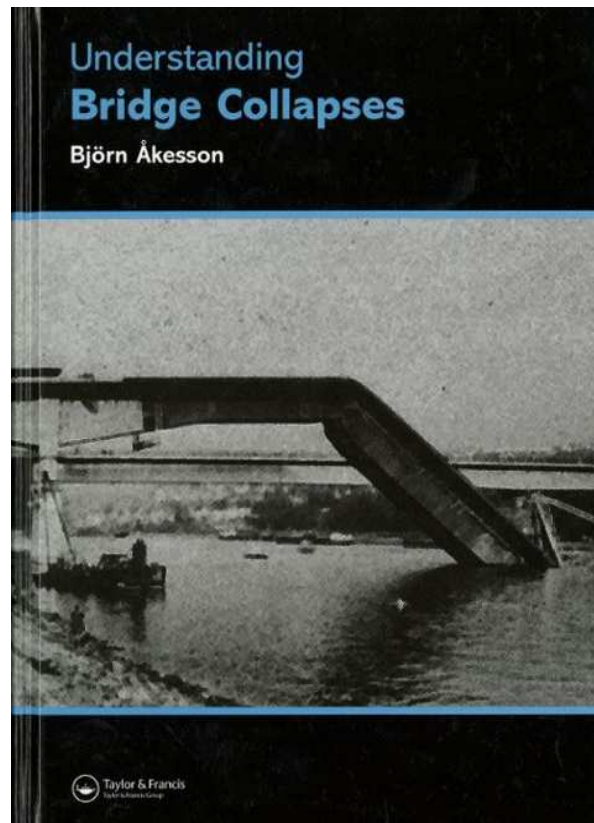
水素爆発直後の1号機原子炉建屋



非常用復水器の被害状況



被災事故の原因から学んで、技術革新！



【失敗学(Failure Studies)】

失敗に学び、同じ愚を繰り返さないようにするにはどうすればいいかを考える。さらに、こうして得られた知識を社会に広め、ほかでも似たような失敗を起こさないように考える。以下3点が失敗学の核となる：

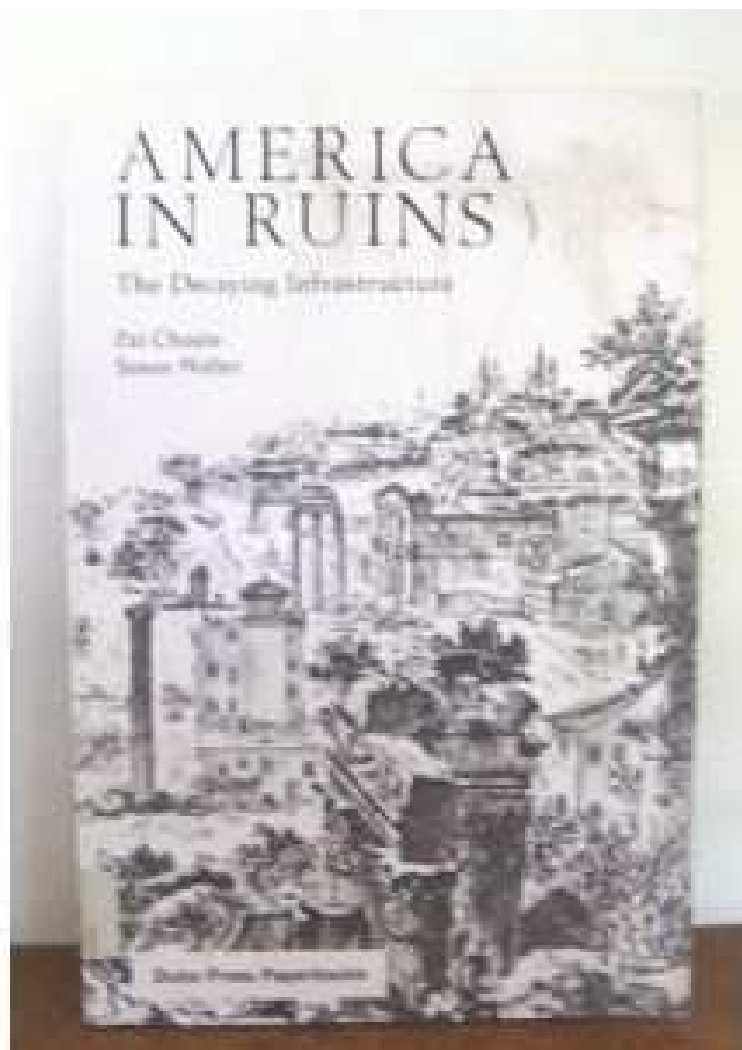
- 原因究明 (CA: Cause Analysis)
- 失敗防止 (FP: Failure Prevention)
- 知識配布 (KD: Knowledge Distribution)

なお、安全工学などとも関係し、工学・経営学などを網羅的に含んだ領域と考える。

America in Ruins : The Decaying Infrastructure (荒廃するアメリカ)

Dr. Choate re-examines the infrastructure crisis:

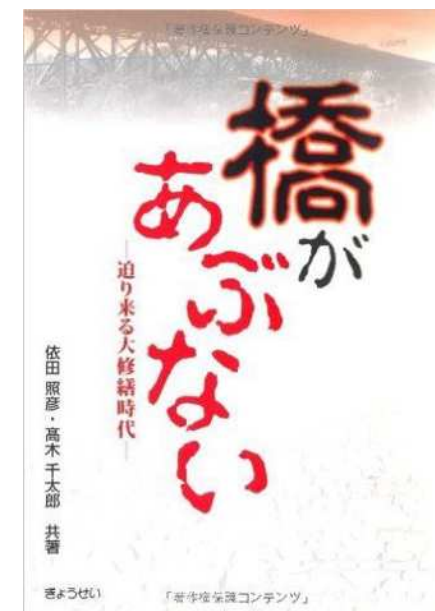
“The deterioration of America's stock of public facilities is strangling the nation's capacity to support renewed economic growth and provide basic community services.”



Published 1981 by Council of State
Planning Agencies in Washington, D.C .



2011



2010

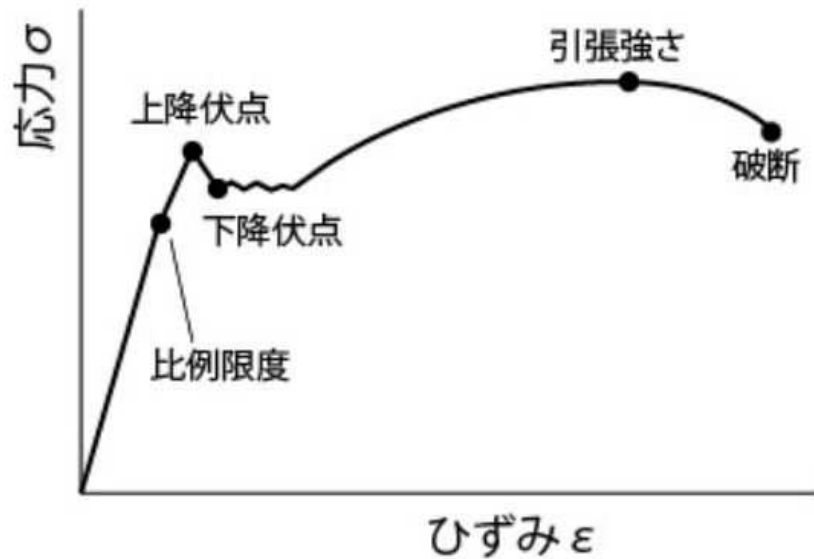
日本においても同様に起きる！



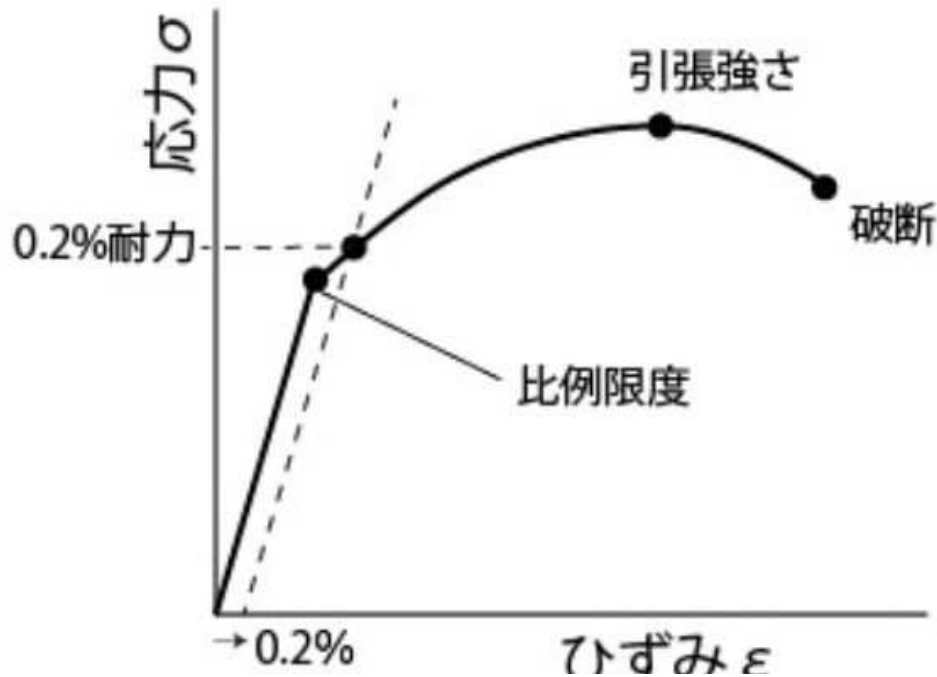
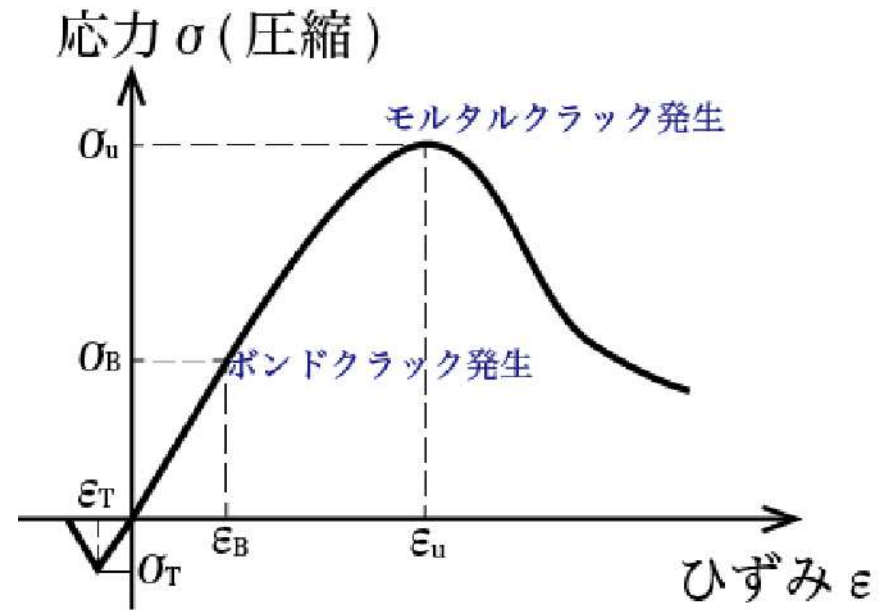
Forensic考察の始まり！
まずは材料から, . . .

• 構造材料の応力-ひずみ関係は？

[鋼材]



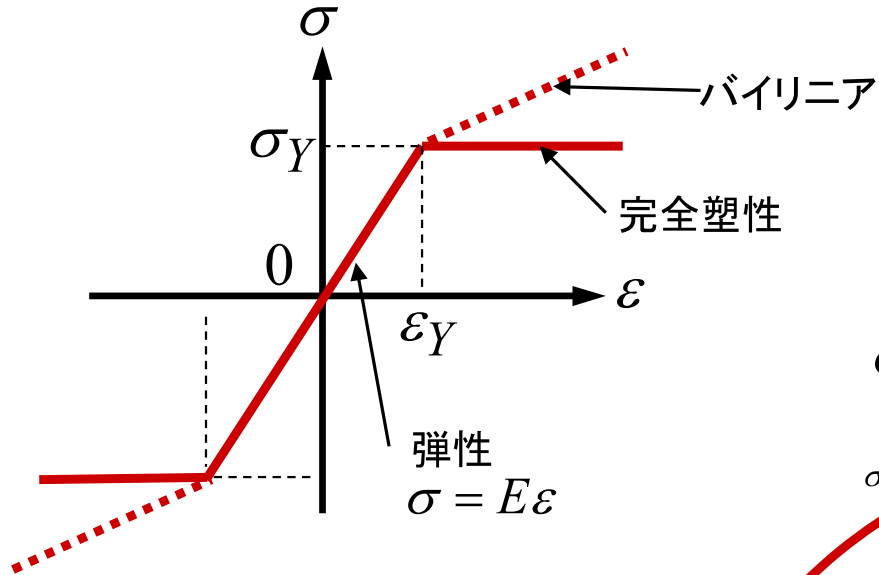
[コンクリート]



島津製作所製

鋼材の非弾性特性のモデル化を例とすると, . . .

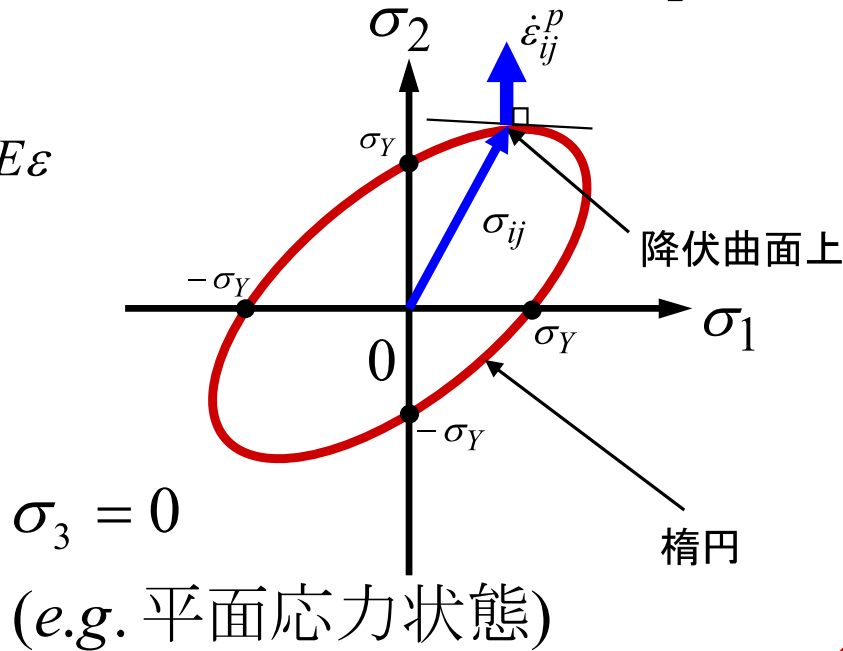
[一軸応力状態(1D)]



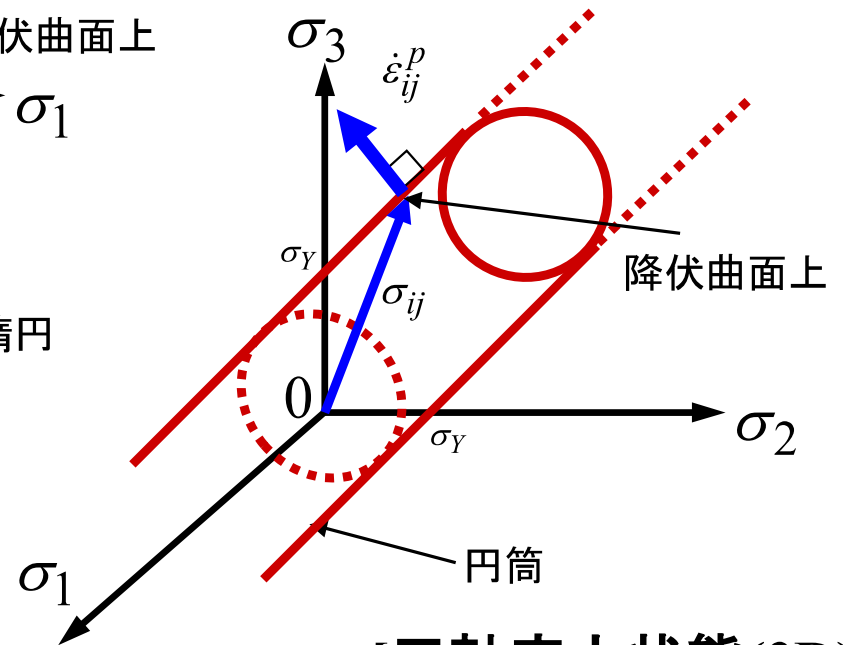
$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

#ミーゼスの降伏条件

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{2} \left\{ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right\}$$



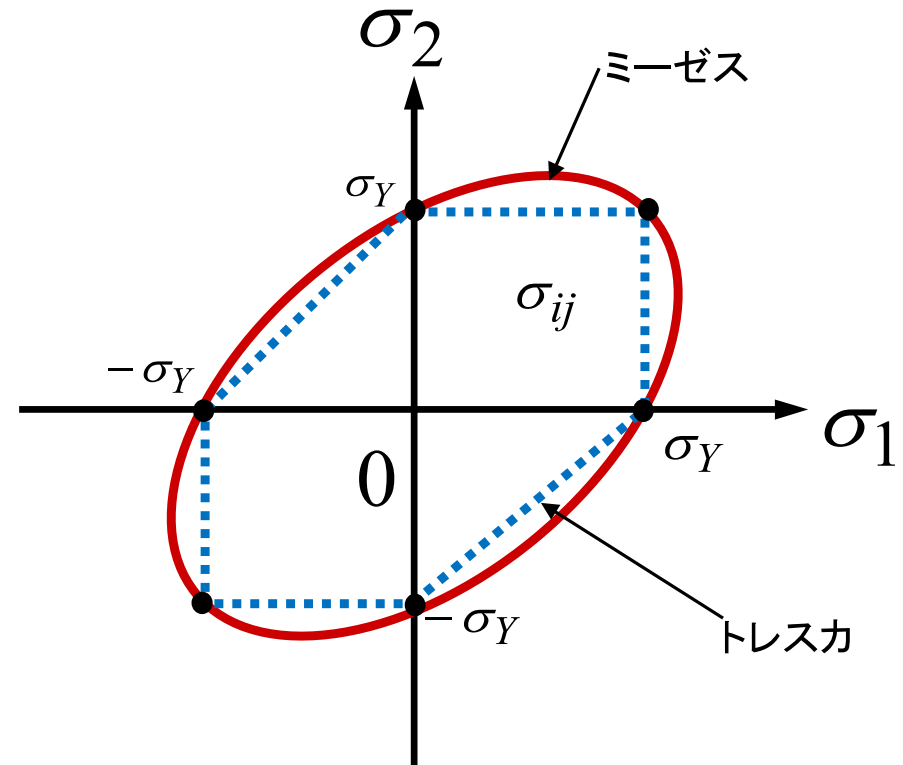
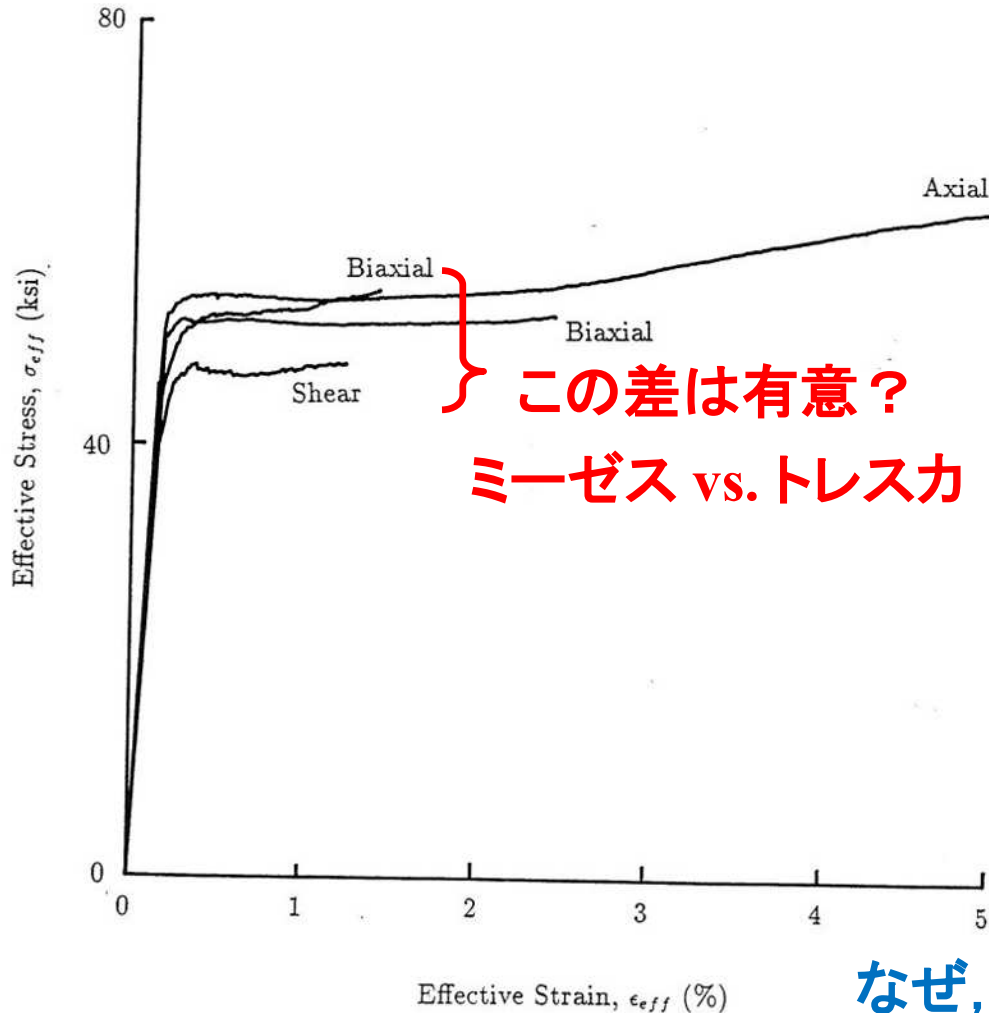
[二軸応力状態(2D)]



[三軸応力状態(3D)]

一般的に、鋼材においては、相当応力(ミーゼス応力)を用いる！

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}, \quad \text{偏差応力 } s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\sigma_{kk}}{3} \delta_{ij}$$

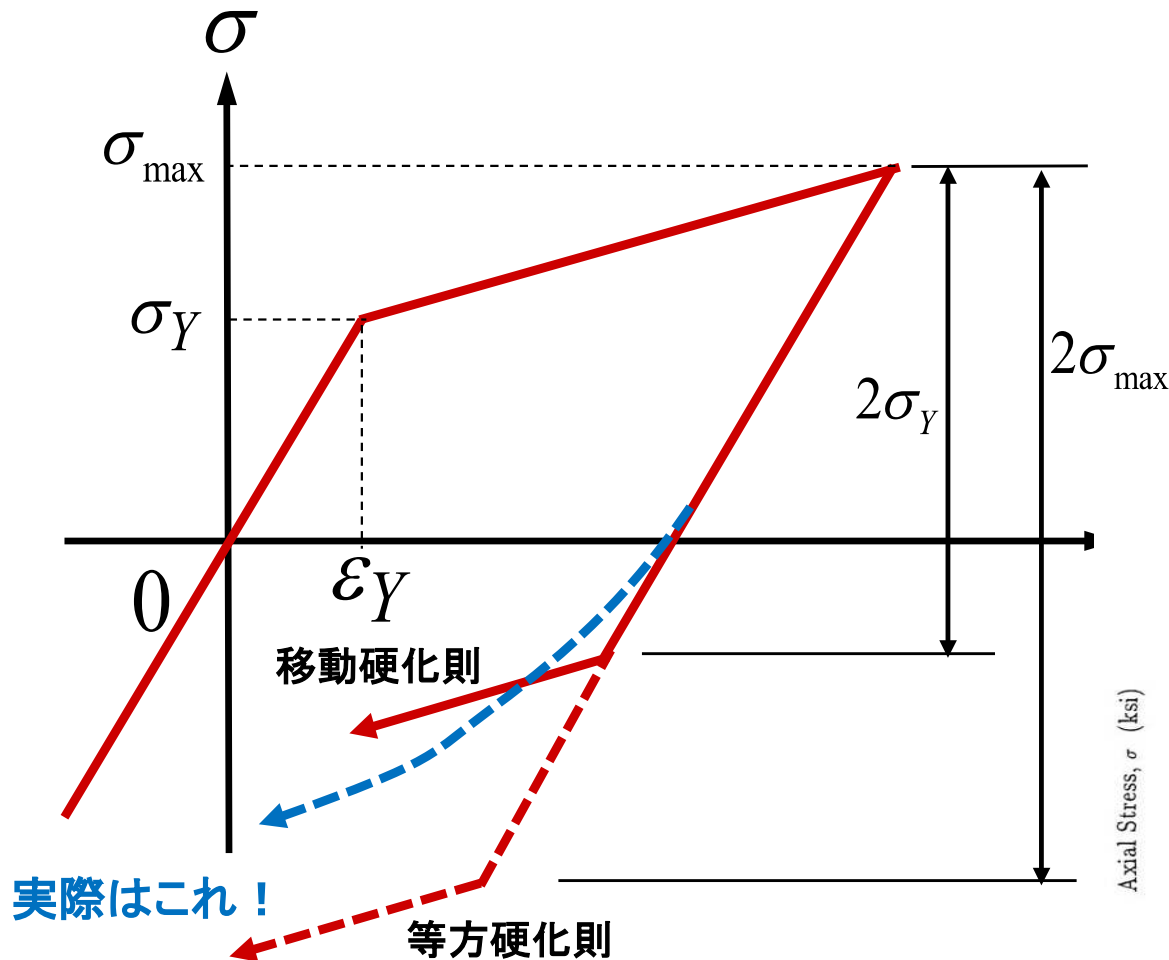


なぜ、ミーゼスを用いる？

「二軸の材料試験結果の一例(博士論文の一部)」

ひずみ硬化のモデル化: 移動硬化則 vs. 等方硬化則

地震時応答評価のための時刻歴応答解析など, 繰り返し荷重を受ける場合, 何を使うか?



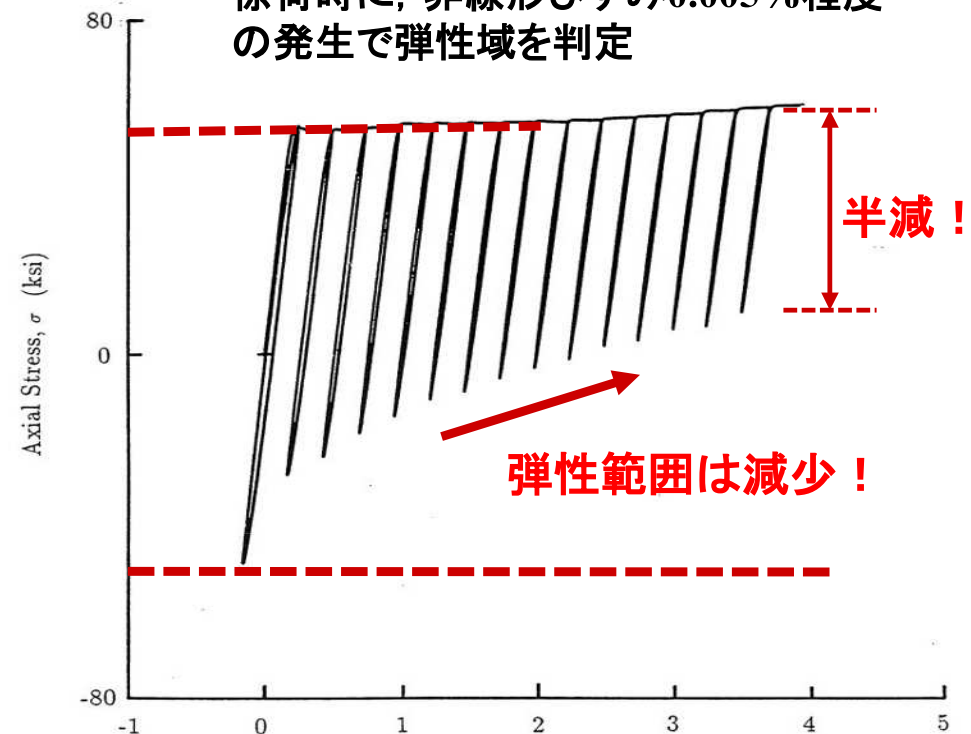
$$f(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) - \kappa_0 = 0$$

α_{ij} : Back Stress



$$f(\sigma_{ij}) - \kappa(\bar{\epsilon}^P) = 0$$

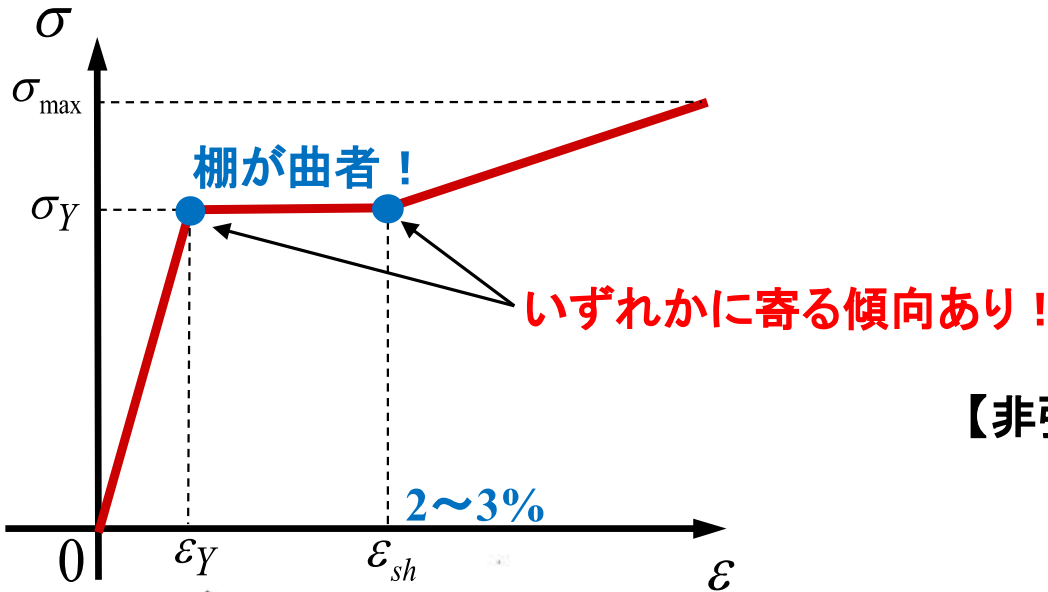
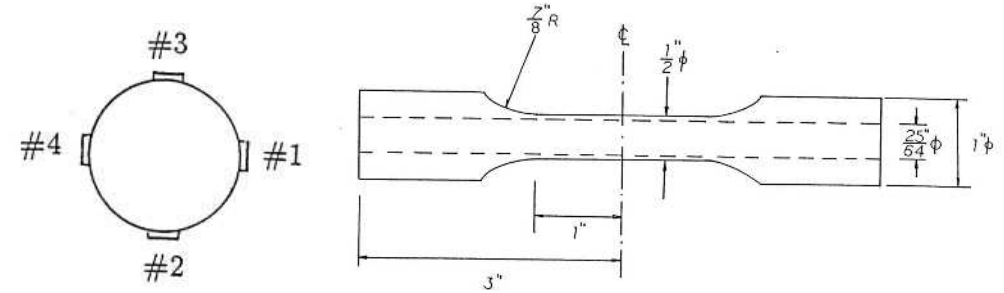
徐荷時に, 非線形ひずみ0.005%程度の発生で弾性域を判定



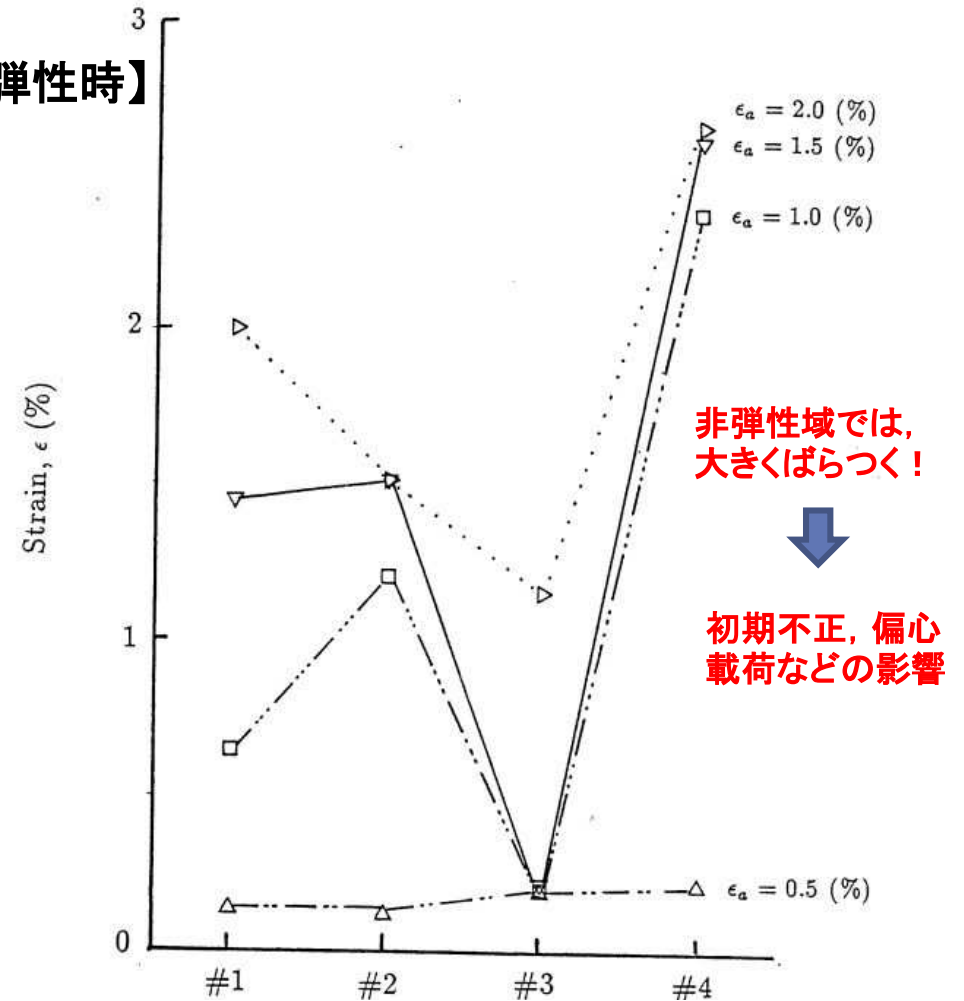
どのように使い分ける?

● 普通構造用鋼材では降伏棚が存在！

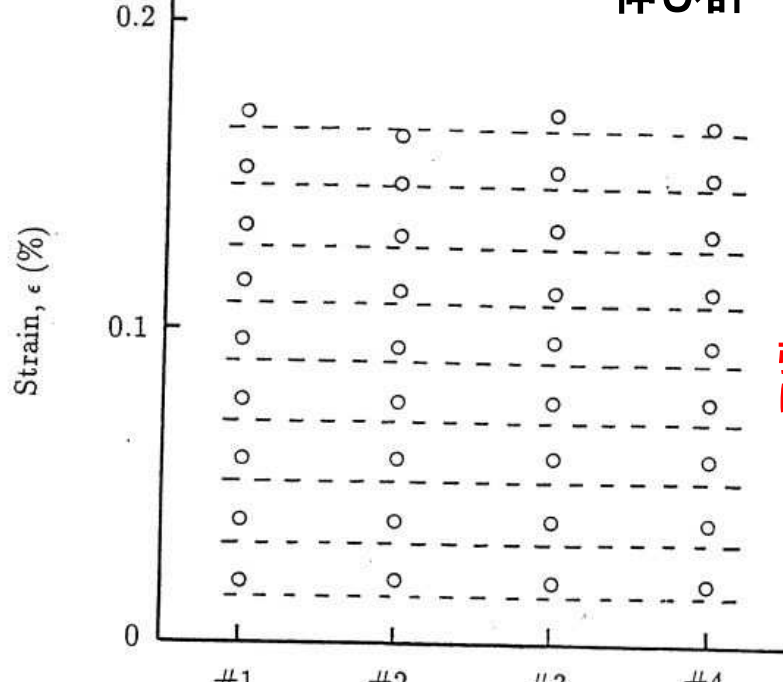
円筒形引張圧縮試験片



【非弾性時】



【弾性時】

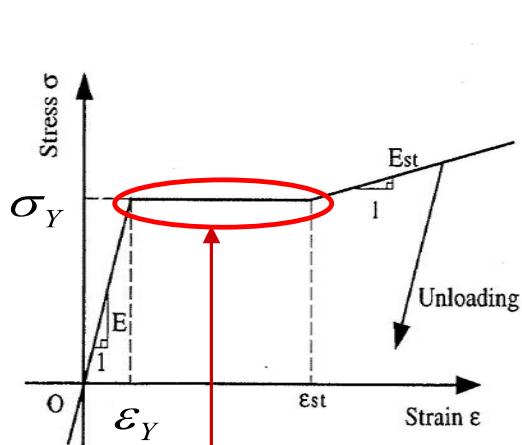


弾性域では、
ほぼ一様

非弾性域では、
大きくばらつく！

初期不正, 偏心
載荷などの影響

鋼極短柱の圧縮挙動を検証すると、...



