

第 1 3 回 鋼構造技術継承講演会

「経験豊富な先人に学ぶ次世代への継承技術」

配布資料

2 0 2 5 年 1 2 月 1 6 日

土木学会 鋼構造委員会

土木学会鋼構造委員会主催「技術継承講演会」

2025.12.16(火) 於：土木学会 講堂

現象をどう表現するか — 仮定とモデル化の工夫 —

広島大学名誉教授
藤井 堅

豊島大橋

自己紹介

S50(1975). 3. 広島大学工学部土木工学科卒業
S52(1977). 3. 広島大学大学院工学研究科土木工学専攻修了
S52(1977). 4. 川田工業（株）技術本部
S54(1979). 4. 広島大学（工学部）
H29(2017). 3. 広島大学 退職
H29(2017). 4. 広島大学名誉教授，特任教授
H30(2018) インフラメンテナンス国民会議「ちゅうごく」フォーラムリーダー
R1(2019). 10. 広島大学名誉教授
現在に至る

資格：工学博士，技術士（建設部門）
専門分野：構造力学，橋梁工学，維持管理工学，鋼構造，複合構造

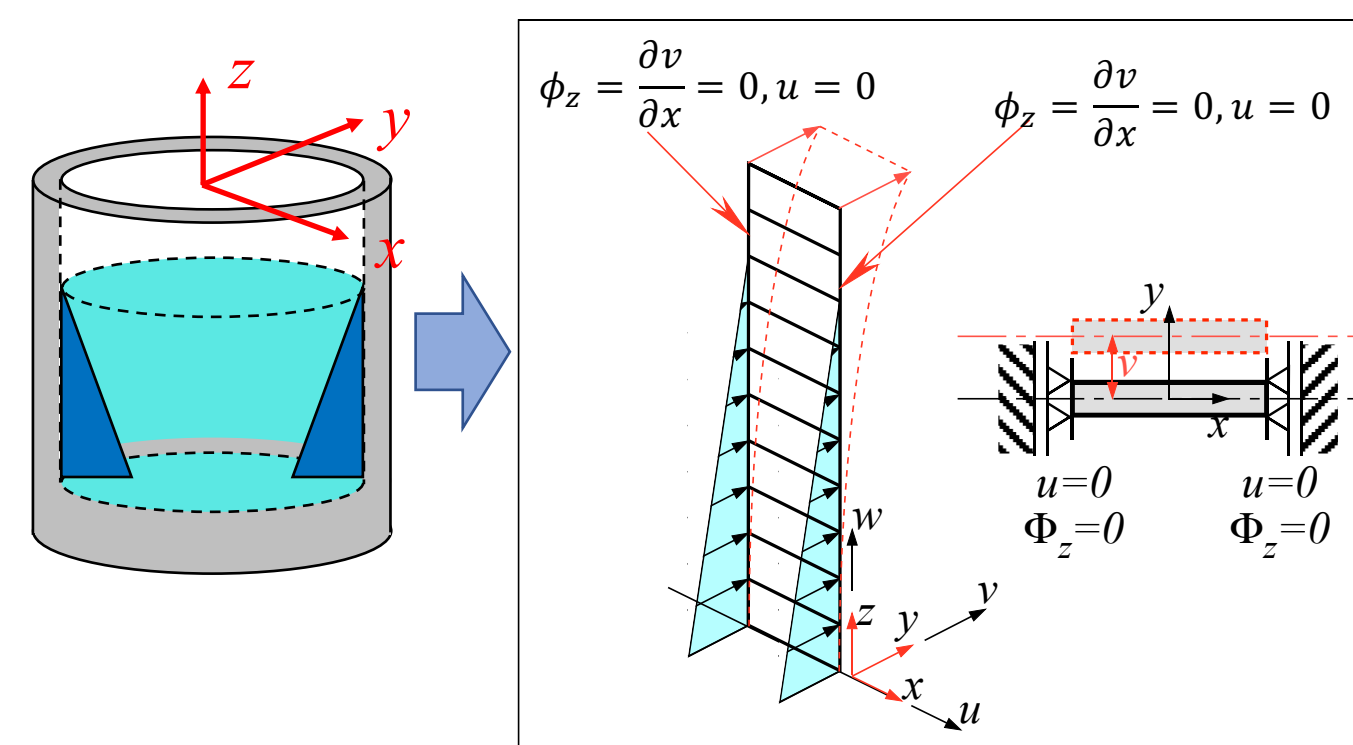
本日の講演内容

1. 構造工学における実現象と理論・解析
2. H型鋼のねじり実験
3. 曲線桁の有限要素解析と曲げ耐荷力評価
4. まくらぎ下が腐食した桁の残存曲げ耐荷力評価
(板の座屈強度評価式を適用した評価法)
5. 鋼構造物の腐食凹凸表面を再現する
6. 腐食表面生成モデルの将来予測への適用
7. 孔あき鋼板ジベル(PBL)のずれ耐荷力評価
8. 結言

モデル化と境界条件

円筒貯水槽の有限要素解析

問題：貯水槽に静水圧が作用している。RC貯水槽の壁体を設計せよ。



解析方針

- 汎用解析ソフトを用い，弾性FEM解析を行う。
- 水圧を受ける円筒シェル(軸対象問題)だから，対称性を考慮して壁体の一部を解析領域とする。
- 要素分割は，周方向に1分割，母線(z)方向に10分割とする。
- 荷重は，面外方向に内圧に相当する節点外力を与える
- 要素は，4節点6自由度のアイソパラメトリックシェル要素を使用する。
- 境界条件は，軸対称性から，左図のように与える。

さて，上記の解析結果は，正しいでしょうか？

円筒貯水槽の有限要素解析

正解を得るためには

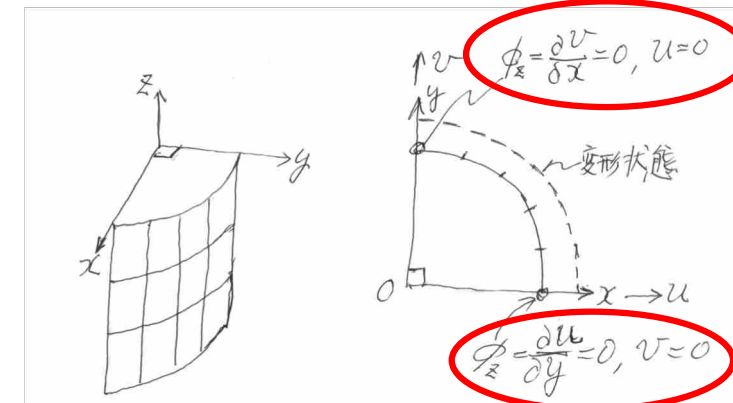
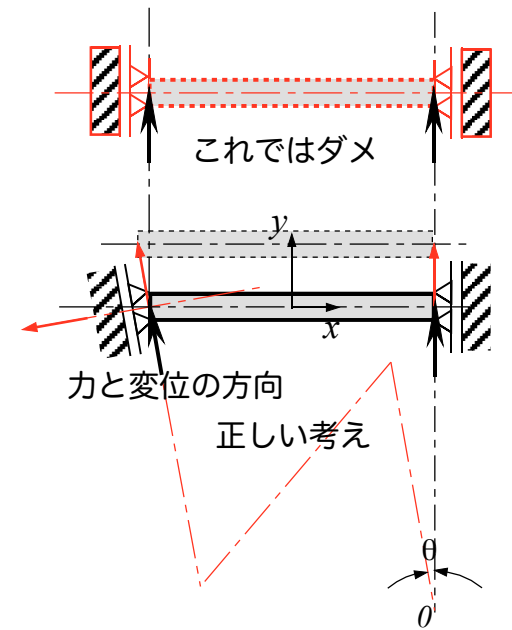
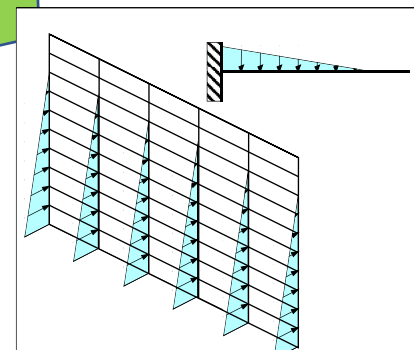
- 円筒座標系に基づく(曲率を考慮できる)シェル要素や円筒板要素などを用いる。このとき、**円筒座標系による荷重条件、境界条件**を与える。

あるいは

- 平板要素の場合、**曲率を考慮した境界条件**を与える。(右図のように境界条件を座標変換する)。これは結構めんどうなので・・・
- 周方向に1分割ではなく、**1/4円(半円やシェル全体でもよい)**を解析領域として要素分割する。

アイソパラメトリックシェル要素といっても周方向に1分割の場合、平板と同じになる場合がある(シェル要素というものの・・・)

- 解析は、
- 片持ちはりの解析
 - 円筒シェルの**周方向膜応力**を考慮できない



釈迦に説法ですが・・・正解を得るためには

- 作用力により構造物がどのように挙動するのかを知っている(**よく観察している・経験豊富**)、あるいは技術や知識を基に実際の挙動をほぼ**正しく推測**できる能力・知識が必要。
- 解析に当たって、構造物の何を求めたいのかを明確にして**解析手法を選択**する。例えば座屈荷重を求めるのであれば、座屈荷重等を求められる解法が必要。
- 実際(正解)に近い解を得るための、適する**座標系**、構造物の**モデル化**、**境界条件**の与え方、**解析理論**等を適正に選択できる能力が必要。

有限要素解析について

- 有限要素解析は強力な武器であるが、解析の特性・特徴や**要素の特性・適用範囲**をよく理解しておくことが必要。
- 解析領域や要素分割、線形・非線形の選択、**適する要素の選択**、ができる知識や能力が必要。

1. 構造工学における実現象と理論・解析

理論とは

科学研究において、個々の現象や事実を統一的に説明し、予測する力をもつ体系的知識。狭義には、明確に定義された概念を用いて定式化された法則や仮説を組み合わせることによって形作られた演繹的体系を指す

解析とは

物事を分析して理論的に明らかにすることにより、その本質を明らかにすること。分析。

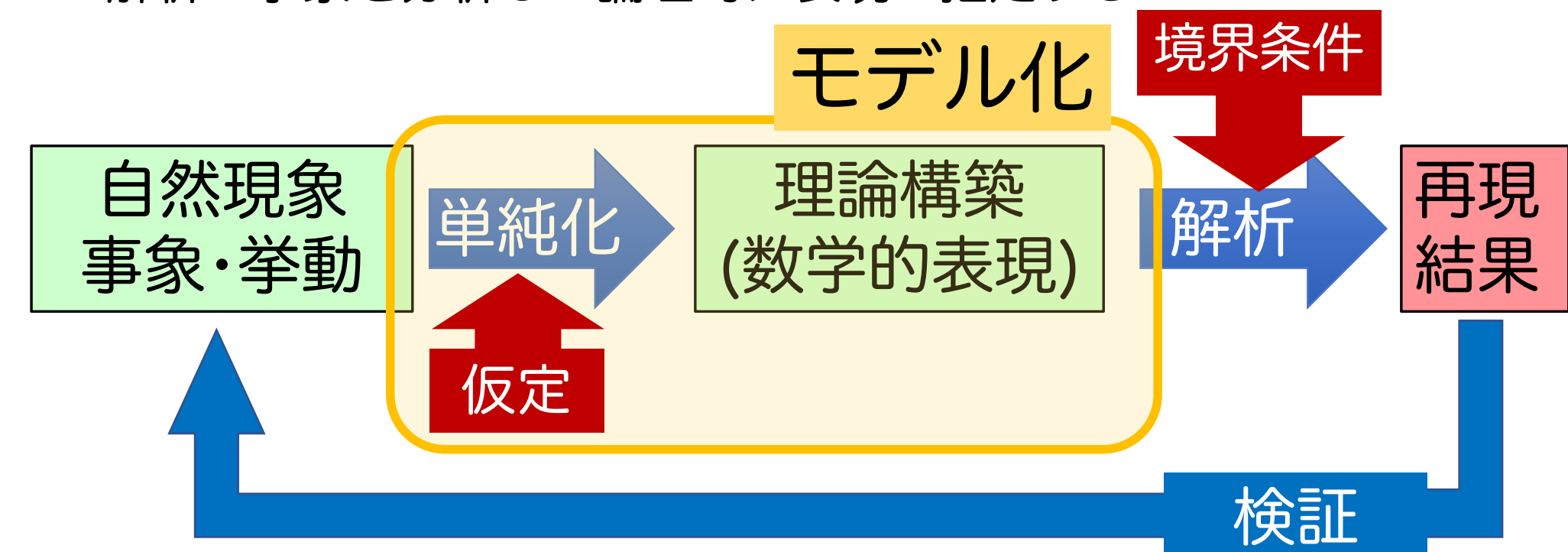
解析学：微分学・積分学から発展した数学の総称。

微分方程式等による数学的表現をもちいて解を得ること

現象の再現手順をまとめると・・・

理論：自然現象を統一的に表現する

解析：事象を分析して論理的に表現・推定する



事象は一つ！結果が合わなければ、仮定やモデル化、境界条件がおかしい！

問題は・・・

- 種々の解析結果が実現象に近ければ、その理論は正しいと判断して良い(と思われる)
- 必ず実現象(実験結果)とは異なる解析結果が現れる。その理由は？

実際上あるいは実験上の不備(初期不整の影響)

理論の導出や考えが不十分

仮定の不成立(適用範囲外)

解析モデルの不備(境界条件等の設定が実際と異なる等)

解析手法の限界(解析ソフトの能力)

解析ツールの限界(コンピュータの能力)

いまさらですが・・・「はり理論」

はり理論は実験結果(実現象)よりも正しいと思っていませんか？

平面保持の仮定
断面剛の仮定

理論：個々の現象を法則的かつ統一的に説明するために筋道を立てて組み立てられた知識の体系

モデル化：複雑な現実を単純化し、理解しやすくすること

仮定：複雑な現象を単純化するために現実とは異なる条件を設定する。本質的な部分を取り出し、それ以外の要素を省略して単純化し、模型や概念として表現すること

$$\text{支配方程式：} EI \frac{d^4 v}{dx^4} = w$$

$$\text{はりの直応力分布：} \sigma = \frac{M}{I} y$$

$$\text{はりのせん断応力：} \tau = \frac{VQ}{Ib}$$

力の釣り合い条件
変位の適合条件
材料の特性

$$???? : \tau = \frac{V}{A}$$

V: せん断力, A: ????

大学ではこんなせん断応力を習いませんでしたか？

個人的な意見(疑問)

- 種々の解析結果が、実現象に近い結果を与えるとしても・・・
理論(評価式など)は力学的に矛盾無く構築されているか
補正係数の意味を、力学的に説明できるか
適用範囲に矛盾はないか
(例えば鉄筋のある場合と無い場合の不整合)

要は説明を聞いて、
まわりが納得できるか？まわりを説得できるか？

ところで 大学で担当した講義科目は・・・

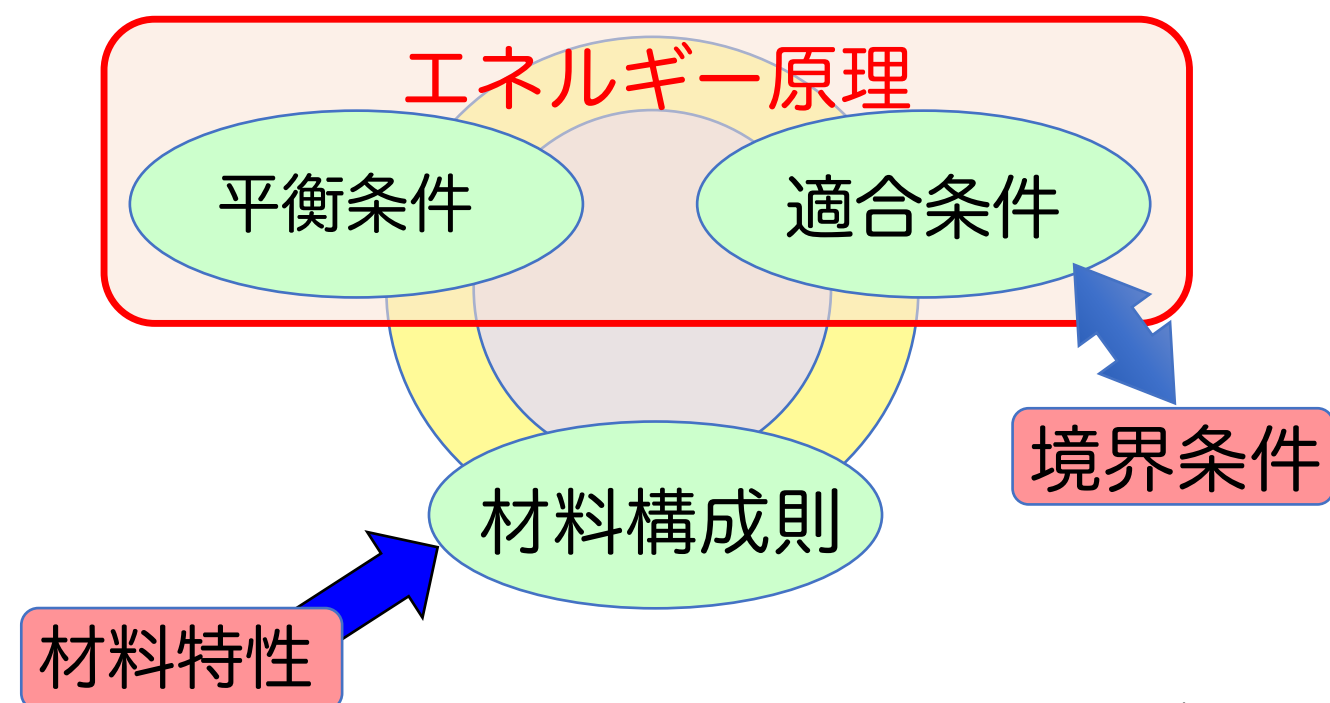
- 材料力学 (2年前期)
- 材料力学演習 (2年前期)
- 構造力学 (2年後期)
- 構造力学演習 (2年後期)
- エネルギー原理と構造解析 (構造解析学) (3年前期)
- その他
維持管理工学, 社会基盤環境工学実験, 社会基盤環境デザイン (橋梁設計)・・・
- 構造工学特論 (主にFEM) (M)
- 構造力学特論 (主に鋼構造) (M)

大学では、2～4年生の3年間をかけて
構造関係のほぼ全部の講義・演習を担当したが、学生が理解したかどうかは不明

大学(学部)の3年間で教えたことは 構造解析とは

12

平衡条件と適合条件を、材料特性を考慮して（境界条件を加えて）解く



長期間かけて教えたことは、たったこれだけ！
はりやトラス、板など形が変わっただけ

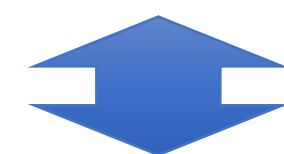
ついでに非線形解析

材料学的非線形（塑性，粘性）

- ・ 構造物を構成する材料の特性
- ・ 材料の構成則

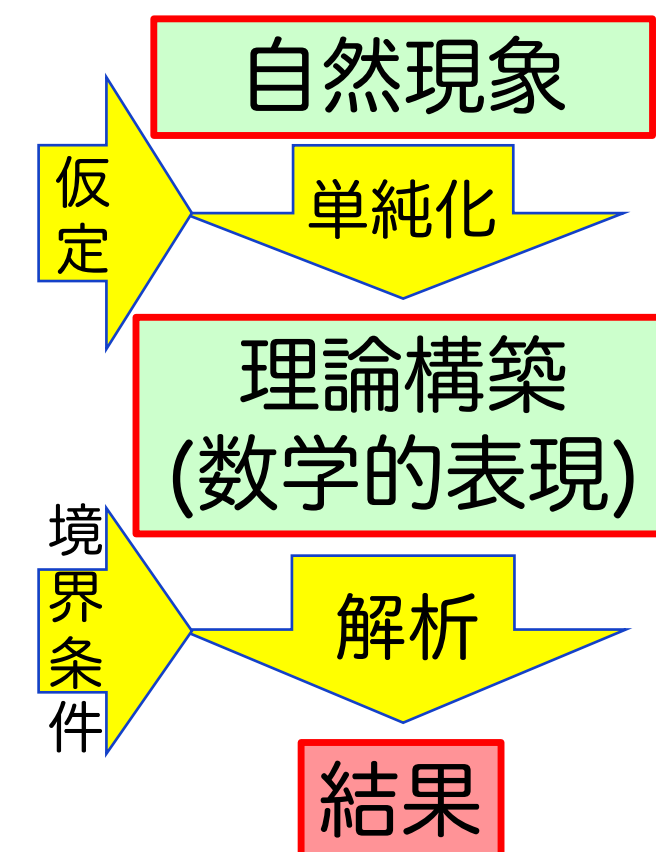
幾何学的非線形（大たわみ，有限変位）

- ・ 変形後の平衡方程式
- ・ 変形後の正確な適合条件



微小変位理論

- ・ 変形前の力の釣り合いと適合条件



材料構成則，有限変位理論なども
再現手順は同じ

2. H型鋼のねじり実験

14



H型鋼のねじり実験

<問題>

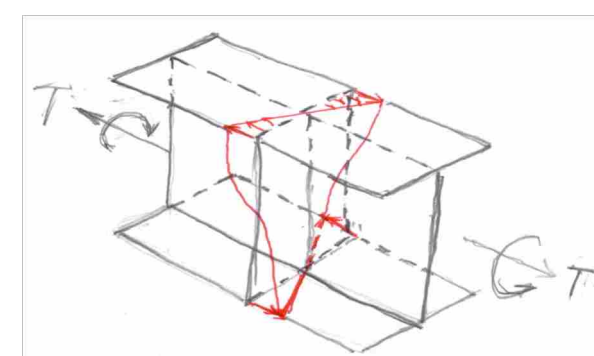
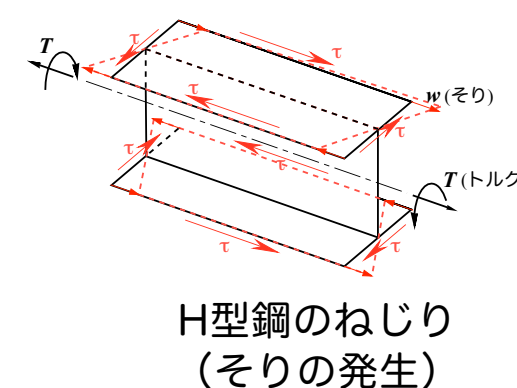
実験条件

- ・ 供試体の中間には複数の垂直補剛材を配置している(上下フランジと溶接されている)
- ・ 供試体の1端のねじり角を止め，他端にトルク T を与える
- ・ 両端のそりは自由（そり拘束なし）

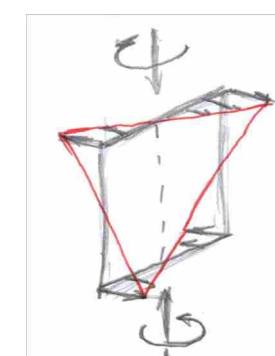
このとき，H型鋼の両端の相対ねじれ角 θ はいくらか？

補剛材を持つH型鋼のねじり挙動

15



モデル化(ねじりユニット)



補剛材の変形

垂直補剛材のモデル化

垂直補剛材の挙動

- ・ H型鋼の両端は反り自由なので，反りが発生する
- ・ H型鋼の反り(フランジの軸方向変位)によって，補剛材はねじられる
- ・ その結果，補剛材はH型鋼の反りに抵抗するので，H型鋼は反りねじれ状態となる(補剛材は見かけ上ねじりバネのような効果を発揮する)

すみません!!H型鋼に作用するトルク T の向きが逆です

2. H型鋼のねじり挙動解析(モデル化)

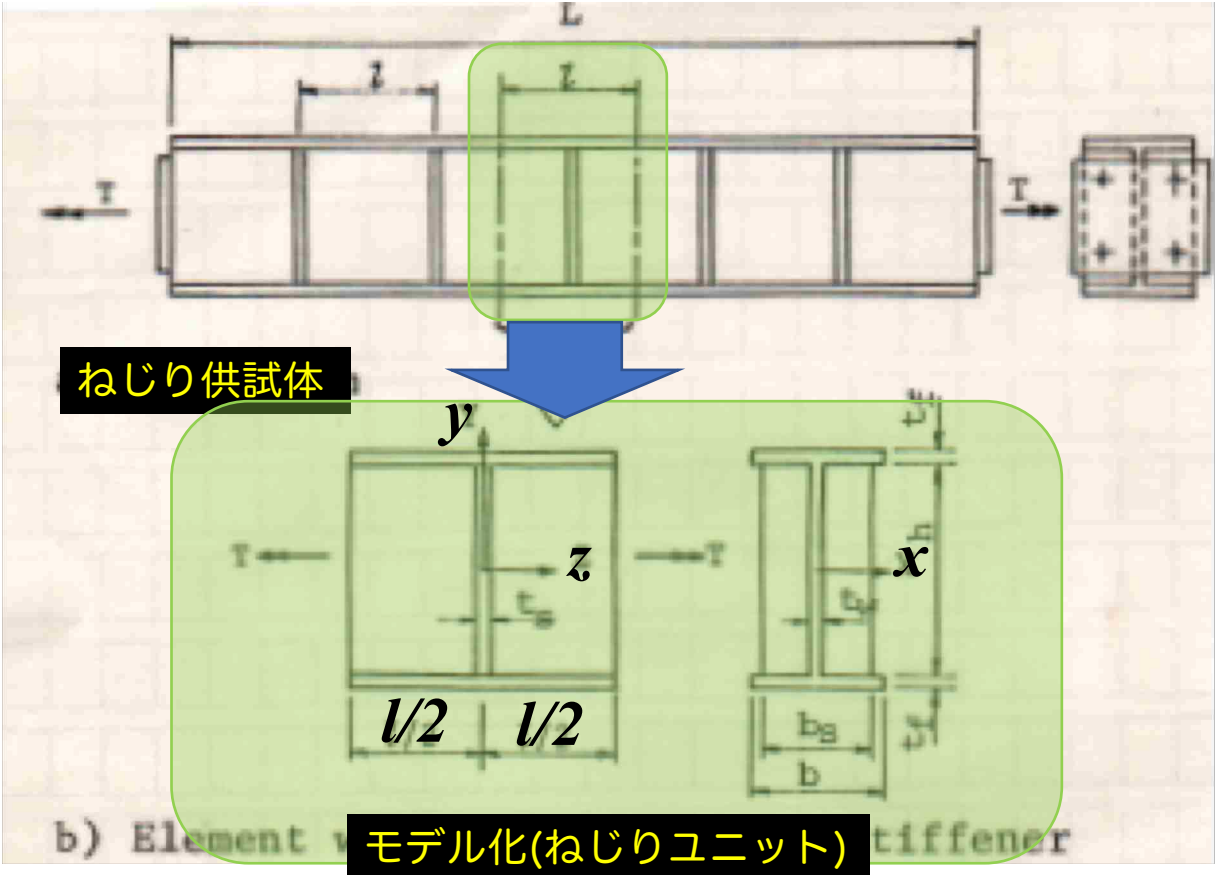
- 1. 補剛材の反り抵抗は無視して、次式で評価する.
$$\theta = \frac{Tl}{GJ}$$
ここに、 l :H型鋼の長さ、 G :せん断弾性係数、 J :St. Venantのねじり定数
- 2. 補剛材の反り抵抗を考慮した解析の方がより正確なので、反り抵抗を考慮する.
 - 2-1) アイソパラメトリックシェル要素を用いた有限要素立体解析：耐荷力も求めたいので、降伏後の材料非線形性を考慮する？
 - 2-2) アイソパラメトリックシェル要素を用いた有限要素立体解析：耐荷力を求めるために、材料非線形のほかに幾何学的非線形性を考慮する.
 - 2-3) 有限要素解析は時間がかかるので、単純なモデルを用いて弾性域でのねじり角を近似的に求める.

・・・等々・・・

皆さんはどんな方法で解きますか？

Proc. of JSCE Struct.& Earthq. Eng. Vol.2, No.1,1985.4.

2-3) 簡単なモデル化(ねじりユニット)



H型鋼の両端の相対ねじれ角 θ は、両端は反り自由であるから、左図に示すねじりユニットの相対ねじれ角を $\Delta\theta$ を用いて、

$$\theta = n \Delta\theta$$

で表されとする.

ここに、

n はH型鋼のねじりユニットの数(垂直補剛材の数)

ねじりユニットの相対ねじれ角 $\Delta\theta$

ねじりユニットの境界条件

$$\begin{aligned} \theta &= 0, & \text{at } z &= 0 \\ \theta'' &= 0, & \text{at } z &= \frac{l}{2}, \quad z = -\frac{l}{2} \end{aligned}$$

反りねじりの支配方程式

$$-EC_w \theta''' + GJ \theta' = T$$

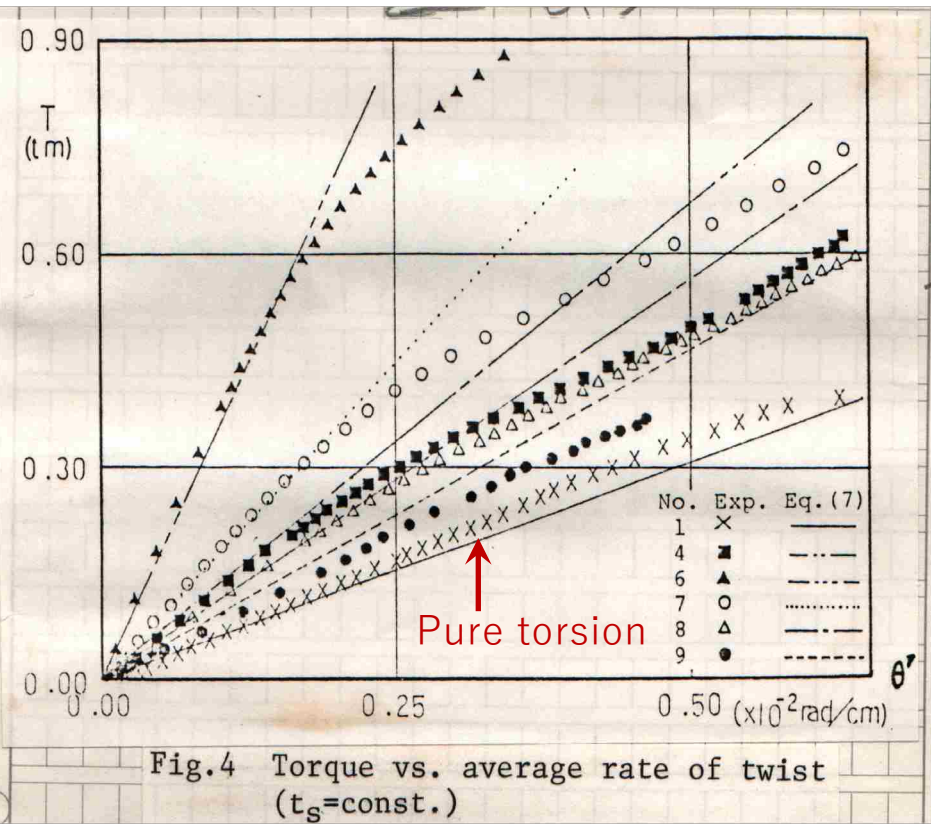
EC_w : 反りねじり剛度, GJ : ねじり剛度

ユニットの相対ねじれ角 $\Delta\theta$

$$\Delta\theta = \frac{Tl}{GJ} \left\{ 1 - \frac{2}{2\chi R + \chi \coth(\chi/2)} \right\}$$

$$\chi = l \sqrt{GJ/EC_w} \quad R = \sqrt{GJEC_w}/k$$

ねじりを受けるH型鋼の実験結果

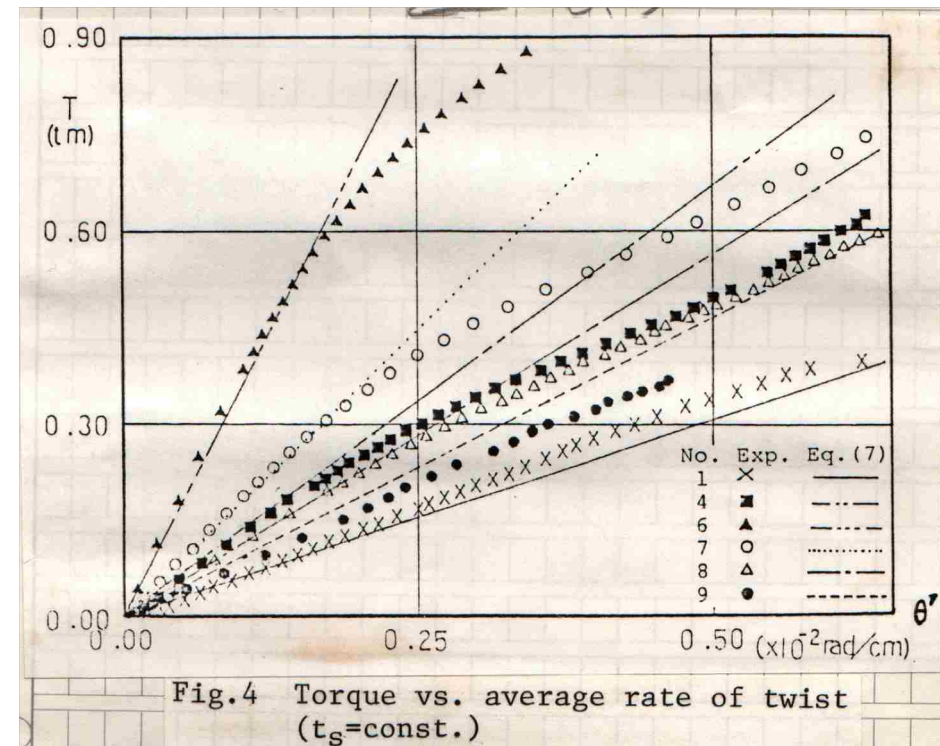


トルク-ねじれ率曲線

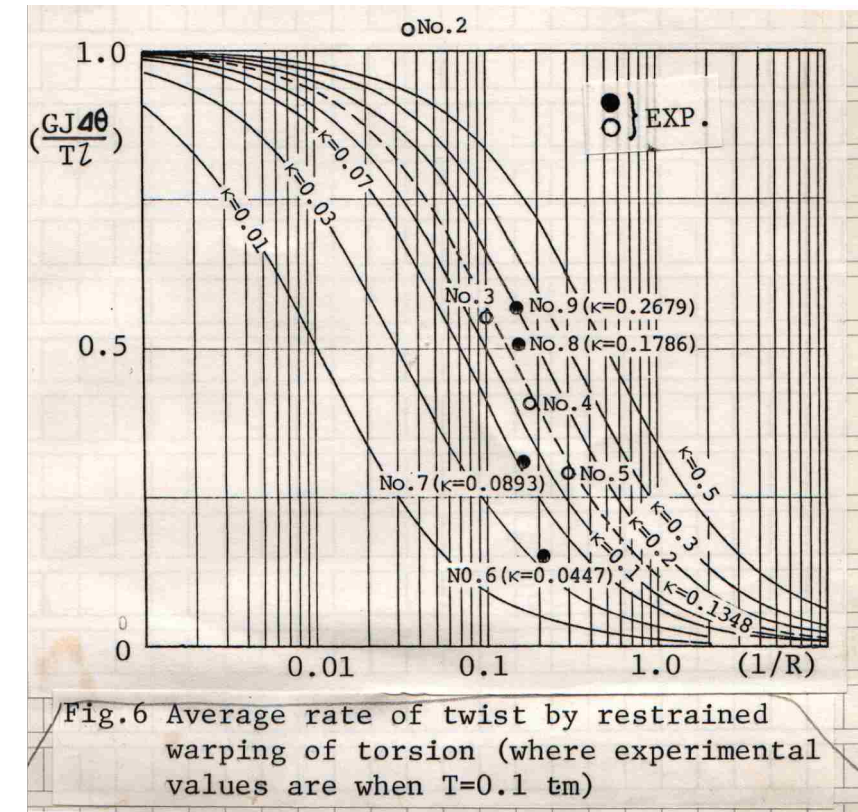
- 垂直補剛材が密に配置される(補剛材枚数が多い)ほど、見かけのねじり剛性が大きくなる
- 補剛材板厚が厚いほど見かけのねじり剛性が大きくなる
- 補剛材の反り抵抗は無視できない(上下フランジと溶接しているのが条件)
- ねじり剛性は、供試体降伏後もほぼ一定のねじり剛性を保つ(耐荷力は減少しない)