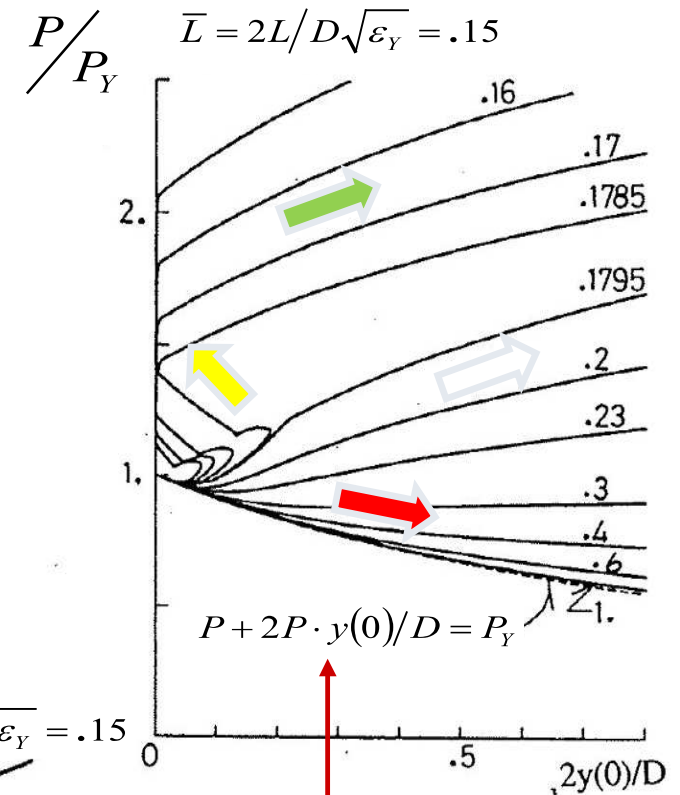
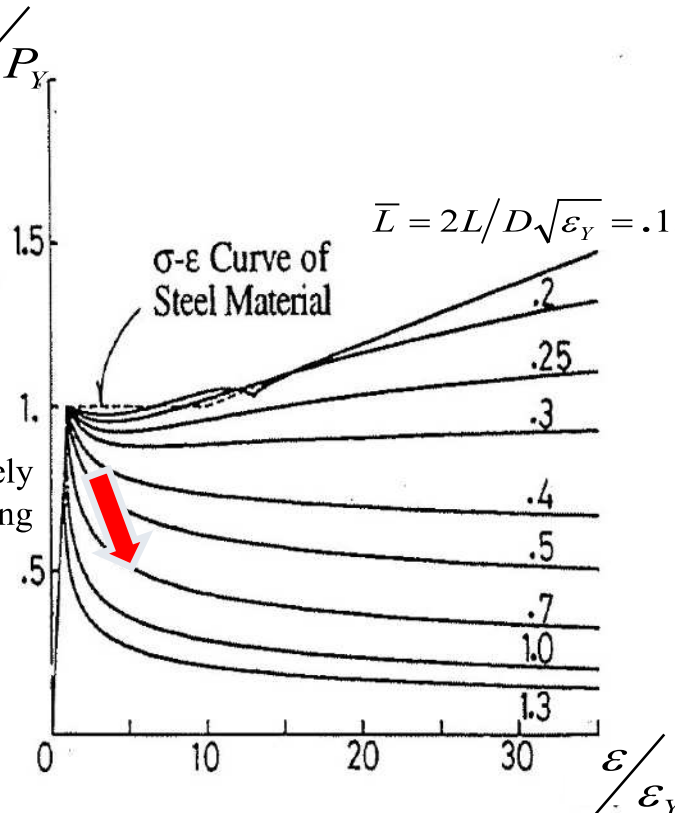
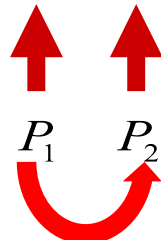
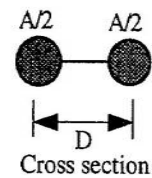
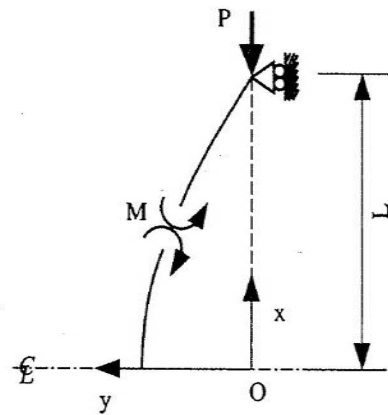
降伏棚
 $E_t = 0$



$$P_t = 0 \quad (P_t < P_Y = A\sigma_Y)$$

降伏して直ぐに座屈!

$$P_t = \frac{\pi^2 E_t I}{\ell^2} \quad (E_t: \text{接線係数})$$



$$\begin{cases} P = P_1 + P_2 \\ M = P \cdot y(0) = \frac{D}{2} P_2 - \frac{D}{2} P_1 \end{cases}$$



yielding

$$P \cdot y(0) = D \cdot P_2 - \frac{D}{2} P = D \cdot \frac{P_Y}{2} - \frac{D}{2} P$$



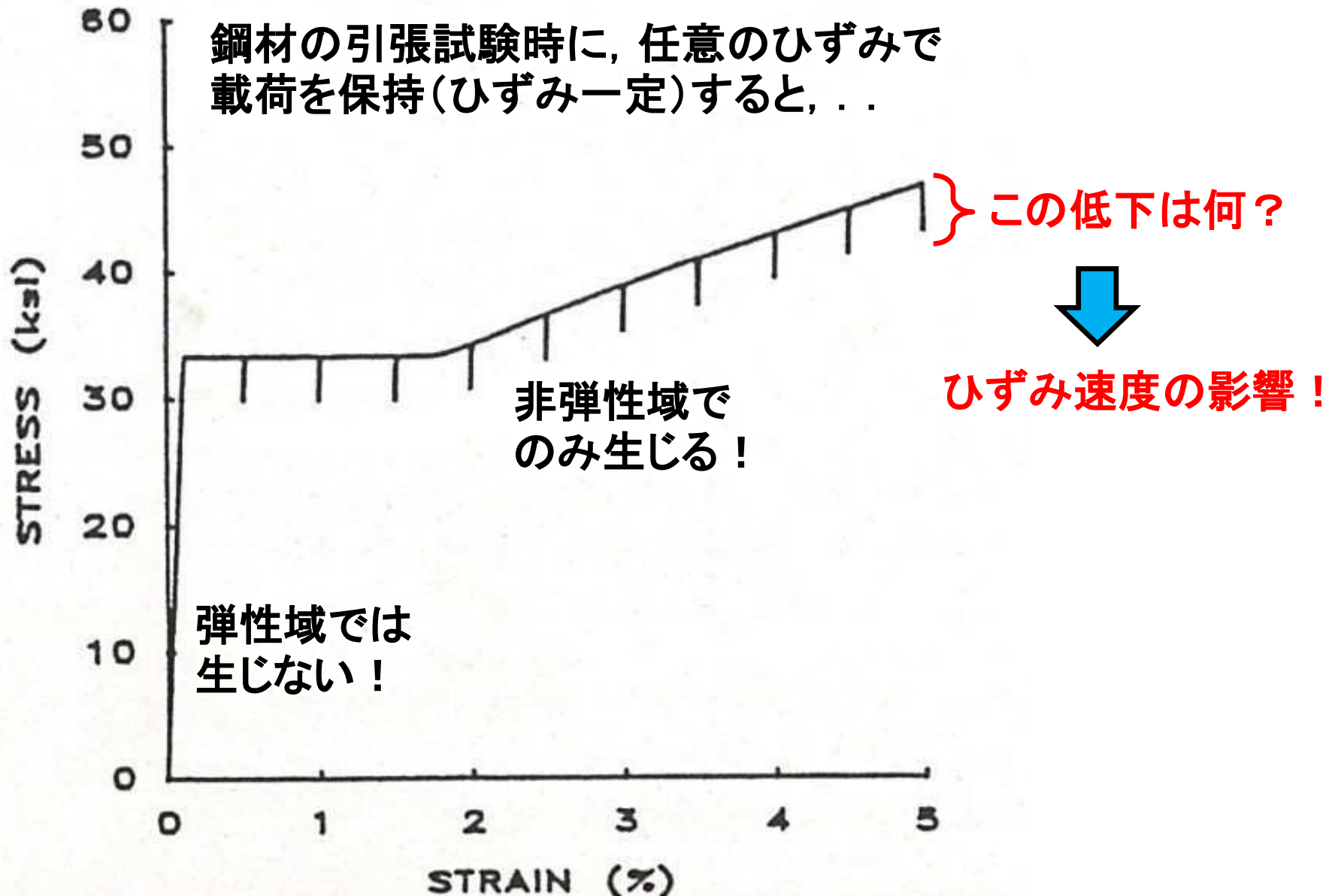
$$P + \frac{2P}{D} \cdot y(0) = P_Y$$

• 引張試験で、静的応力-ひずみ曲線を得るには？

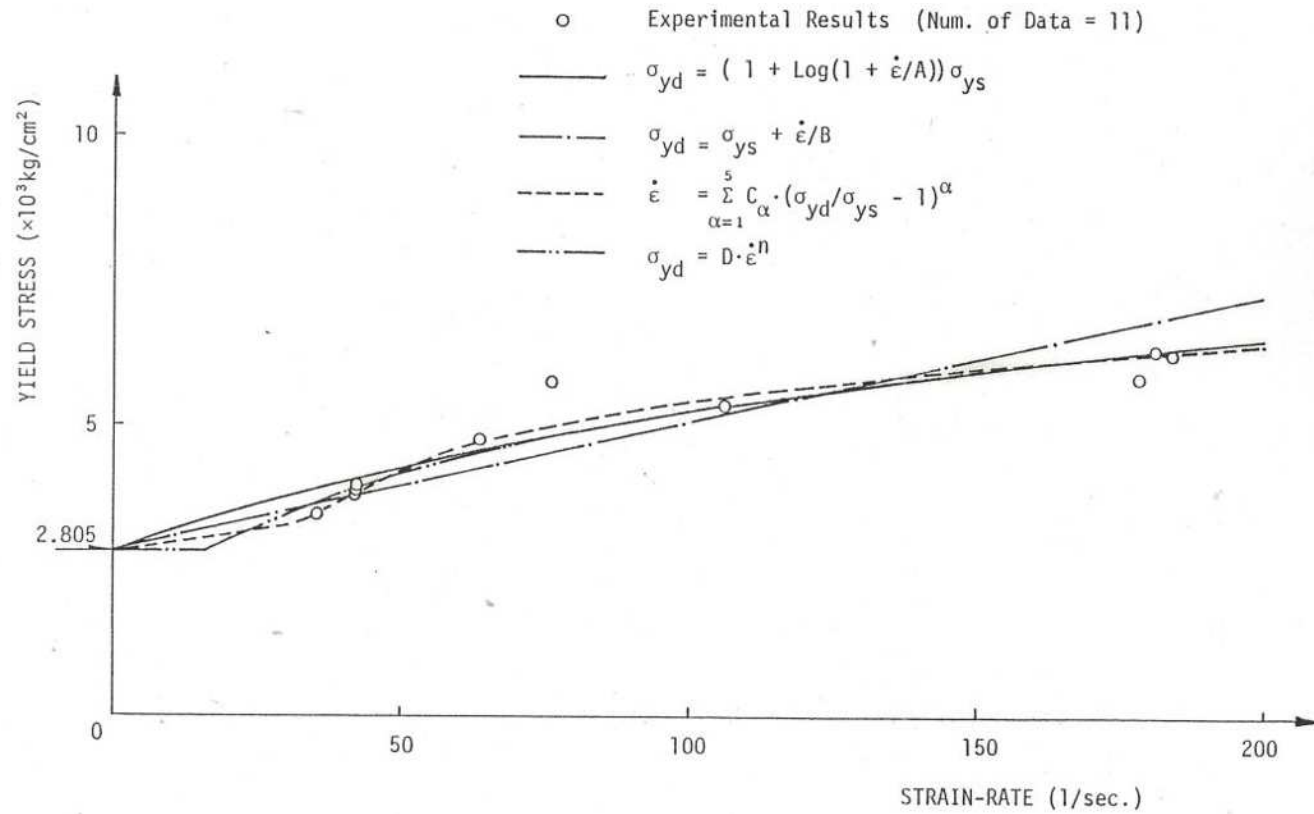
【JIS Z2241(1998)】

上降伏点・下降伏点まで：応力増加速度 3~30 N/mm²/s

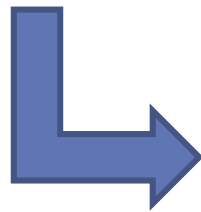
上記以降：歪速度 20~50 %/min



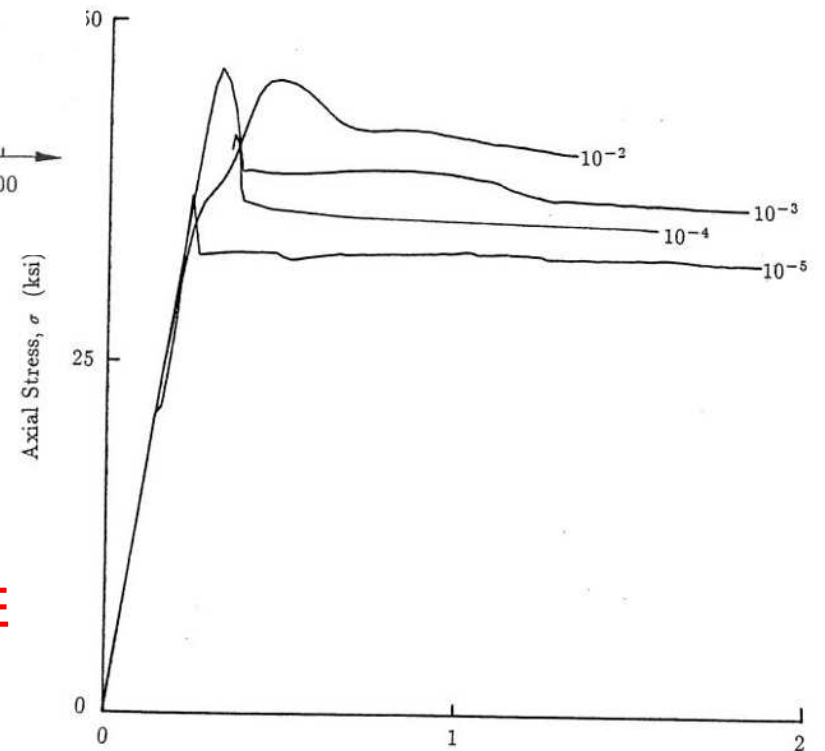
● 引張試験でのひずみ速度の影響を調査すると, . . .



修士論文でのデータ収集

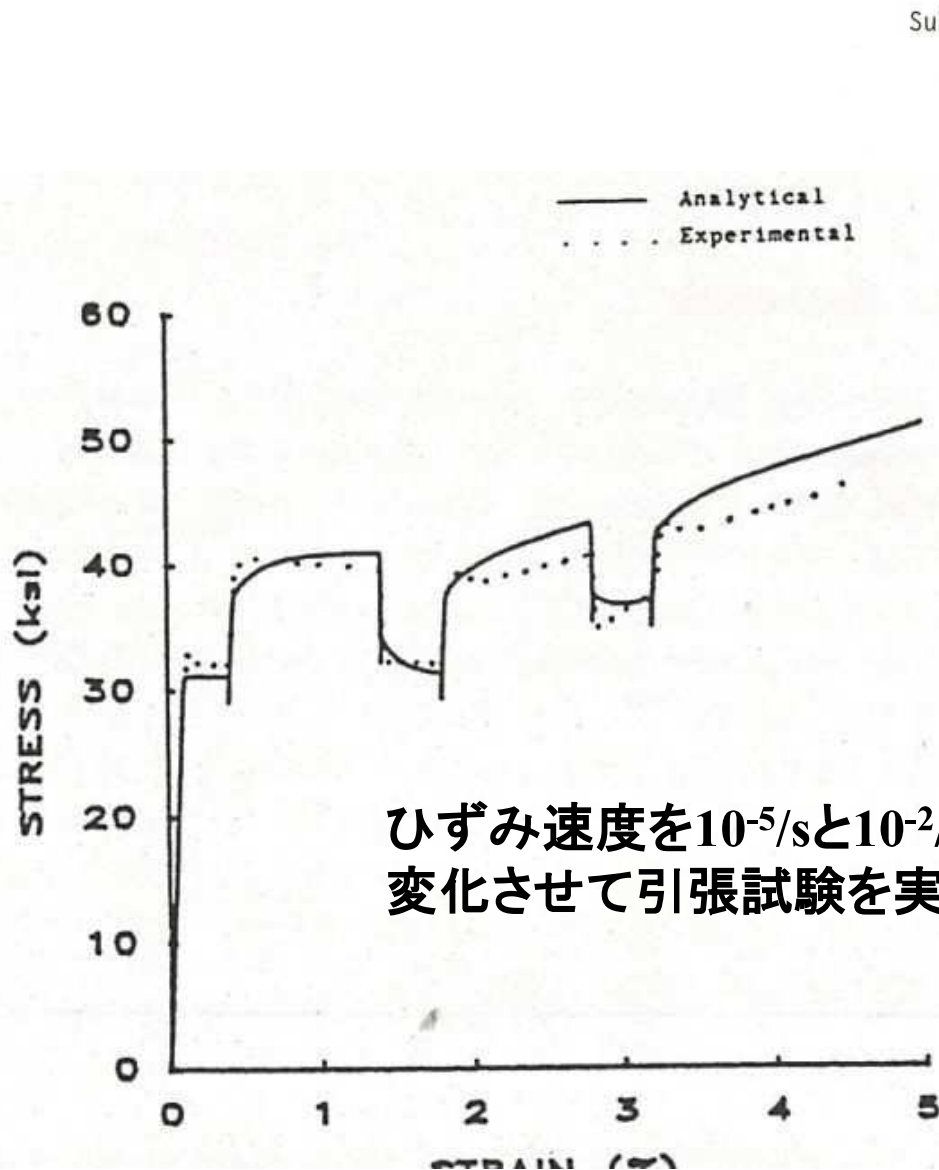


博士論文での自身で検証

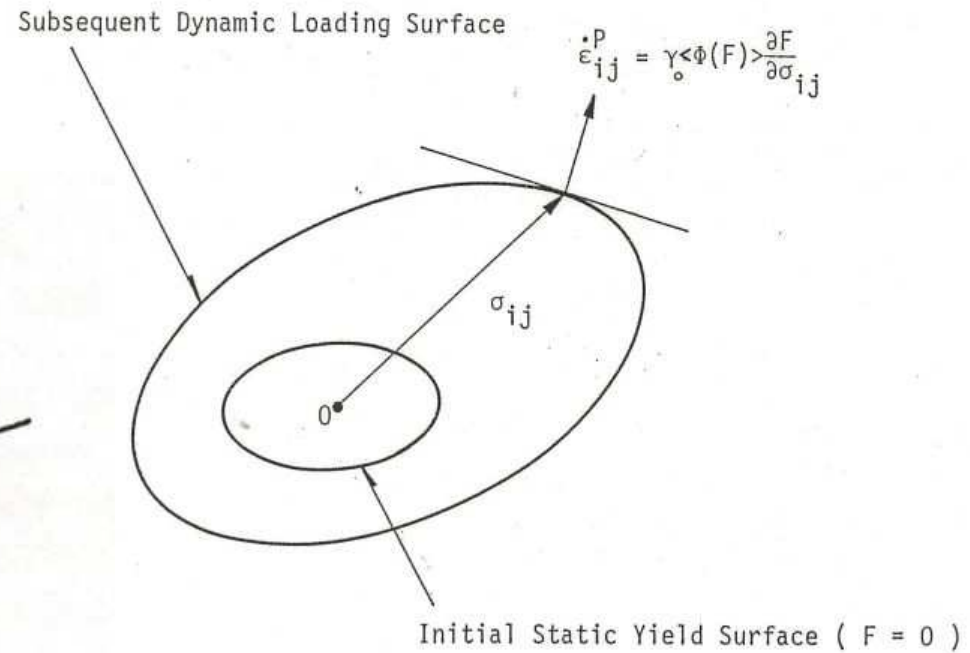


• ひずみ速度を考慮した構成則の構築!

- Φ ; Function
- γ_0 ; Coefficient of Viscosity
- $\dot{\epsilon}_{ij}$; Plastic Strain Rate Tensor
- σ_{ij} ; Stress Tensor

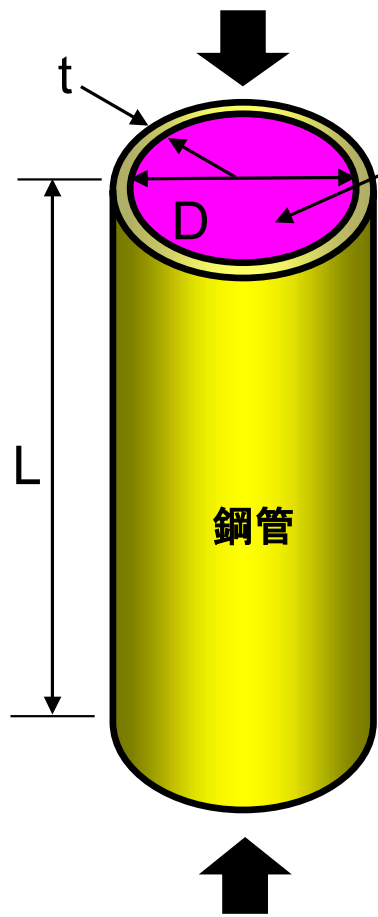


ひずみ速度を $10^{-5}/s$ と $10^{-2}/s$ と交互に変化させて引張試験を実施



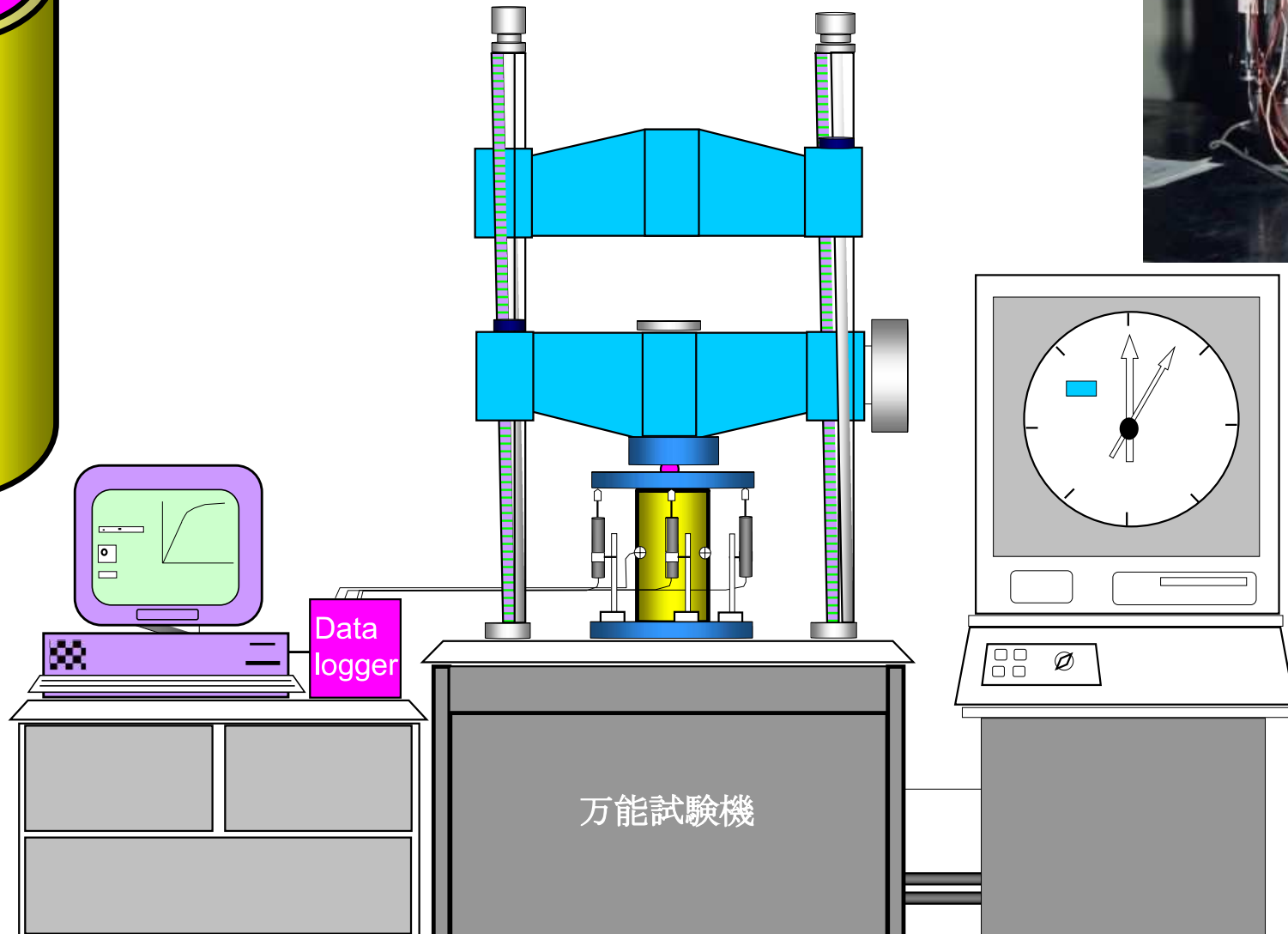
【Perzynaモデル】

- 充填鋼管構造の圧縮挙動を見てみると、...

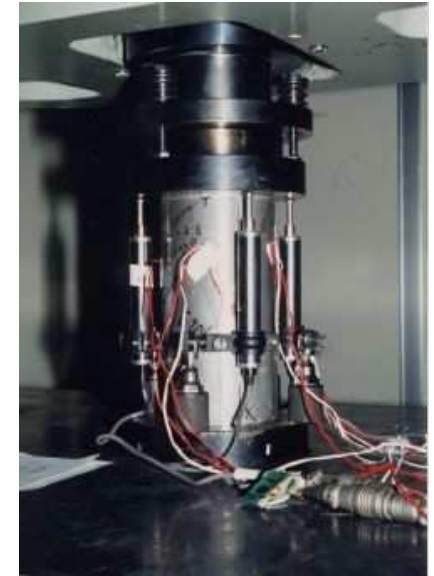


充填材
(コンクリート, ゴム, 樹脂など)

鋼管



万能試験機



- 多様な充填材に対する圧縮荷重-縮み関係は以下の通り



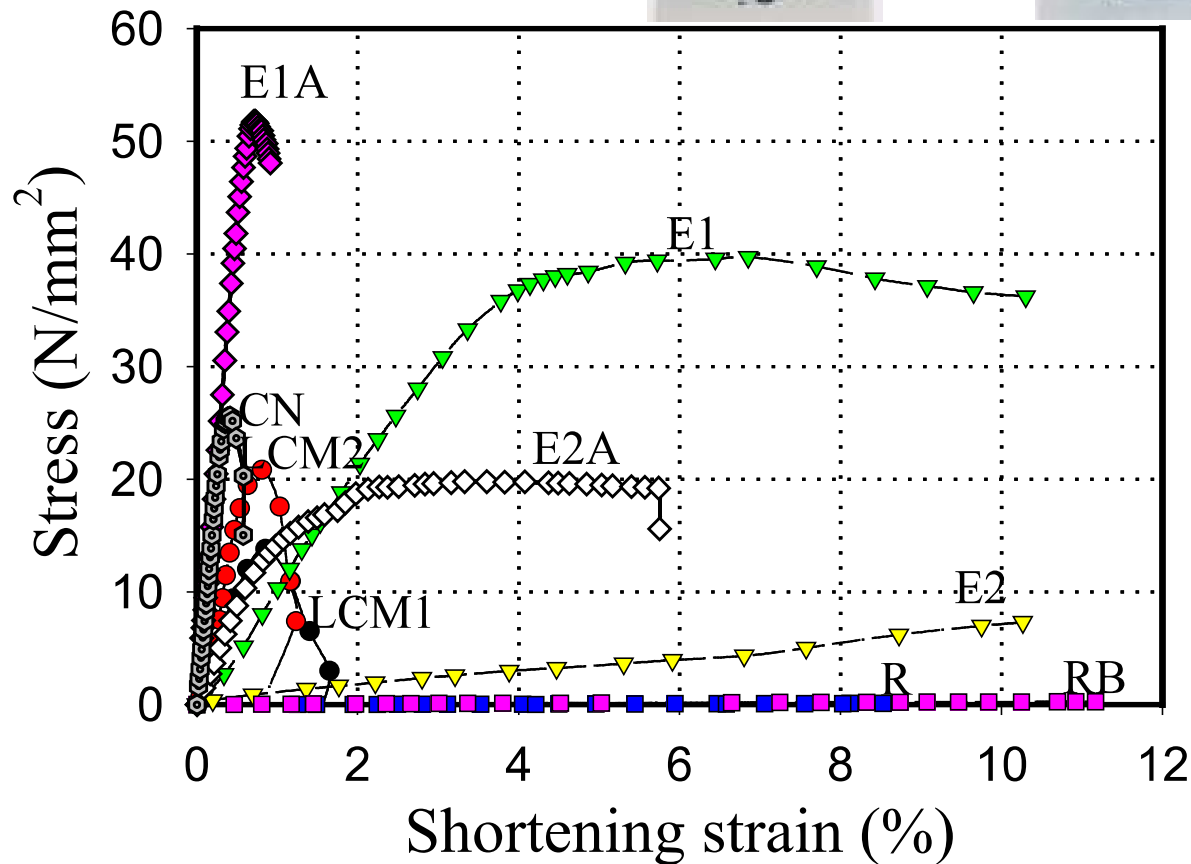
樹脂



ゴム

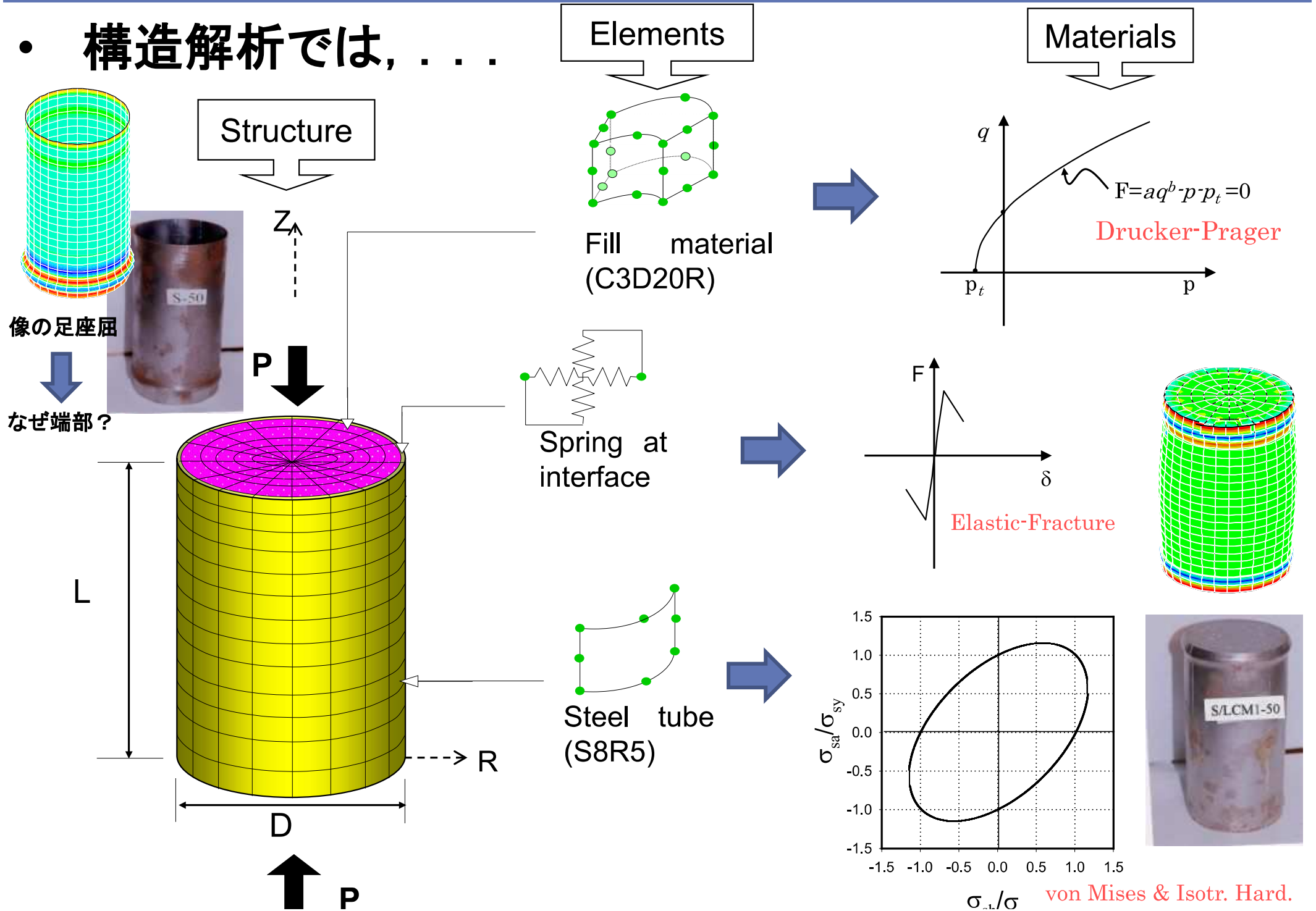


ポリマーモルタル

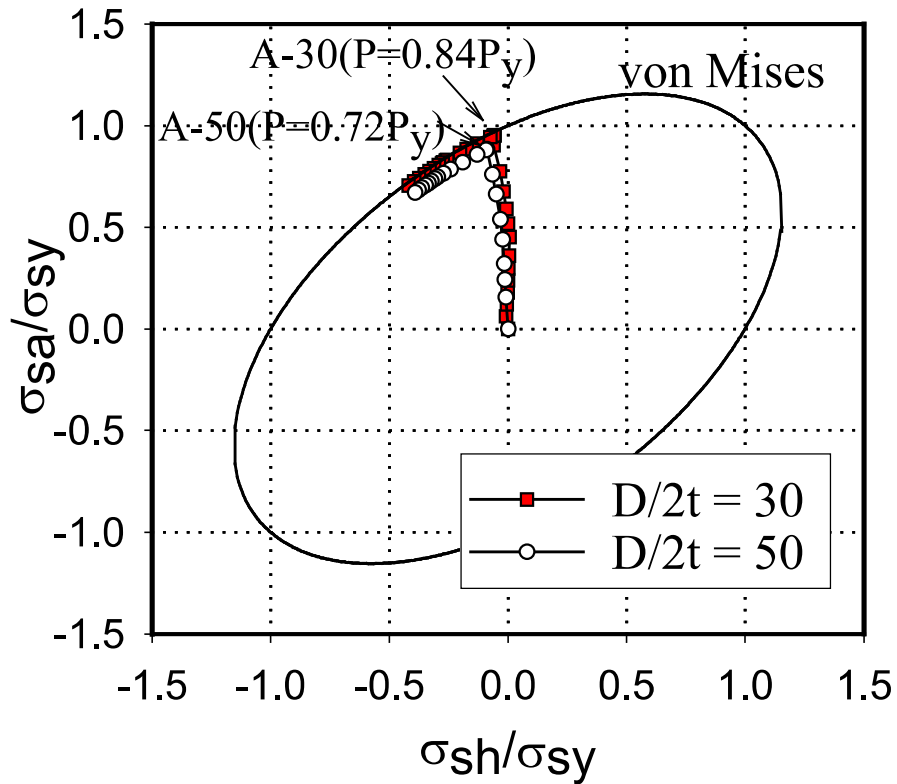


樹脂 + 骨材

• 構造解析では, . . .