➡ 大ねじり問題

実験結果と解析結果の比較

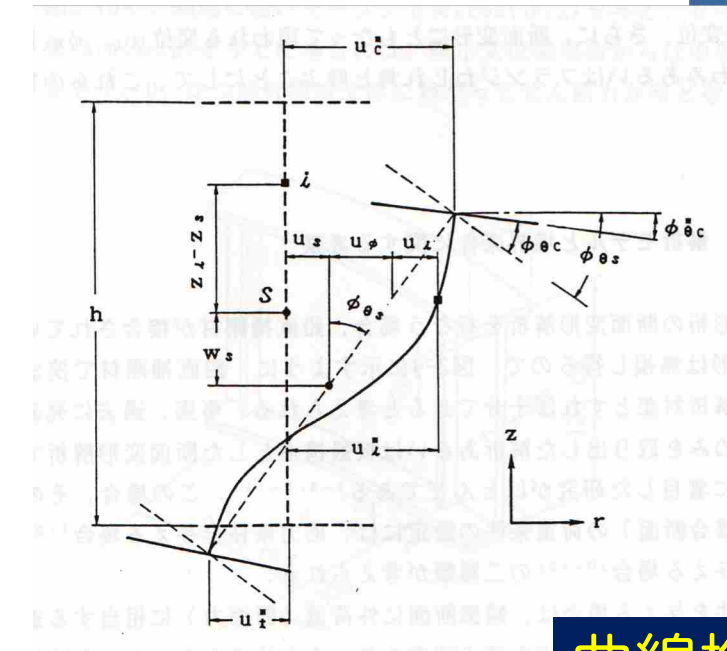


トルク-ねじれ率曲線



そりを考慮したねじれ率

3. 曲線桁の有限要素解析と曲げ耐荷力評価



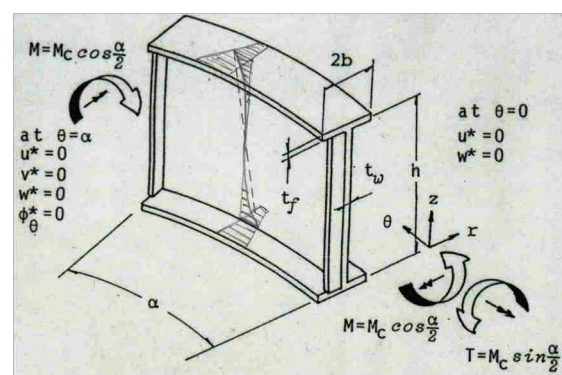
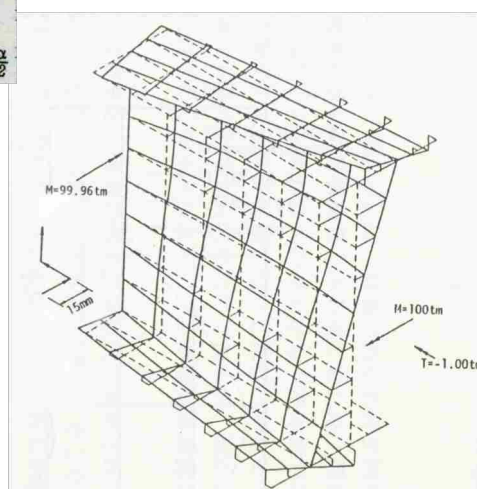
断面の変形

曲線桁の特徴

- ・ 曲げとねじれが連成
- ・ 大きな断面変形を発生



曲線桁の有限要素解析

解析モデル
扇板と曲面板の立体解析要素分割と解析結果
(桁の変形状態)

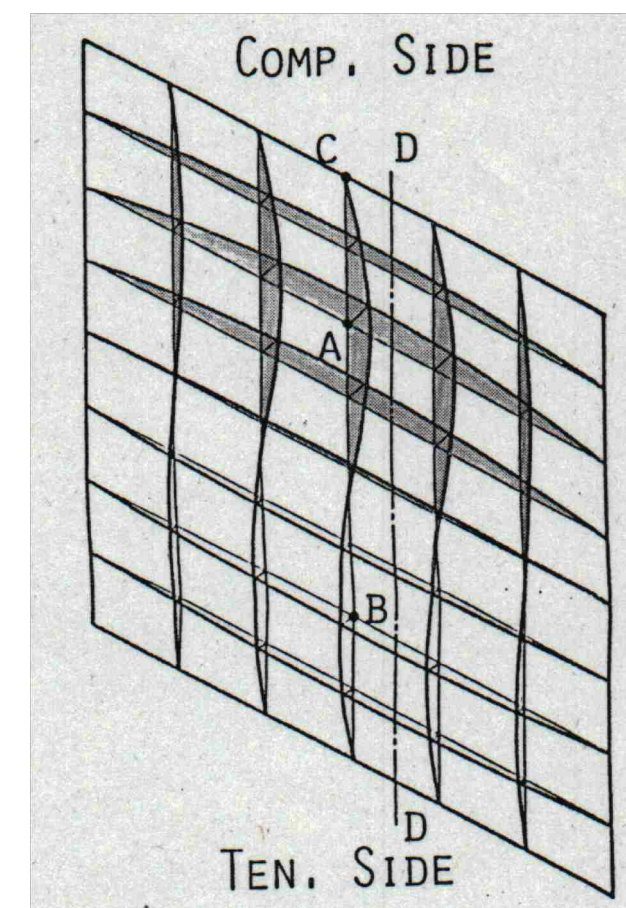
目的

曲げを受ける曲線プレートガーダーの断面変形を調べたい。
そのためには、はり理論は適用できない。

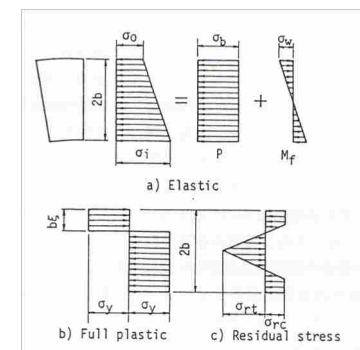
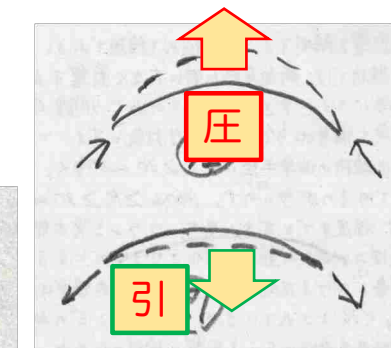
モデル化と解析方針

- ・ 垂直補剛材で挟まれた1区間を解析対象とし、両端に曲げモーメントを作用させる。
- ・ フランジを扇形板、ウェブを曲面板とみなし、桁を板シェル構造とみなす。
- ・ 1接点6自由度の、扇形板要素と曲板要素からなる折板構造として、有限要素解析を行う。
- ・ 幾何学的非線形性が強く現れるため、有限変位解析とする。
- ・ 塑性(材料学的非線形性)は考慮しない

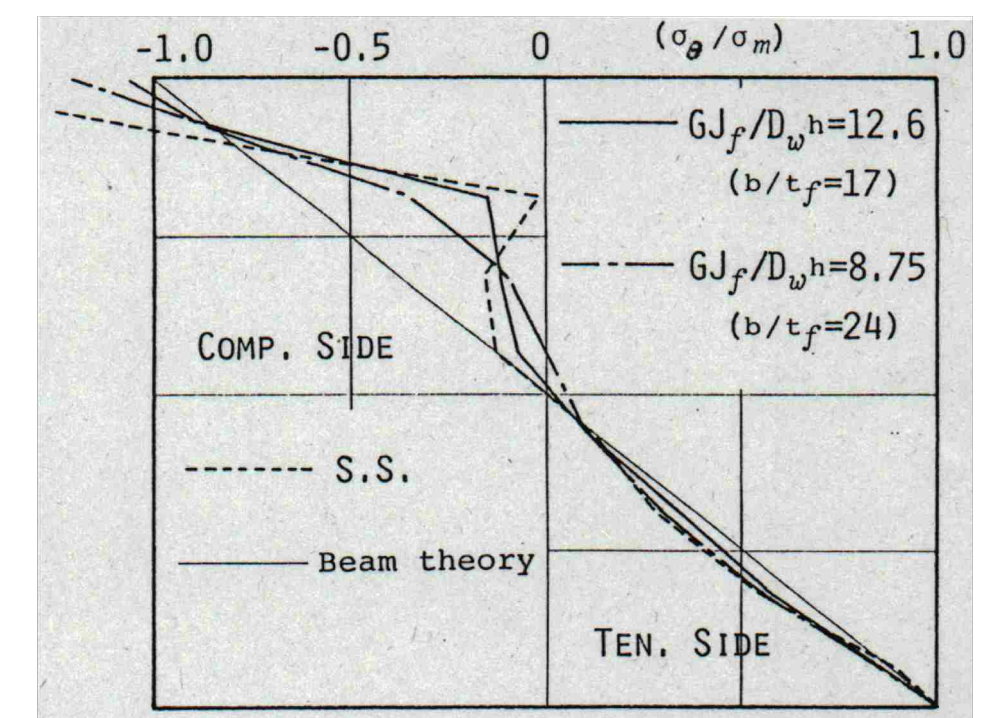
解析結果



ウェブの変形

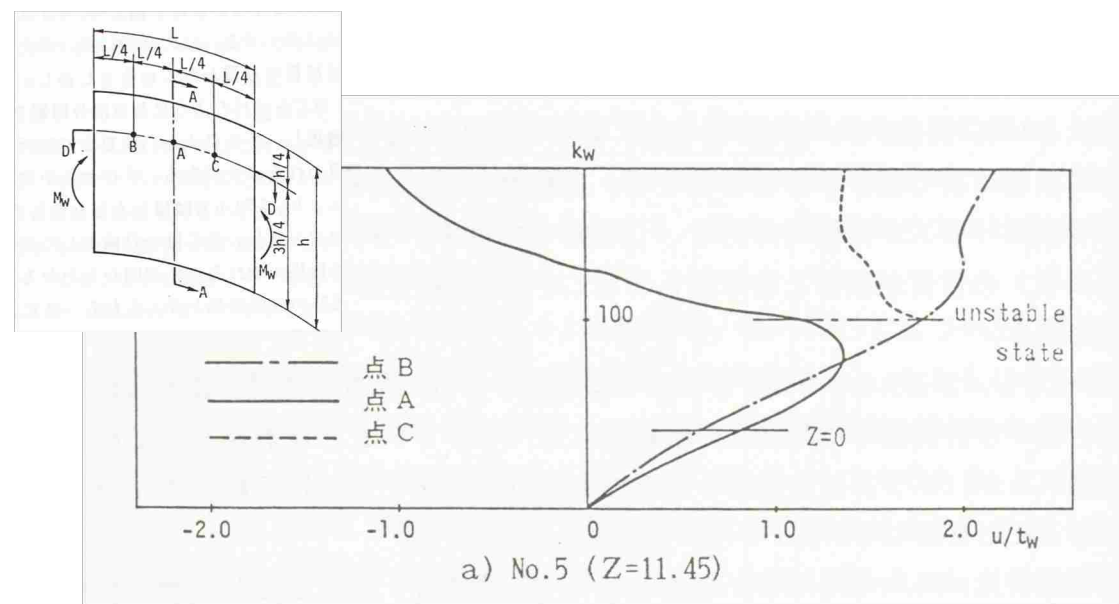


フランジの軸応力



ウェブの曲げ応力 (週方向)

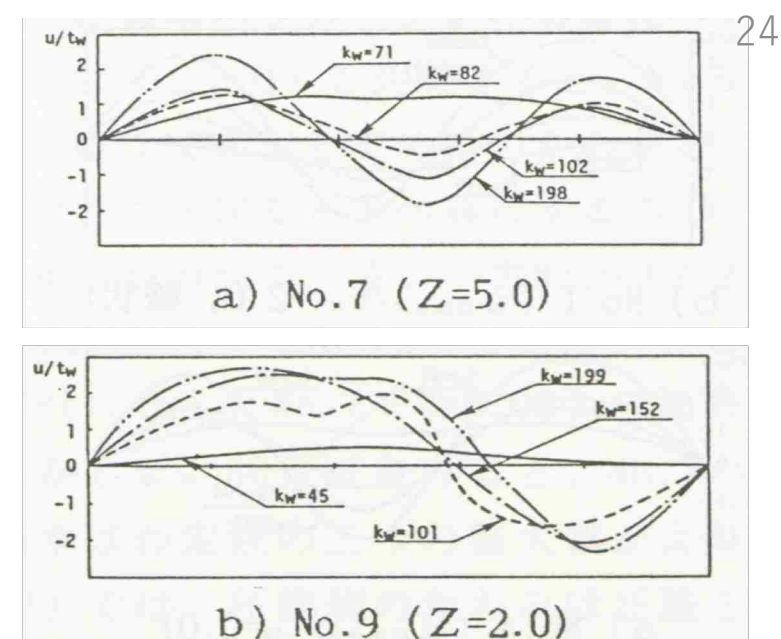
曲線桁ウェブの断面変形挙動



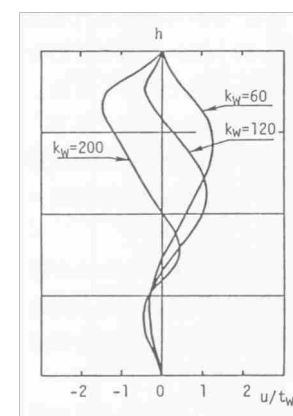
荷重増加に連れてウェブは、**複雑な非線形挙動**を呈する
ウェブ圧縮側の面外たわみは、周方向に

1次 ➡ 2次 ➡ 3次
と高次モードに移行する ➡ **後座屈後座屈**

中央での対称条件は崩れます!!

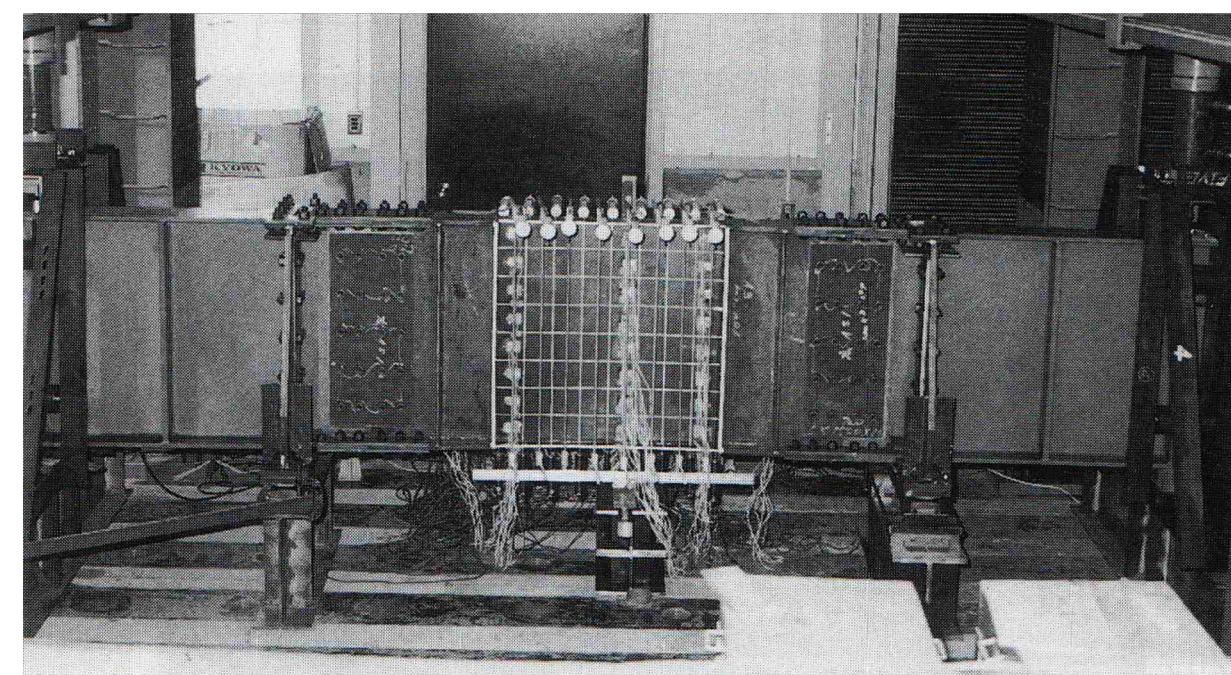


たわみの周方向分布 D-D line



たわみの高さ方向分布 (中央断面)

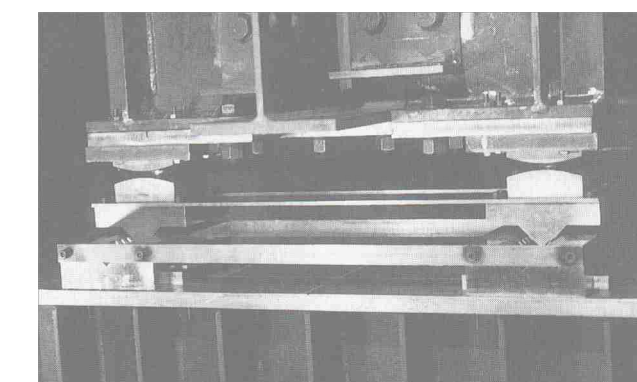
曲線桁の曲げ耐荷力実験



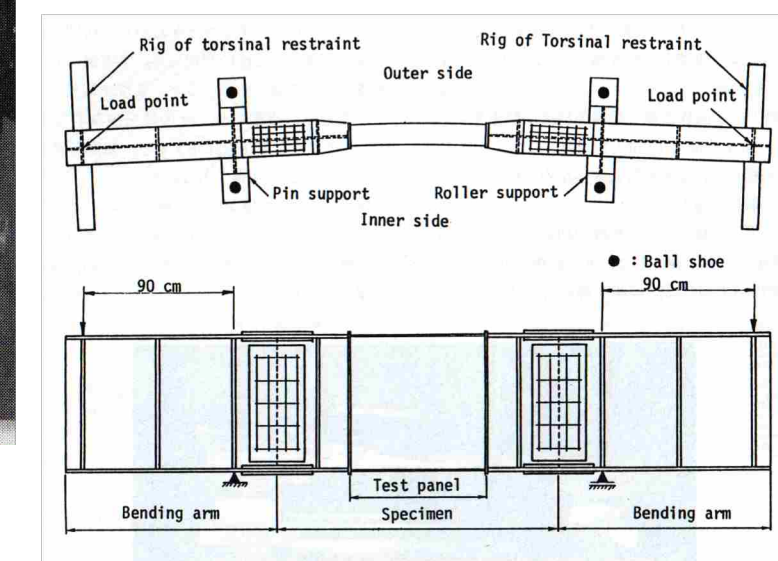
載荷風景

構造工学論文集, Vol.36.A, 1990.3.

境界条件設定のための工夫

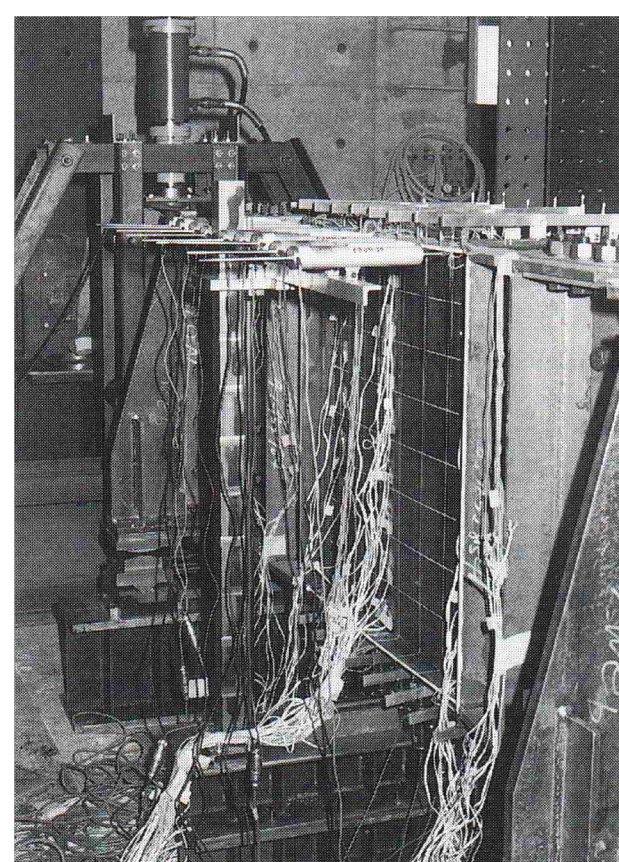


Roller Support
(移動シュー)



載荷概要

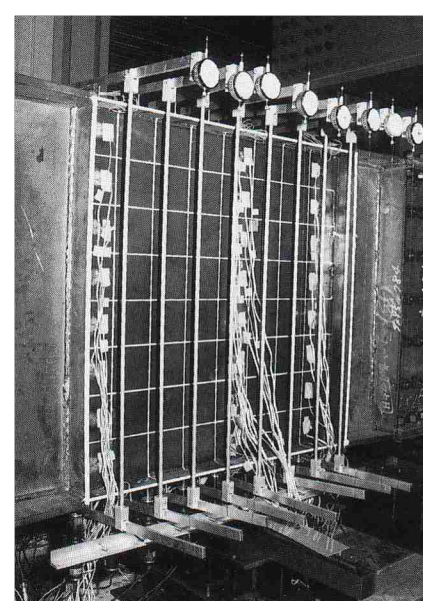
曲線桁の曲げ耐荷力実験 (計測法の工夫)



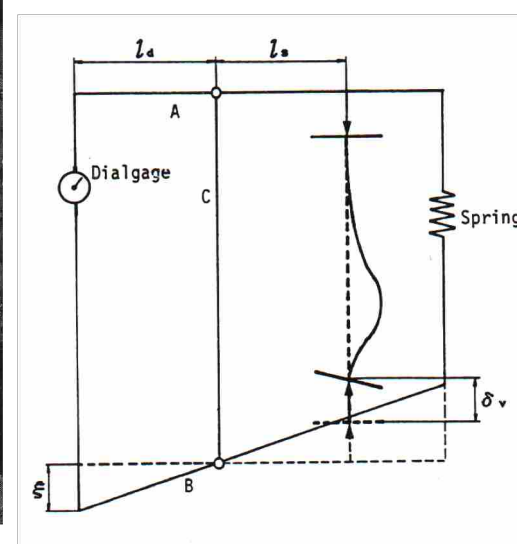
ウェブの面外たわみ計測
多点同時計測

フランジ垂直座屈破壊に注目

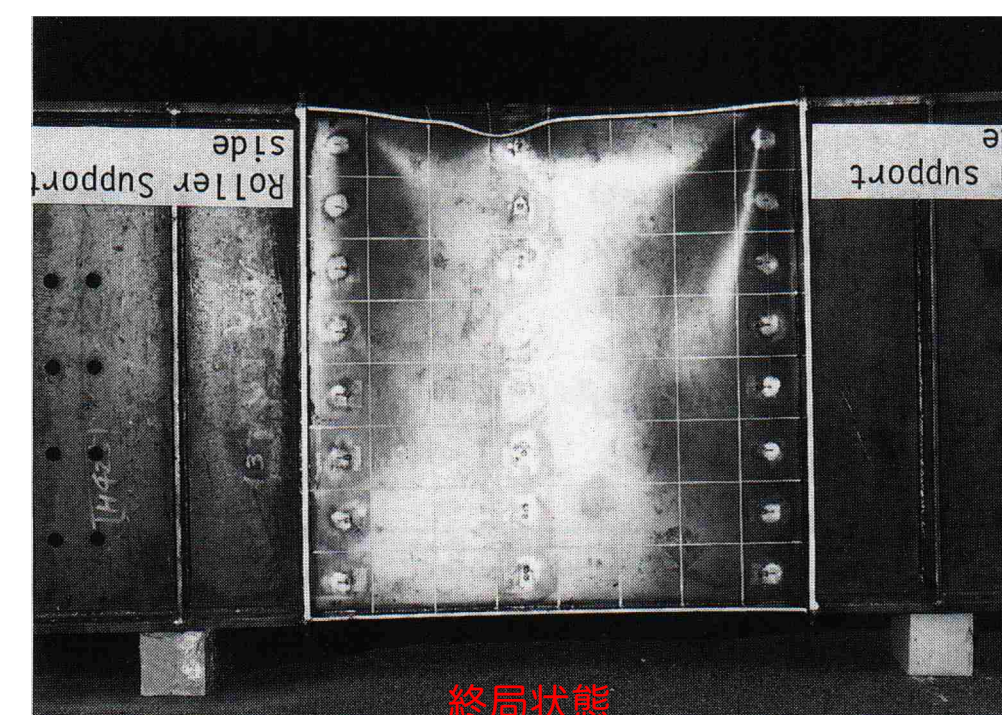
- ・桁高の変化 (縮み) 計測装置
- ・多点同時たわみ計測



桁高変化 (縮み) 計測

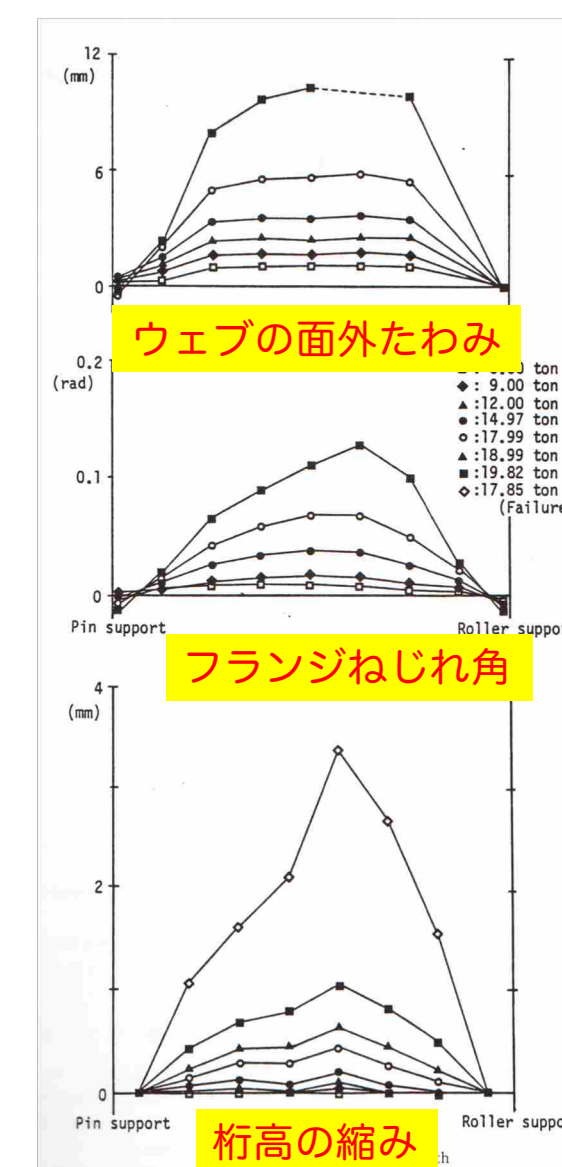


曲線桁の曲げ耐荷力実験



終局状態
圧縮フランジの局部座屈

- ・ウェブが薄いとフランジ垂直座屈は発生する
- ・フランジのねじれとけた高の縮みは連成して発生する

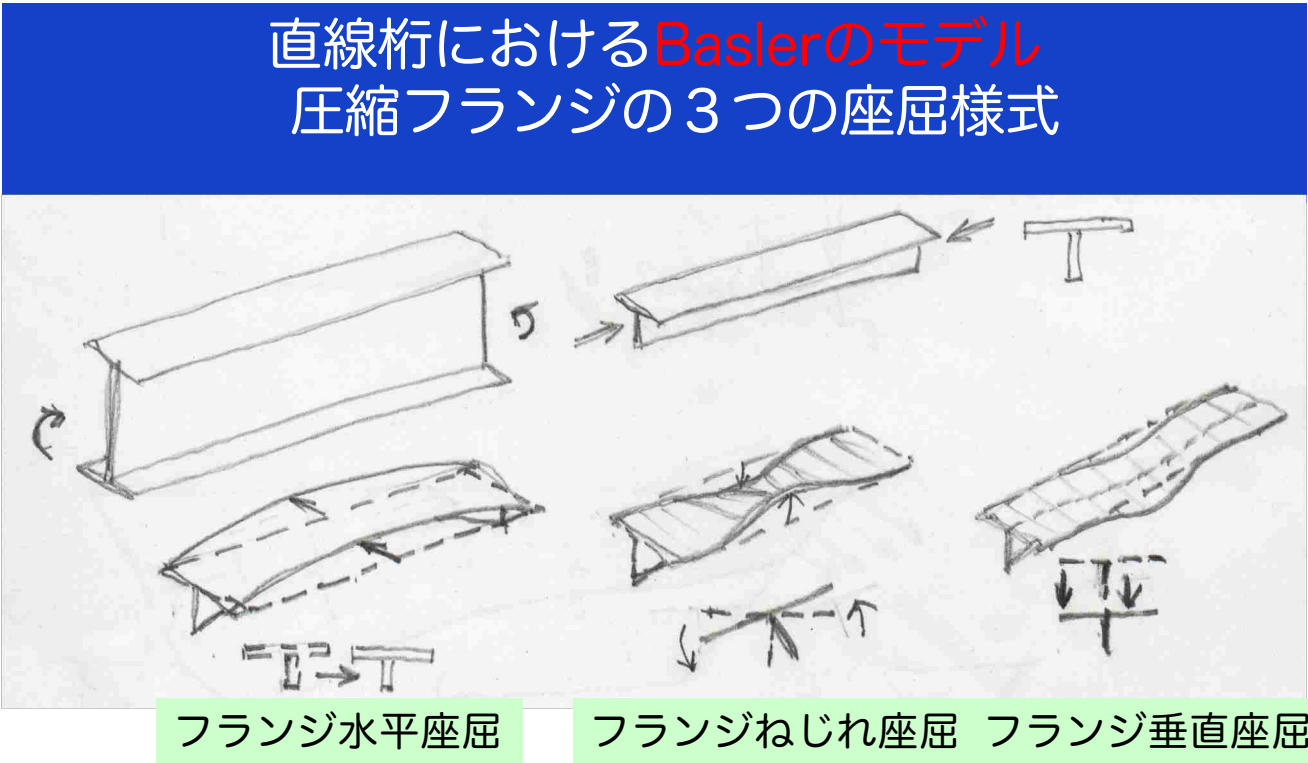


曲線桁の曲げ耐荷力評価

非線形FEMで、耐荷力は求まるかもしれないが、費用と労力は莫大

実務で使えるためのモデル化が必要

複雑な実現象を簡略化、モデル化して、工学的に実用可能な範囲で耐荷力を評価する。



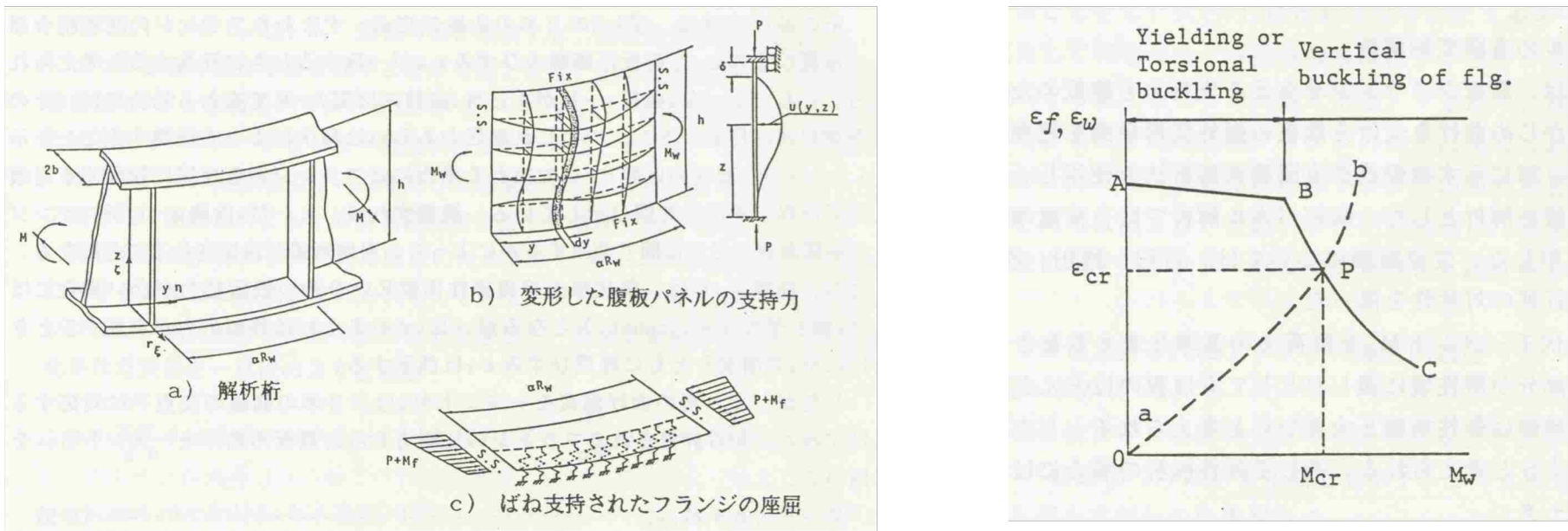
直線桁の曲げ耐荷力を支配する、フランジねじれ座屈、フランジ水平座屈（横ねじれ座屈）については、概ね解明されていたが、フランジ垂直座屈の発生メカニズムは、十分には解明されていなかった。

- フランジ垂直座屈による曲げ耐荷力評価モデル
- ・ Basler et. al(桁の変形後の垂直方向圧縮力)
 - ・ 西野，長谷川（flg.とwebの有効部分の座屈）
 - ・ 三上(桁の変形後のパネルの垂直方向圧縮力)
 - ・ 藤井（評価法が一番面倒くさい）

土木学会論文集, No.374/I-6. 1986. 10.