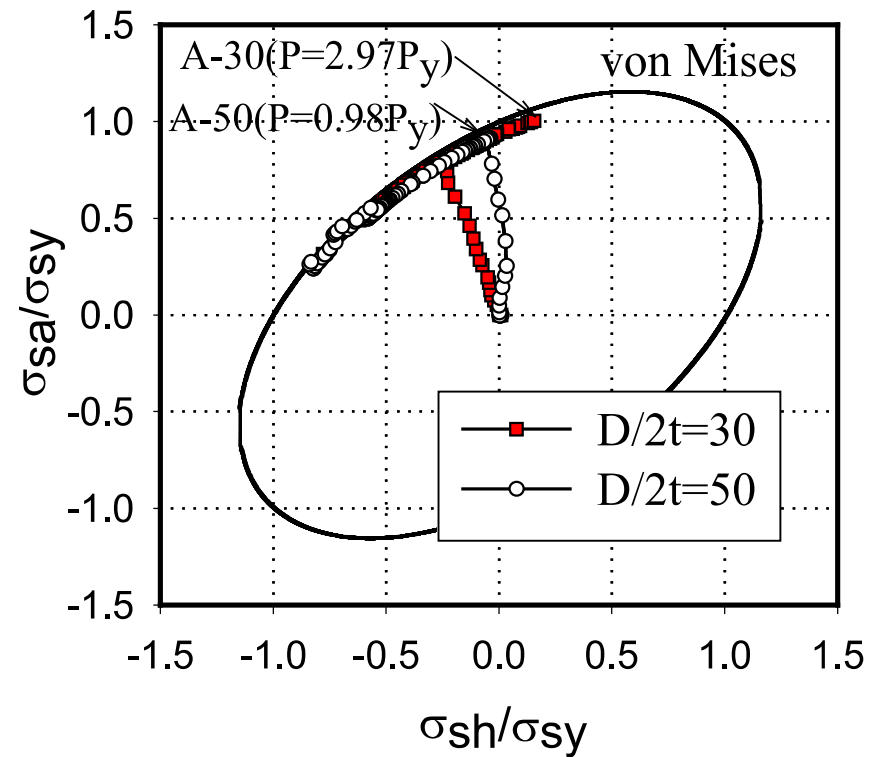


● 鋼管の応力(軸対称, 軸方向+円周方向)の軌跡は？



S
【鋼管のみ】

実験時に二軸ゲージで鋼管表面のひずみ履歴を計測することで、鋼管の2軸応力状態を終局時(座屈しない範囲で)まで算定できる。



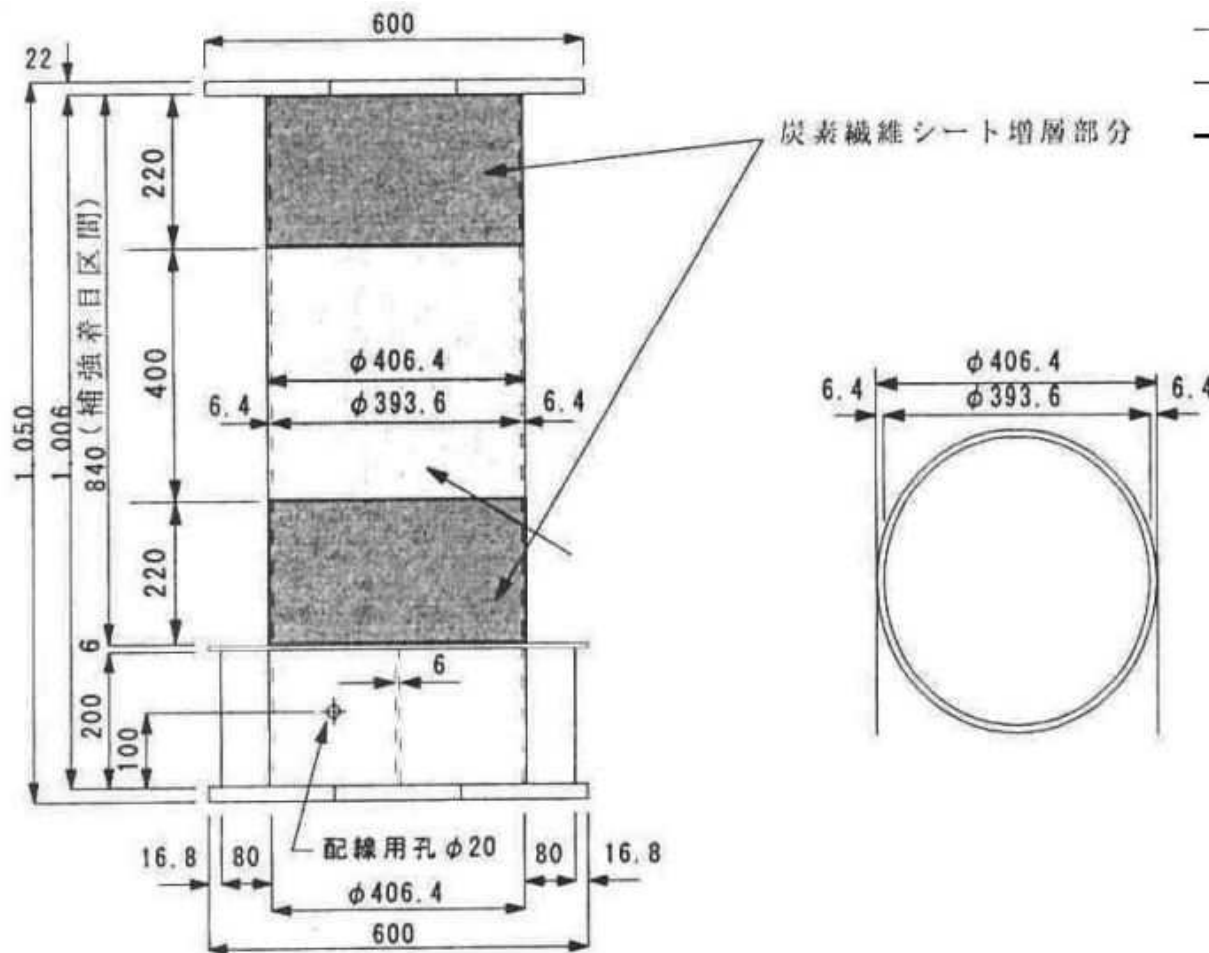
【樹脂充填鋼管】

降伏時には、応力点の軌跡が降伏曲面上を移動することが理解できる！

● 炭素繊維による鋼管の補強実験結果に対する疑問！

“鋼材の強度は拘束力でどこまで向上？”

実験供試体 No.	CFRP 層数		備考
	軸方向	周方向	
3-01	0	0	鋼供試体
3-02	1	3	-
3-03	1	3	ゴムシート(4 mm)を挿入
3-04	1	8	-
3-05	1	8	発泡ウレタンシート(12 mm)を挿入



(a)側面図

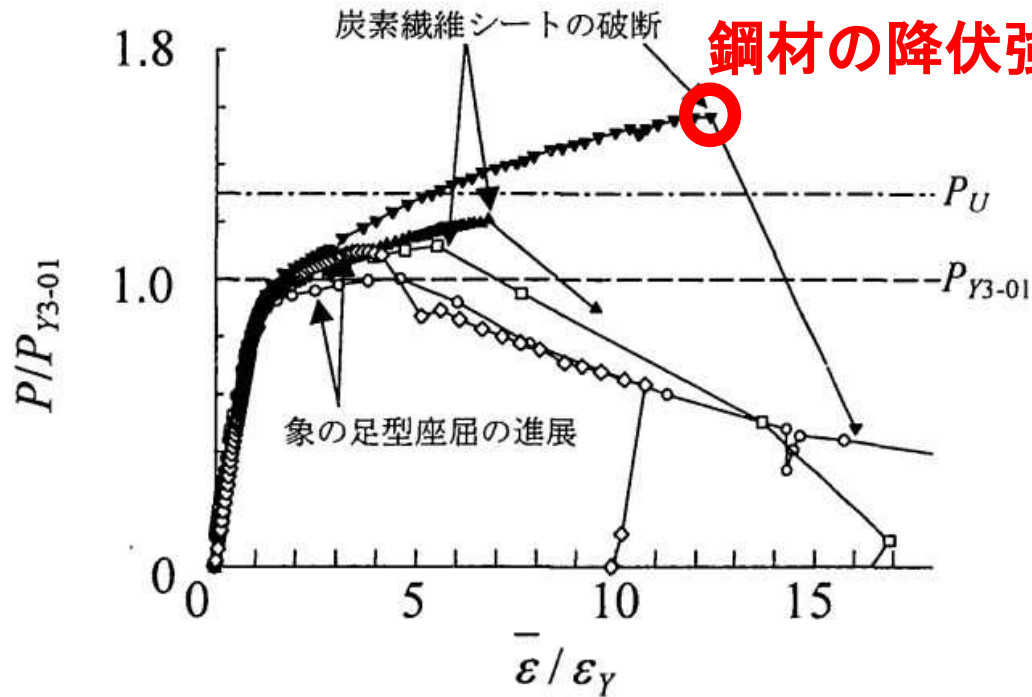
(b)断面図

鋼管を炭素繊維シートで補強



円周方向の炭素繊維が鋼管の座屈を拘束するが、終局強度は？

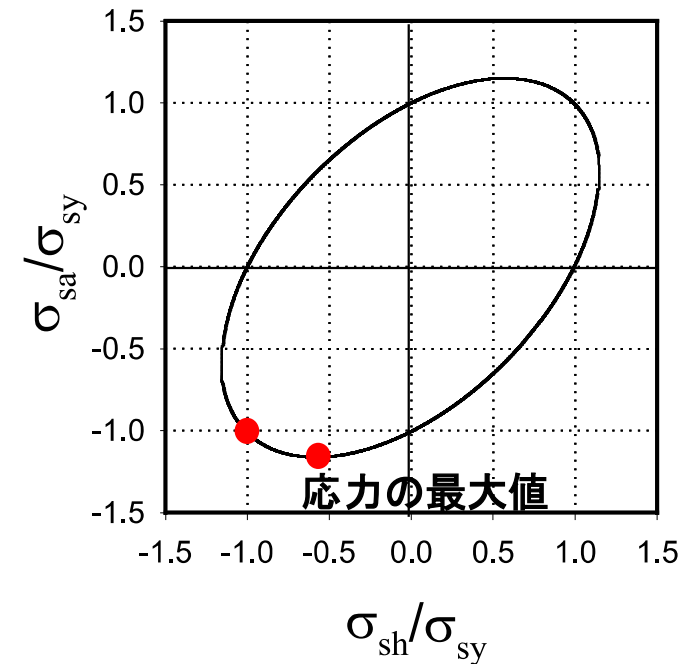
※ 水圧鉄管で降伏を抑えるために強化繊維を巻き立て補強する実績あり



鋼材の降伏強度の1.56倍で、引張強度を超える! ?

- : 実験供試体 3-01
- ▲: 実験供試体 3-02
- : 実験供試体 3-03
- ▼: 実験供試体 3-04
- ◇: 実験供試体 3-05

- $P_u (= \sigma_u A)$
- $P_{Y3-01} (\sigma_{YS} A)$
- σ_{YS} : 鋼板の降伏点
- σ_u : 鋼板の引張強度
- A : 実験供試体 3-01 の断面積



供試体名	圧縮剛性 (kN/mm)	鋼との剛比	終局荷重 P_u (kN)	P_u/P_{u3-01}	終局縮み u_u (mm)	u_u/u_{u3-01}
3-01	1,790	-	2694.0	1.00	6.42	1.00
3-02	1,791	1.00	3238.0	1.20	9.45	1.47
3-03	1,860	1.04	2997.8	1.11	8.01	1.25
3-04	1,782	1.00	4212.0	1.56	17.23	2.68
3-05	1,770	0.99	2942.0	1.09	5.32	0.83

- 構造材料の応力-ひずみ関係は、構造物の応答を理解する上で、もっとも重要な情報！
- より広範囲(一般的)の条件下での関係の把握が不可欠！
- 複合構造であれば、各構造材料の相互作用、その境界などの応答性状の把握もさらに必要！！

【若い人へ】

- 他の構造材料, 例えば, ステンレス, アルミ, 木材なども研究してください！
- 鋼材の場合は高温下の挙動も！



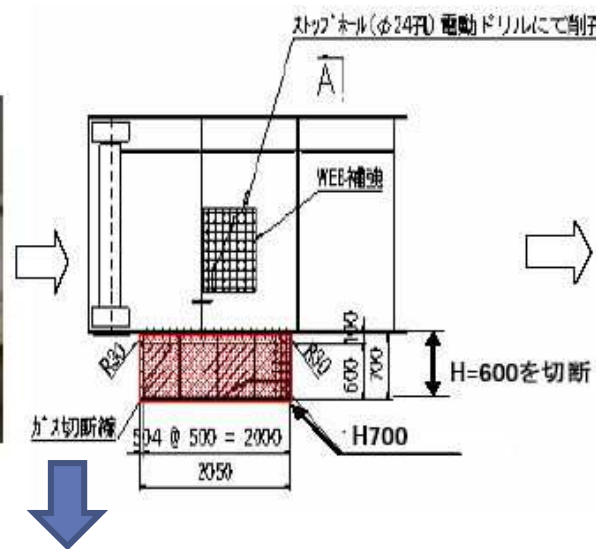
材料を理解したうえで構造物の損傷分析・残存性能評価などのForensic検証

● 鋼構造物の2大損傷への対応

➤ 腐食



➤ 疲労き裂



①損傷と残存性能. ②損傷の検知・非破壊評価の事例と③Forensicな考察?

- 腐食損傷を有するリベット継手の残存性能評価は？



リベットの頭部はどこ？



リベット頭部が腐食損傷した時, 継手強度へ及ぼす影響は？
どのような検討を進めるか？ **どんな実験, どんな解析, . . .**

まず、載荷実験による検討!

でも、リベットを施工できる人を確保できるか?

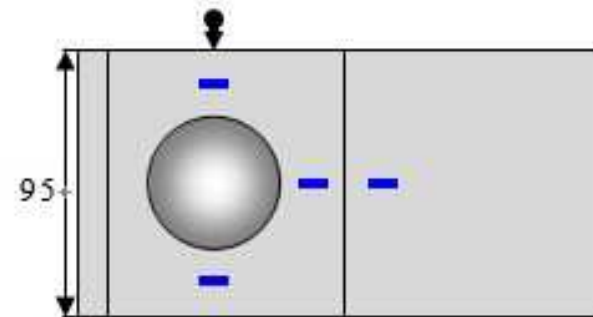
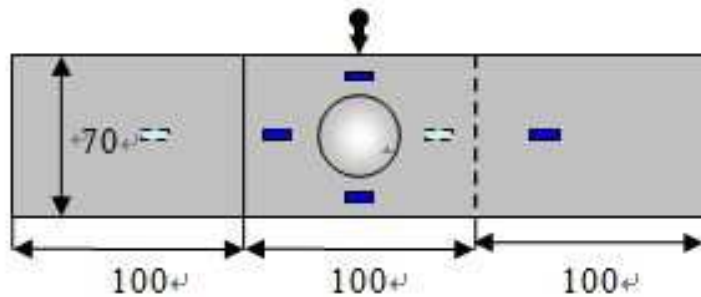
実験供試体: 実際の橋梁から切り出し

→ 接合面数の違い: 1面せん断と2面せん断

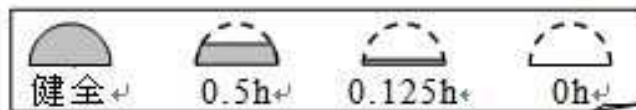
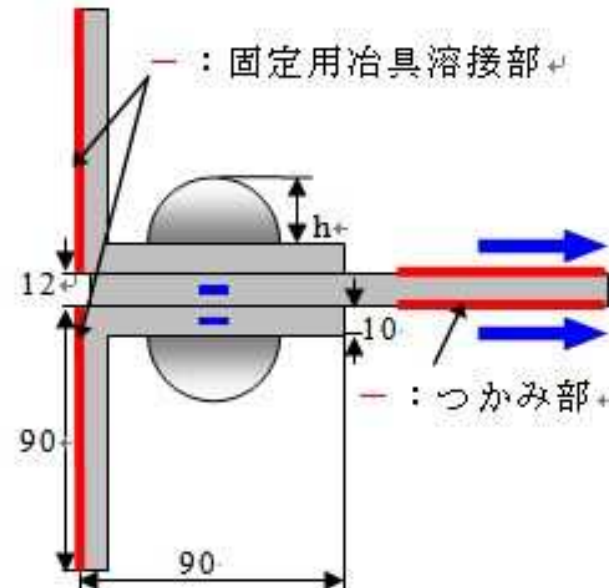
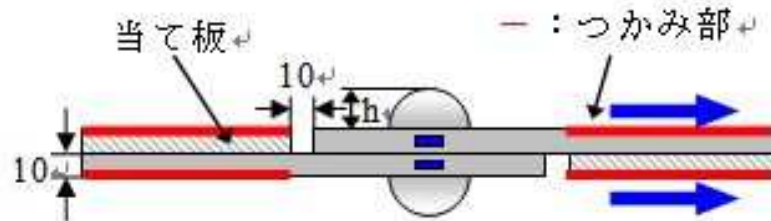
→ 腐食損傷量の違い: 頭部を切削し腐食を模擬



福島県: 海老川大橋(2007年撤去)



損傷をどのように与えるか?

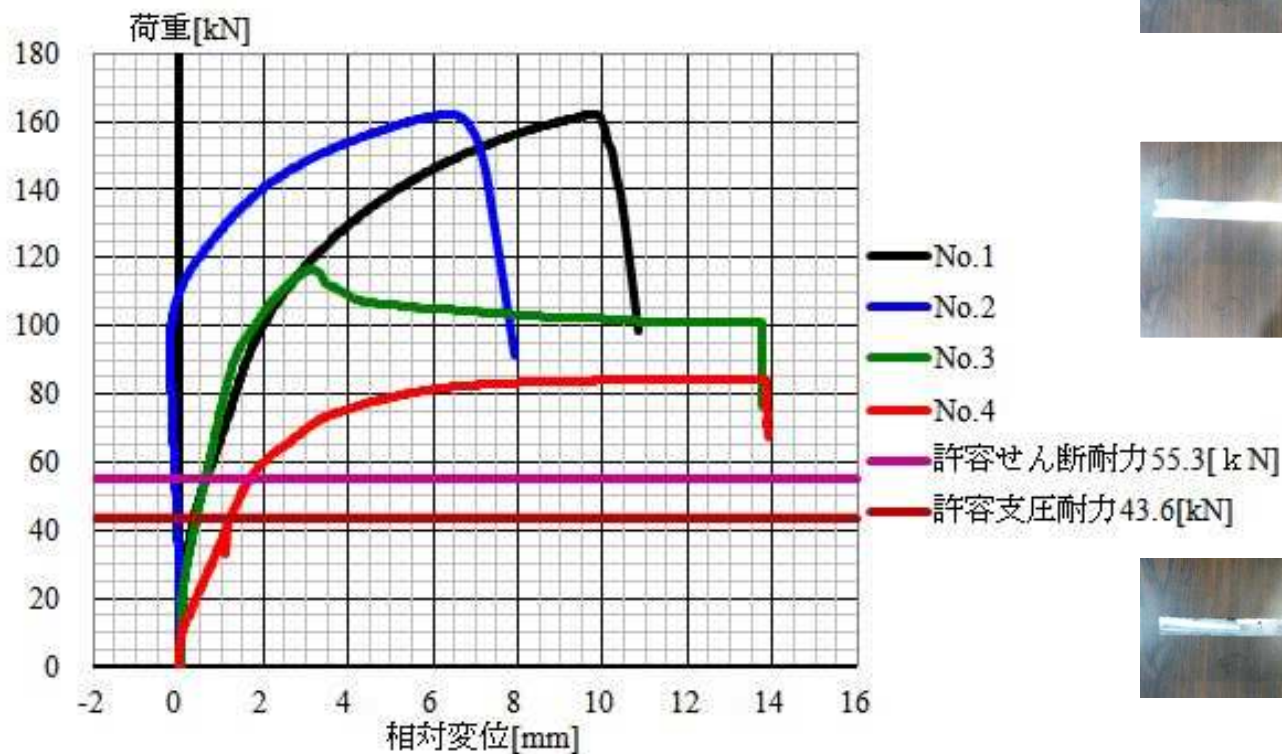


■ 1軸ゲージ=裏側貼付 ↓ 相対変位計

● 例：実験結果（1面せん断継手）

一面せん断継手の実験結果

No.	リベット頭部高さ	最大耐力[kN]	破壊モード
1	h	162.5	せん断
2	0.5h	162.3	せん断
3	0.125h	117.0	抜け出し
4	0	84.3	抜け出し



No.1



No.2



No.3



No.4

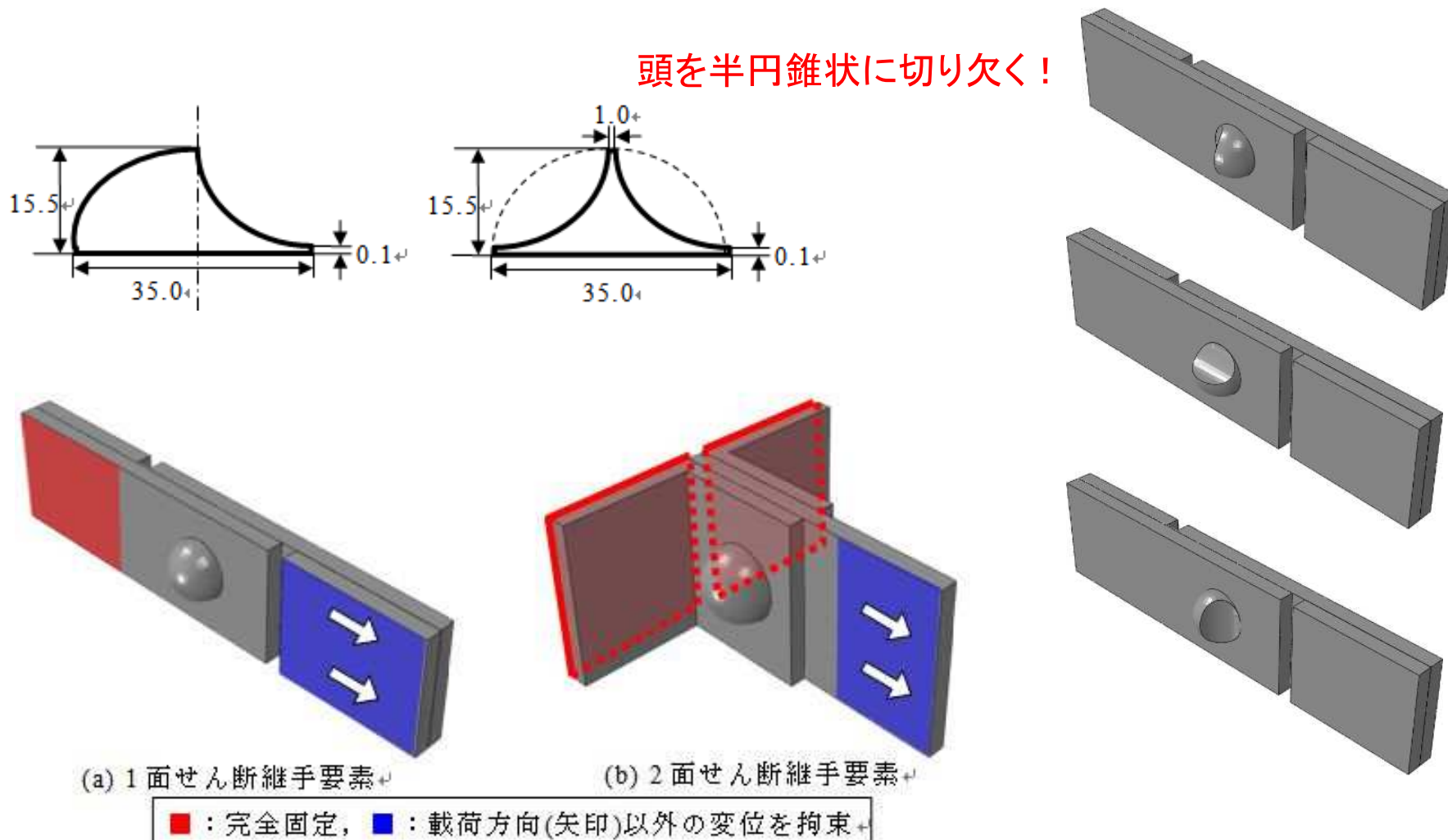
一面せん断では 継手部に付加曲げが発生



頭の掛りが重要！

• FEMによる解析的検討

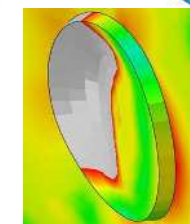
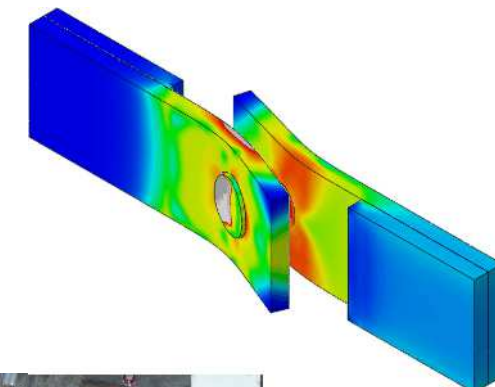
“実験のケースに加え, 実際に近い損傷状態を再現したケースも解析”



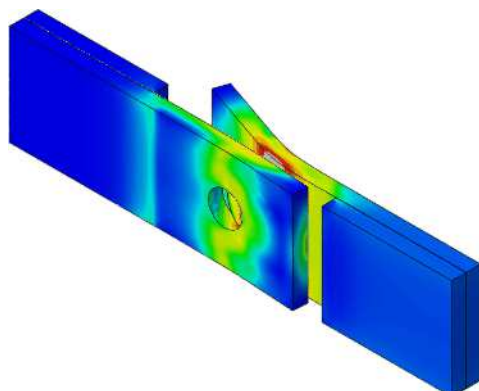
• 1行1列継手要素の解析結果(1面)

1面せん断継手要素の解析結果

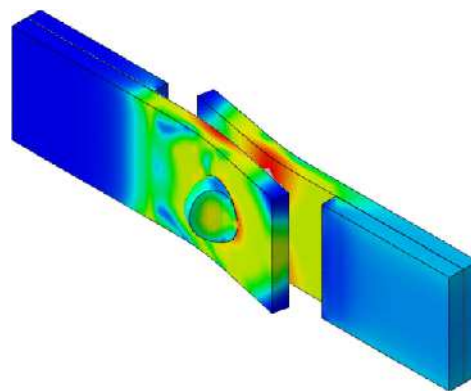
No.	リベット頭部条件	最大耐力 [kN]	破壊モード	最大耐力[kN] (実験値)
1	健全	160.1	せん断	162.5
2	高さ1/2	160.1	せん断	162.3
3	高さ1/8	155.4	せん断	117.0
4	全切除	91.5	抜け出し	84.3
5	半円カット(部材端側)	154.6	せん断	—
6	半円カット(継手側面)	159.5	せん断	—
7	半円カット(部材端の反対側)	157.9	せん断	—
8	半円カット(全周)	146.6	抜け出し	—



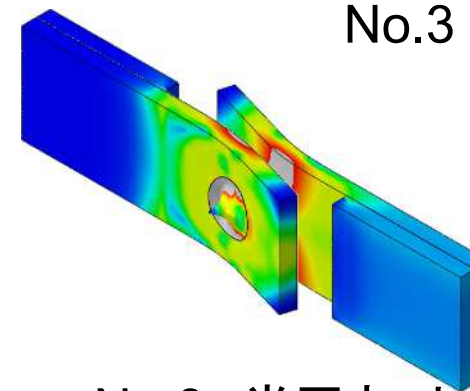
No.3 高さ1/8



No.4 全切除



No.5 半円カット (部材端側)



No.8 半円カット (全周)

FE解析モデルの妥当性を確認!

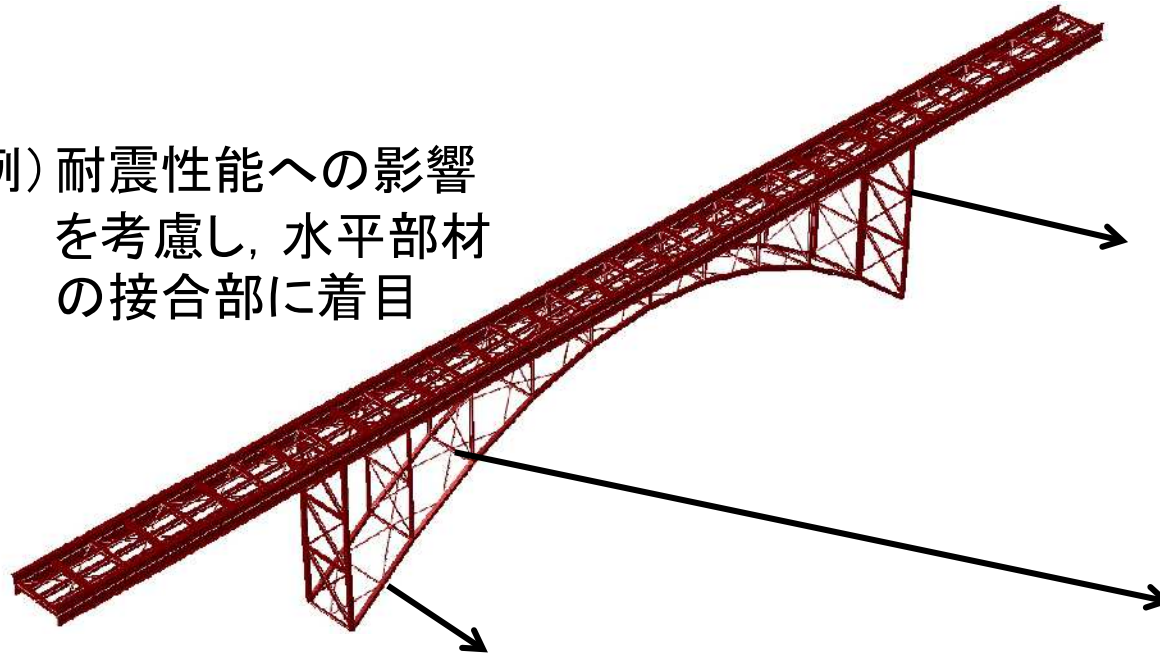


次は何をする?

- 実構造：多行多列継手の解析的検討をしてみることに、...

“より実際に近いリベット継手構造をモデル化”

例) 耐震性能への影響
を考慮し、水平部材
の接合部に着目

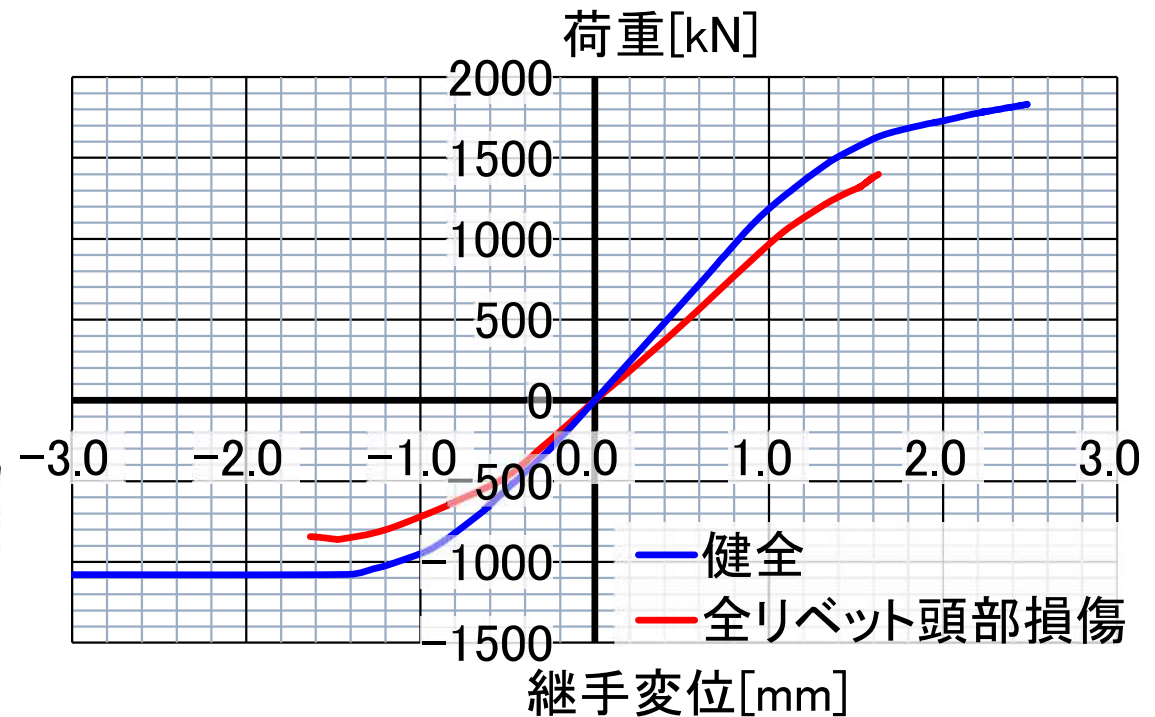
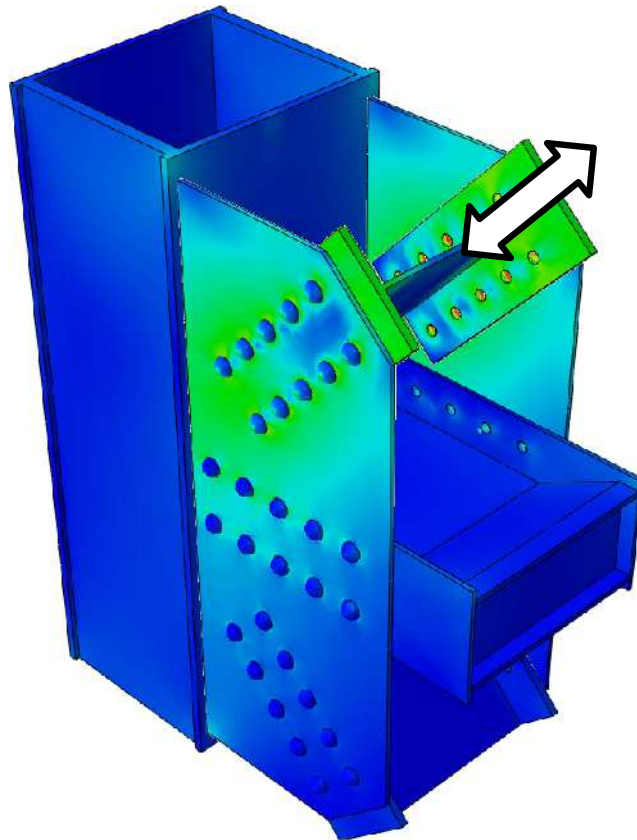


福井県・国道9号線
桜橋



- 解析結果の例(1)

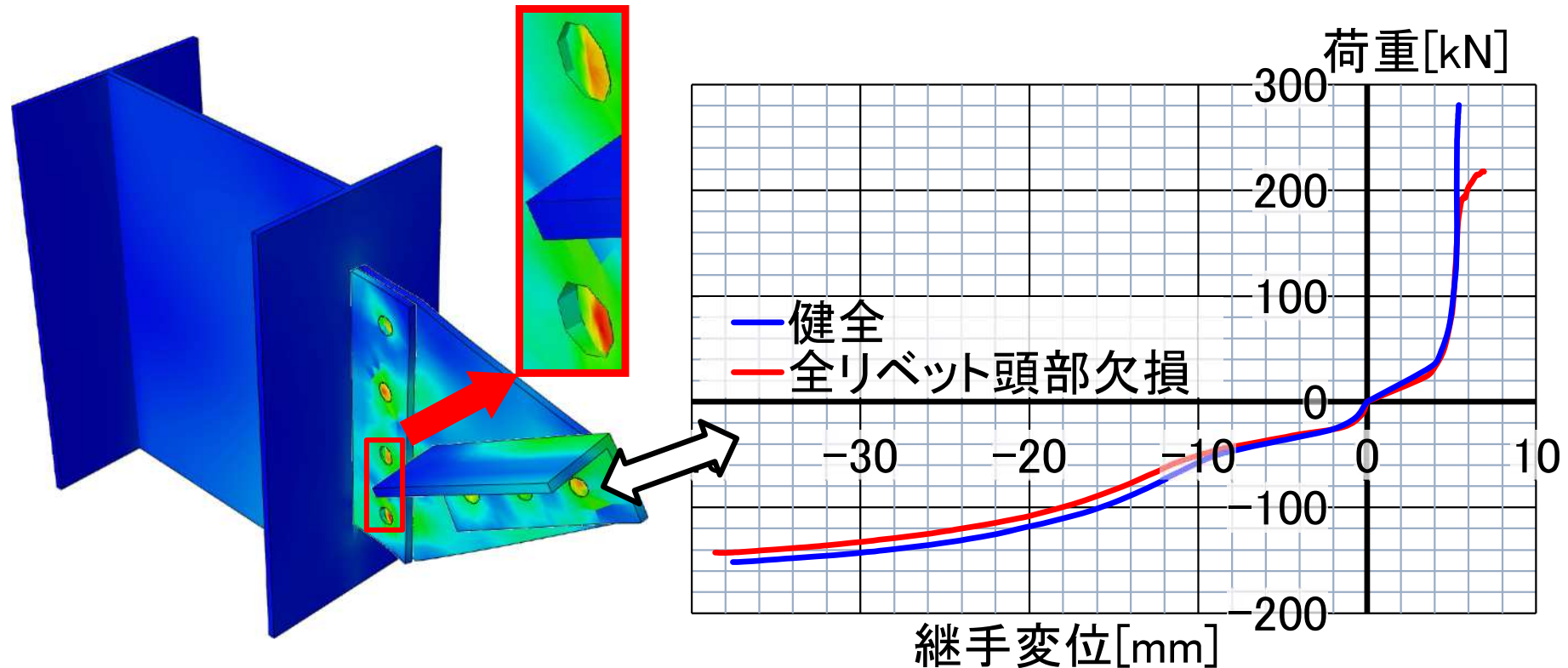
CASE: 部材が対称的に接合されている場合



リベット頭部の欠損によってガセットプレートの変形が増大し、剛性が低下
⇒圧縮時の最大耐力が**21.8%低下**

• 解析結果の例(2)

CASE: 部材接合面が1面の場合



鉛直材(H鋼)取付側のリベットに抜け出しが発生
 ⇒最大耐力が圧縮側6.0%, **引張側22.4%以上減**

“多様な継手構造のモデル化の方法が構築でき、性能確認も可能に！”
 でも、まだ繰り返し载荷・大変形などには、対応できてません！

腐食損傷を有するリベット継手のまとめ

- 一面せん断継手の場合, リベット頭の腐食が耐力低下に著しく影響する. 二面せん断継手では, その影響は小さい.
- 複数のリベットを組み合わせた継手でリベット頭部が著しく腐食している場合, 継手形状によって耐力の低下度は変わる.
- **なぜ, 腐食による形状変化はこのようになる?** 【今後の課題?】



腐食損傷を有する高力ボルト摩擦接合継手の残存性能評価は？



高力ボルト摩擦接合継手が腐食すると...

$$F_{slip} = \mu \cdot m \cdot n \cdot N$$

(μ : すべり係数, m : 接合面数, n : ボルト本数, N : ボルト軸力)

➡ μ : すべり係数, N : ボルト軸力が変化する

➡ { 実験: すべり係数 μ の変化
 実験・解析: ボルトヘッド・ナットが減肉した時のボルト軸力 N の変化

どのような検討を進めるか？

どんな実験. どんな解析. . . .