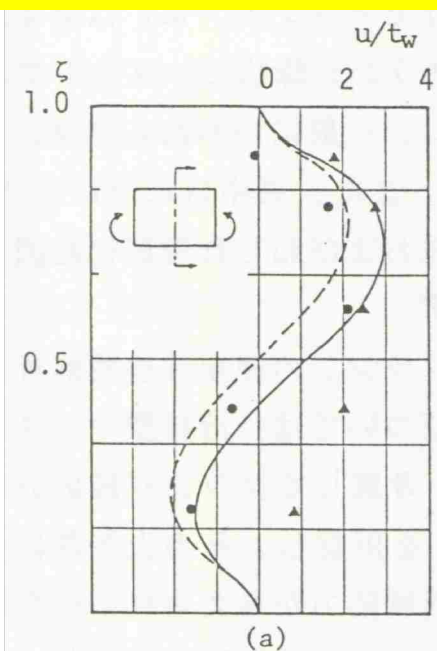
フランジ垂直座屈の発生メカニズム（藤井モデルの仮説）

1. 荷重（曲げモーメント）によりウェブにたわみが発生する。たわみは荷重増加とともに変化する。
2. フランジは、ウェブに支持されているが、ウェブの支持力をバネ定数として考慮する。
3. バネ定数は、ウェブのたわみに依存し、ウェブのスリットのたわみ分布で表す。
4. ウェブ支持力が十分なときは、フランジのねじれ座屈か水平座屈で崩壊する。ウェブ支持力が十分でなくなったときにフランジ垂直座屈が発生して崩壊する。

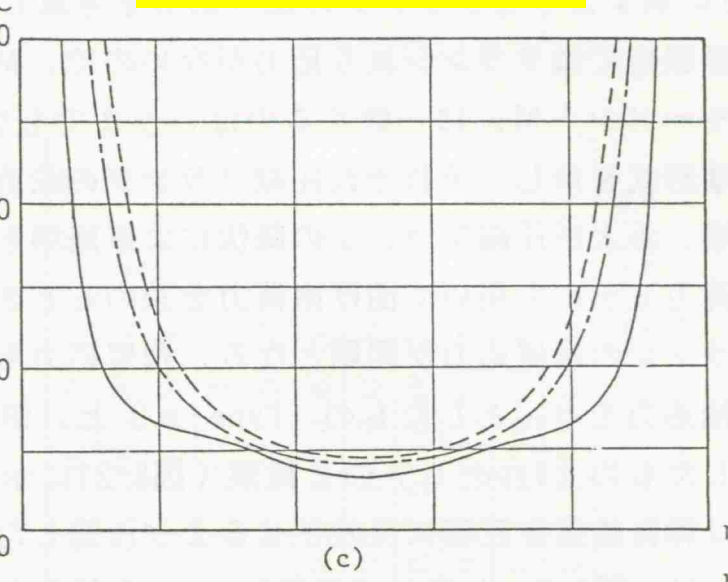


ウェブの支持力（バネ定数の求析）

ウェブの面外たわみ鉛直分布

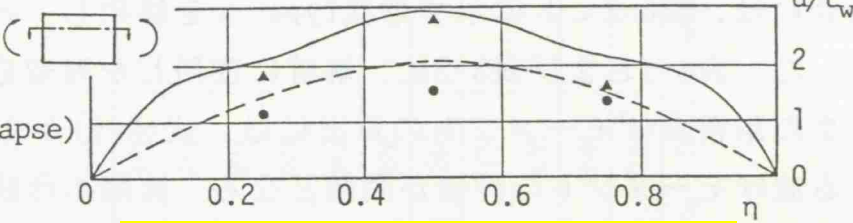


ばね定数の軸方向分布



- --- $k_w = 0$
- --- $k_w = 50$
- --- $k_w = 80$ (collapse)
- ▲ : EXP.

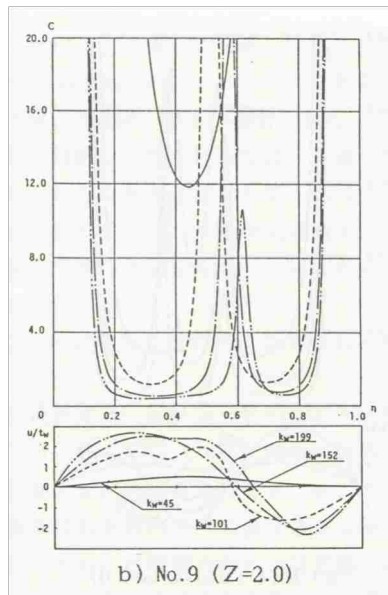
ウェブの面外たわみ軸方向分布



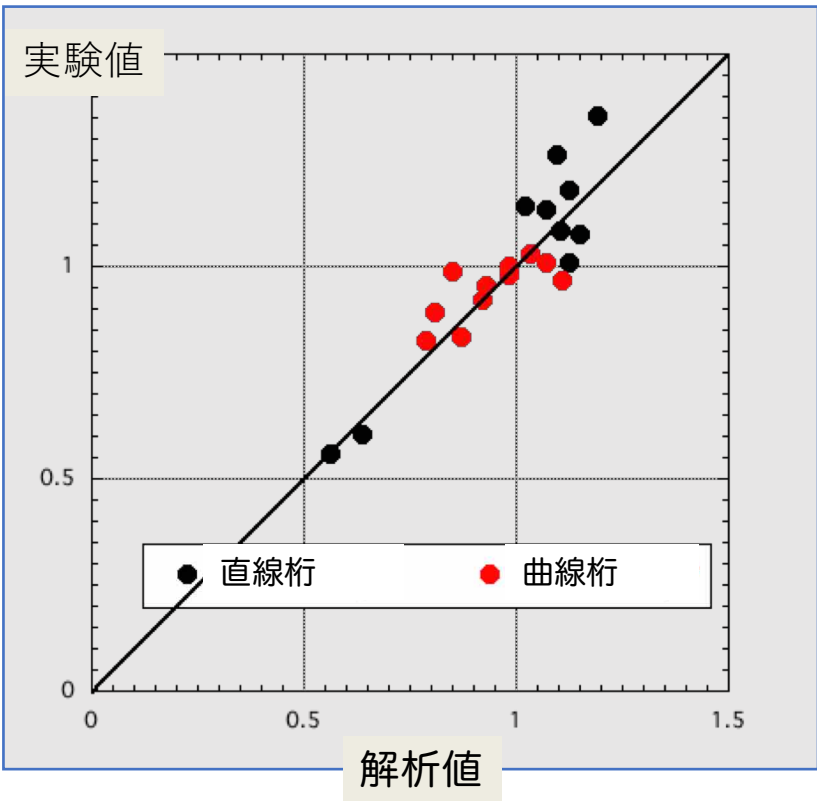
曲げ耐荷力解析の精度

学位論文：曲げを受ける曲線桁の断面変形と耐荷力に関する研究

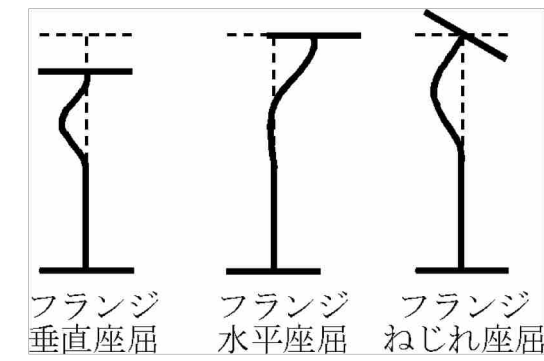
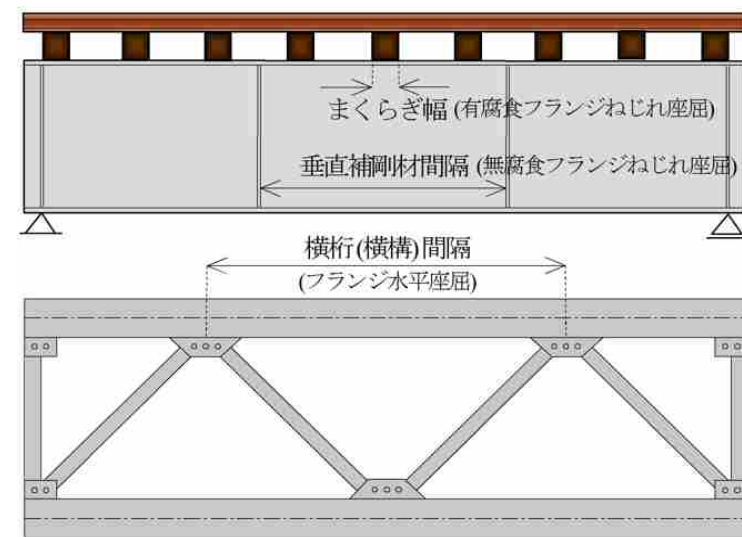
- ・ 反り応力を考慮したフランジねじれ座屈
- ・ ウェブ変形を考慮したフランジ垂直座屈
- ・ 曲線桁の曲げ耐荷力評価法の提案



バネ定数とたわみ分布



4. まくらぎ下が腐食した桁の残存曲げ耐荷力評価 (板の座屈強度評価式を適用した評価法)



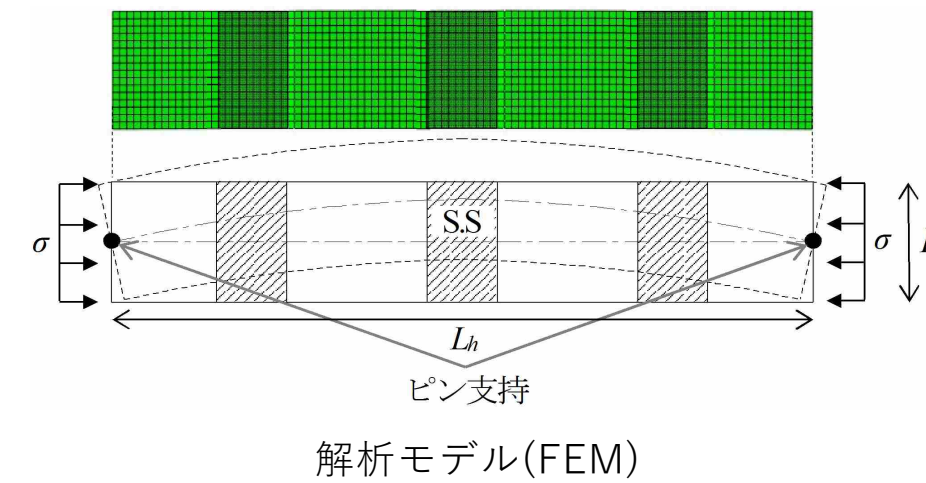
プレートガーダーの曲げ耐荷力
圧縮フランジの座屈様式

想定される圧縮フランジの座屈形式

- (1)横構間隔間のフランジ水平座屈 (横ねじれ座屈)
- (2)まくらぎ間隔におけるフランジねじれ座屈
- (3)垂直補剛材間隔のフランジねじれ座屈

まくらぎ下が腐食した桁の残存曲げ耐荷力

破壊要因：フランジ水平座屈



この解析結果を用いる場合、連成座屈は考慮される

Baslerの式

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{uh}}{\sigma_y} = 1 - \frac{\lambda^2}{4} & \lambda \leq \sqrt{2} \\ = \frac{1}{\lambda^2} & \sqrt{2} < \lambda \end{cases}$$

σ_{uh} : 水平座屈における曲げ耐荷応力

σ_y : 降伏応力

λ : 細長比パラメータ

L_h : 基本座屈長

r : 断面2次半径

E : 弾性係数

r : 断面2次半径

$$I = \frac{B^3 t_f}{12}$$

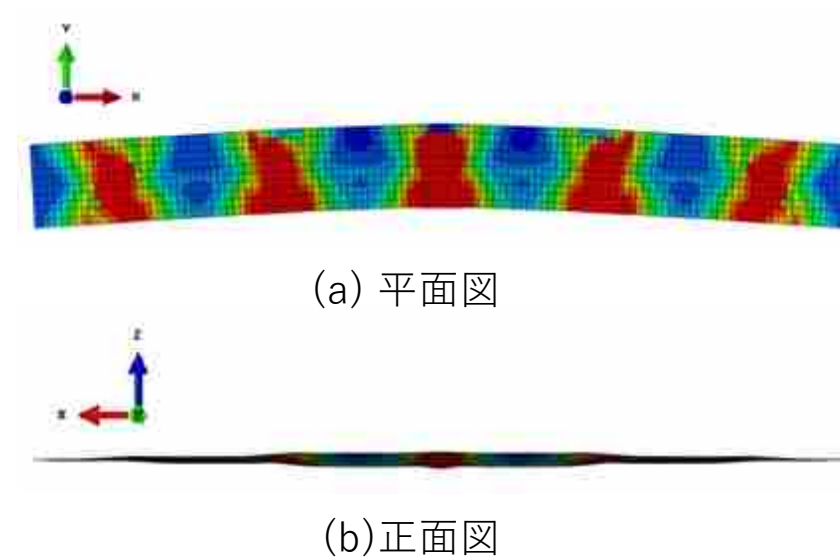
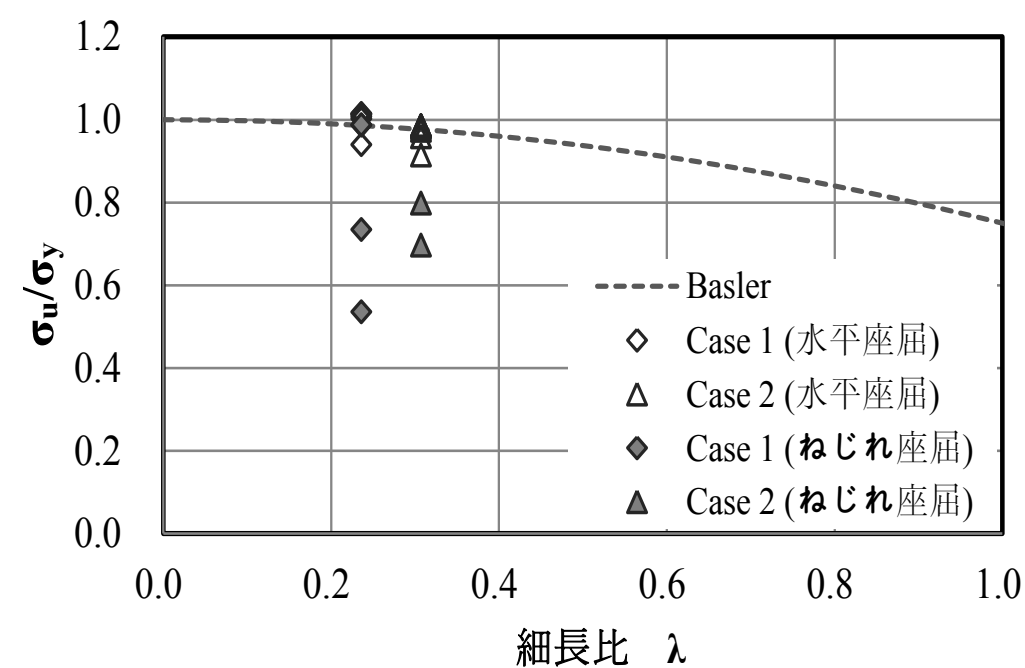
$$A = B t_f$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{B^2}{12}}$$

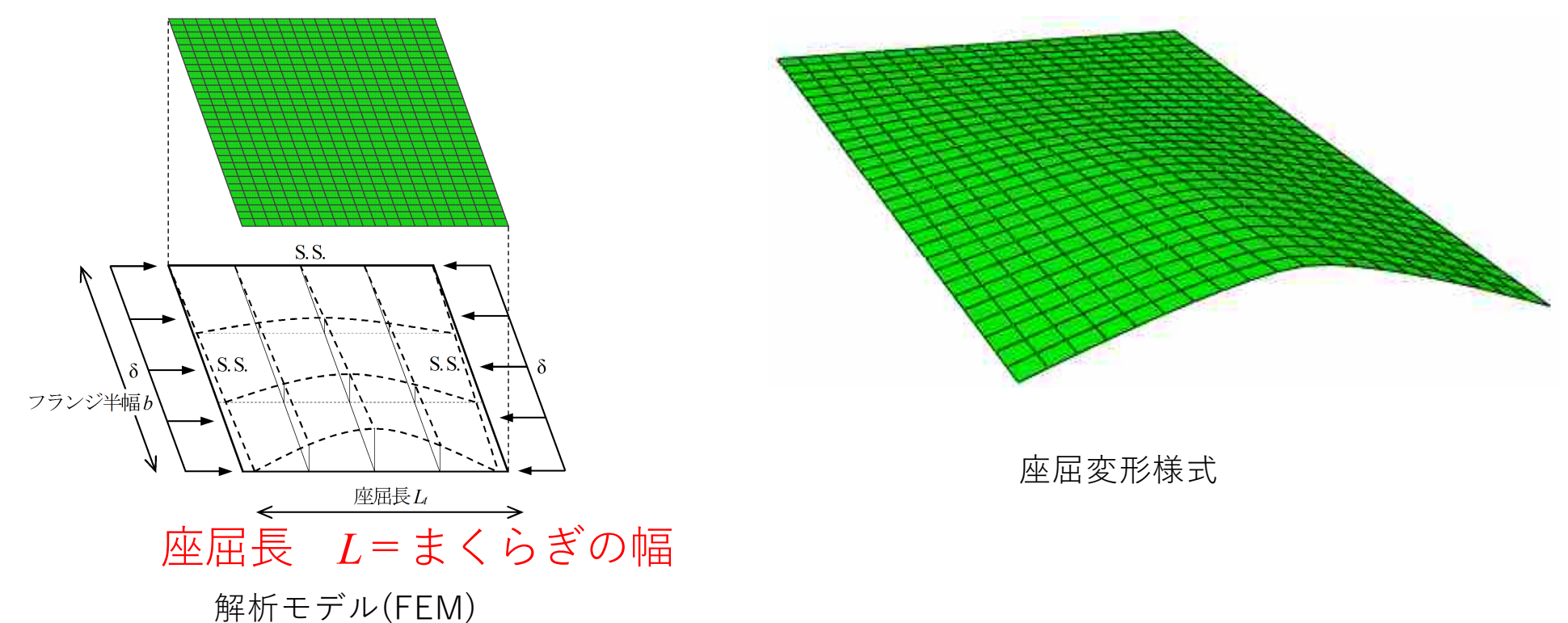
t_f : 腐食部における上フランジの平均板厚

Basler, K. and Thurlimann, B.: Strength of Plate Girders in Bending, *Proc. of ASCE*, Vol.87, No.ST6, pp.153-181, 1961.

破壊要因：フランジ水平座屈



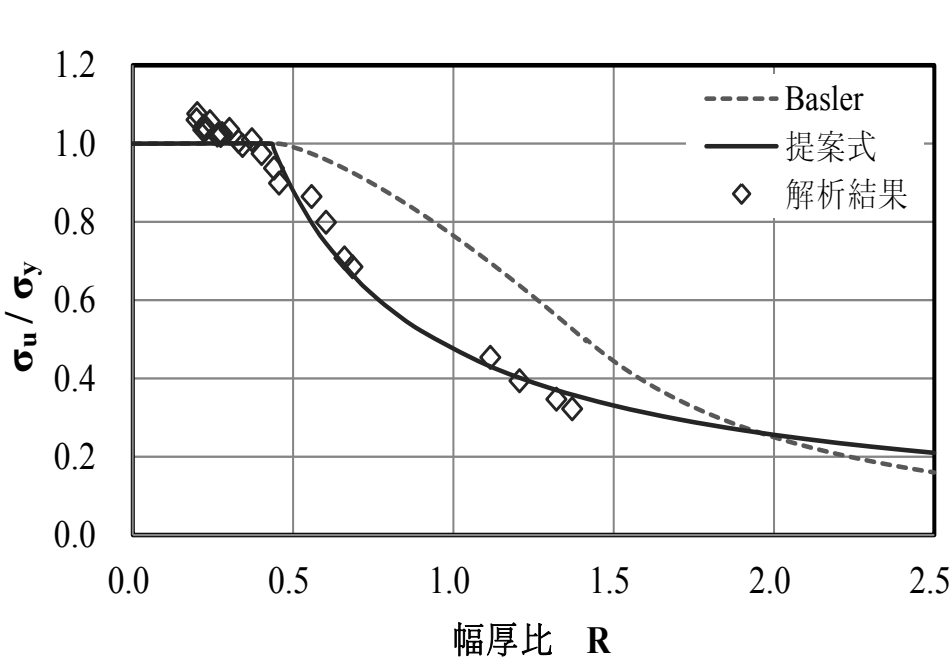
破壊要因：フランジねじれ座屈



座屈変形様式

座屈長 $L = \text{まくらぎの幅}$
解析モデル(FEM)

破壊要因：フランジねじれ座屈



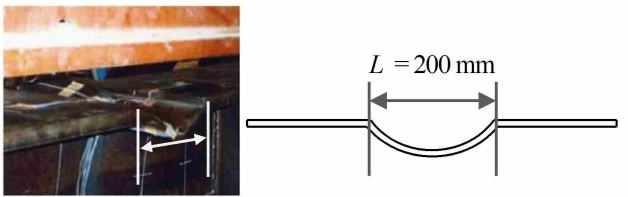
$$\begin{cases} \frac{\sigma_{ut}}{\sigma_y} = 1 & R \leq 0.433 \\ = \left(\frac{0.433}{R}\right)^{0.89} & 0.433 < R \end{cases}$$

$$R = \frac{1}{\pi} \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

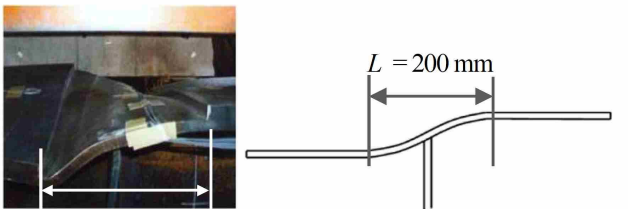
σ_{ut} ：ねじれ座屈におけるフランジの耐荷応力
 b ：フランジ半幅
 t_f ：上フランジのまくらぎ下腐食部の平均板厚
 ν ：ポアソン比
 k ：座屈係数
 $k = 0.43 + (1 / \alpha)^2$
 α ：アスペクト比（本解析の場合、 L_t / b ）
 σ_y ：降伏応力
 E ：弾性係数

破壊要因：フランジねじれ座屈(ねじれ座屈長)

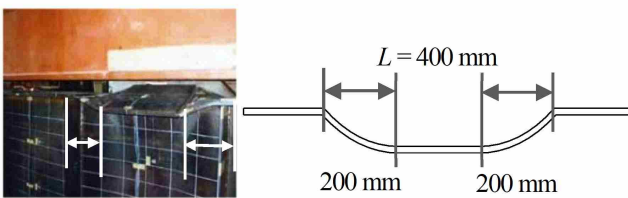
座屈長：まくらぎ幅=20cm



(a) 垂直補剛材間に腐食が1箇所の場合



(b) 垂直補剛材上に腐食が1箇所の場合



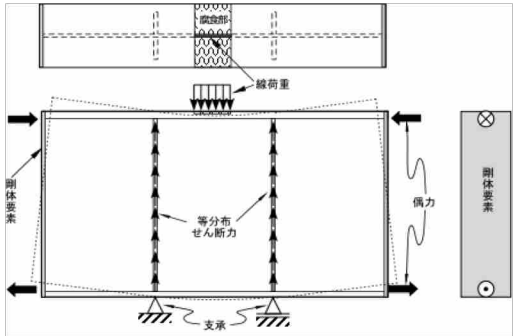
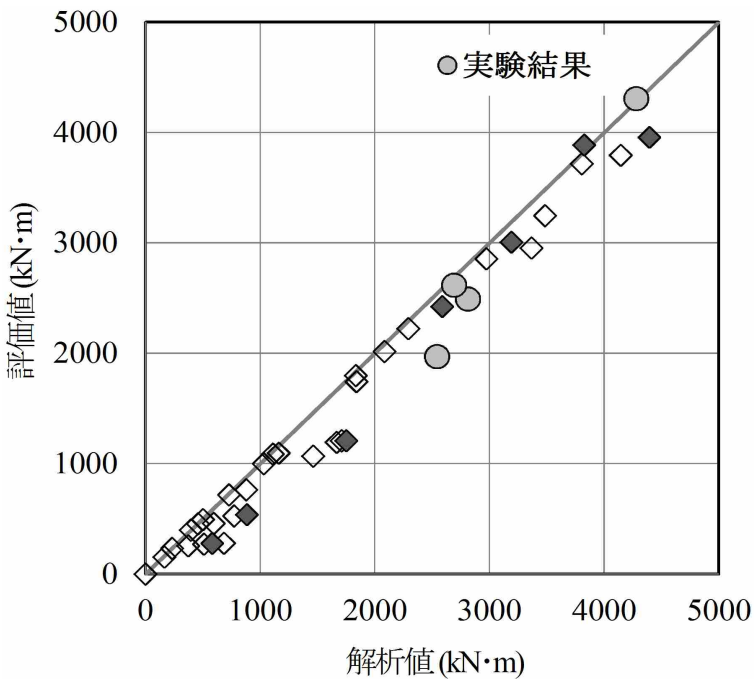
(c) 垂直補剛材間に腐食が2箇所の場合

座屈長Lの考え方

残存曲げ耐荷力評価の流れ(評価値との比較)

$$M_{u0} = \frac{\sigma_u}{h} I$$

M_{u0} ：残存曲げ耐荷モーメント
 σ_u ：フランジ水平座屈応力とねじれ座屈応力の最小値
 I ：まくらぎ下の腐食を考慮した断面2次モーメント
 h ：腐食部断面の中立軸位置から上フランジ中央面までの距離



FEM解析モデル
(複合非線形解析)

5. 鋼構造物の腐食凹凸表面を再現する

- 腐食は、Feの酸化（酸素O2と水H2O）の電気化学的反応
 - 多くの研究者は、そのメカニズムや腐食量(減肉板厚)に着目した論文が多い
 - しかし、腐食した鋼構造の残存耐荷力評価には不向きのように見える(表面凹凸形状が無い)
- 腐食表面凹凸形状を作ると
 - 平行な減肉（一様な板厚）を用いた評価より正確
 - 一様腐食（全体腐食）のみならず局所腐食も考慮できる
 - 補修実験において、種々の補修効果を定量的に評価できる

腐食凹凸表面作成モデル

- ①単純な支配パラメータ
- ②修正が容易
- ③種々の腐食表面ができる

腐食形態は、空間的時効相関があるのではないかと。
(奥村誠，塚井誠人)

腐食凹凸表面作成モデル

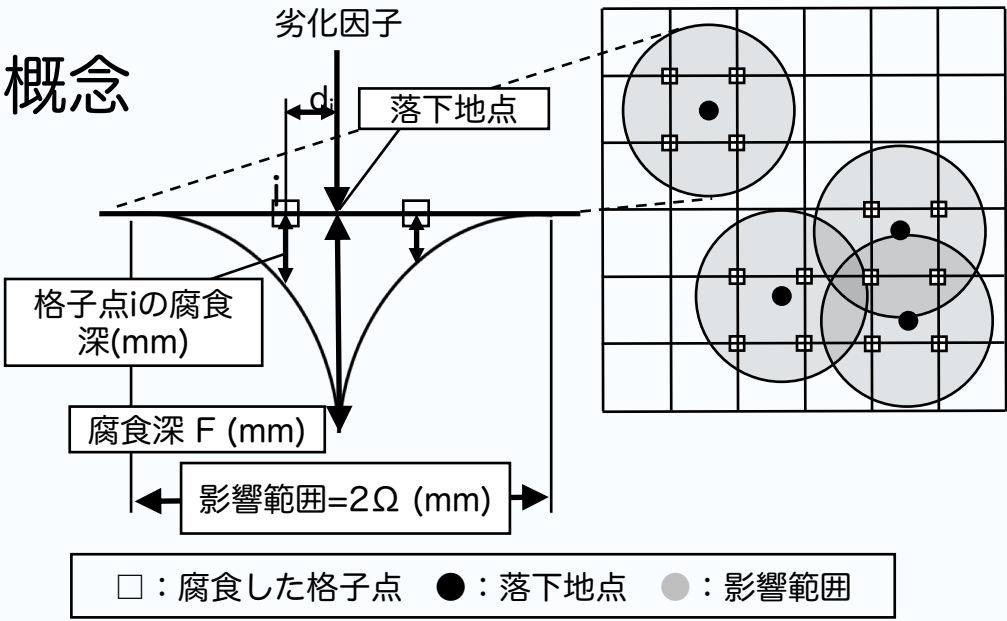
- **アタック因子**(劣化因子)概念の導入

一つのアタック因子により鋼表面が掘り下げられる。その深さ形状は以下とする。

$$V_i = F \exp(-\beta d_i)$$

空間的自己相関

V_i : 鋼表面の任意点の腐食深
 F : アタック因子の強さ
 b : 距離減衰係数
 d_i : アタック因子の落下地点から格子点までの距離

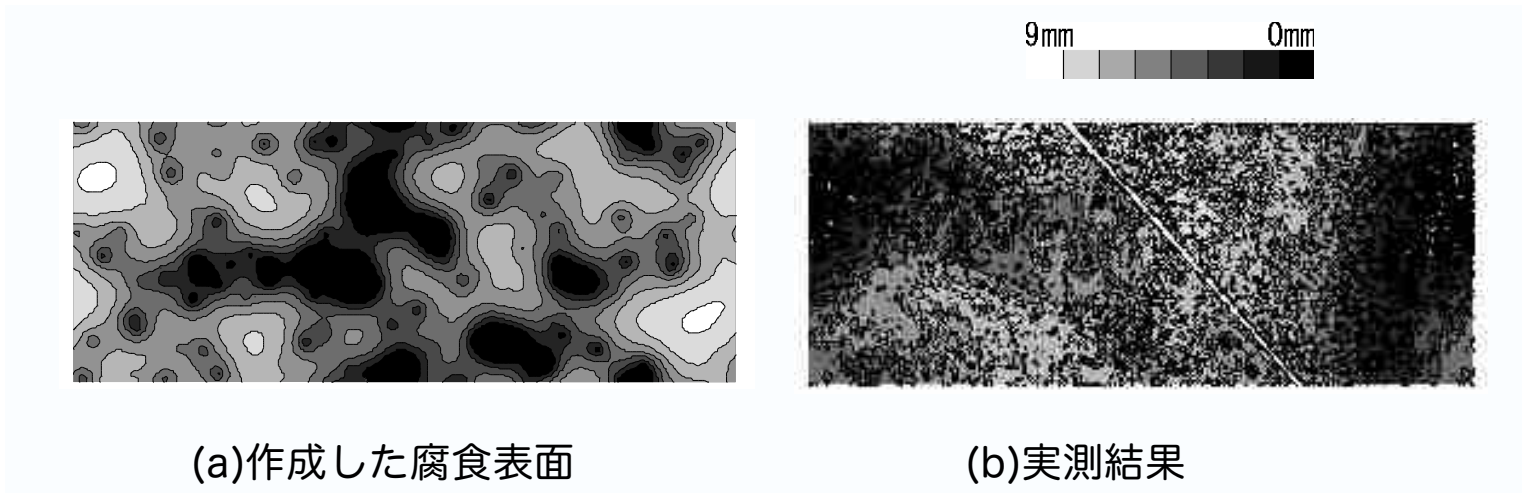


腐食表面凹凸形状は
・アタック因子の強さ F
・ β (腐食深の形状を決めるパラメータ)
・アタック因子の数 n
の3つのパラメータで決まる。

土木学会鋼構造委員会：腐食した鋼構造物の性能回復事例と性能回復設計法，土木学会，H26.8.