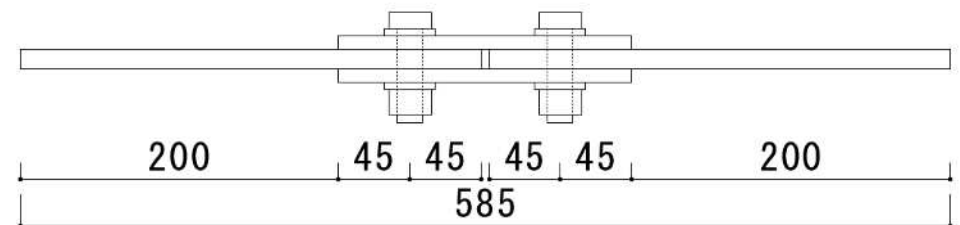
まず、腐食促進試験と載荷実験！（すべり係数の変化の検討）

・試験体

- ・無塗装:A, 外側のみ塗装:B, 全塗装(接合面内も):C
- ・M16高力ボルトを用いた1行1列2面継手

・腐食促進試験

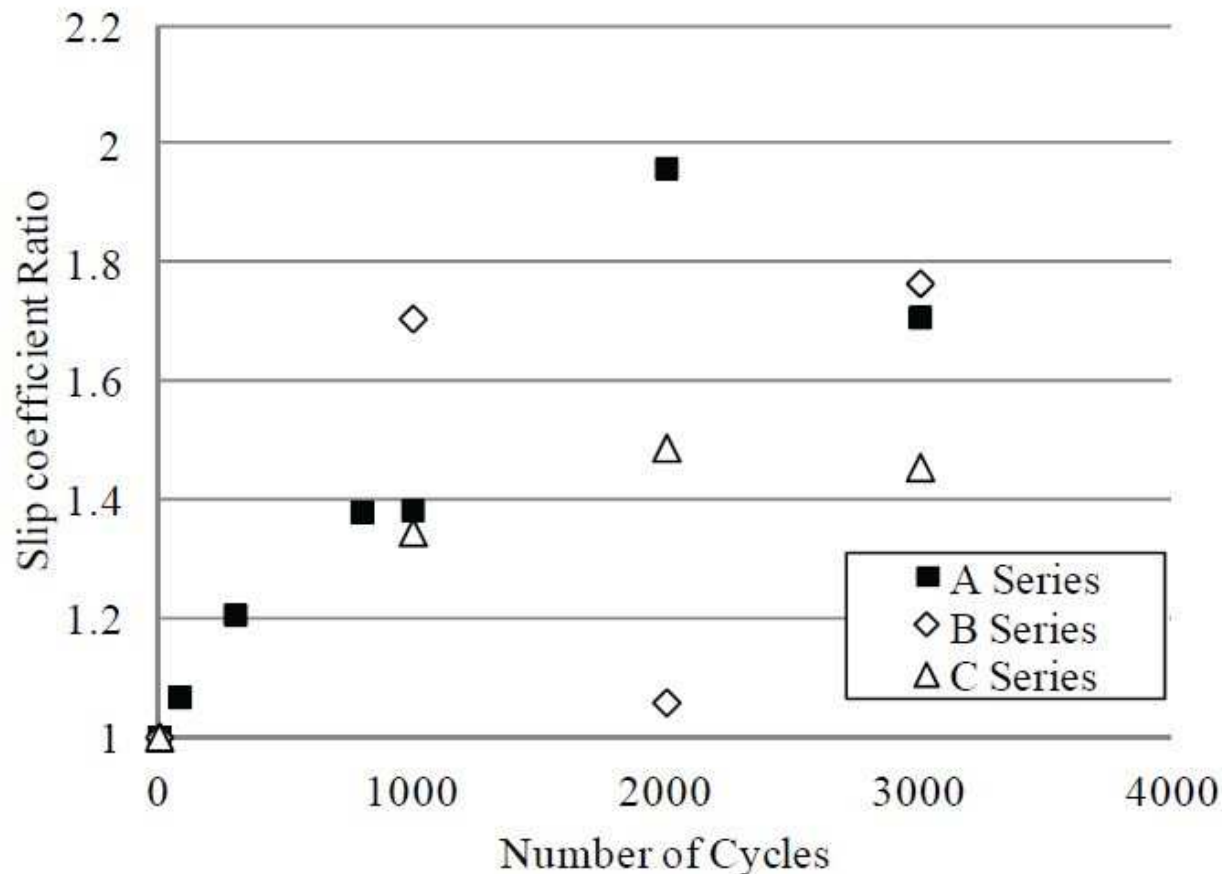
- ・乾湿繰返し試験(1サイクル:1分間浸漬, 4時間乾燥)
- ・接合面内に塩水が入りやすいように設置



鋼種:SS400
表面処理:ショットブラスト

実験結果によると, . . . すべり係数は?

- 一定期間(0, 80, 300, 800, 1000, 2000, 3000サイクル)促進後, 引張実験を実施



すべり係数はどのケースにおいても上昇する可能性があることがわかった。



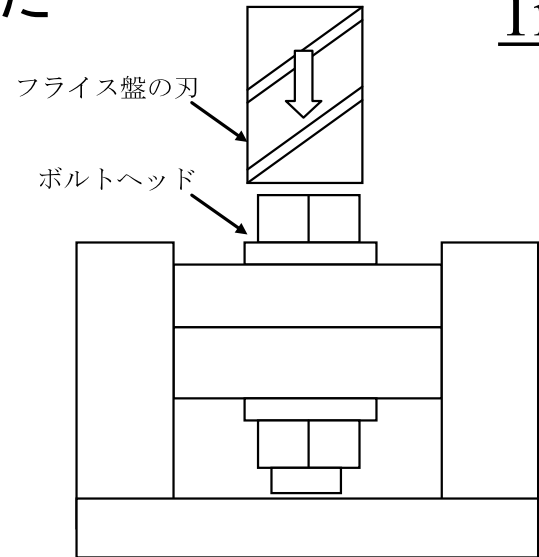
赤さび面の方が, すべり係数が大きくなる通説と整合する!

• ボルトヘッドおよびナットの減肉によるボルト軸力量の変化は？

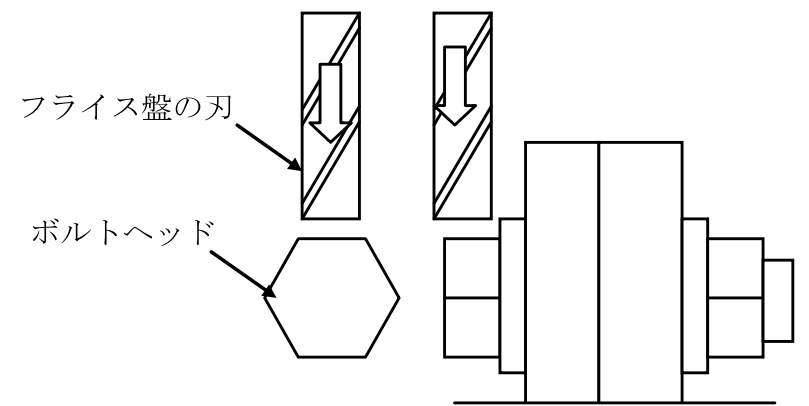
→切削実験

- 腐食促進試験ではかなり時間がかかることや腐食減肉量の制御が難しいため、切削により腐食を模擬した

1mmずつ切削→軸力測定



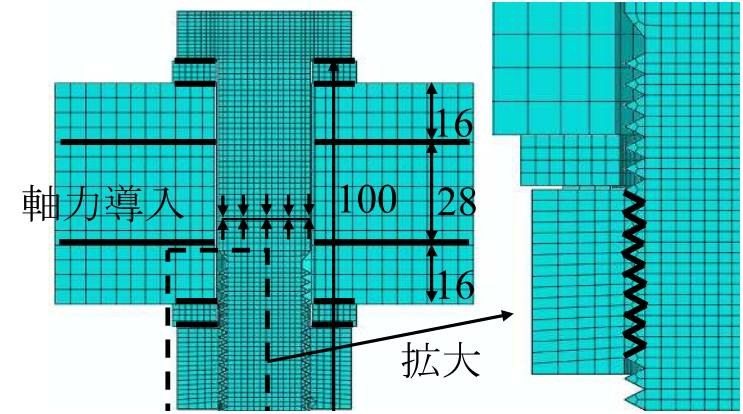
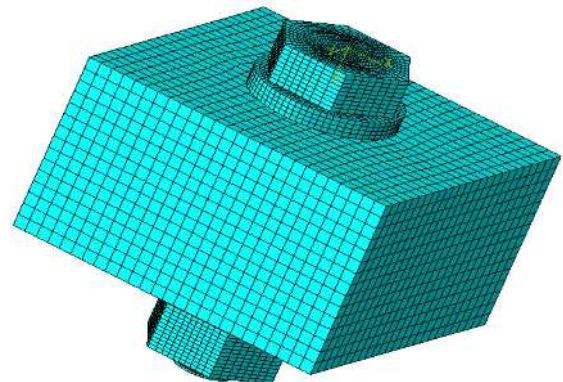
高さ方向の切削



幅方向の切削

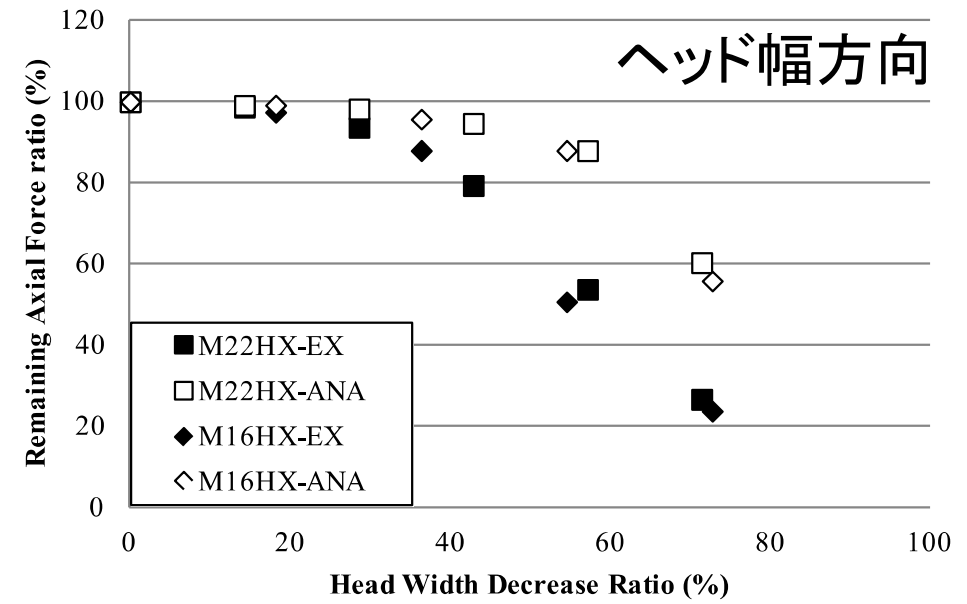
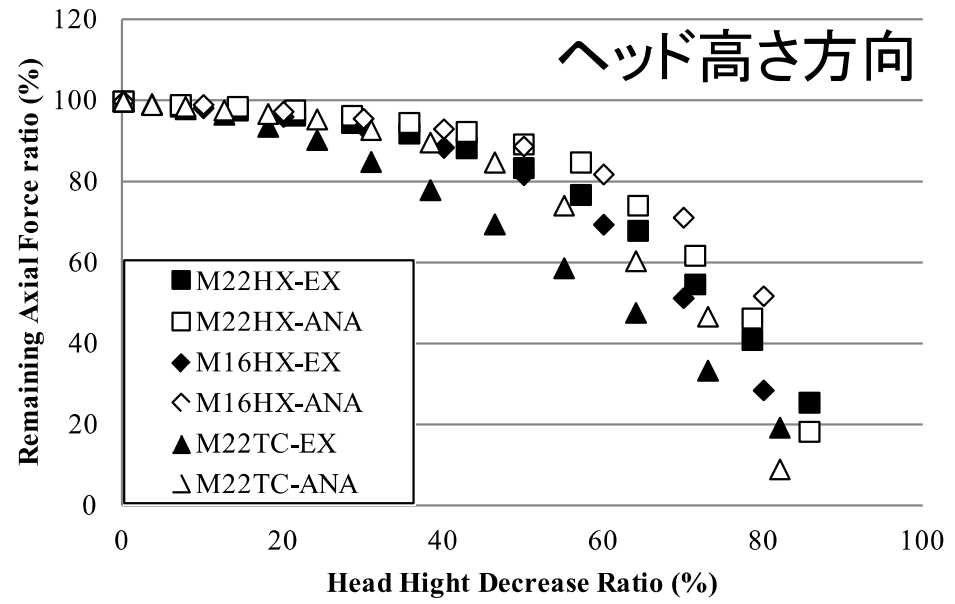
— : 接触条件導入位置

→FE解析モデル

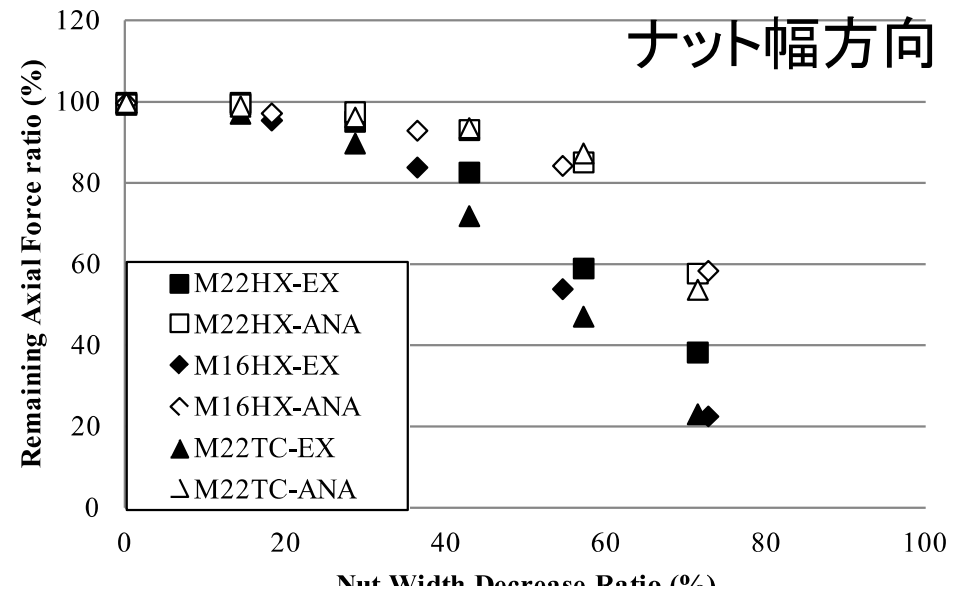
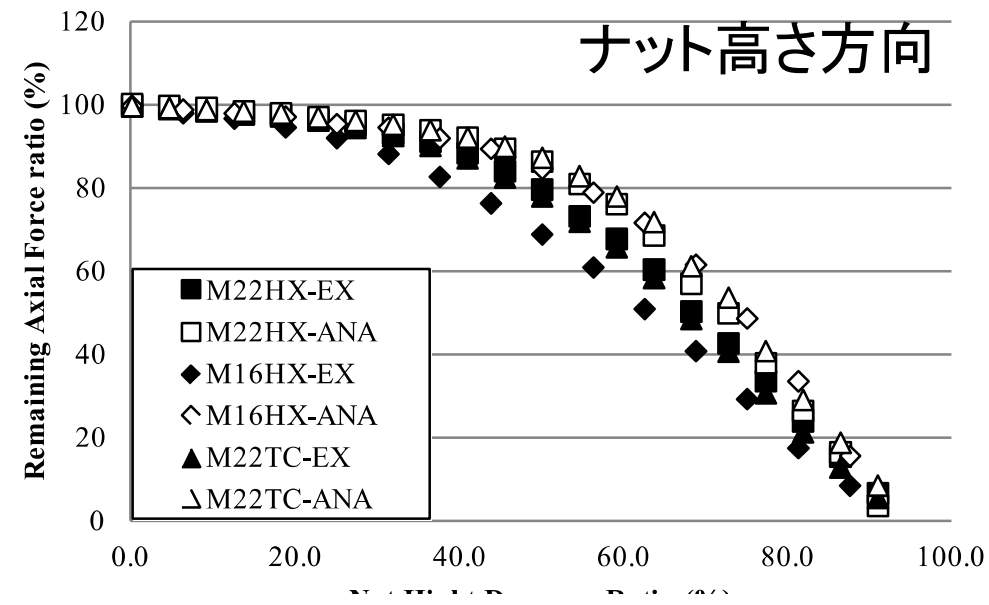


◆ ヘッド切削時の残存ボルト軸力と減肉率

軸力低下の概略は理解できた！



◆ ナット切削時の残存ボルト軸力と減肉率

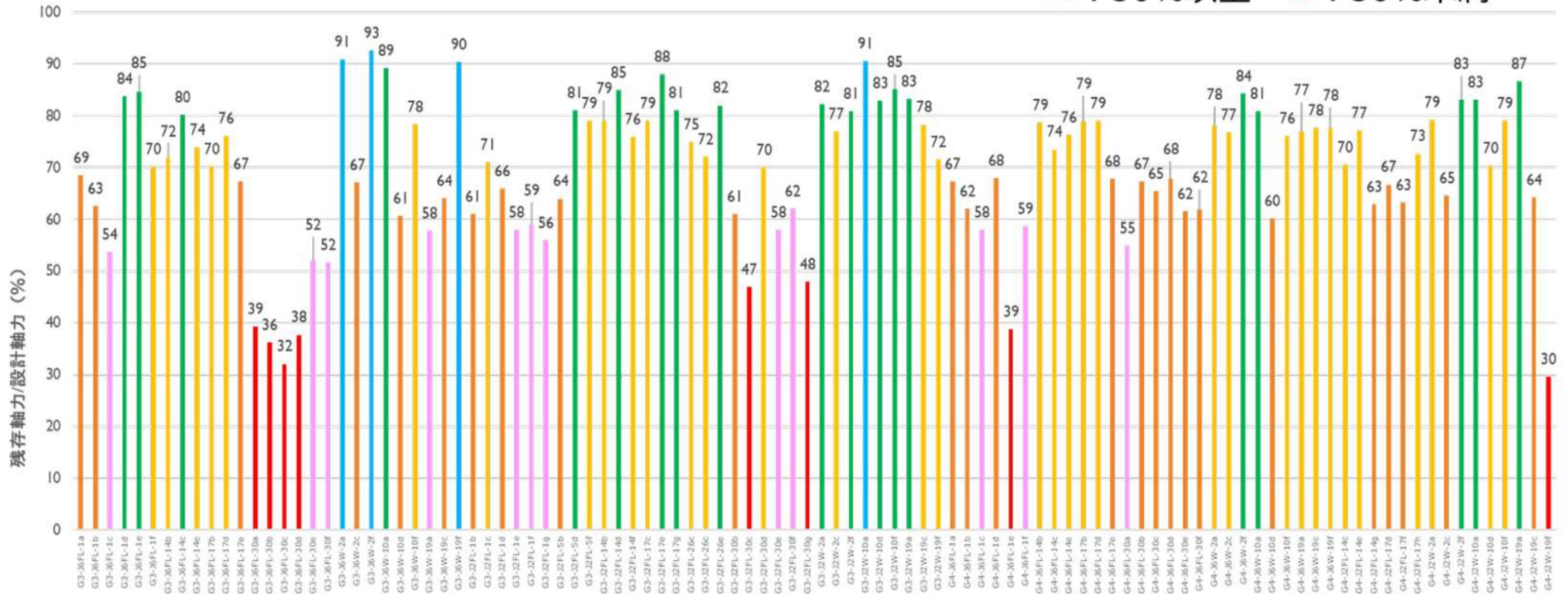


しかし、腐食してなくても実橋における高力ボルトの残存軸力は？

腐食損傷無し

残存軸力調査結果 (道路橋D)

■ : 90%以上 ■ : 80%以上
■ : 70%以上 ■ : 60%以上
■ : 50%以上 ■ : 50%未満



- ・ 調査部位：ウェブ、下フランジ
- ・ 調査ボルト本数：**102本**
- ・ F10T設計ボルト軸力：**205 kN**

・ 全てがボルトが設計軸力以下である。
 ・ 設計軸力70%未満のボルトが44%もあった。

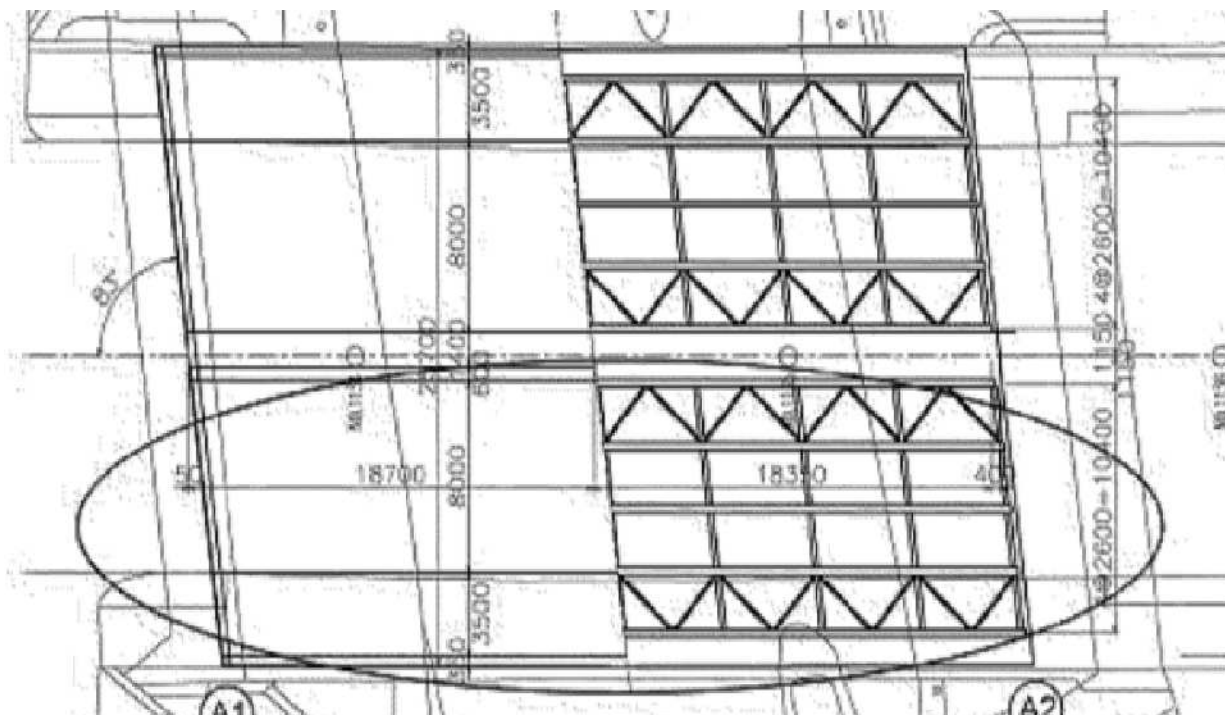
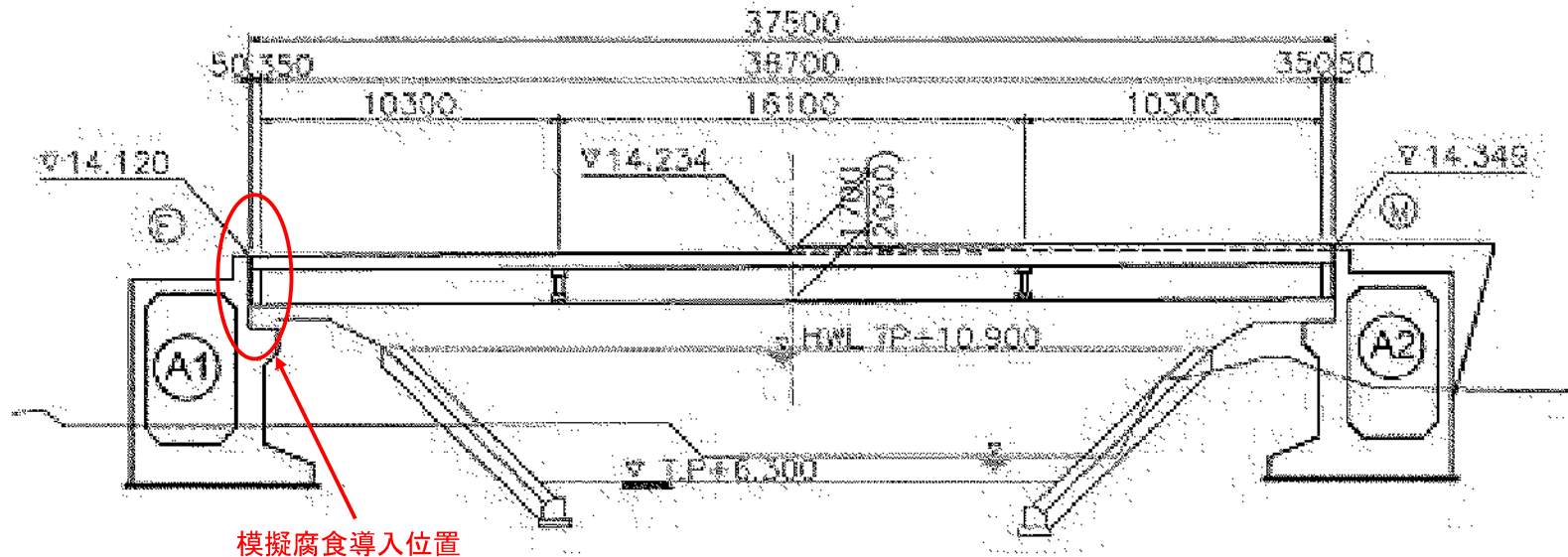
腐食損傷を有する高力ボルト摩擦接合継手のまとめ

- 継手面内が腐食するとすべり係数は大きく上昇するが、ボルトヘッドやナットが腐食し減肉した場合、ボルト軸力は低下し、その形状変化から残存ボルト軸力を定量化できる。
- 高力ボルト摩擦接合継手の構造詳細、締め付け管理が時代ごとに異なる、部材の大断面化での締め付け手順、交通振動・温度による高力ボルトへの影響を検証する必要がある。
- なぜ、腐食による『花咲形状』はこのようになる？ 【今後の課題？】



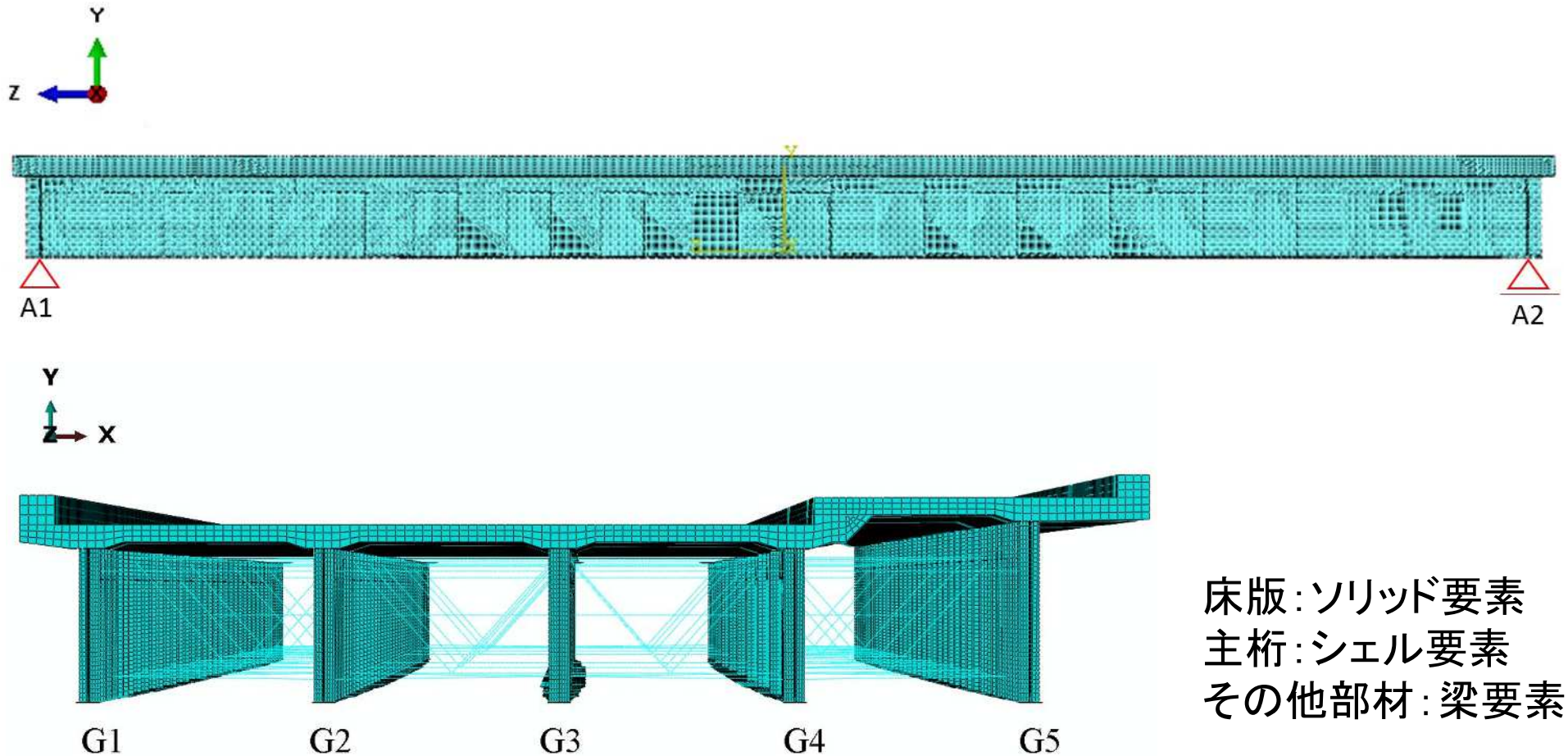
● 対象橋梁の諸元(津田川橋, 1971)

実橋での耐力実験は困難!



• 解析モデルの概要

(“実橋では評価できないので、現時点では解析のみ!”)