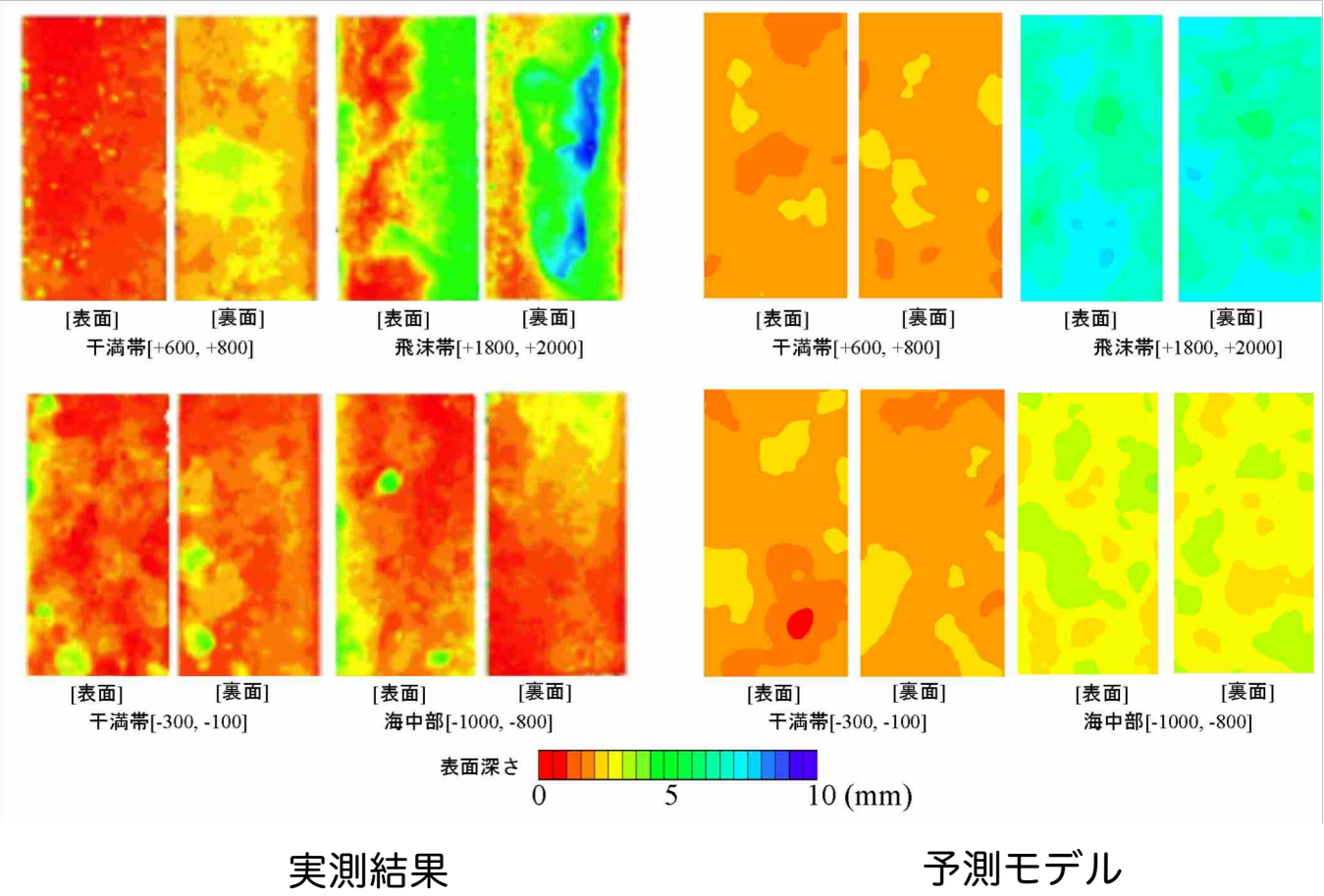
腐食凹凸表面を再現する

腐食凹凸形状は、 F 、 β とアタック因子の数 n の、3つのパラメータで決まる
アタック因子の**落下位置**(座標)は乱数を発生させて決める



様々な解析および実験シミュレーションが可能となる!!
凹凸形状を決めるパラメータの数は少ない方が簡単

解析結果（曝露試験結果との比較）

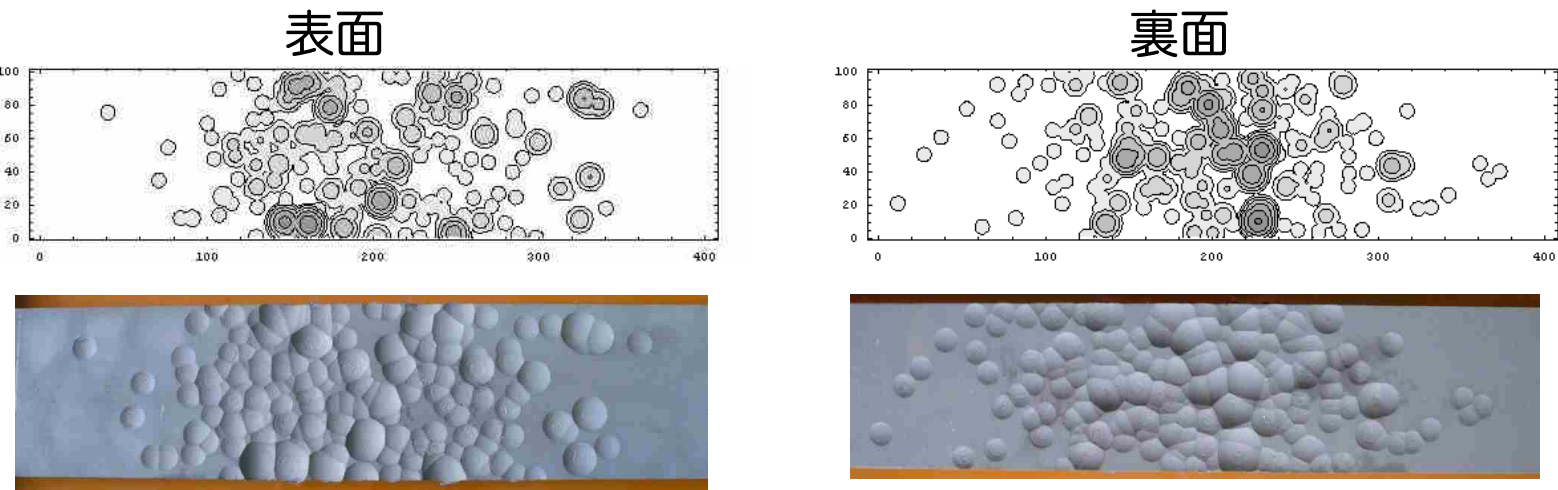


同じ腐食表面を持つ実験供試体を作る

マザーマシンと連携させると**同じ凹凸表面を持つ供試体**を多数製作することもできる。

すると
当て板補修の適する当て板形状のパラメトリック実験などが可能となり**補修効果を定量的に把握できる**
実物の腐食鋼板では、当て板無しの試験をするとその鋼板は無くなる

- 腐食鋼材の性能回復効果の実験供試体の作成例

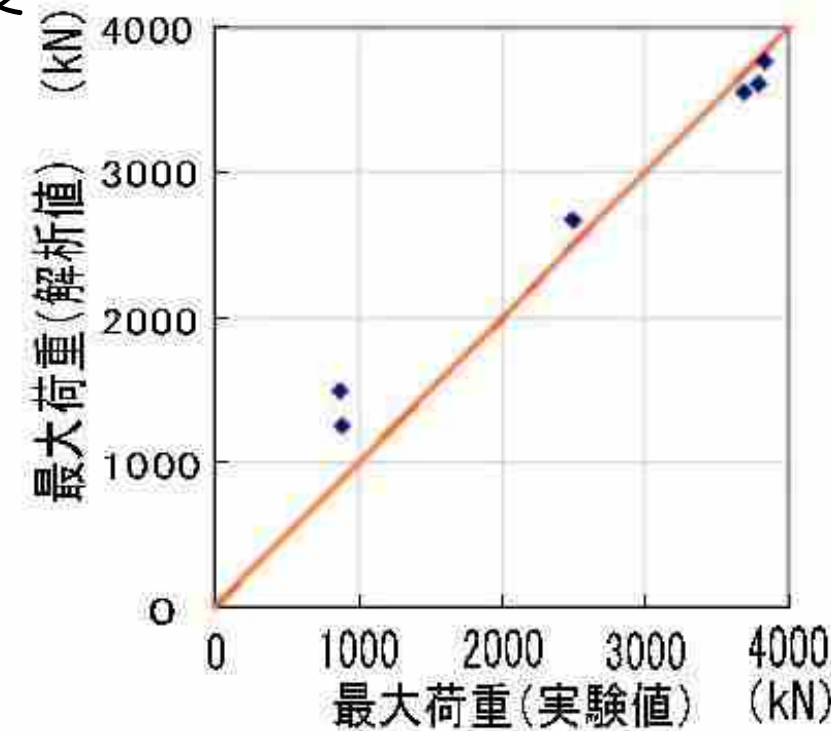
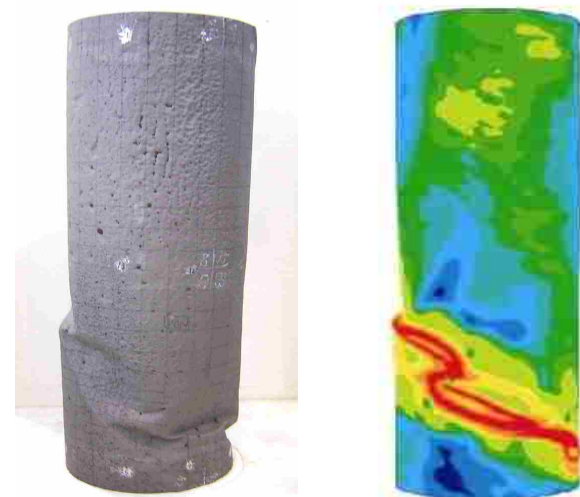


FEMによる鋼管杭の残存耐荷力解析(実測値)

44

- 複合非線形解析
- **アイソパラメトリックシェル要素**が便利
- 要素長：**10mm**程度

実測結果が正確であれば、高精度で評価が可能



有限要素法による残存耐荷力解析結果例

45



(a)実験結果



(b)実測結果を用いた解析



(c)腐食予測モデルを用いた解析

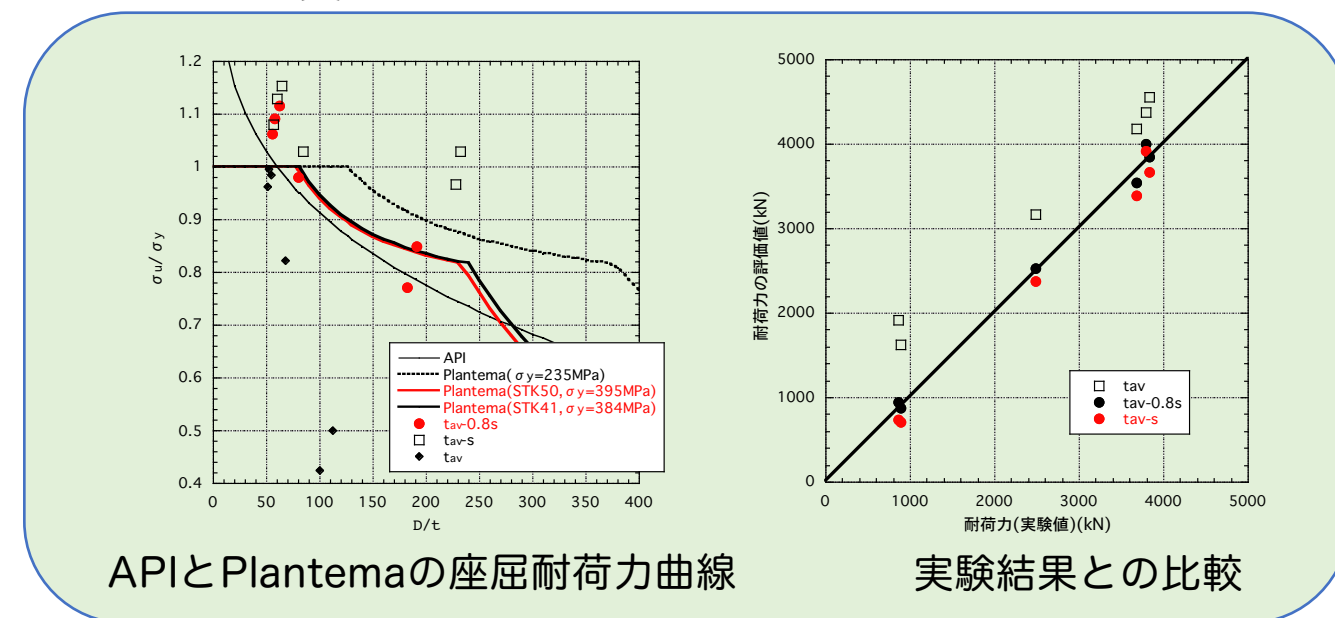
腐食した鋼管杭の破壊形態

複合非線形FEMにより精度のよい耐荷力評価が可能

FEM以外の耐荷力評価

円形鋼管柱の簡易評価式を適用した残存圧縮耐荷力評価

- **無腐食部材の座屈曲線**に、腐食計測結果（例えば**代表板厚**）を適用して強度を求める



腐食した鋼管杭の残存圧縮耐荷力を求めるために、無腐食の鋼管座屈曲線に代表板厚を代入して、残存圧縮強度を求めた例
(この場合、代表板厚は、腐食後の**平均板厚**－**標準偏差**とすると実験結果を推定できる)

6. 腐食表面生成モデルの将来予測への適用

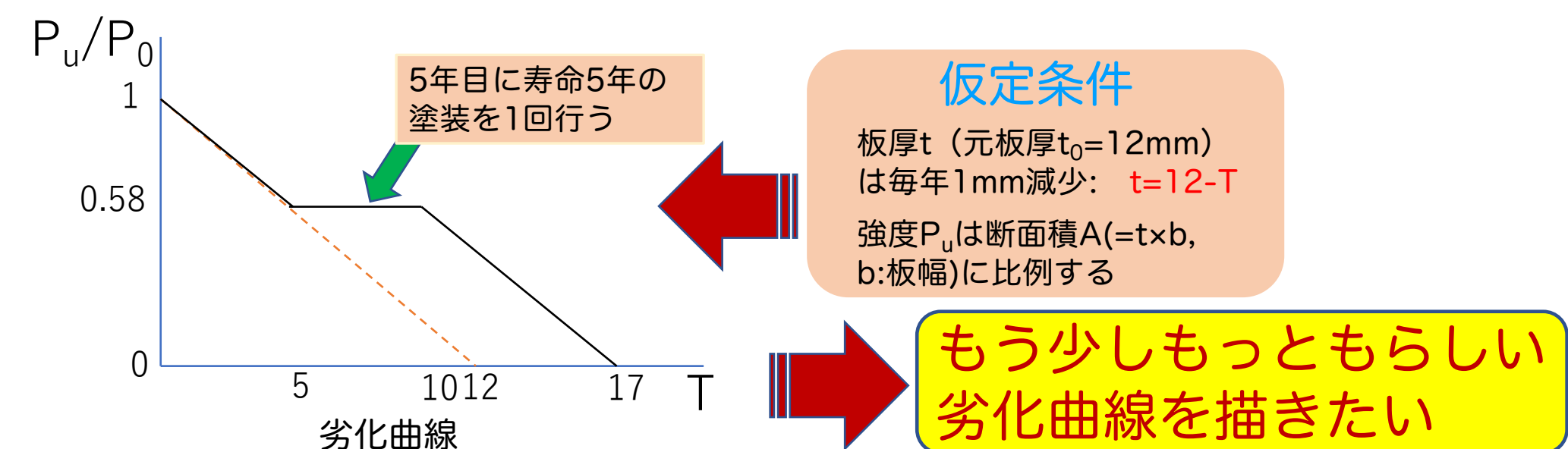
47

そもそも 残存耐荷力の将来予測とは**耐荷力劣化曲線**を描くことにほかならない

予測モデルの構築は

「簡単と言えば容易、複雑といえば極めて難問」

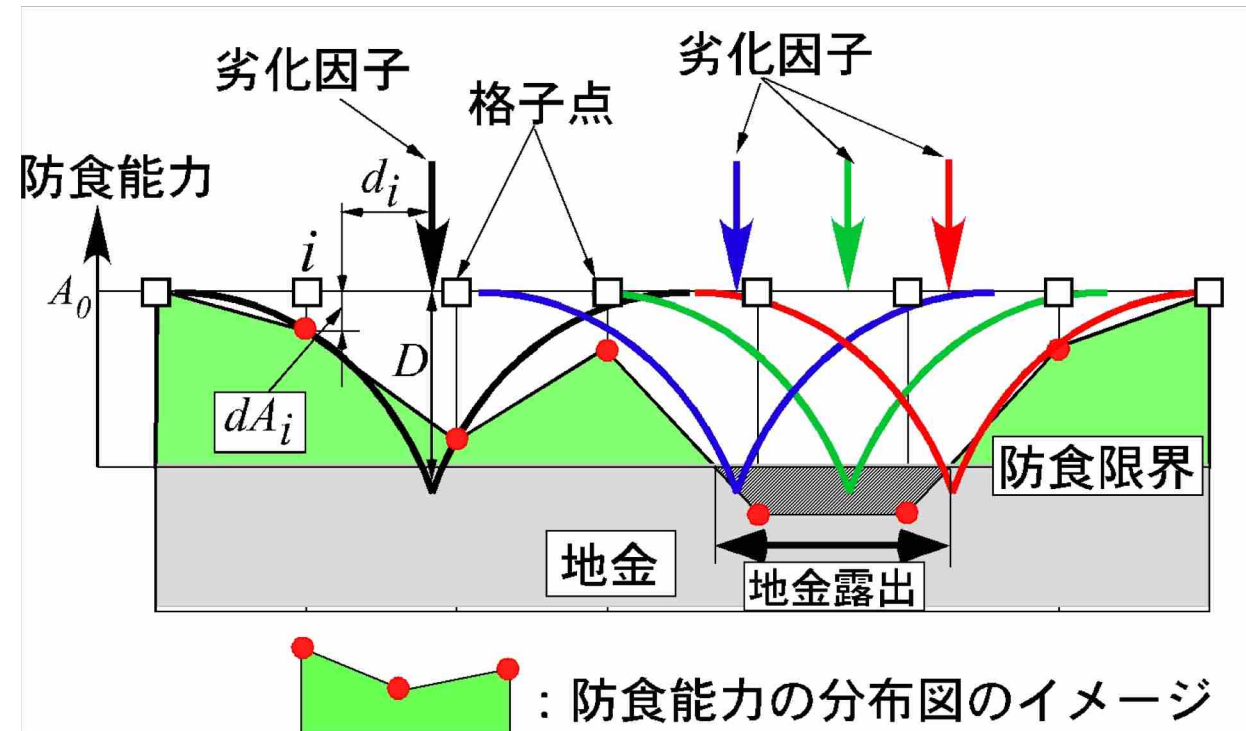
問題は、モデルの仮定、条件が実現象と整合するか？



腐食表面の将来予測モデル

48

- もし、**アタック因子 F** が、**1年間に n 個**落ちると仮定すると、**予測が可能になる**。



実現現象の表現 (モデルの補正)