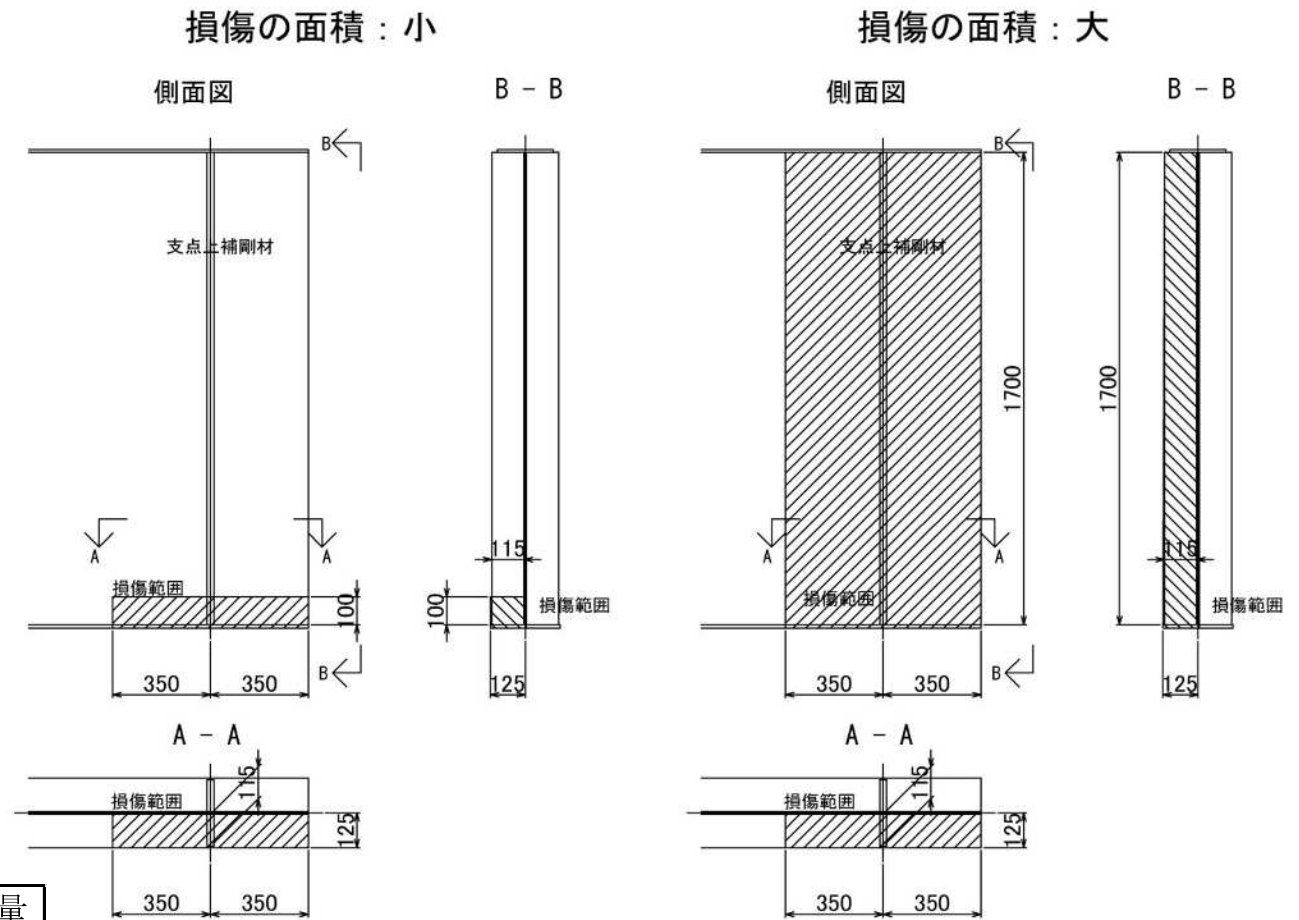
床版:ソリッド要素
 主桁:シェル要素
 その他部材:梁要素

➡ 弾塑性有限変位
 解析を実施

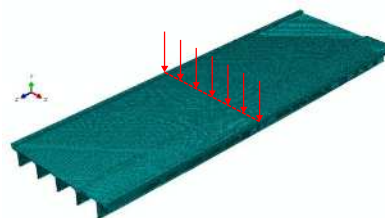
● 実際の腐食損傷を簡単にモデル化してみる！



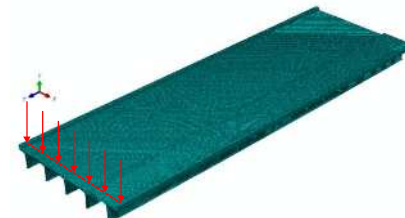
発見された腐食損傷は、点検記録より損傷の深さは大、損傷の面積は小と判定



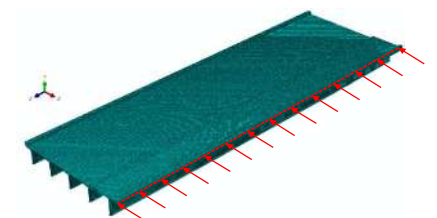
Case	腐食位置	腐食範囲	腐食減肉量
1	腐食なし		
2	G1桁片側	小	1/2
3	G1桁両側	小	1/2
4	G1～G4桁両側	小	1/2
5	G1～G5桁両側	小	1/2
6	G1桁両側	大	1/2
7	G1桁両側	小	3/4
8	G1～G4桁両側	大	1/2
9	G1～G4桁両側	小	3/4



(a)スパン中央載荷



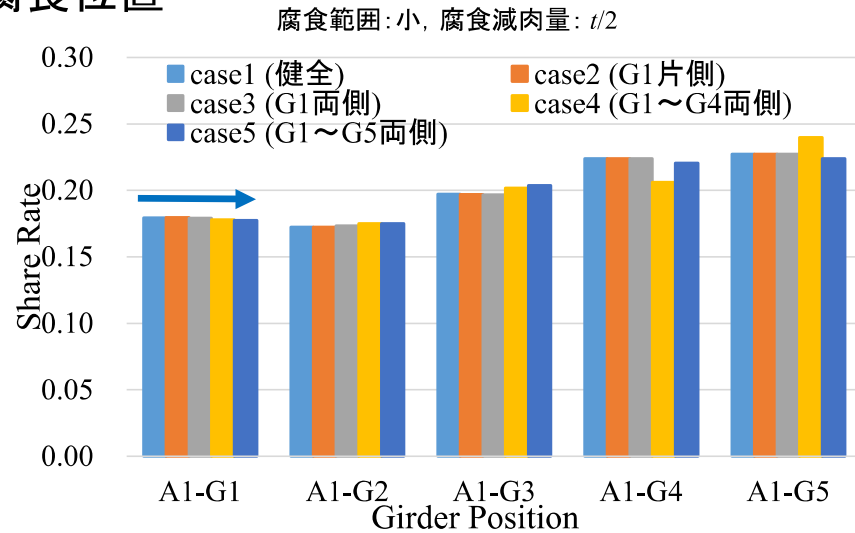
(b)桁端載荷



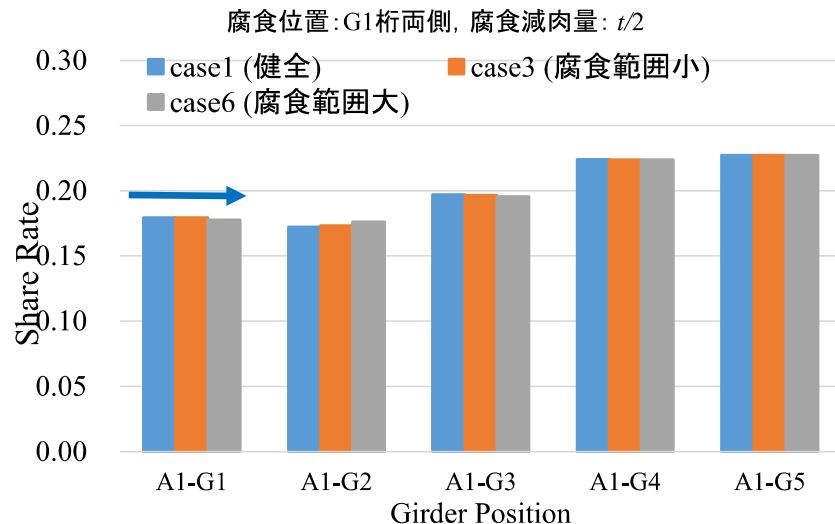
(c)水平方向載荷

● 解析結果(支点反力分担率:スパン中央載荷)

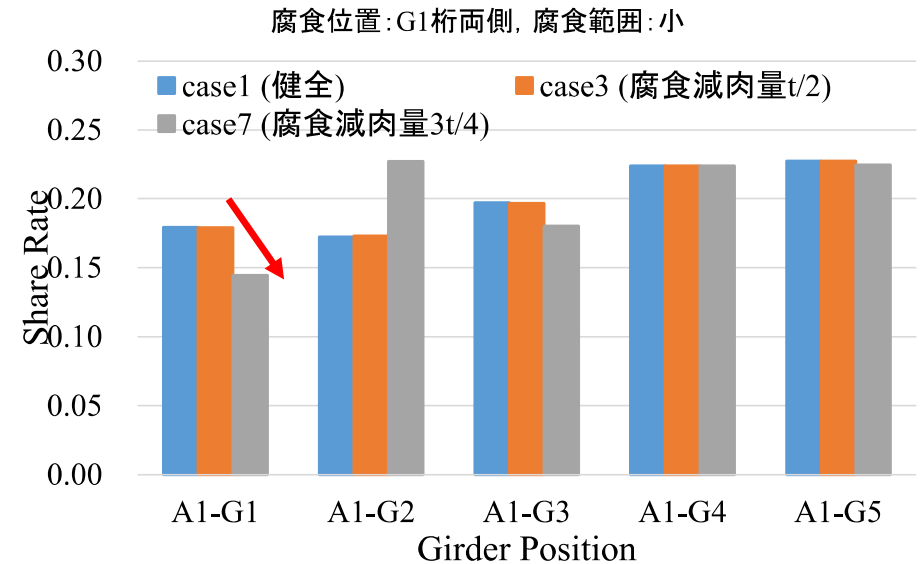
(a)腐食位置



(b)腐食範囲



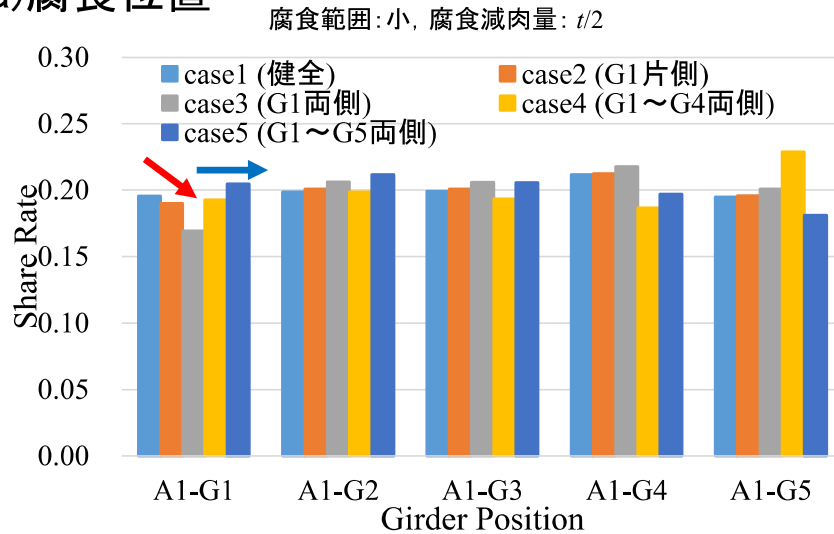
(c)腐食量(深さ)



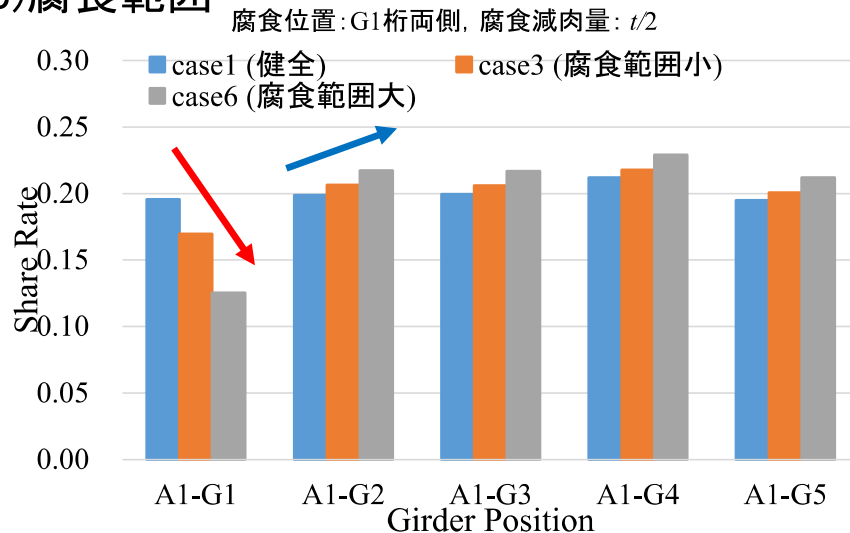
腐食範囲より, 腐食量(断面欠損)の影響が大きい!

● 解析結果(支点反力分担率:桁端載荷)

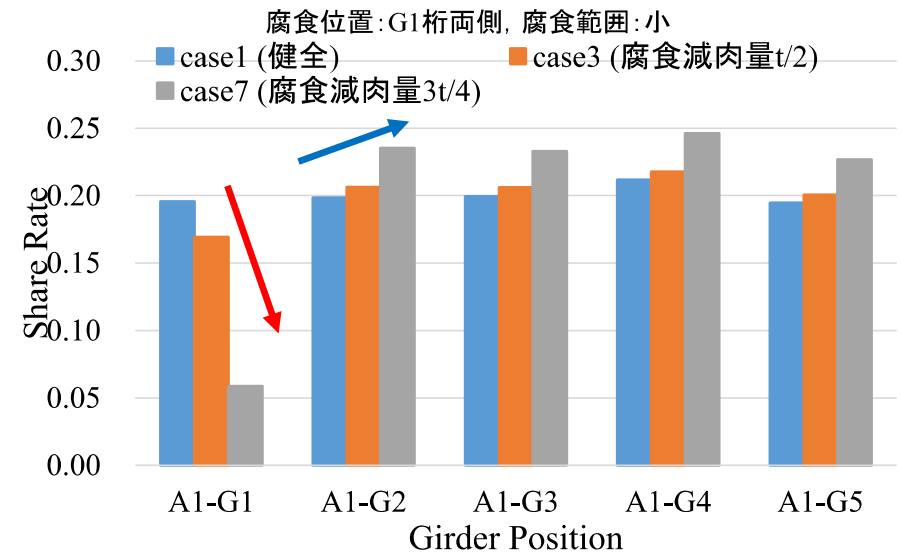
(a)腐食位置



(b)腐食範囲



(c)腐食量(深さ)



桁端部の腐食損傷と耐力に関するまとめ

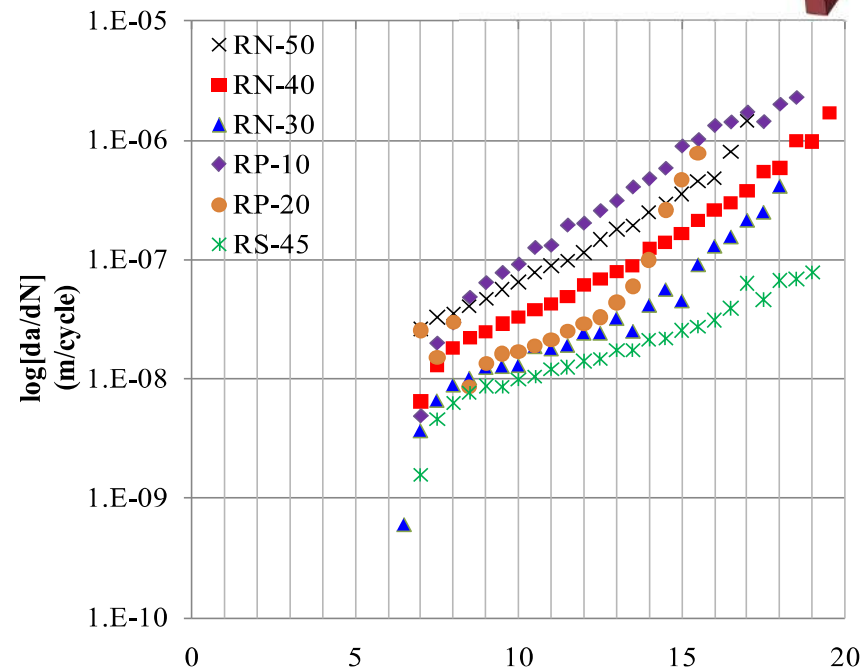
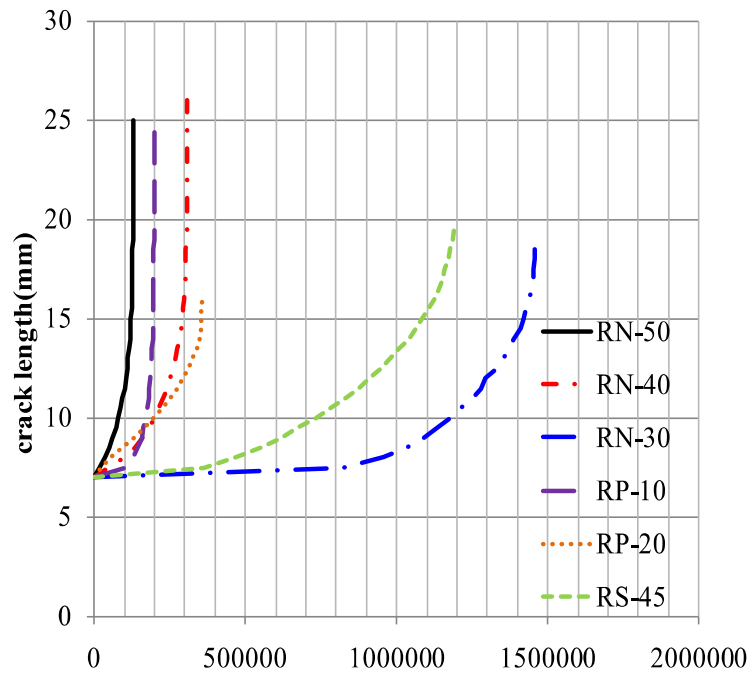
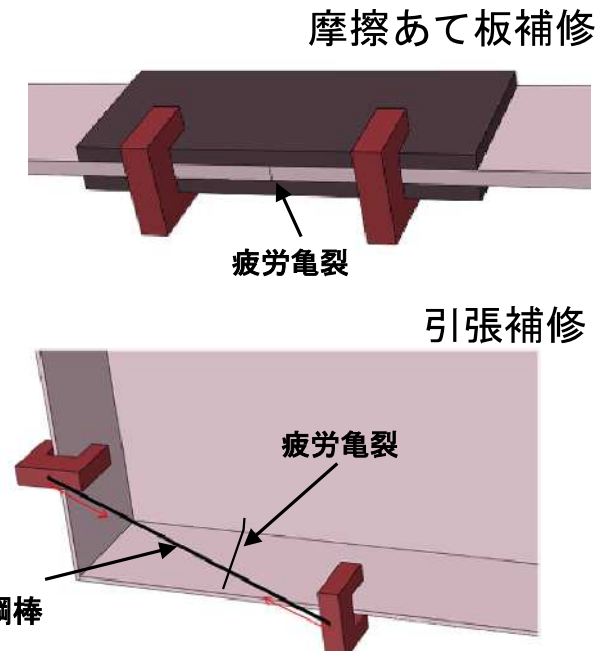
- スパン中央での鉛直強制変位を載荷では、橋梁全体系の剛性が大きく低下するケースは確認されなかった。一方で、支点直上に鉛直強制変位を載荷すると、複数の桁に腐食を再現した解析ケースで床版端部の鉛直変位が大きくなる。
- 一般に、腐食範囲および腐食減肉量が大きいほど顕著となる。また、腐食損傷を有する桁の支点反力が低下し、隣接する桁の支点反力が増加する。
- 地震力などを想定した水平力を載荷した解析では、支点部で下横構が連結されている桁の水平反力が他の桁と比べて大きくなる。したがって、下横構が連結されている桁に腐食が生じた場合には、橋梁全体の水平力に対する剛性が大きく低下する
- 腐食損傷による剛性・抵抗力低下は、支点反力の減少となる。支点での桁応答および支点反力の変化で、構造健全性評価ができる可能性がある。
※多主桁構造は、並列構造形式であるため

【現在検討中！】

- 鋼橋に生じた疲労き裂の進展を止めるには？ **ストップホールの施工無しでの緊急応急的な対応は？**

疲労亀裂進展の実験結果

供試体名	補修方法	最終破断サイクル
RN-50	補修無	1,460,907
RS-45	あて板補修t=4.5mm	1,222,596
RS-90	あて板補修t=9.0mm	2,000,000以上
RP-10	プレストレス補修P=10kN	198,286
RP-20	プレストレス補修P=20kN	356,563



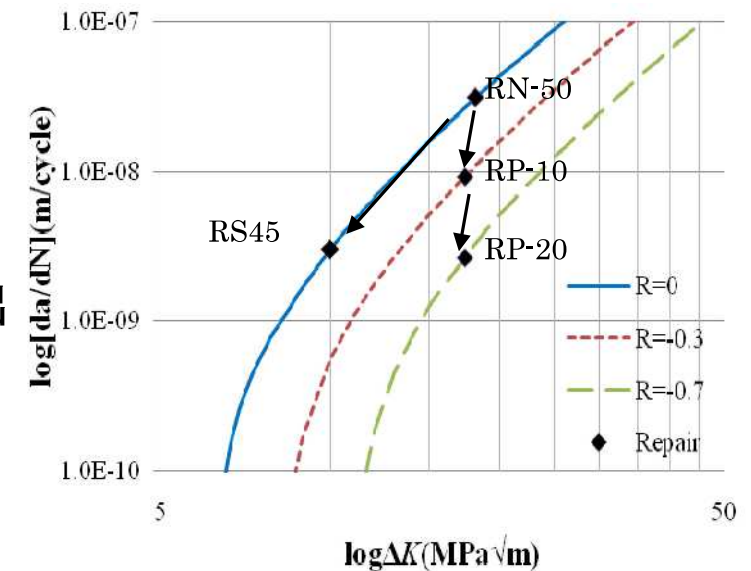
FE解析でも検証は可能！

き裂進展の解析結果(き裂進展長さ2mmのとき)

モデル名	ΔK (MPa \sqrt{m})	応力比R	き裂進展速度(m/cycle) **
RN-50	18.1	0	3.10E-08 (2.63E-08) *
RS-45	6.2	0	2.74E-10 (1.57E-09) *
RS-90	9.8	0	進展しない(進展しない) *
RP-10	17.3	-0.3	9.16 E-09 (4.87E-09) *
RP-20	17.3	-0.7	2.66E-09 (2.55E-08) *

* ()内の値は実験値

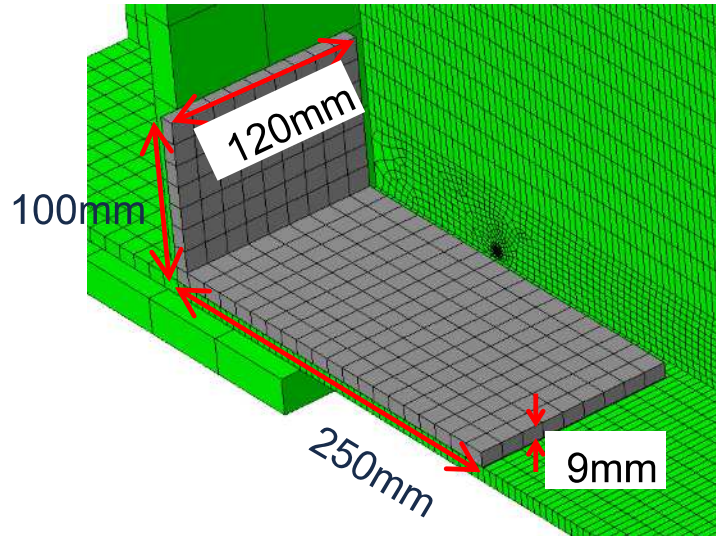
** 解析におけるき裂進展速度は、得られた ΔK を基にJSSC疲労設計指針の設計曲線式より算出



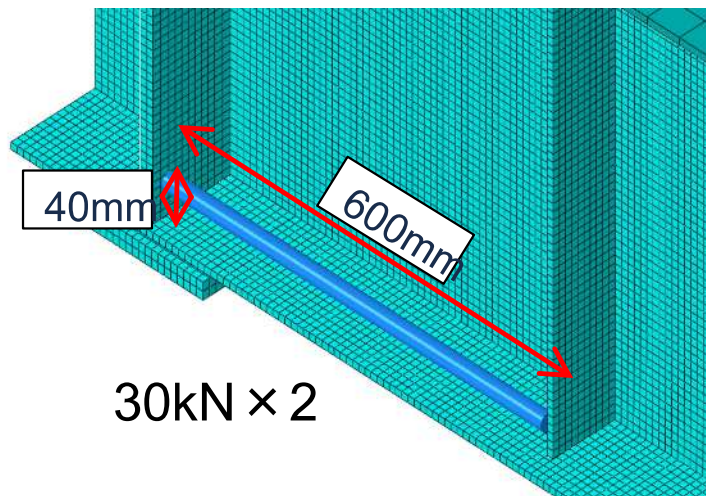
き裂進展抑制効果の考え方

• 実構造部位に対する解析的検討
(ソールプレート部)

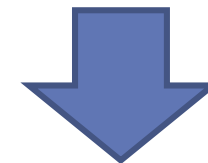
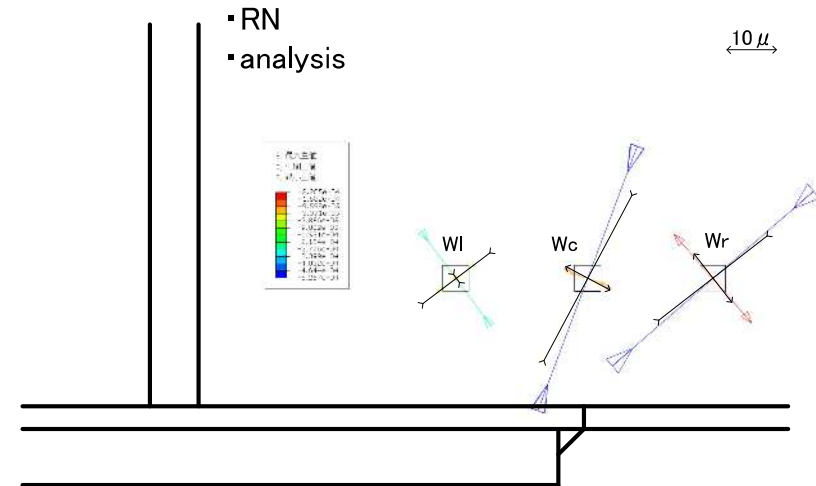
当て板補修(RA)



プレストレス補修(RP)

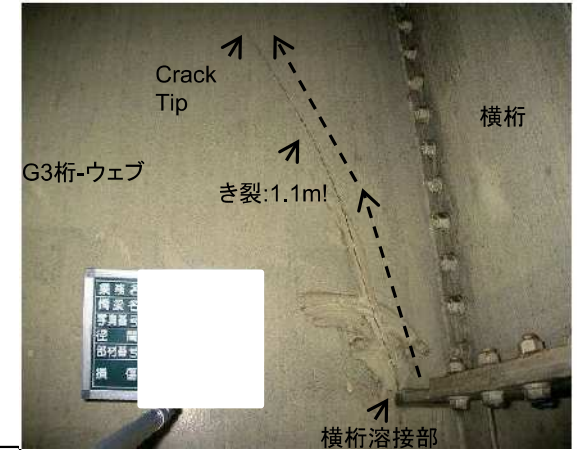


		支間中央下フランジ	
		ひずみ(μ)	変位(mm)
RN	Analysis	298.1	1.16
	Experiment	314	1.57
	A/E	0.95	0.74
RA	Analysis	259.6	1.14
	Experiment	290	1.39
	A/E	0.90	0.82

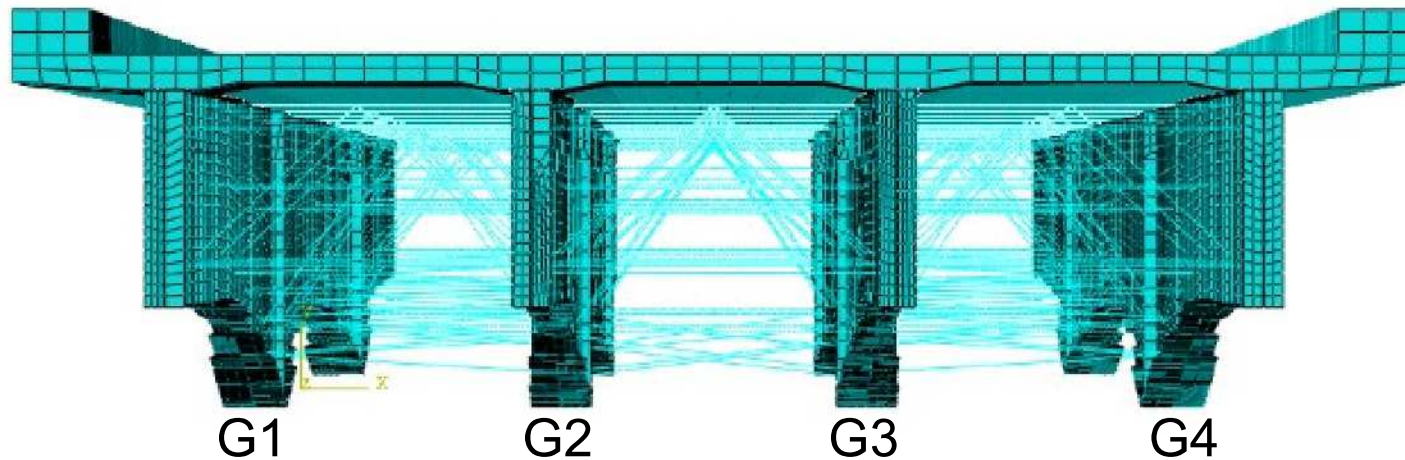
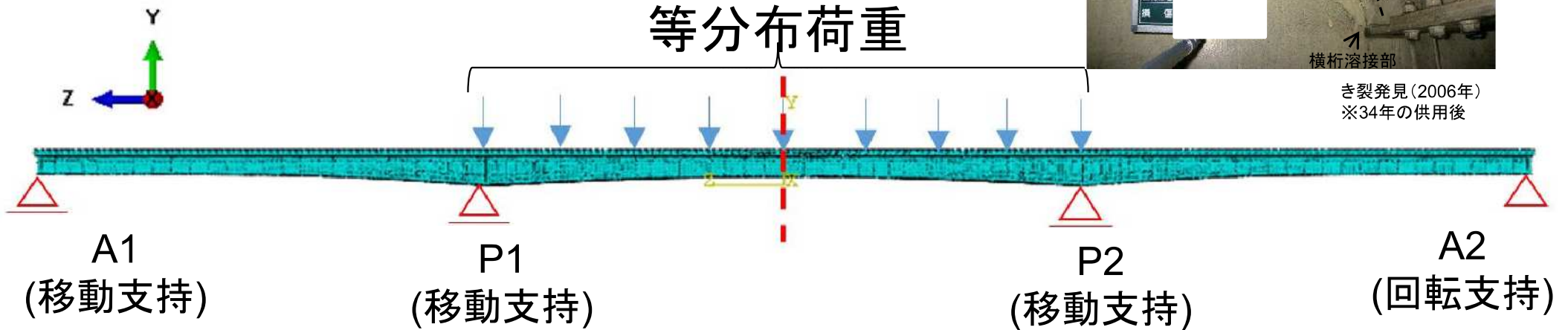


- (RA)発生応力を約20%低減→応力拡大係数を約15%低減→き裂進展速度が約65%に
- (RP)残留応力250MPaとすると応力比を10%低減→応力拡大係数を約10%低減→き裂進展速度が約75%に

- 実際に大きな疲労き裂を生じた鋼橋では、...
(名阪国道・山添橋)



き裂発見(2006年)
※34年の供用後



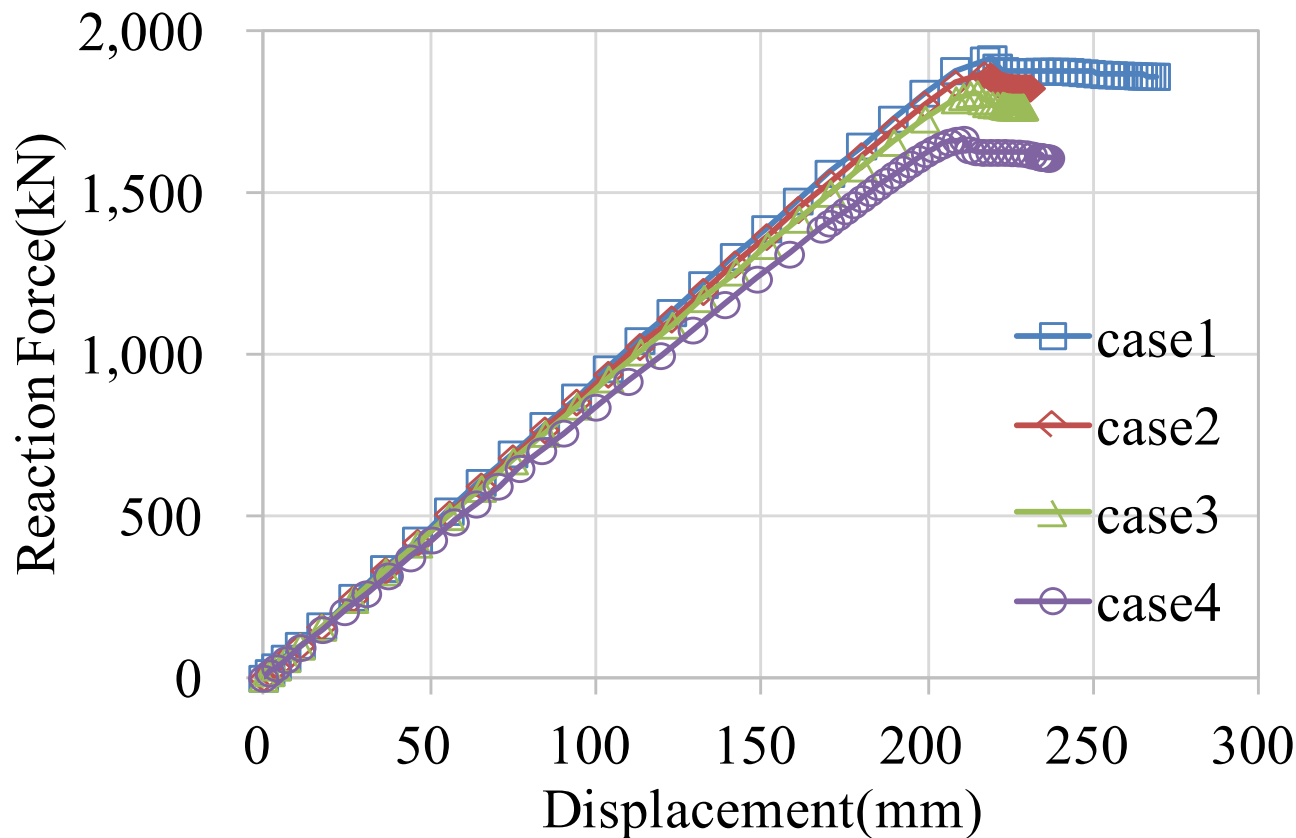
疲労き裂

- 床版: **Solid Element**
- 桁, 補剛材: **Shell Element**
- 橋脚 橋桁 斜橋脚等: **Beam Element**

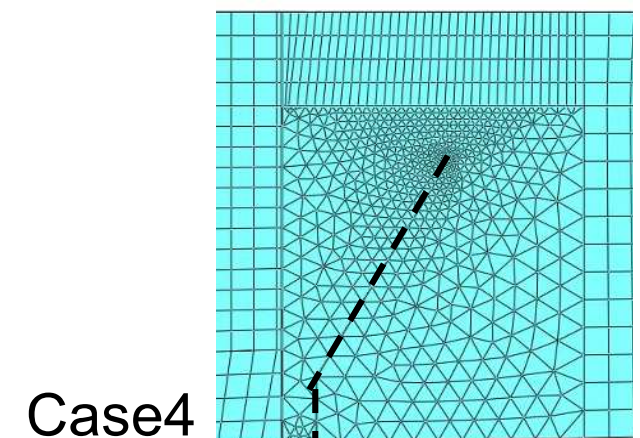
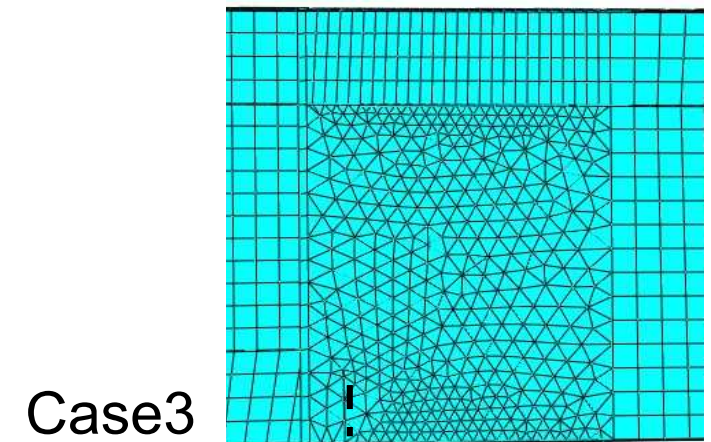
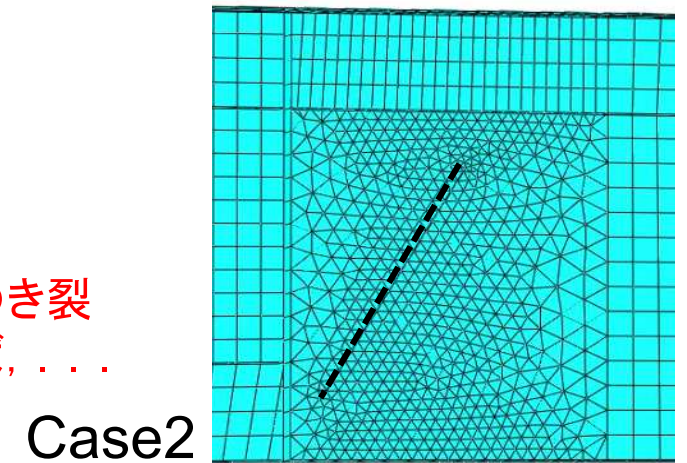
- Case1: き裂無し
- Case2: 長さ1.1 m のき裂 (ウェブへの実際のき裂)
- Case3: 長さ0.3 m のき裂 (下フランジ方向へ)
- Case4: 長さ1.4 m のき裂 (両方向へ)

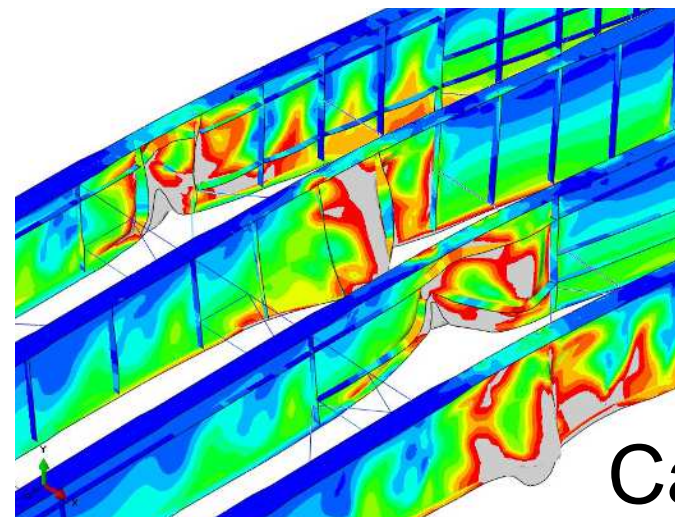
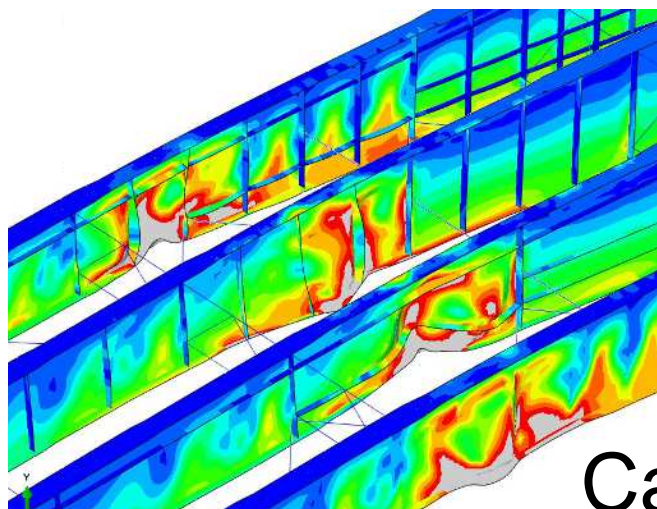
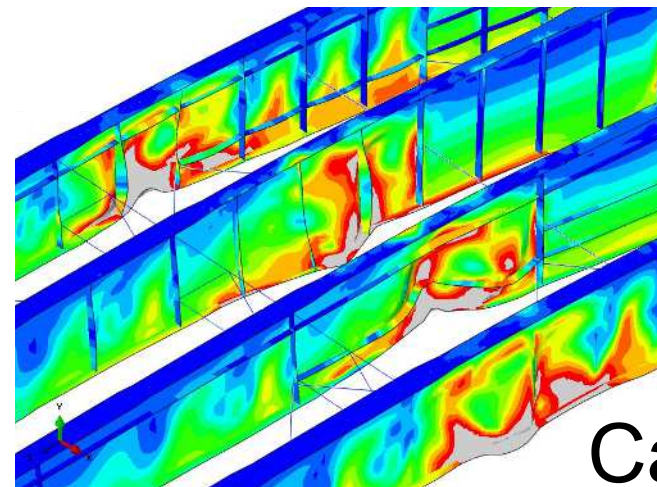
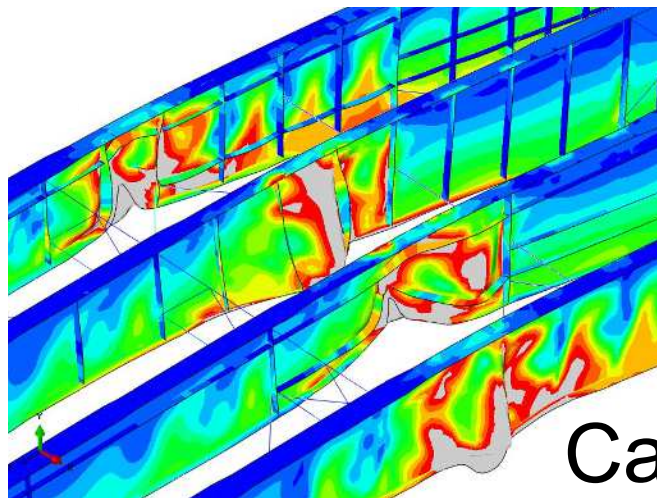
※き裂進展は考慮していない

FE解析モデルでのき裂
の取扱が分かれば, ...

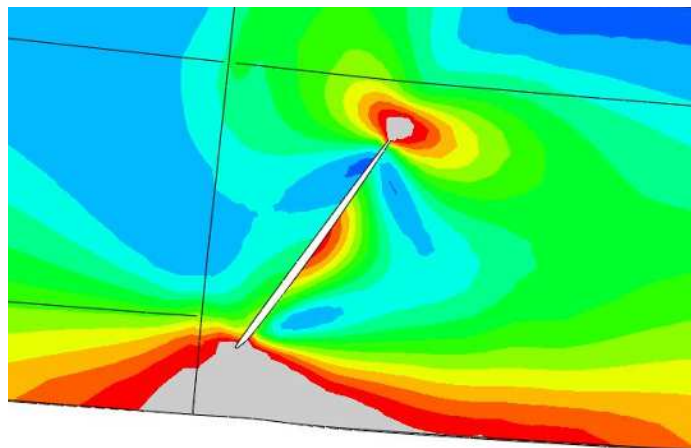


Case1 > Case2 > Case3 > Case4
(1,916kN) (1,863kN) (1,809kN) (1,666kN)

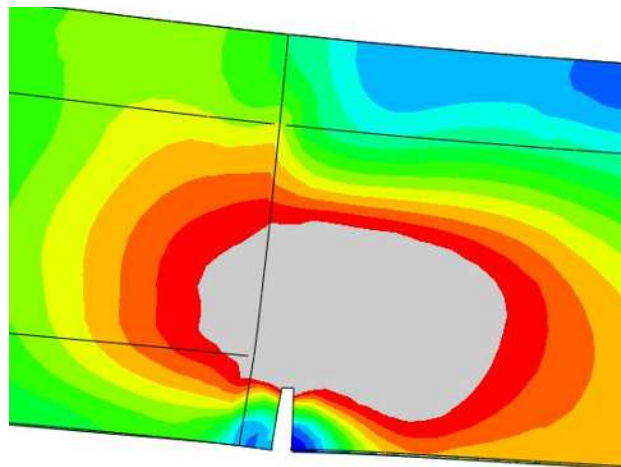




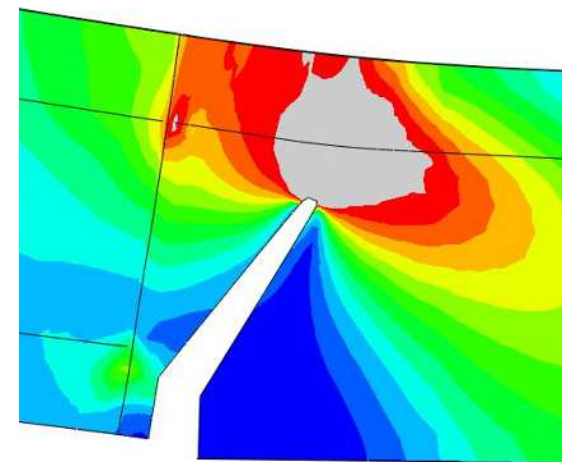
局部変形に大きな差異はない？



Case2

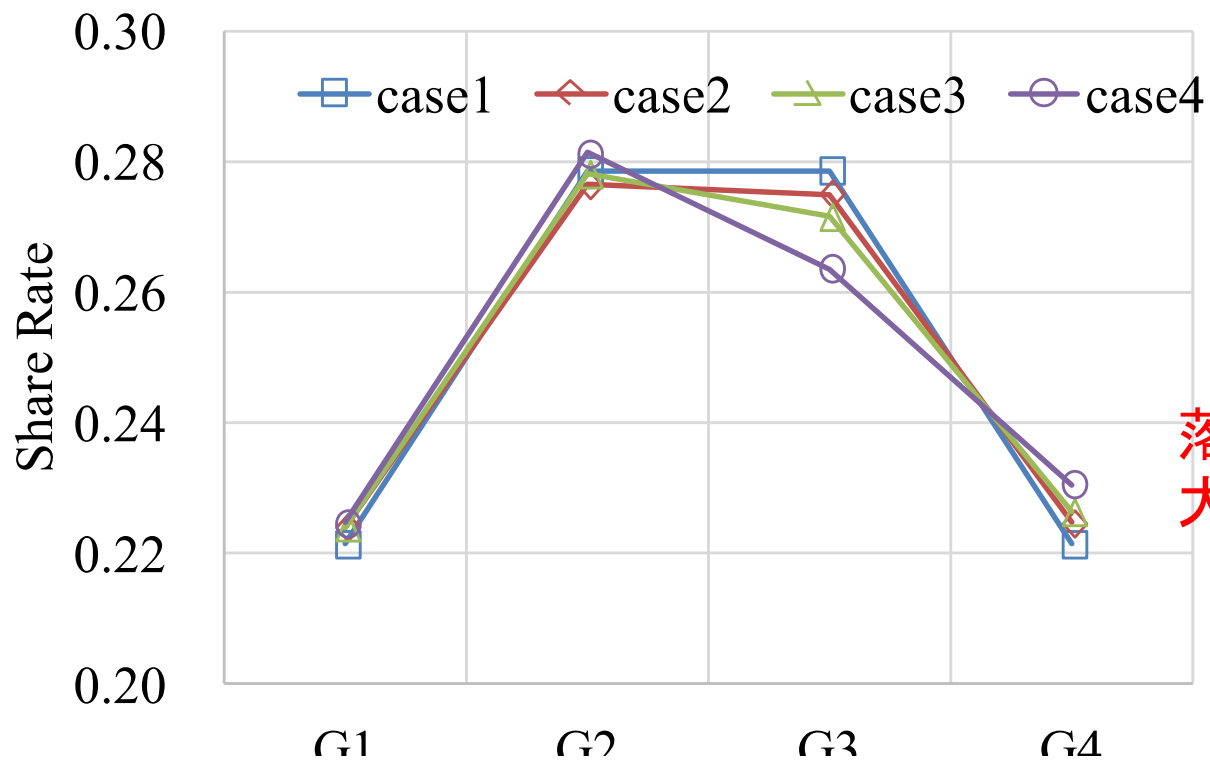


Case3



Case4

灰色は、
塑性領域



落橋に至るには
大きな余裕あり!

疲労き裂を有する鋼橋の残存耐力のまとめ

- 4ケースを比較しても、橋梁全体での荷重-変形特性に大きな差異は生じず、き裂を生じていない桁への荷重再配分が健全に行われる。中間支点P1付近の不曲げの領域において、顕著な局部座屈が見られるが、4ケースでその形態が大きく異なることはない。
- 全断面にき裂が進展しても、床版が桁の一体性をある程度確保するので、落橋するに至るような耐力低下は生じない。
- 疲労き裂を有するG3桁のみの反力低下が著しい。
→桁端での応答量の計測による健全度評価の可能性あり 【現在検討中！】
- 今後は、トラス橋、アーチ橋などにおいて、FCM (Fracture Critical Member)の特定が必要！
【今後の課題？】

【損傷を有する構造物の残存性能評価のまとめ】

- 室内実験が可能であれば、現象を理解するために実験的検証が有効.
- 実橋を用いた実験では、安全上、時間、費用などの制約があり、非常に難しい！
- FE解析などのシミュレーションは有効であるが、損傷の形態を実状に応じて再現することが不可欠.



研究成果が実用的でなければ，社会貢献にはなりません？

- Society5.0(DX)に向けた研究開発に取り組んでいます！

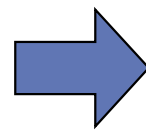
橋梁構造物を対象とした、点検の合理化、省力化、迅速化が必要
(点検結果の客観性)

現在の点検業務の多くは、路面下側からの点検

→ **足場などが不可欠**

- 路面上側からの点検・検査法
- 交通を遮断しない点検・検査法

例えば、使用条件下で、
構造物の損傷を検知するシステムがあれば...



新幹線



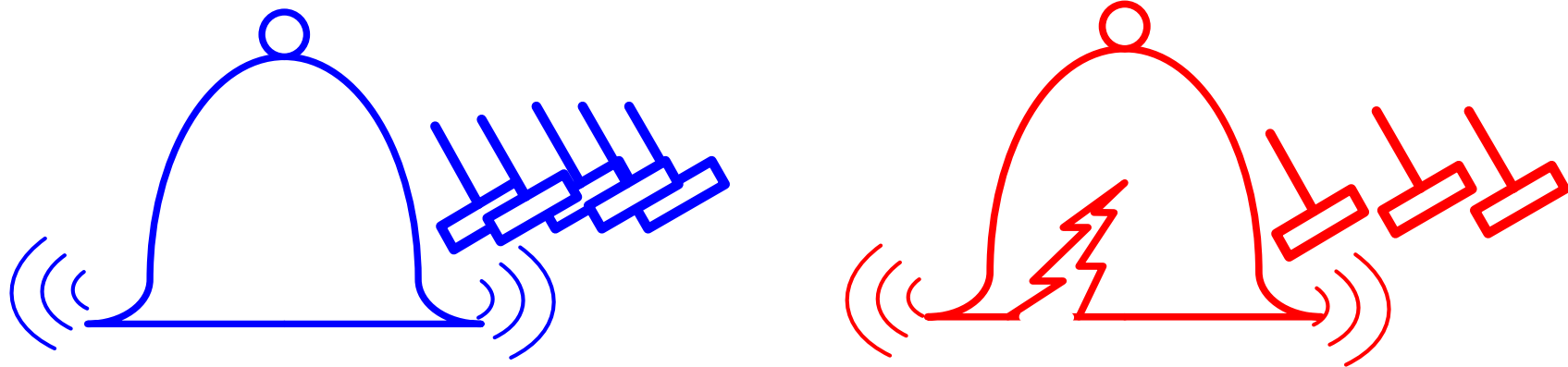
The HERMES bridge inspector



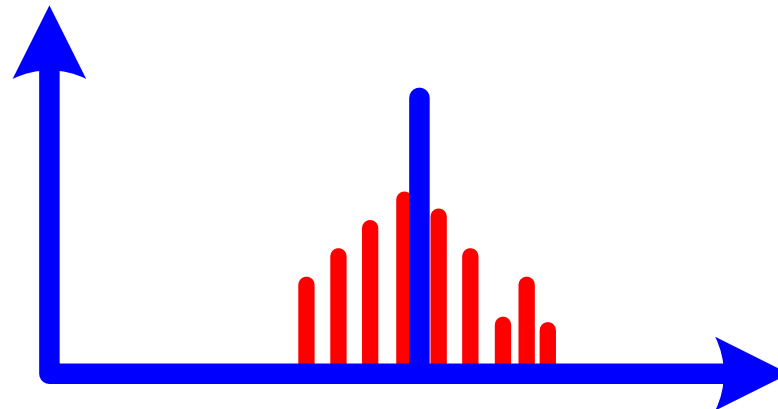
橋梁点検車

日常的な使用下で簡易に損傷を検知するためには？

- 振動特性の変化(振動数, 振動モード, 減衰など)

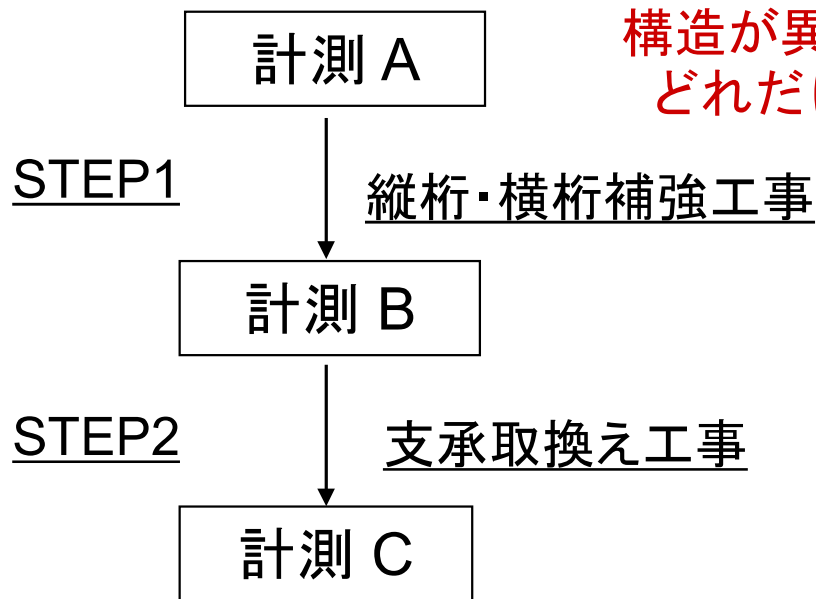


音の強さ(Sound Strength)

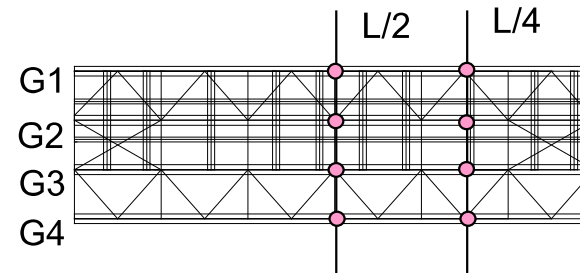


振動数(Frequency)

• とにかく、実橋梁で検証！(国道357号線:海老川大橋)



構造が異なれば、
どれだけ変化?



計測	橋梁状態
A	縦桁および横桁補強前・足場あり
B	縦桁および横桁補強後・足場あり
C	ゴム支承に取換え・足場なし



(a) 縦桁・横桁補強
Installing girders

曲げ1次 : 4.01Hz



(b) ゴム支承に交換
Installing rubber bearing

曲げ1次 : 4.24Hz
ねじり1次 : 5.02Hz



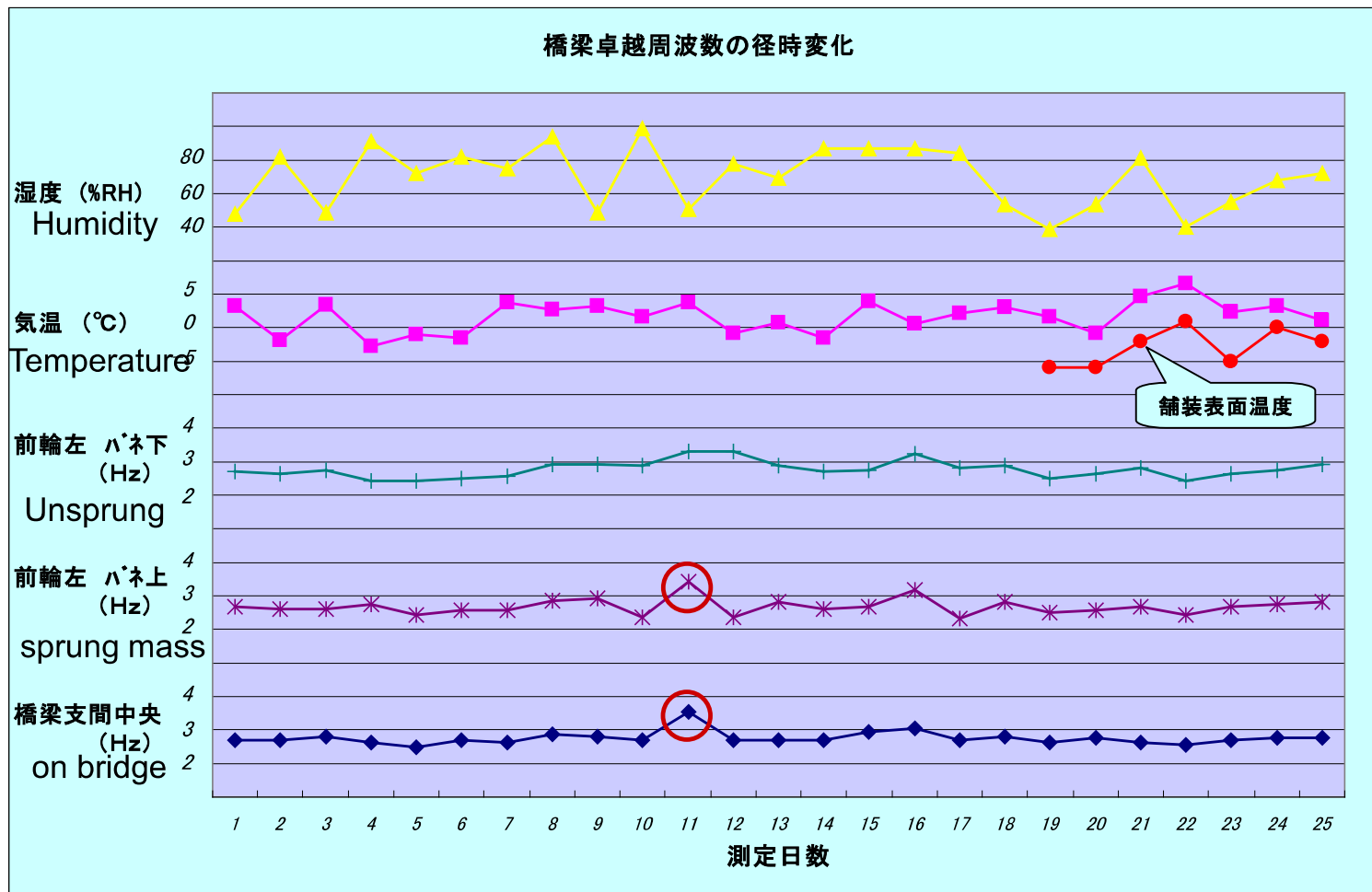
(c) 足場(付加振動系)
with scaffold

曲げ1次 : 3.52Hz
ねじり1次 : 4.47Hz

固有振動数の日常の変動幅の実態は？



橋長約170mの4径間単純非合成桁橋(桐生市管理)



統計的な処理
Statistical Processing



トレンドの有意な変化を抽出
Trend Extraction

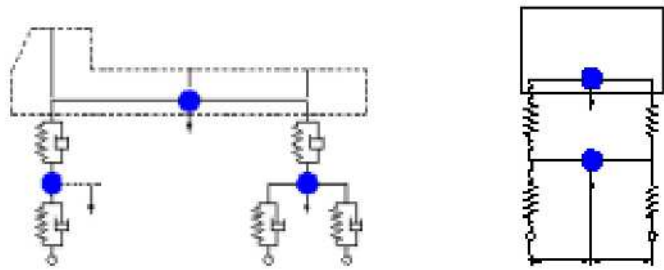
最大幅38%の変動あり
38% in variation

○を除けば
変動幅20%が目安

—通常の振幅程度を超える場合は 甚大な損傷である可能性が高い—

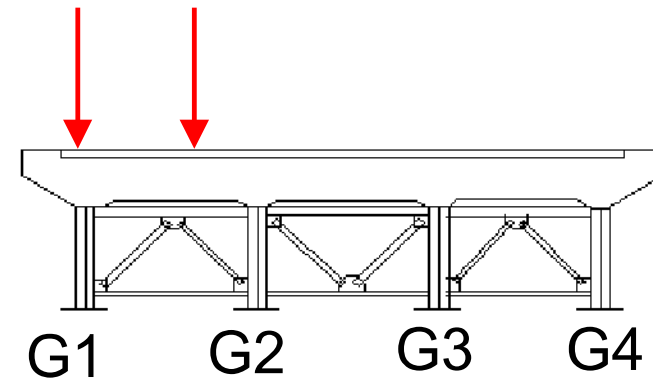
• **まず、車両—橋梁連成振動シミュレーションによって検証！**

車両モデル

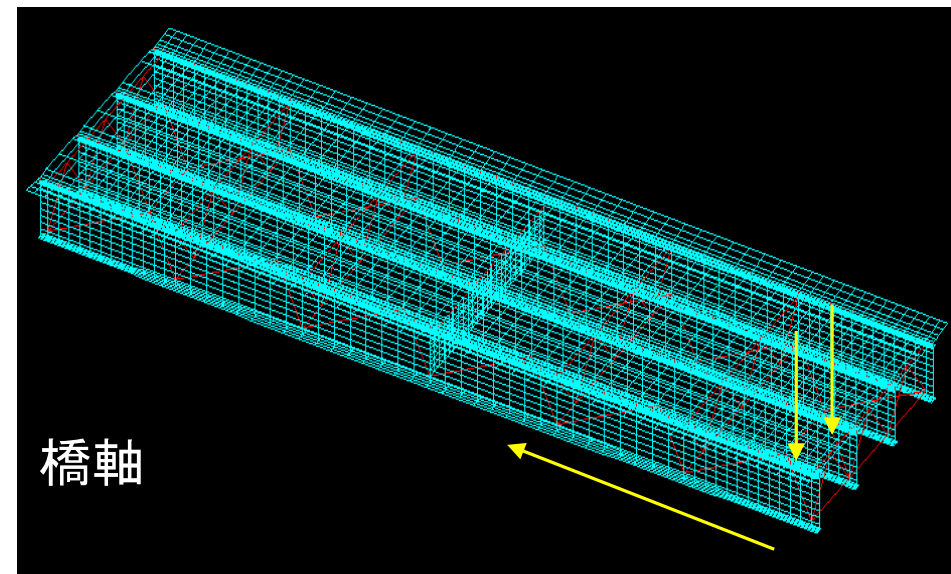
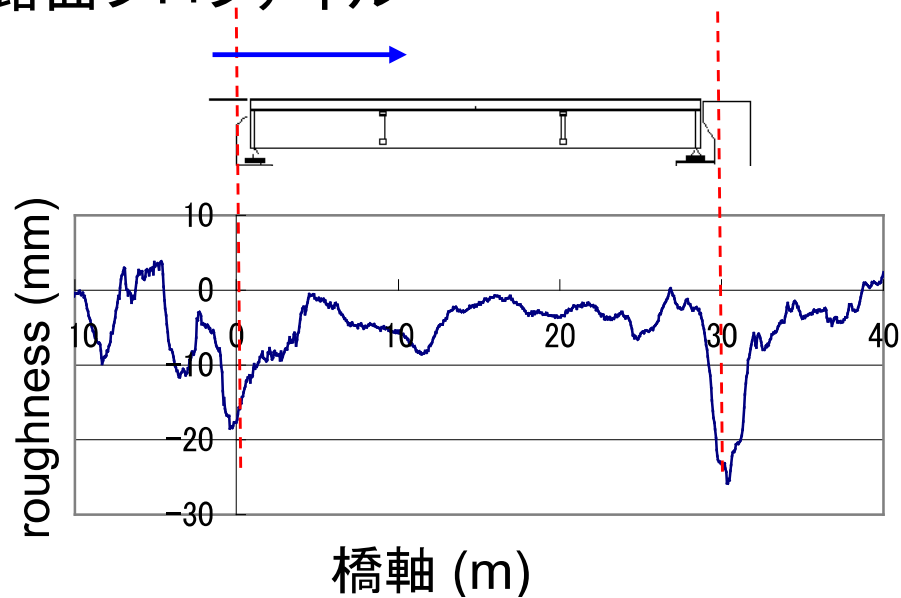


- ・総重量 245kN
- ・車速 20, 40, 60km/h
- ・3次元-8自由度系

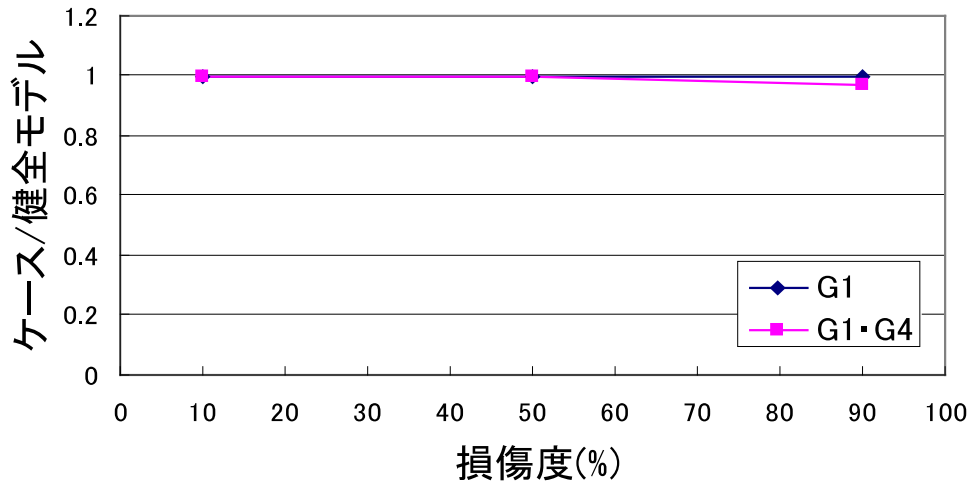
左車輪 右車輪



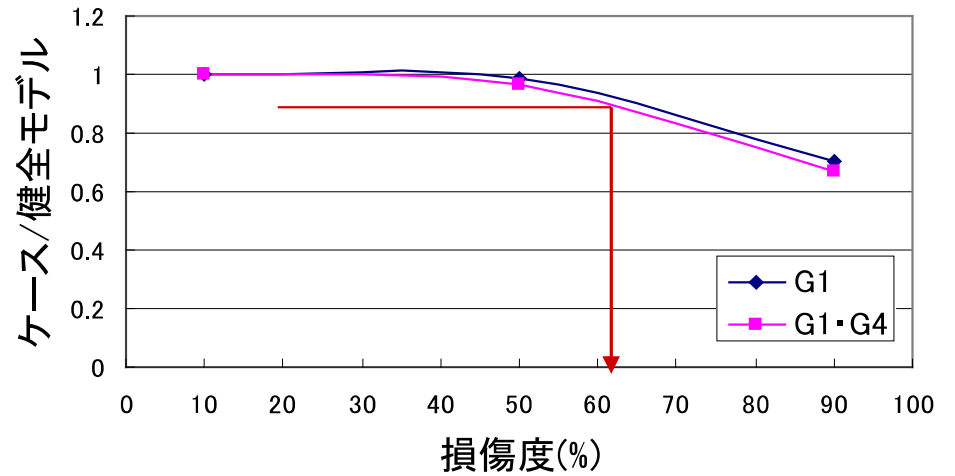
路面プロファイル



固有振動数の変化を見てみると、**主桁の腐食**



鉛直1次

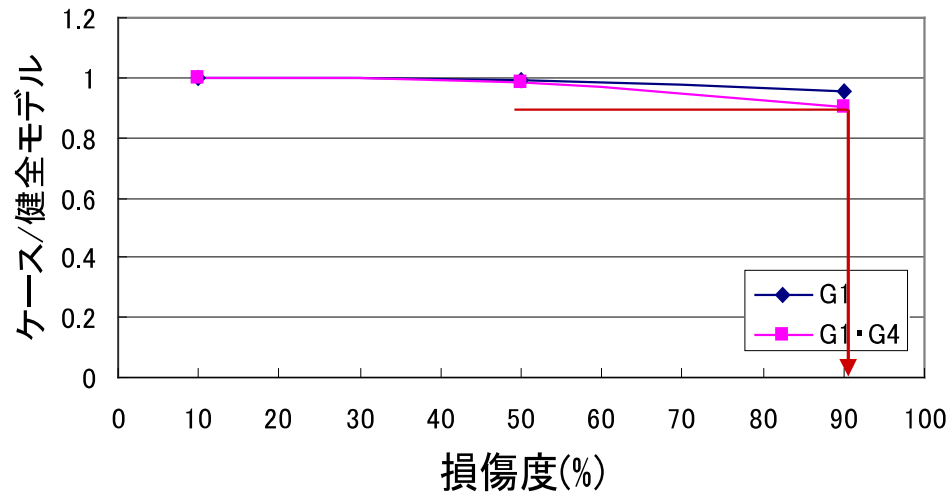


鉛直2次

腐食のモデル化

損傷は桁端部から橋軸方向にウェブ高の1倍(1550mm)とし、板厚を減厚

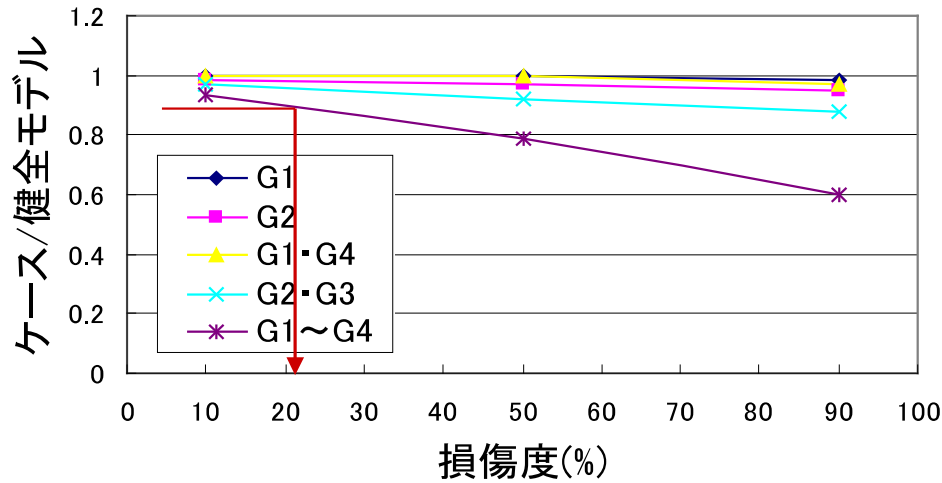
$$\text{損傷度} = \frac{\text{残存板厚}}{\text{設計板厚}} \times 100(\%)$$



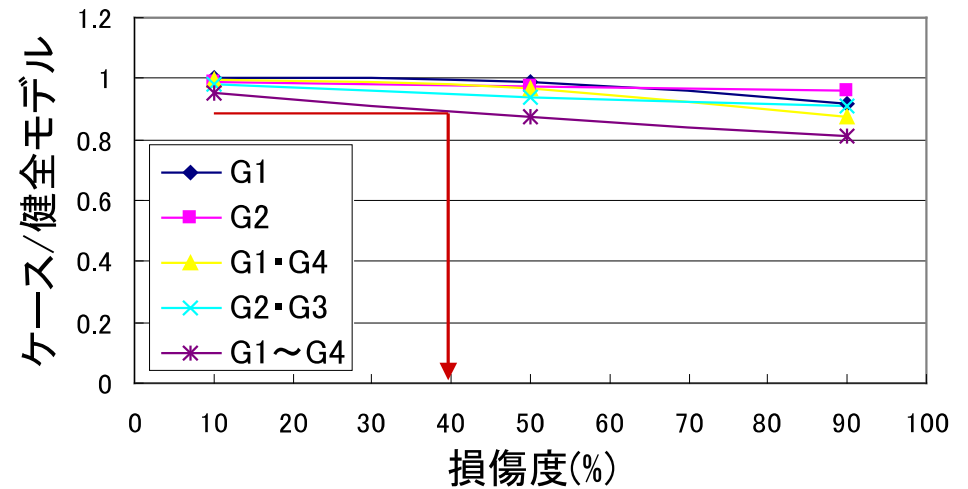
ねじれ1次

桁端部の腐食損傷
↓ 影響小
鉛直1次固有振動数

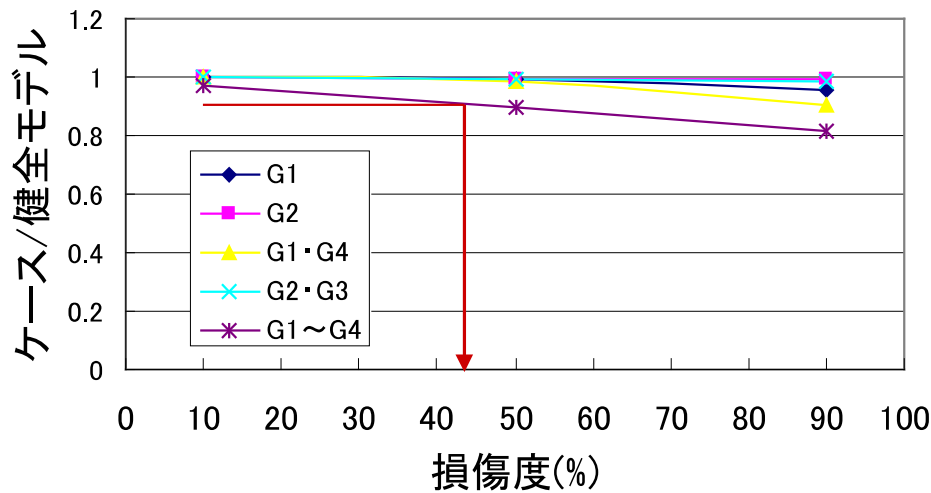
固有振動数の変化をしてみると、**主桁のき裂**



鉛直1次



鉛直2次



ねじれ1次

き裂のモデル化

主桁中央にウェブ高方向に下フランジ側からき裂を設定

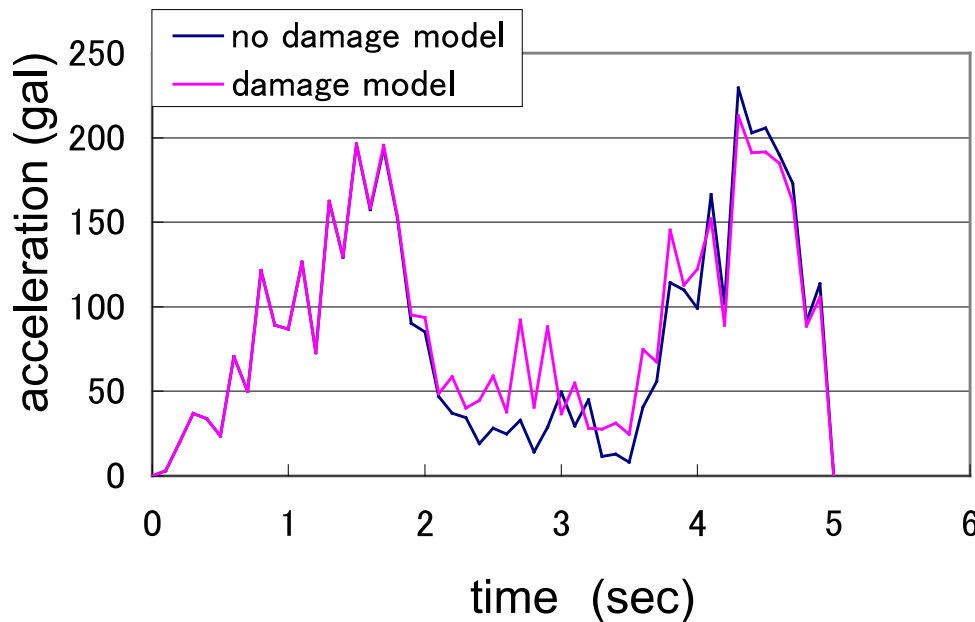
$$\text{損傷度} = \frac{\text{き裂長さ}}{\text{ウェブ高}} \times 100(\%)$$

全桁同時のき裂損傷

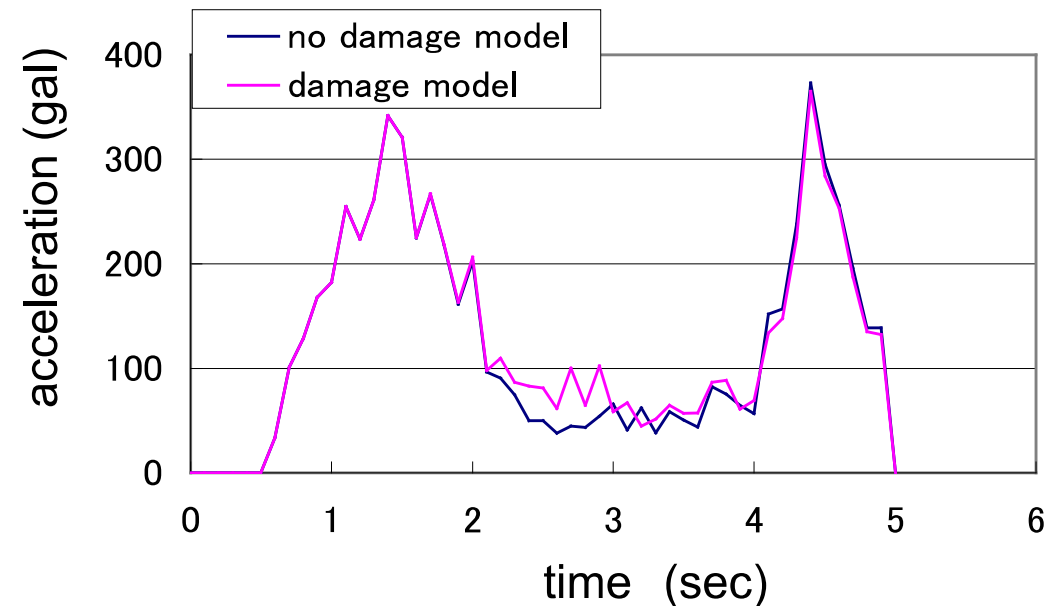
↓ **影響あり**

鉛直1次固有振動数

加速度応答の変化をみると、**—可動支承の固定化—**



車両のばね上応答



車両の後輪応答(ばね下)

加速度応答に差は見られるものの、走行位置、速度などとの関連で、この**“微小な差異”**をいかに検知できるかが課題である。

【FE解析では、多様な“作用—応答”の検証が可能！】

● 試験橋梁を用いた走行試験による実証してみると、...

● 実証手順

- 橋梁上に車両を走行させる
- 共振状態を作り出す
- 車両応答から橋梁の振動成分を抽出
- 橋梁の振動特性のうち固有振動数に着目
- 固有振動数の変化から健全性を評価

● 抽出方法

- 車両振動のスペクトルに着目し、橋梁走行時にのみ発生するピークを橋梁由来の振動特性とする方法



土木研究所・試験橋梁を使用

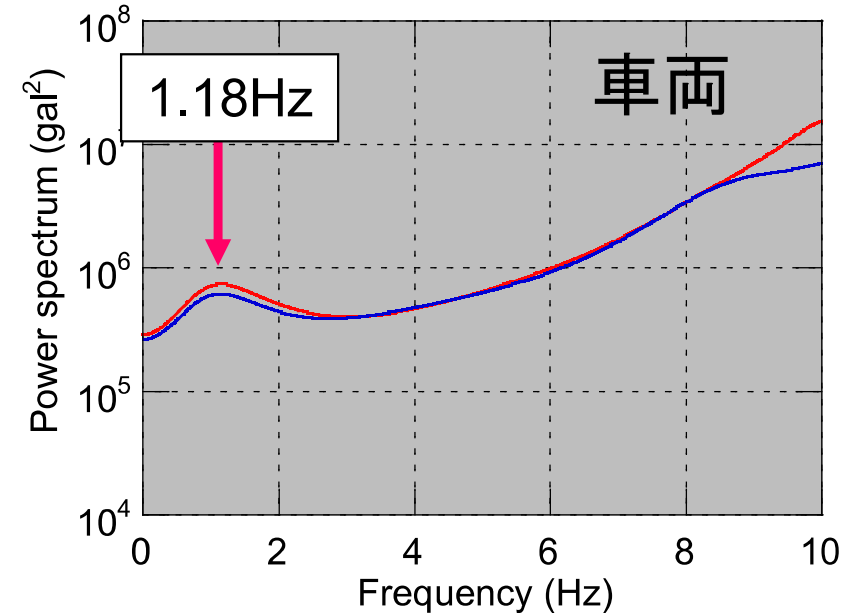
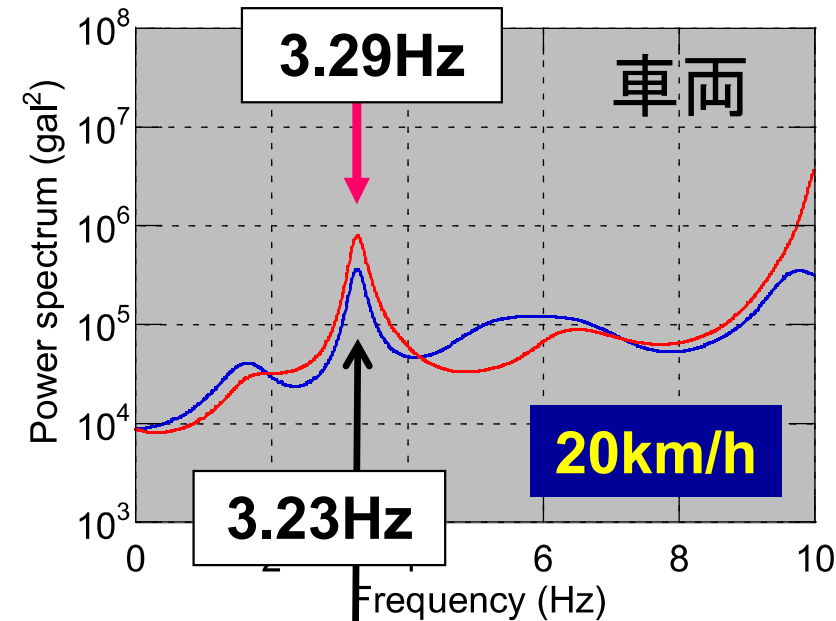


起振車両 (10tf車両に起振機などを配置し、牽引カーゴに制御ユニットを配置)

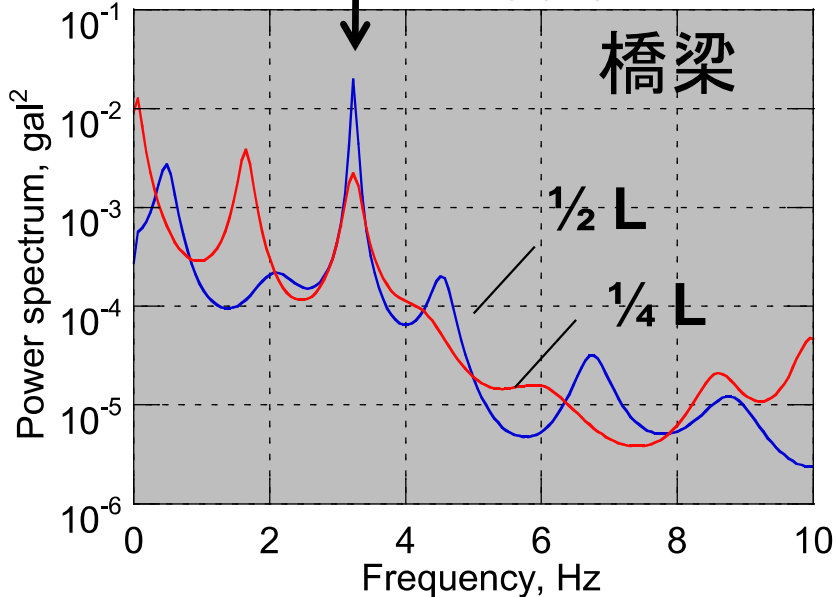


6分力計、前後輪のばね上・下に加速度計を設置した計測車両 (一般車両)

● 固有振動数の抽出例は, . . .



路盤上走行時のスペクトル



車両と橋梁が共振状態
にあれば抽出可能

「走行時間」と「加振力」
の条件

【あと〇年で、実際に検知システムとして運用できる？】

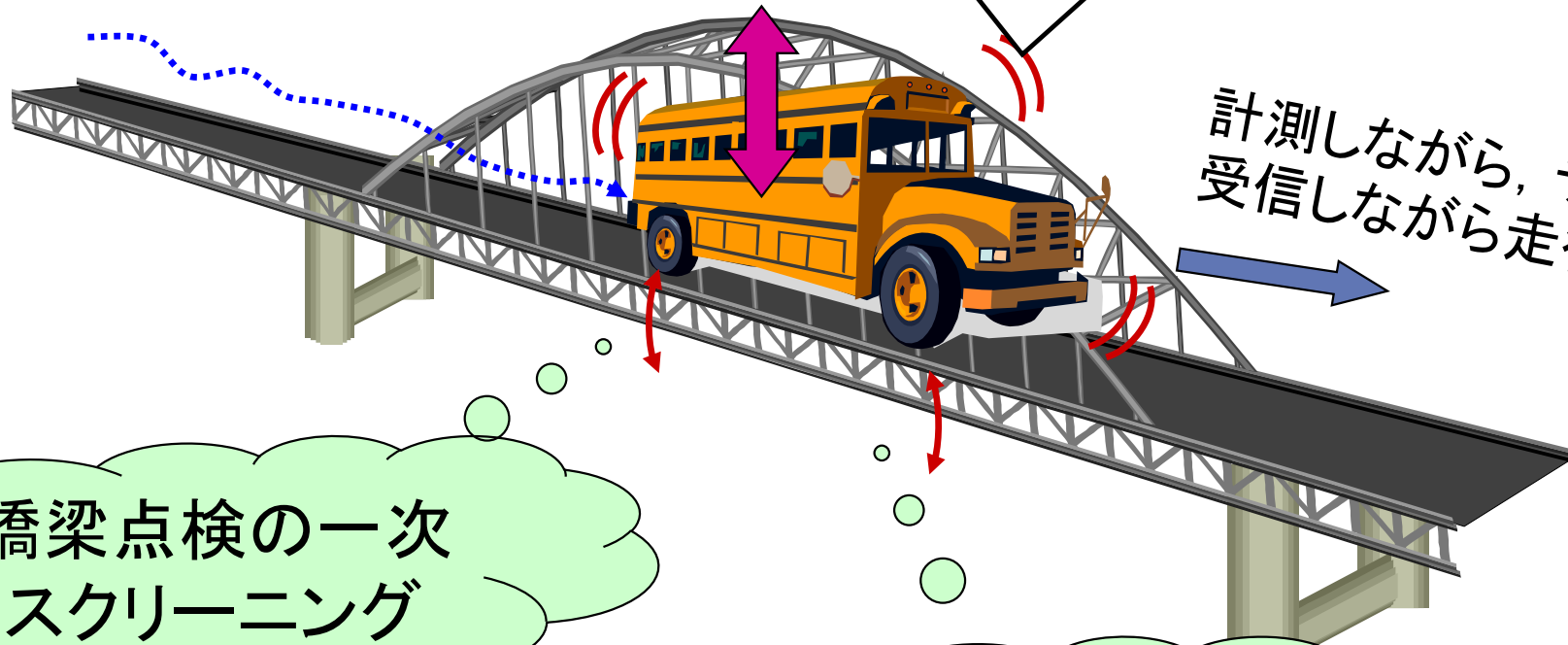
車両の応答(例えば, 加速度)
から橋梁の状態を検知

計測しながら, データを
受信しながら走行する

橋梁点検の一次
スクリーニング

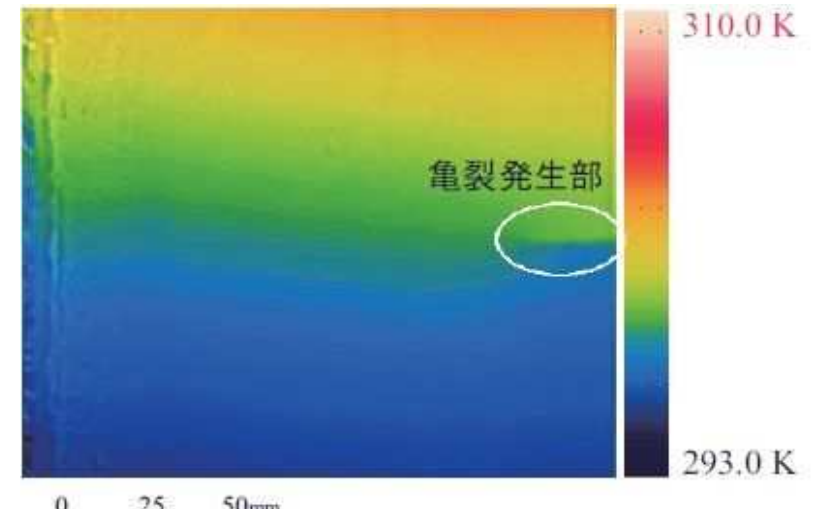
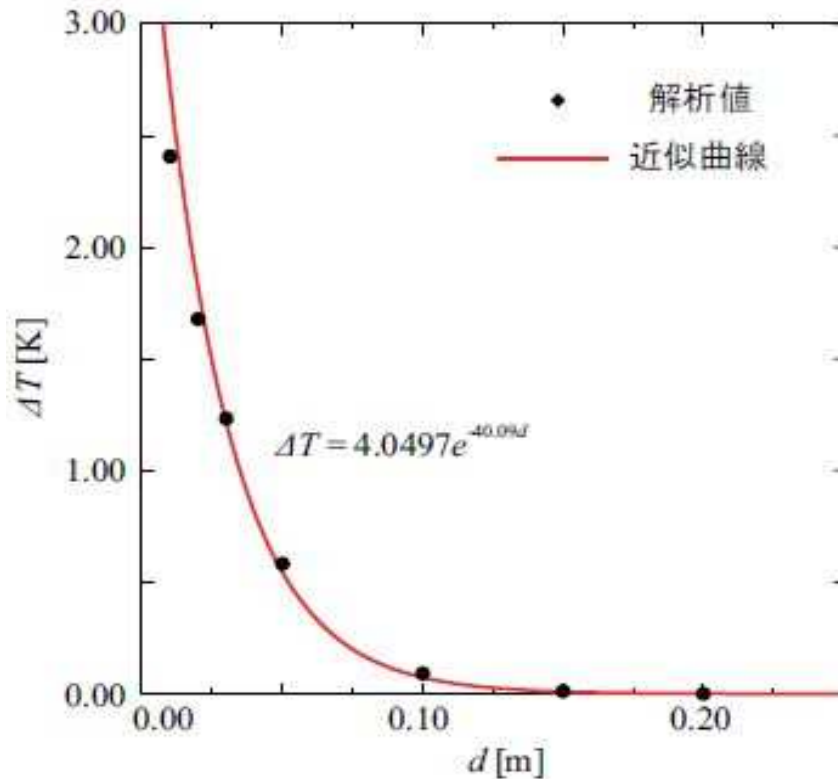
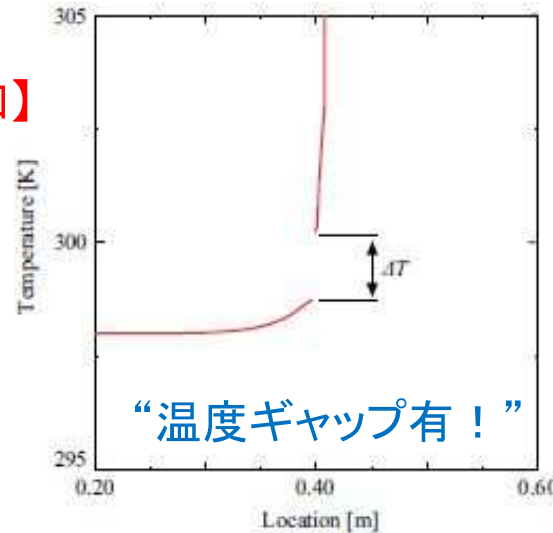
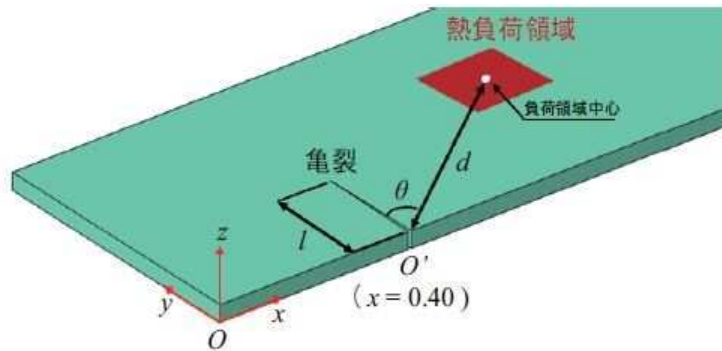
橋梁の状態変化
の履歴を捉える

実現に向けて、プロジェクトX!

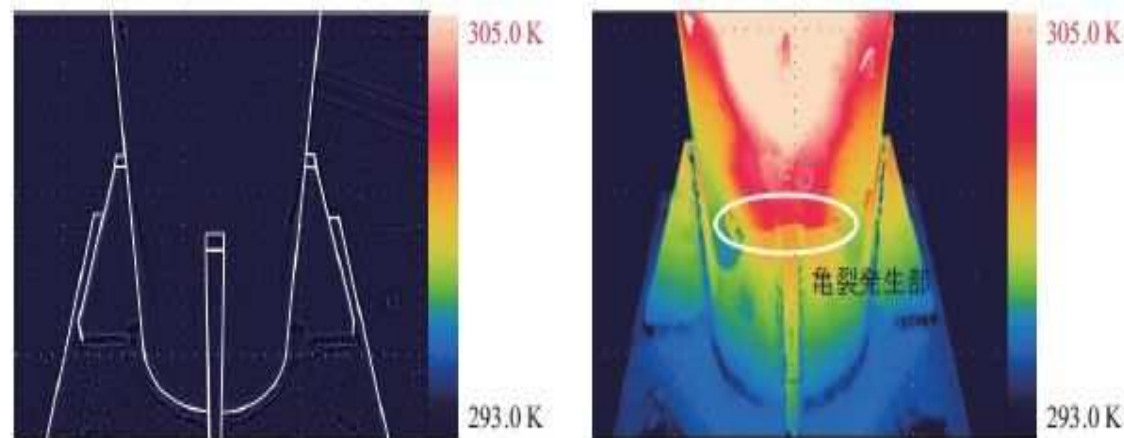
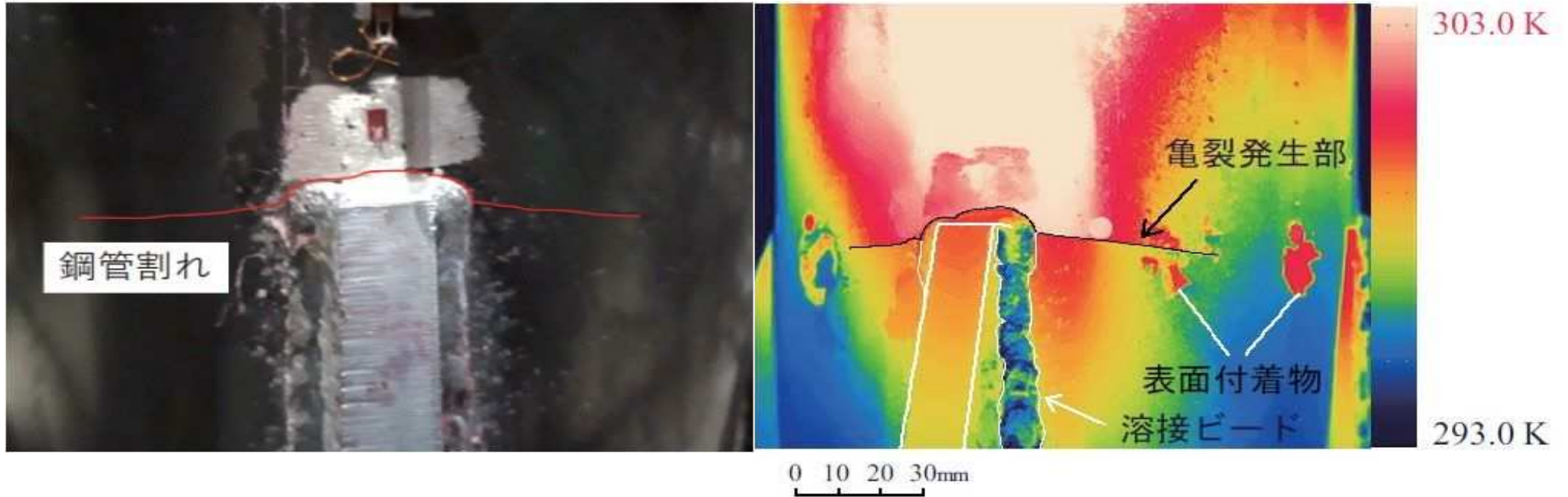


● 塗装鋼板のき裂を検知！？ (熱画像: 熱負荷による温度分布変化)

【近接目視で捉えられない変状の検知】



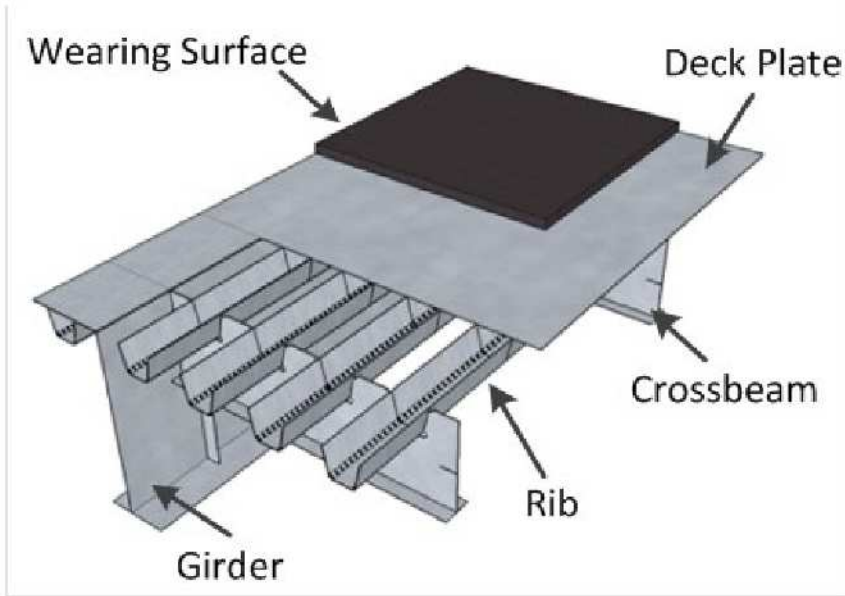
- 照明柱基部に生じた疲労き裂は検知できた！



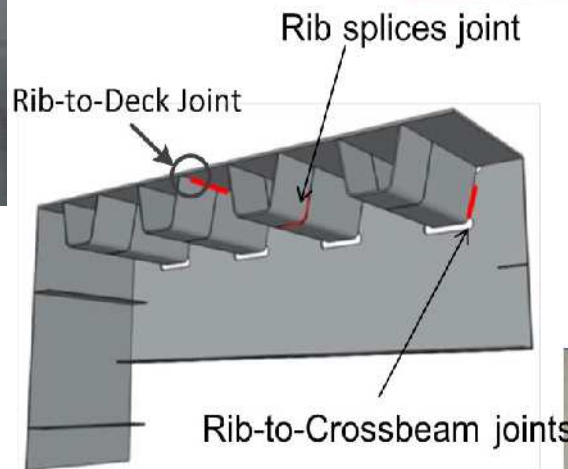
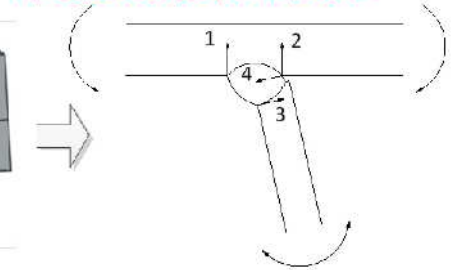
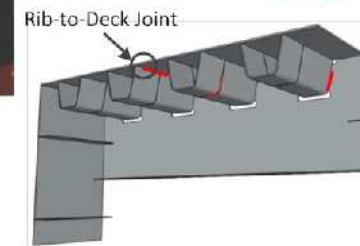
加熱前

定常状態

鋼床版の疲労き裂の路面上からの検知は可能か？



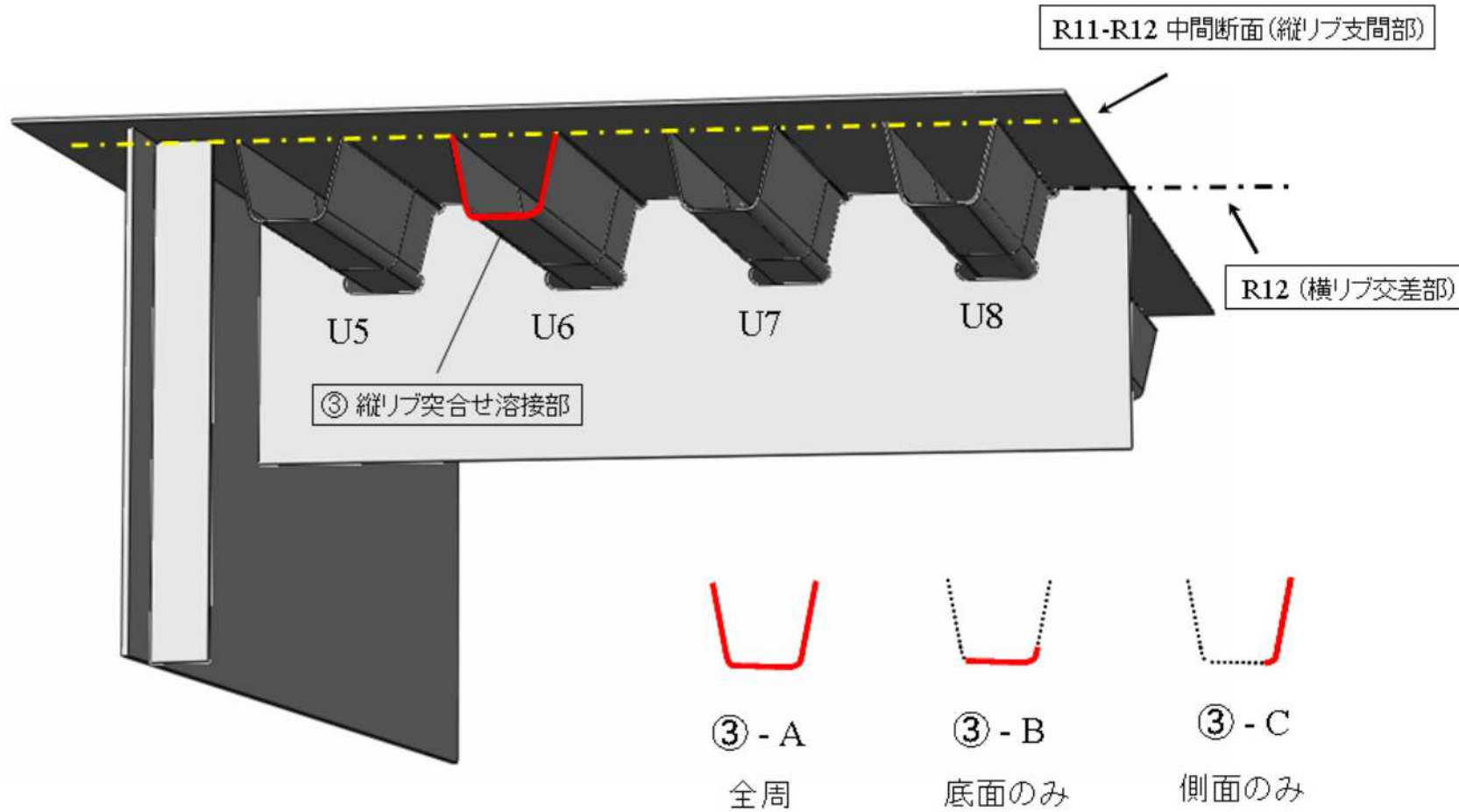
舗装面に変状が見られると
デッキ貫通亀裂がある！



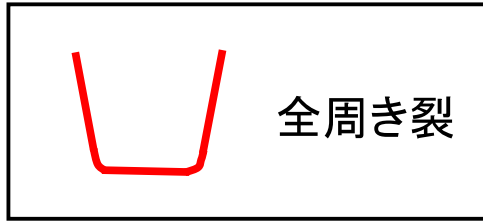
【2】が問題！

- 縦リブ突合せ溶接部の疲労き裂は検知できる?

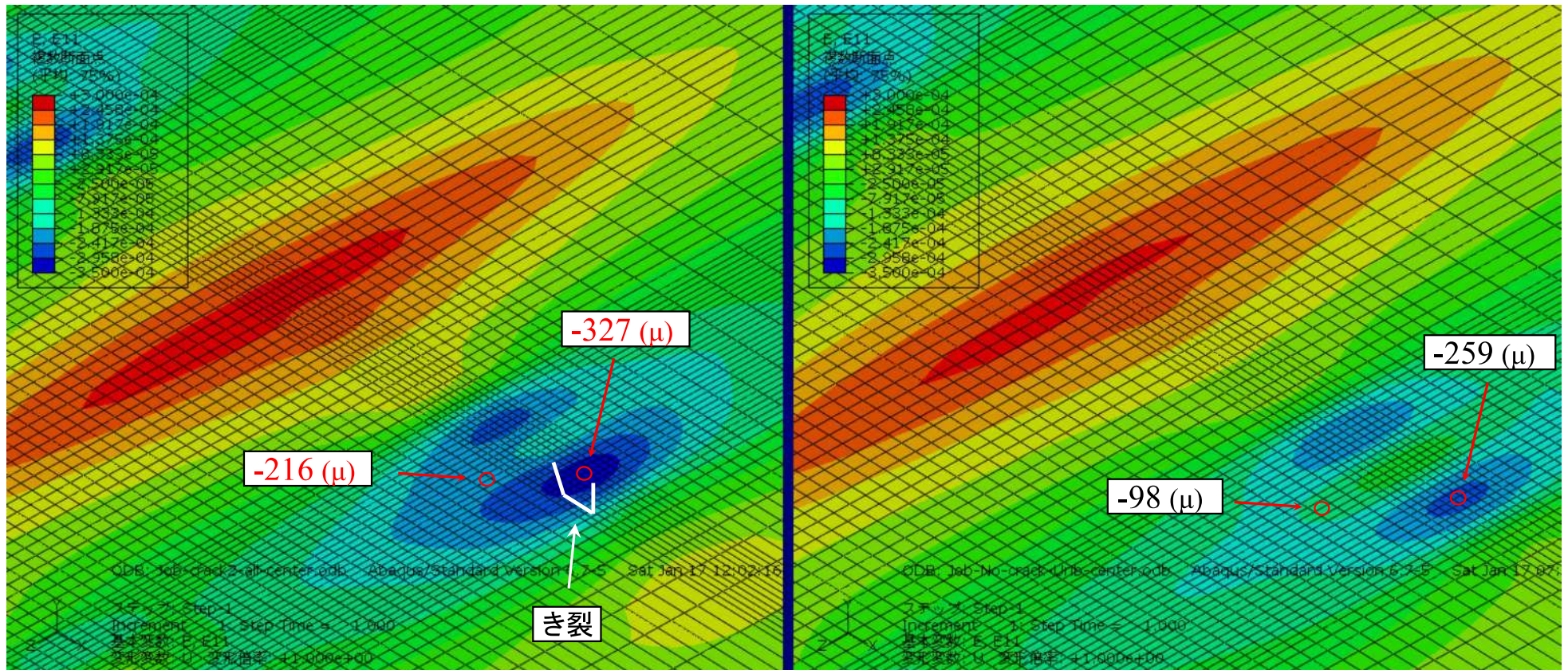
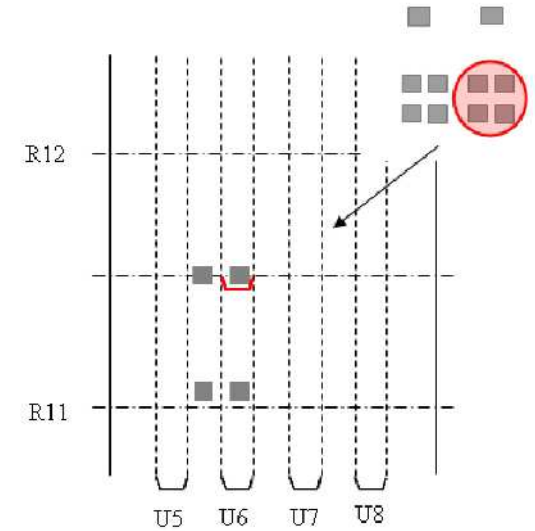
【下面から近接目視で捉えられる変状】



→ 解析結果の例 (突合せ溶接部)



・ 橋軸直角ひずみ

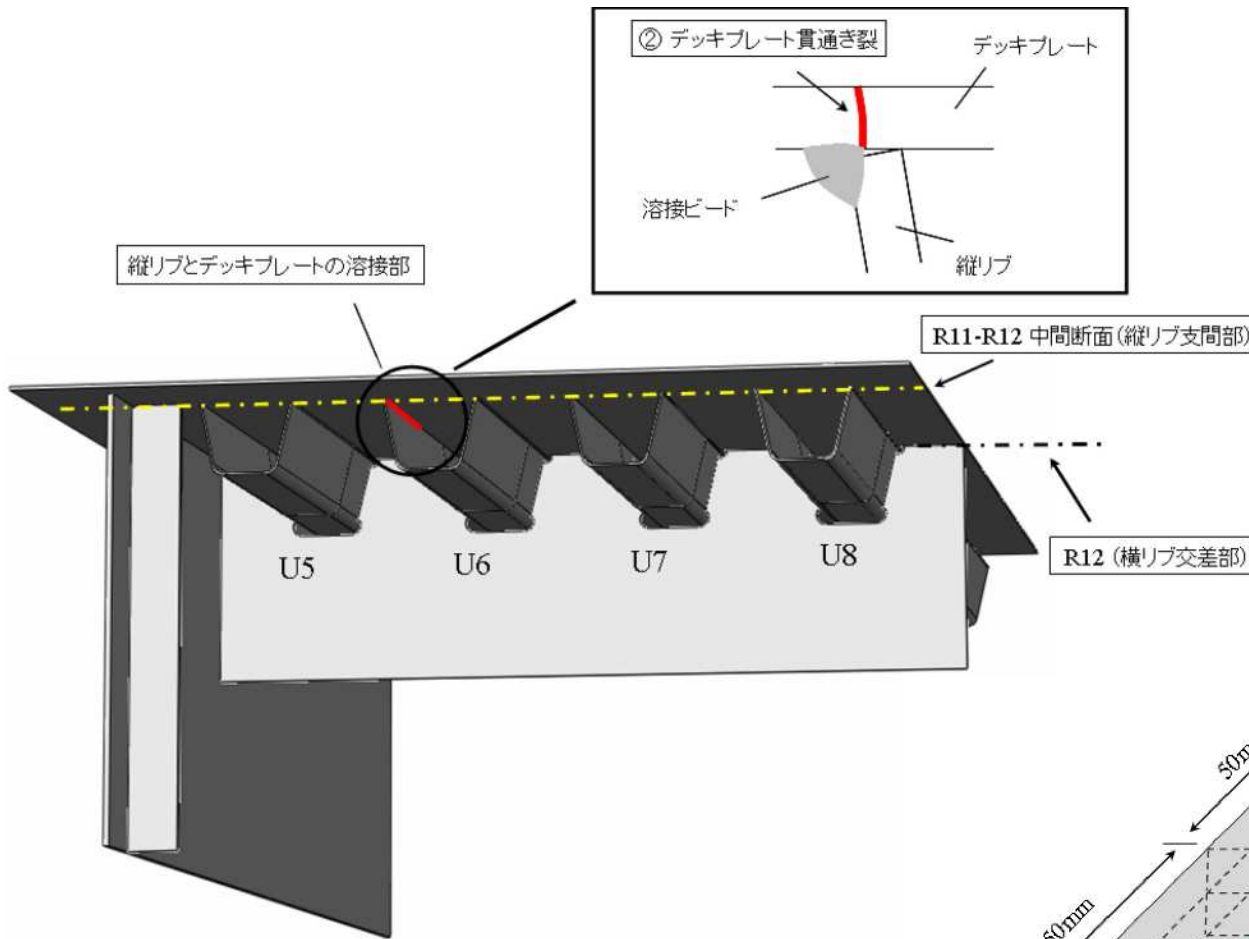


縦断面 (平均 75%) (全周き裂)

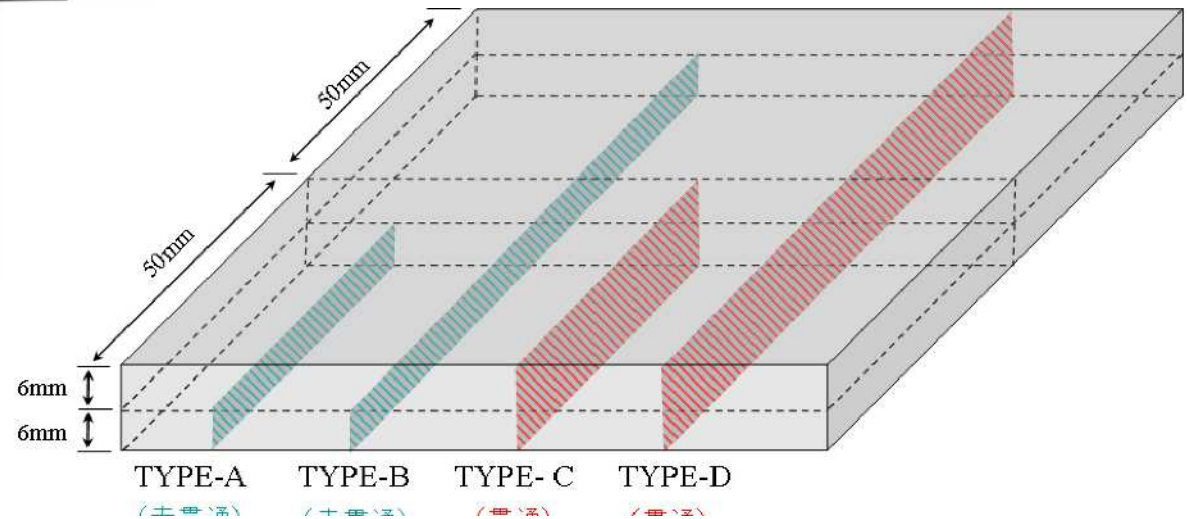
き裂から

• デッキ貫通した疲労き裂は検知できる?

【下面からでも近接目視で捉えられない変状】

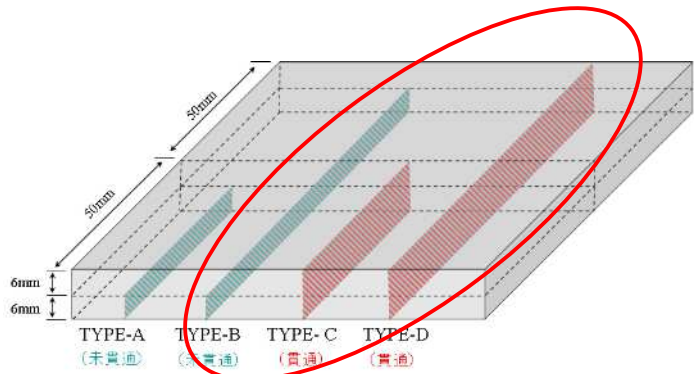


き裂寸法	TYPE-A	TYPE-B	TYPE-C	TYPE-D
奥行(橋軸方向)	50mm	100mm	50mm	100mm
深さ(板厚方向)	6mm	6mm	12mm	12mm

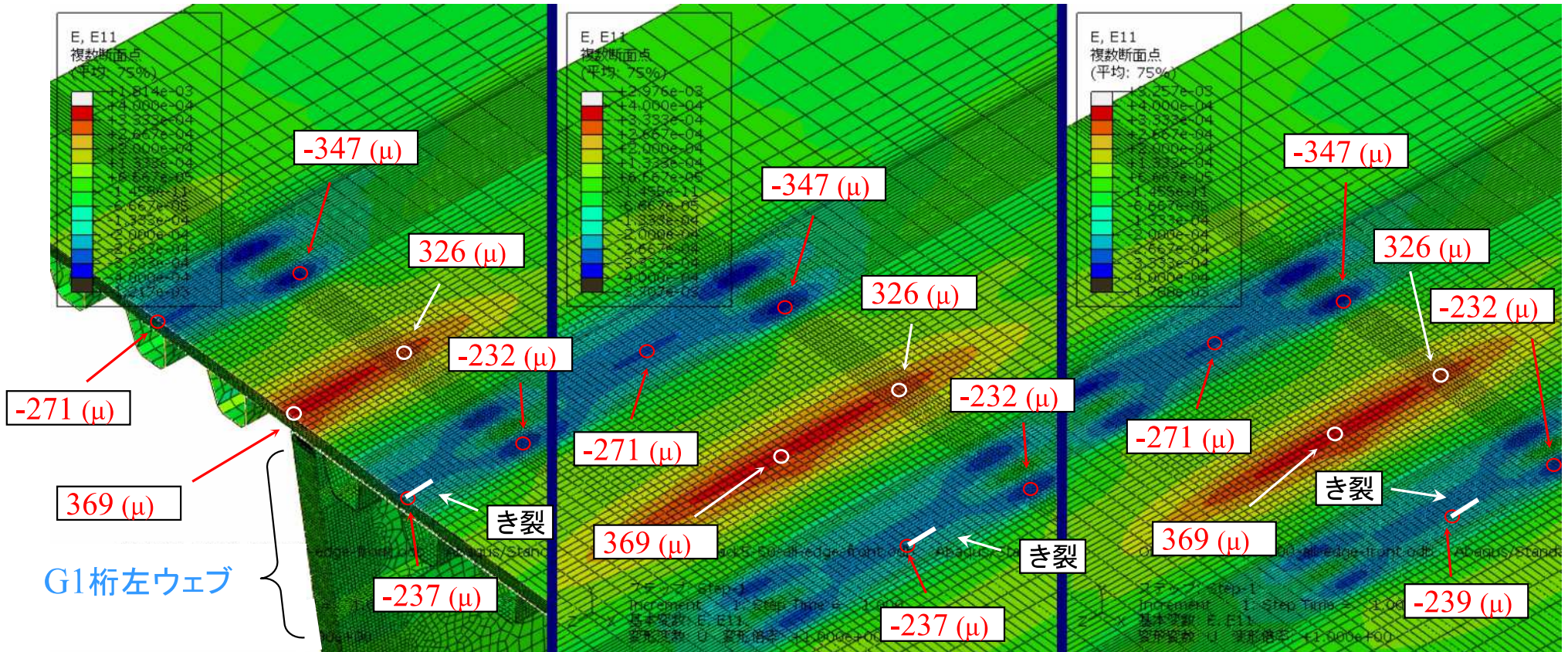
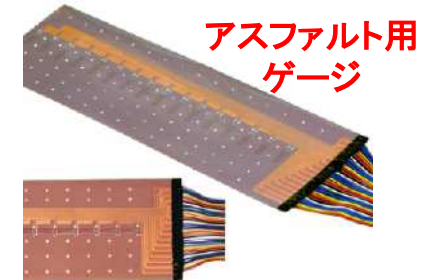
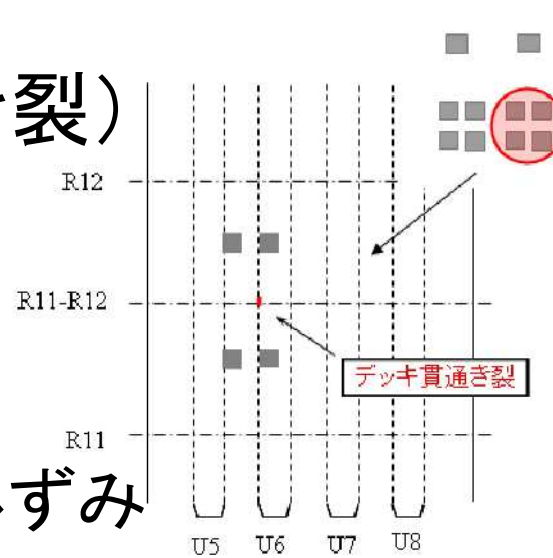


TYPE-A (土垂溝) TYPE-B (土垂溝) TYPE-C (溝) TYPE-D (溝)

→ 解析結果の例 (デッキ貫通き裂)



橋軸直角ひずみ



デッキ貫通 (100mm未貫通)

デッキ貫通 (50mm貫通)

デッキ貫通 (100mm貫通)

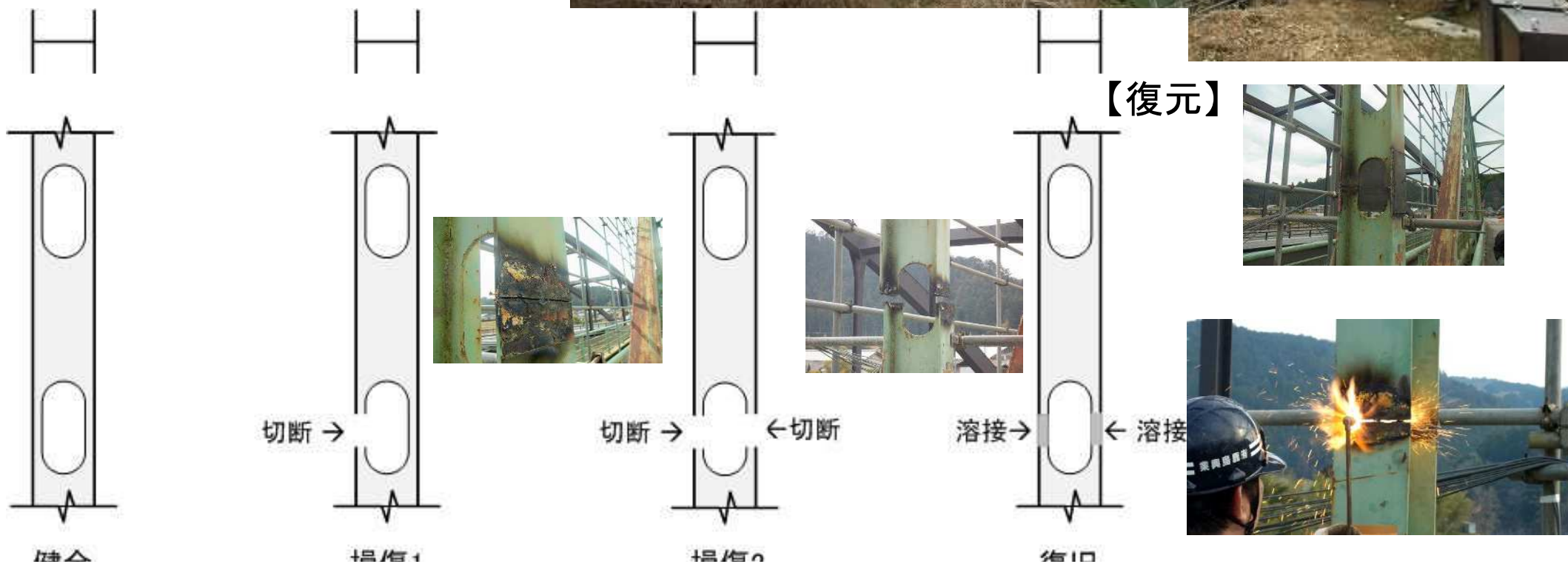
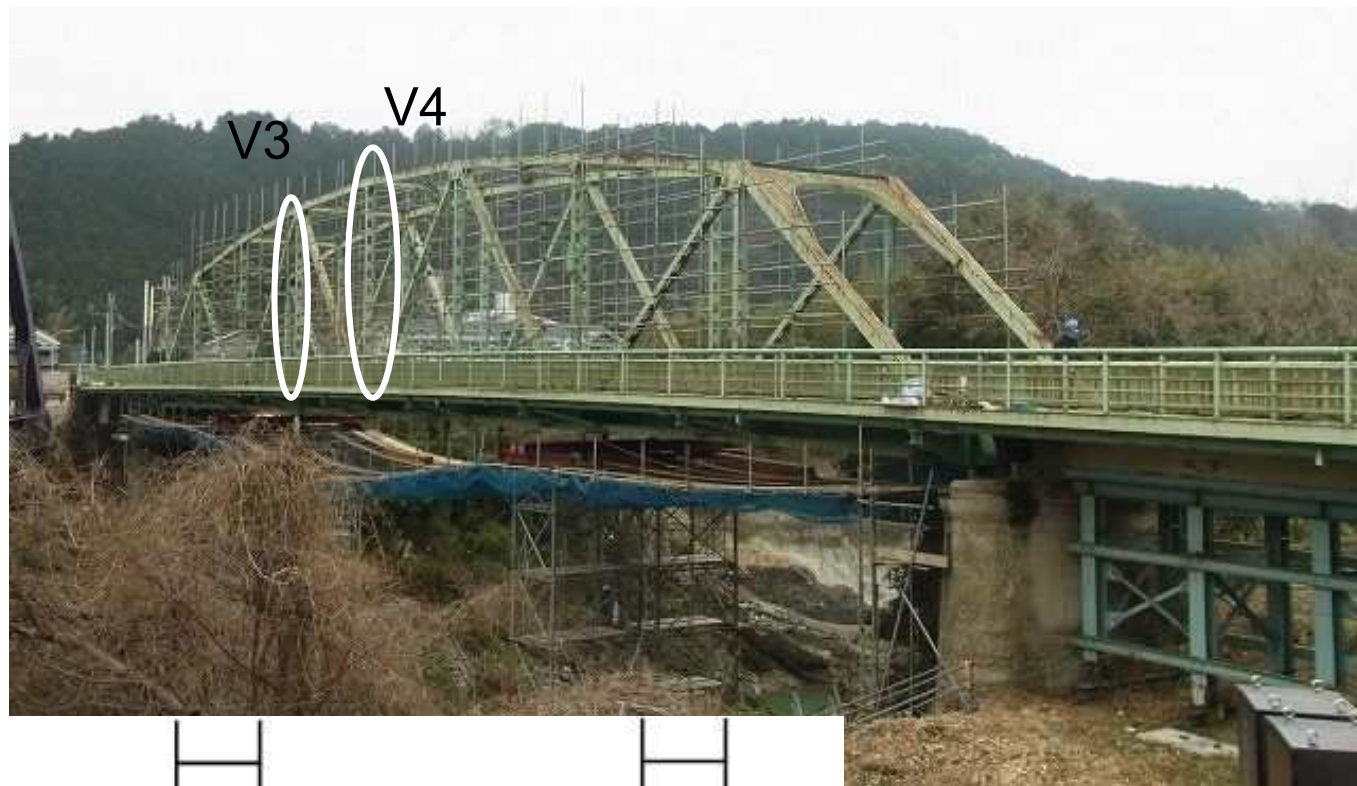
構造物の異常検知に向けての将来展望

- 通常の使用下での異常検知は、如何にノイズに埋もれない信号を扱うかが重要.
- 作用に対する応答値として、損傷との相関が高い応答を対象とする必要があり、その計測精度課題である.
- 健全度評価は、2段階(スクリーニングと詳細評価)が必要で、日常的なモニタリングでは、トレンドを評価する必要. 変化があれば、損傷レベルを把握するために、やはり近接による確認が不可欠.
- 維持管理を進める上で、多くの手順の機械化が、高齢化社会、担い手不足の将来における理想像？

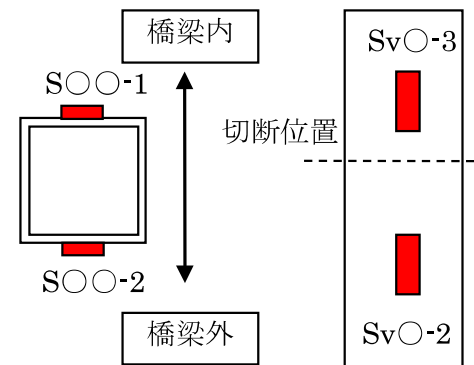
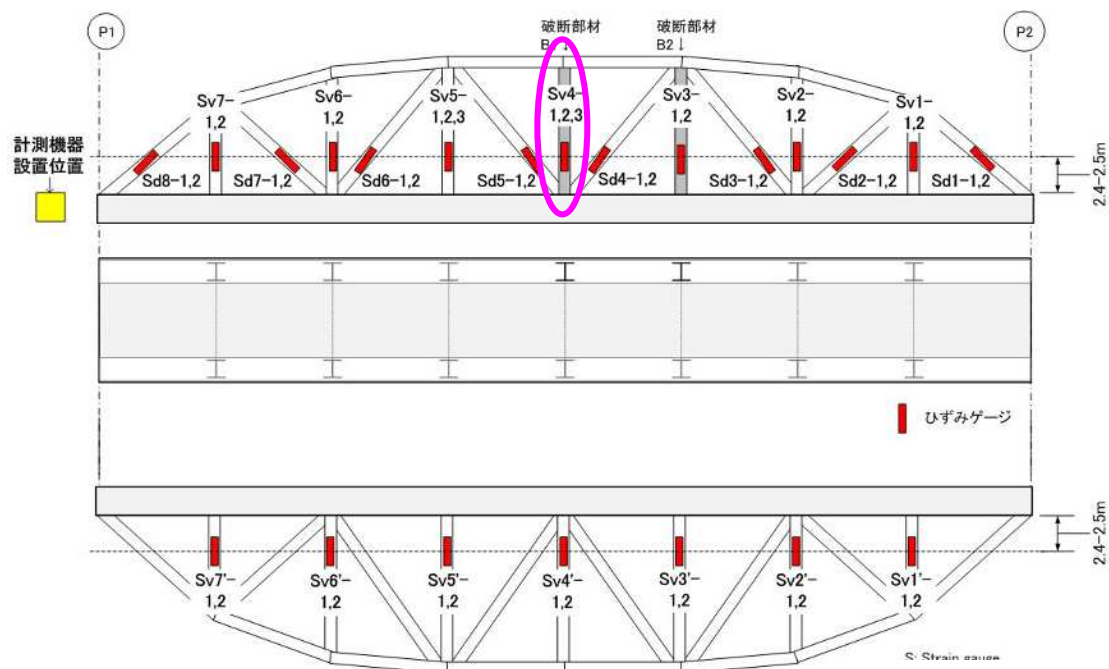


学术论文の査読で経験を積もう！

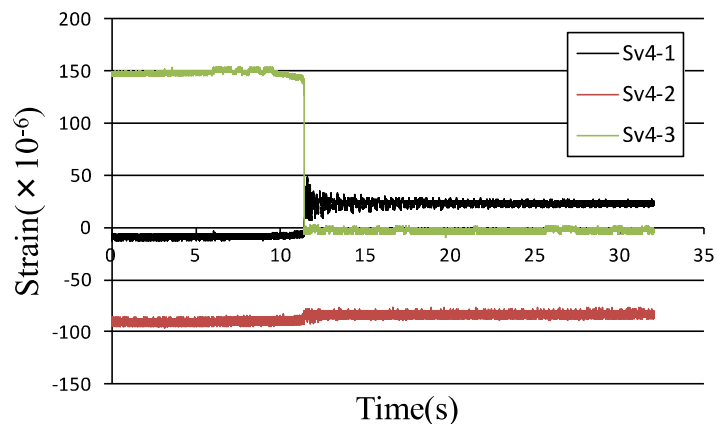
- 形式: 単純鋼トラス(下路式)
- 建設: 昭和34年(1959年)
- 最大支間長: 59.2m
- 幅員: 3.6m(1車線)



ひずみゲージによってトラス部材の動的応答を計測!



ひずみゲージ貼付位置



ひずみ-時間関係(Sv4-1,2,3)

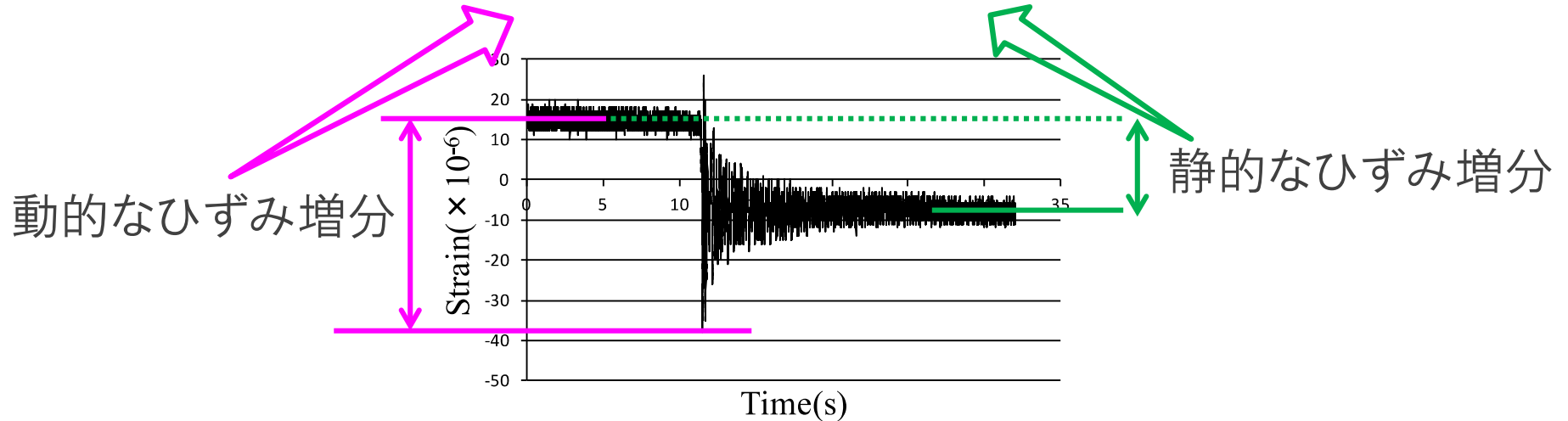
- 部材破断直後に衝撃を伴う大きなひずみ変化が生じた。

部材破断時の衝撃係数を算定してみたら、...

➤ 衝撃係数 $I_i = \frac{|\sigma_{idm} - \sigma_{is}^{(0)}|}{|\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)}|}$

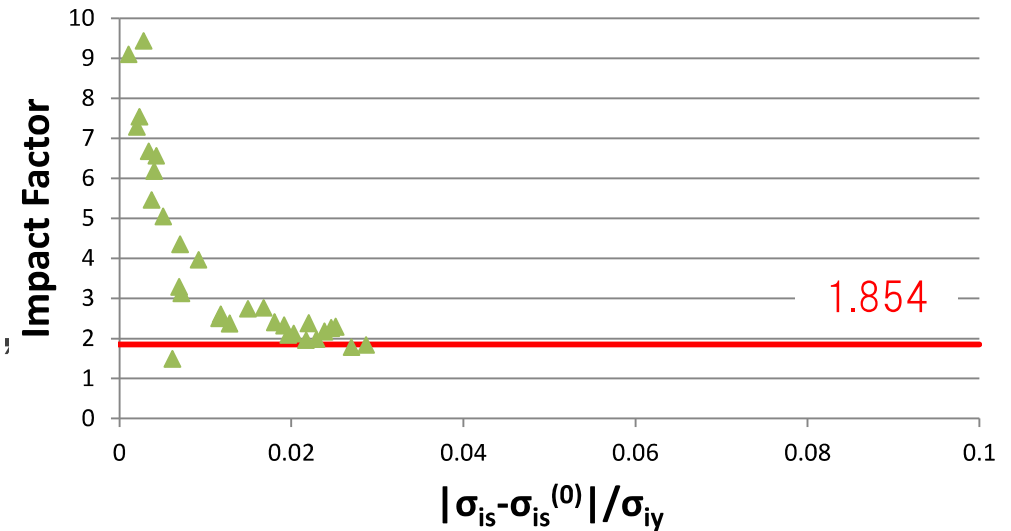
動的応力増分

静的応力増分



➤ 結果

- 静的応力増分が小さいほど衝撃係数は大きな値
- 静的応力増分が大きくなるにつれ、衝撃係数はある一定値に収束していく



既設鋼トラス橋の部材破断による衝撃係数および応力再分配の**実測**

Measurement of impact coefficient and stress redistribution due to fracture of members of the existing steel truss bridge

橋本国太郎*, 中村衣里**, 杉浦邦征***

Kunitaro Hashimoto, Eri Nakamura, Kunitomo Sugiura

*博士(工学), 京都大学大学院助教, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

**京都大学大学院, 工学研究科社会基盤工学専攻修士課程1回生 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

***Ph.D., 京都大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

In this study, to show the impact coefficient and stress redistribution of steel truss bridges when truss members of the bridges fracture, a field test used existing steel truss bridge was conducted. To measure the dynamic force responses of the members in the fracture test, the dynamic strains of the members were measured by dynamic data loggers. The truss members which were a middle vertical member and a neighbor vertical member of the bridge were cut off by gas cutter. The result of the field test showed the actual value of impact coefficient and stress redistribution due to fracture of the truss members.

Key Words: steel truss bridge, redundancy, fracture of members, impact coefficient, stress redistribution

キーワード: 鋼トラス橋, リダンダンシー, 部材破断, 衝撃係数, 応力再分配

後藤芳顕, 川西直樹,
本多一成: リダンダン
シー解析における鋼ト
ラス橋の引張り斜材破
断時の衝撃係数, 構
造工学論文集 A,
Vol.56, pp.792-805,
2010.3.



**既存の報告を参考に,
解析的検討へ!**

橋本 国太郎 殿

土木学会論文集編集委員会

投稿頂いた原稿は、返却が決定いたしましたのでお知らせいたします。

論文番号: A1-0279

タイトル: 鋼トラス橋の部材破断時に生じる衝撃係数に関する一考察

以下は編集小委員会からの返却文です。

橋本国太郎 殿

中村衣里 殿

茅野牧夫 殿

杉浦邦征 殿

公益社団法人 土木学会
論文集A1分冊編集小委員会
委員長 山口 栄輝

投稿原稿の御返却について

拝啓 時下益々ご清祥の段、お喜び申し上げます。

さて、先般ご投稿頂きました貴殿の原稿は慎重な審査を行い、当委員会にて検討協議を重ねました結果、論文集掲載は下記の理由により不相当との結論に至りました。ここに、日頃のご協力に感謝しつつ原稿を返却申し上げます。

なお、登載不可と決定された主たる理由は下記の通りです。

敬具

記

論文番号: A1-0279

論文名: 鋼トラス橋の部材破断時に生じる衝撃係数に関する一考察

<返却理由>

本論文では、表題のテーマに関して FEM による検討が行われ、貴重な検討結果が含まれているとは思われます。しかしながら、実験結果と解析結果には隔たりがあり、解析結果の有効性の検証が必ずしも十分ではないと判断されます。そのため、有用性、完成度の観点から、論文として登載するレベルには達しているとは判断されず、このような査読結果となりました。

以上

なお、このメールはシステムにより自動発信されています。直接返信されてもお答えできません。

お問い合わせは下記窓口まで、メールまたはお電話でお願いします。

問い合わせ窓口: 土木学会研究事業課

(電話: 03-3355-3559、メール: edi@jsec.or.jp)

1回目の返却理由に基づき、『隔たり』に関する考察を加えて再投稿にもかかわらず...

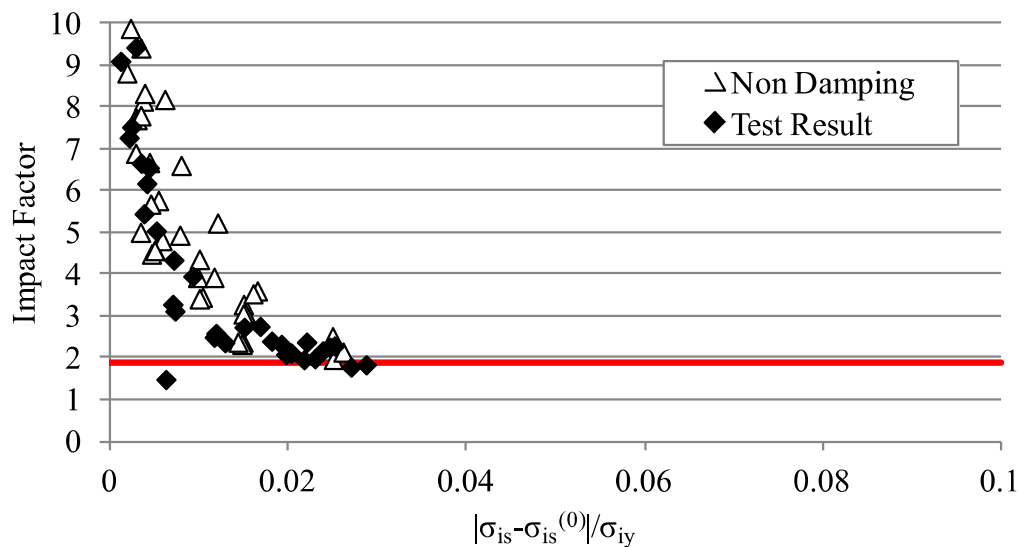


数値解析法の提案を主題とした論文は、実現象と比較されることなく掲載されることが多いが、実験結果と検証して不整合があると掲載不可になるのは如何か?

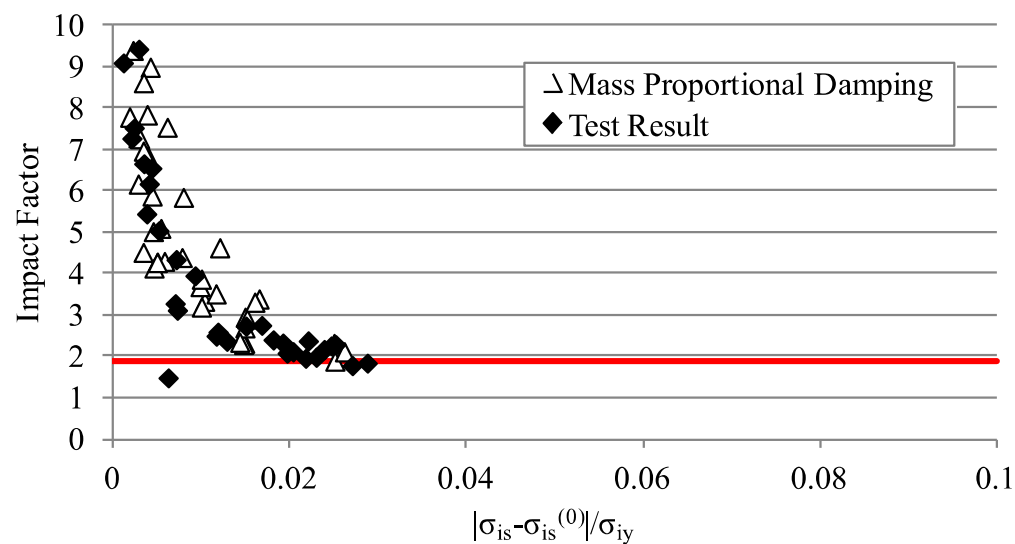
※ 解析法の発展のためには掲載して、読者に議論を促すべきではないか?

メール内容をwordファイルに変更した

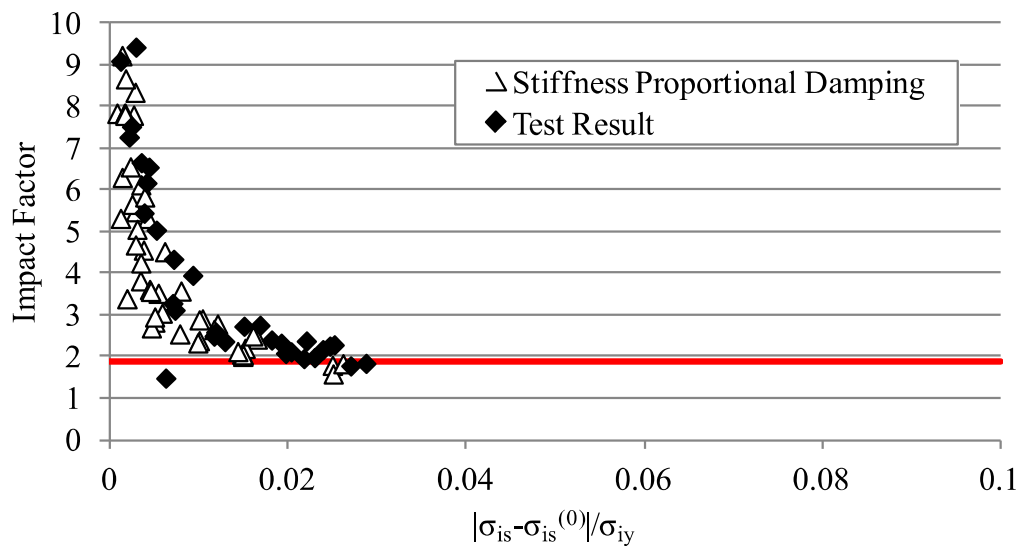
不一致? : 衝撃係数と静的応力変動との関係 (V4垂直材)



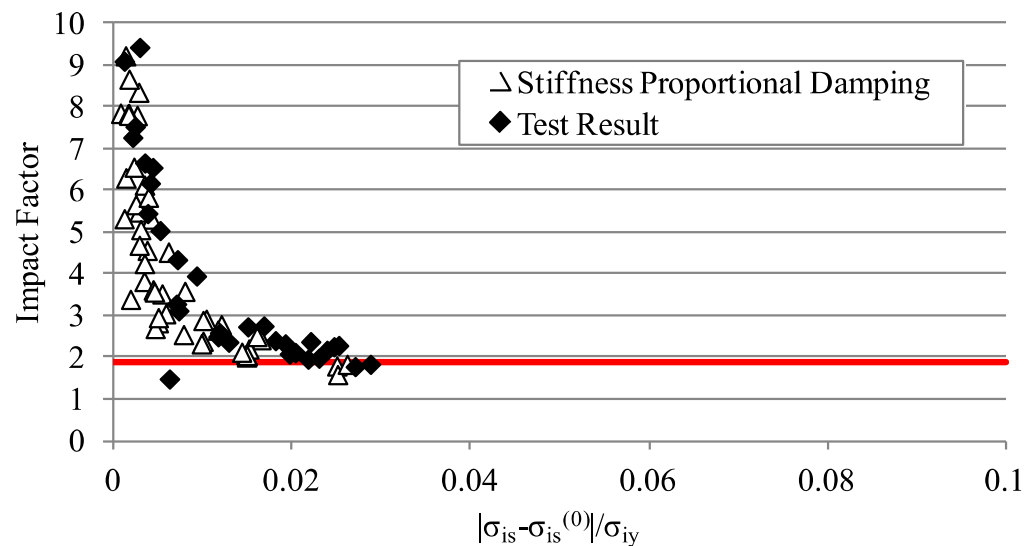
(a) 減衰無し



(b) 質量比例型減衰



(c) 剛性比例型減衰



(d) Rayleigh減衰

土木学会論文集に関する倫理基準

(2020. 1. 28・制定)

土木学会論文集編集委員会

— 一部抜粋 —

2. 査読者の義務

- * 査読者の役割は、学術出版の品質を維持するために論文掲載の可否を公正に判断することであり、以下の義務を果たさなければならない。
- * 査読依頼に対して、利益相反が生じる可能性がある場合、あるいは期限内に査読を完了することが不可能と見られる場合には、直ちに辞退しなければならない。
- * 査読は、著者の知的独立性を正当に尊重しつつ、原稿の品質とその真価に基づいて客観的かつ論理的に実施しなければならない。
- * 査読意見は、著者がその理由を理解できるよう、明確かつ論理的に記述する。査読者の主観的な意見や好みを主張したり、著者と見解を異にする点について修正を要求してはならない。
- * 査読者は、著者を個人的に批判してはならない。

私見: 著者の論文での主張が論理的に検証されているかを判断すべき！？
論文のレベルの高低ではない！？

“査読者が意見・主張をする場ではない“

大阪市立大学橋梁工学研究室同窓会主催 北田俊行先生退職記念特別講演会(平成21年5月9日)
『新旧交代と技術の伝承』より

人の活動の適齢期に関する私見

- 10未満(環境適応) 回りの助けの上での活動
- 10代(知恵の獲得) 興味のあることのみ
- 20代(知識の獲得) 無駄も含めて取り込む
- 30代(知識の実践) トライ&エラーで経験を積む
- 40代(経験の体系化) 個の確立 “平成21年当時”
- 50代(経験の布教) 経験の実践
- 60代(人生の評価) 自己評価? “現時点で妥当と思う?”
- 70代(社会の記録) 第三者的評価の実践
- 80代以降(人生の集大成) 自分史?



【今、読み始めました！】

→かつて、人生50年と言われていた時代では、

10代は、自分のことを考えよ、20代は、国(地域)のことを考えよ、30代は、日本国のことを考えよ、
40代は、世界の国々のことを考えよ！平均寿命80として、それぞれ16～、32～、48～、60～... かな



ご清聴ありがとうございます！



“還暦過ぎてもForensic”な思考はまだまだです。
皆さんも公の場で自信をもって発言できるよう多くの経験を！