49

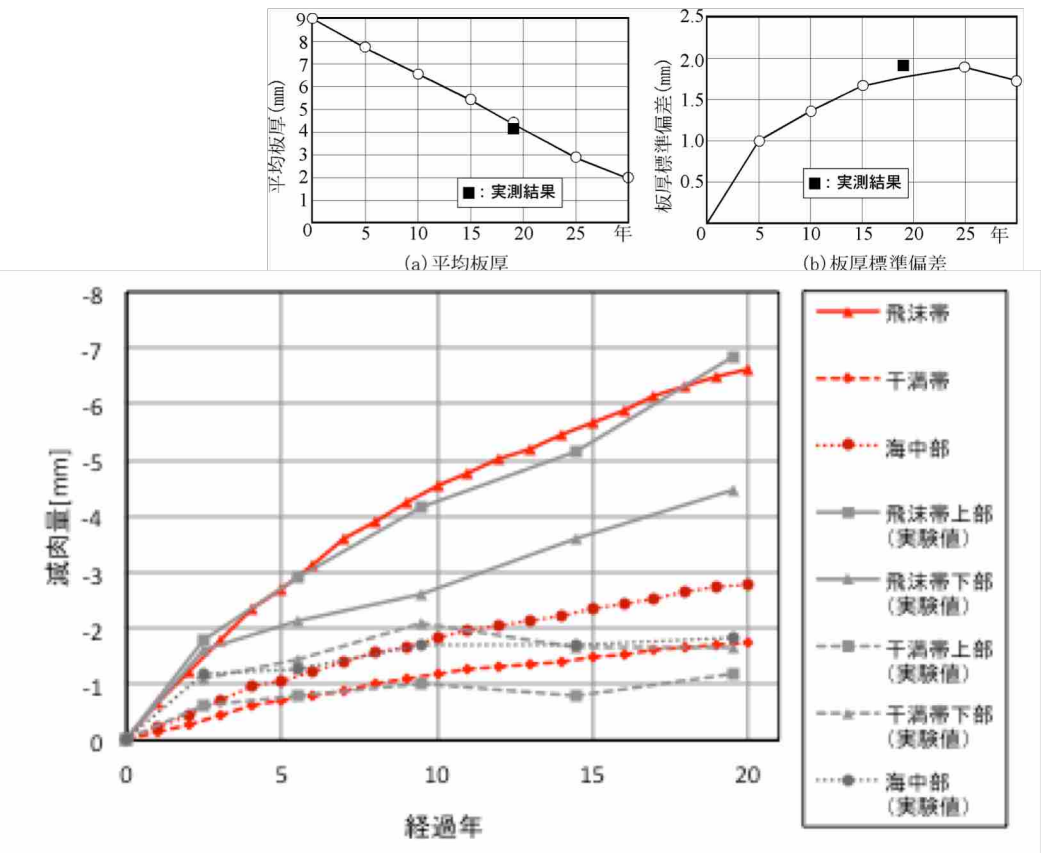
現実：**腐食速度は時間とともに小さくなる**

アタック因子 **F** を腐食深の関数として与える

$$F = F_0 (1 - \gamma \rho^{v_i})$$

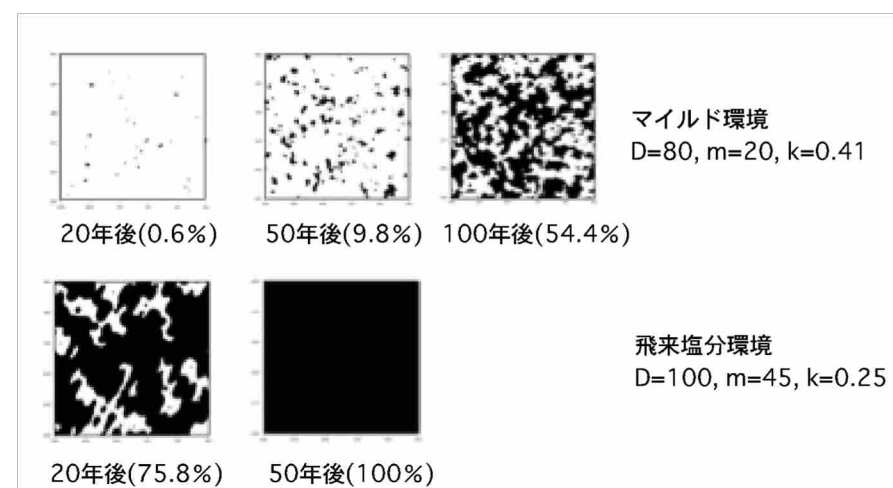
γ, ρ : 係数
 v_i : 腐食深

容易に実現現象を表現できる

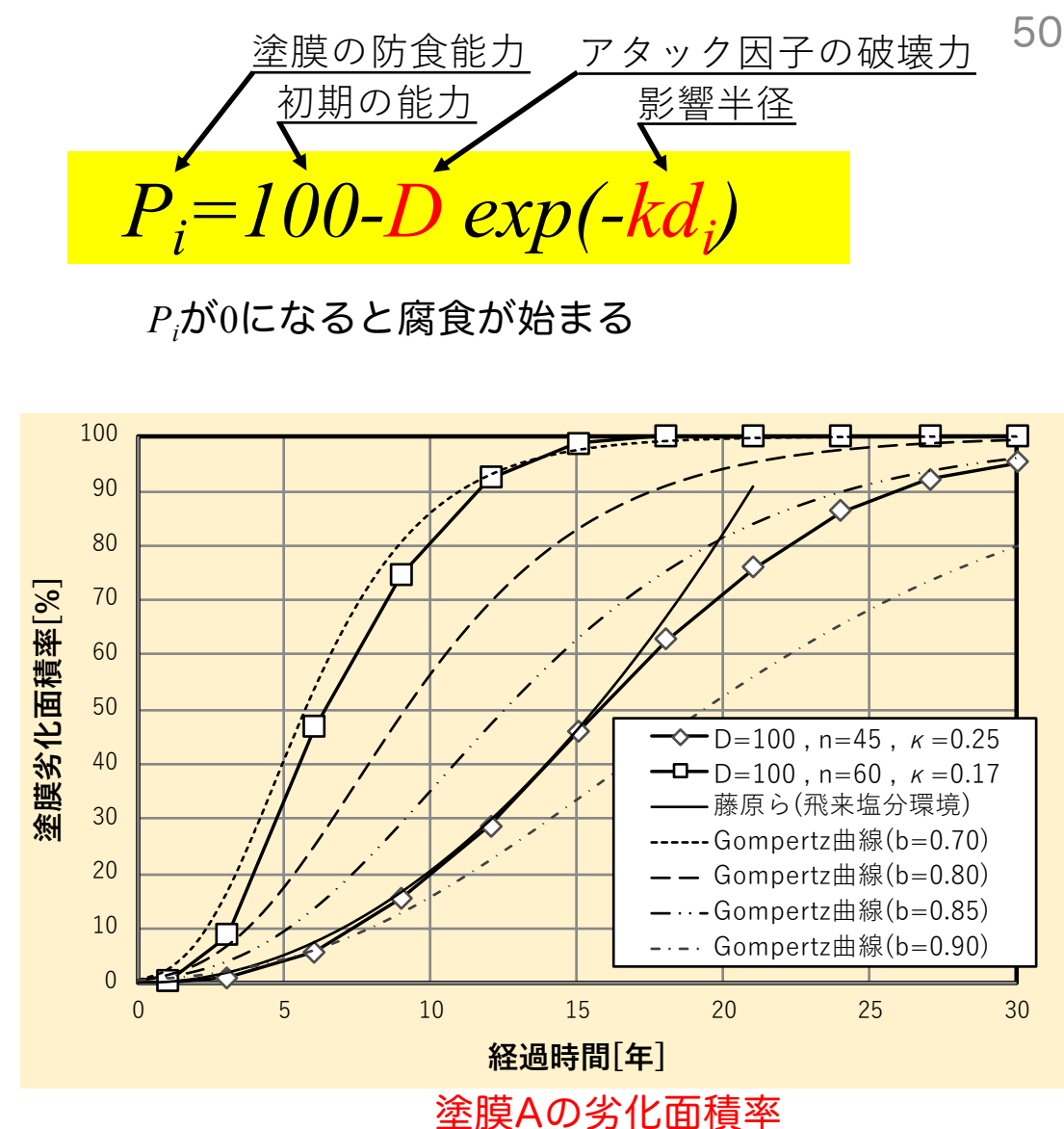


塗膜劣化進展モデル

- 防食機能の劣化**も同じ考えで進行すると仮定すれば、**防食工の劣化を考慮した腐食進展予測が可能になる**。(F , n , β の値は同じ値では無い)



塗膜劣化にともなう地金の露出
(鋼板:200mm×200mm)
() 内の数値は劣化面積率

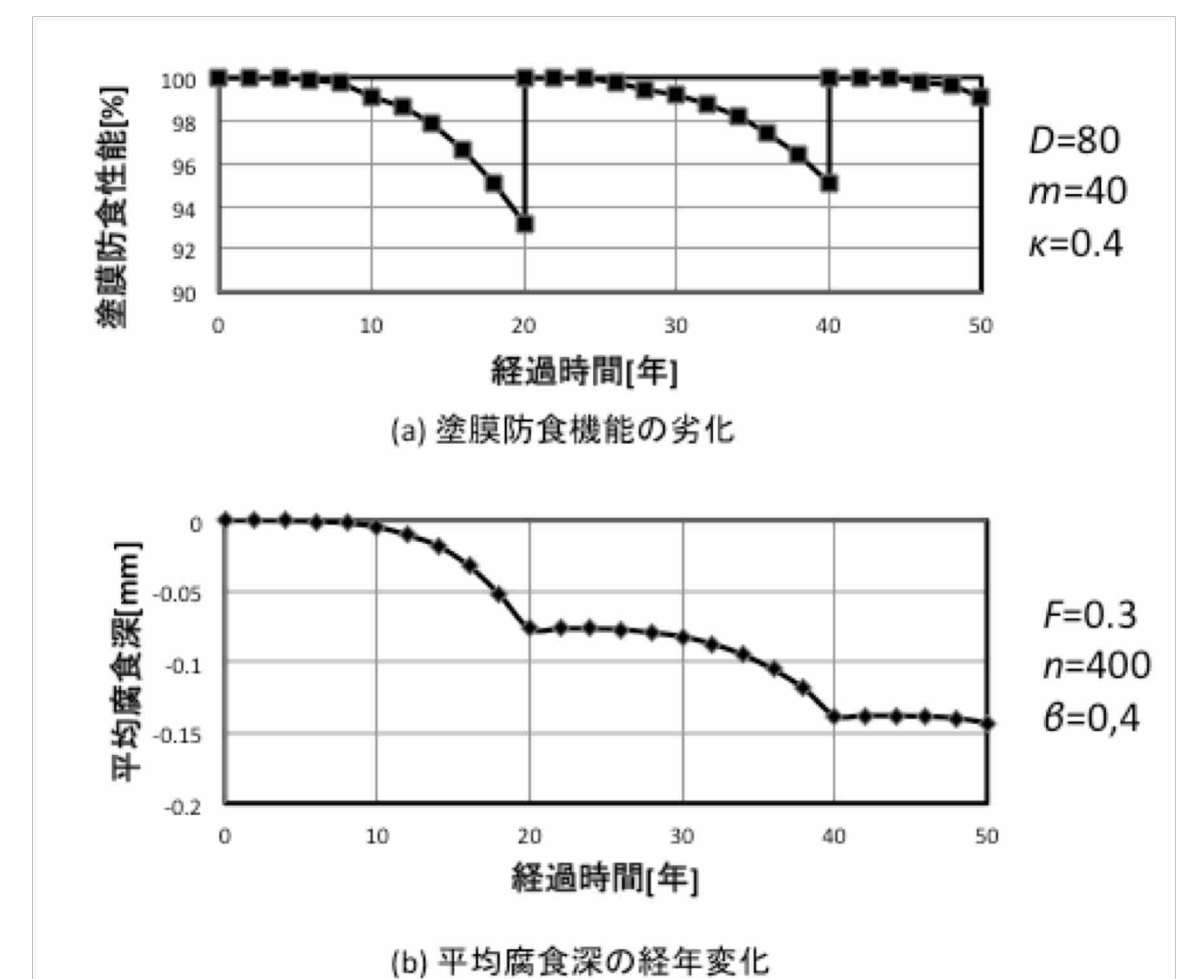


解析結果(防食能力と平均腐食深)

51

解析条件

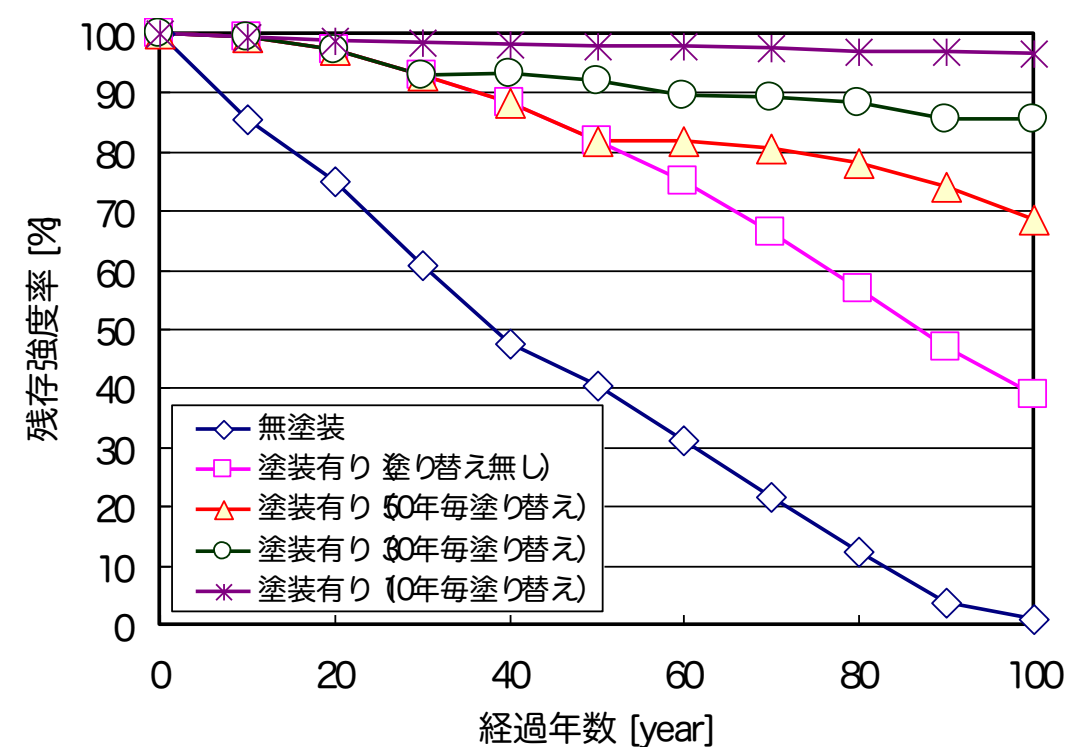
- 防食能力:約10年**
- 20年毎に塗り替え**



解析結果(残存耐力劣化曲線)

52

腐食凹凸表面を予測して、それを用いて耐力解析(有限要素解析等)を行えば、残存耐力の予測が可能となる



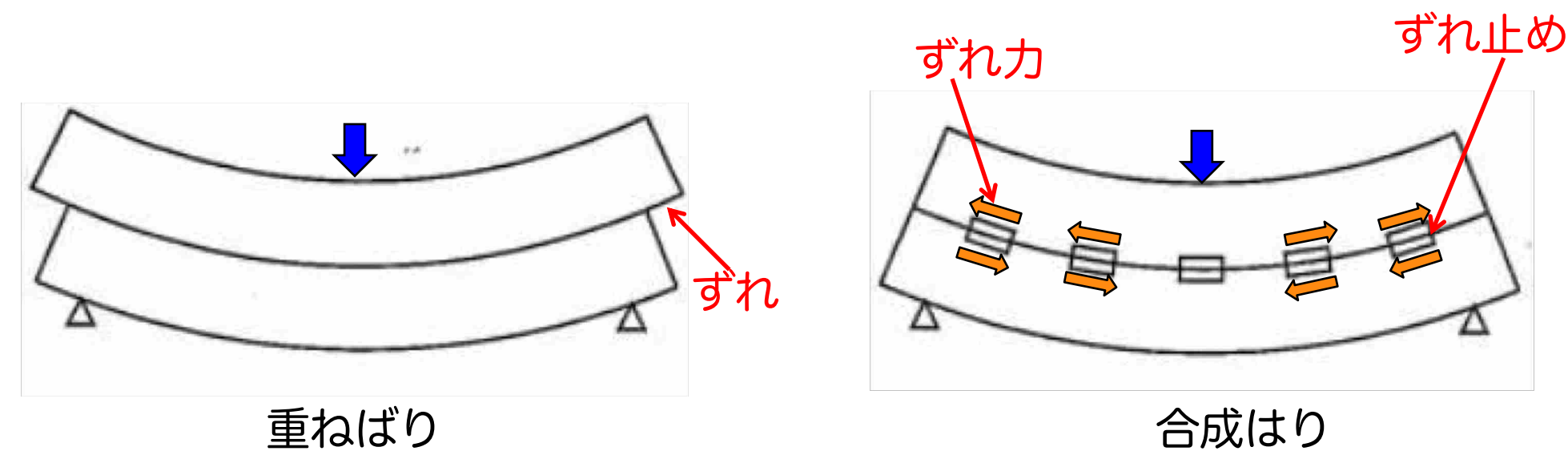
圧縮を受ける鋼管杭の残存耐力の予測例
(塗装の防食効果を考慮した強度低下予測の例)

7. 孔あき鋼板ジベル(PBL)のずれ耐力評価

53

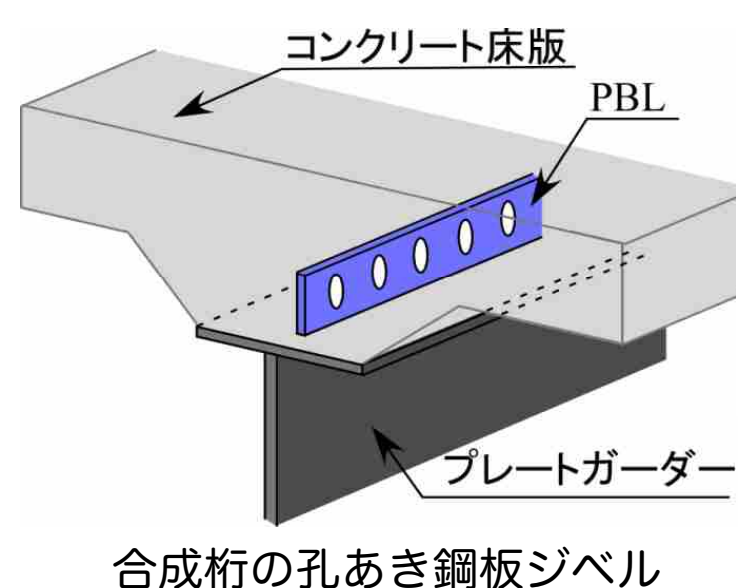
合成桁とは

矩形断面はり一つのたわみ: δ
重ねはりのたわみ: $\delta / 2$
接着した合成はり: $\delta / 8$

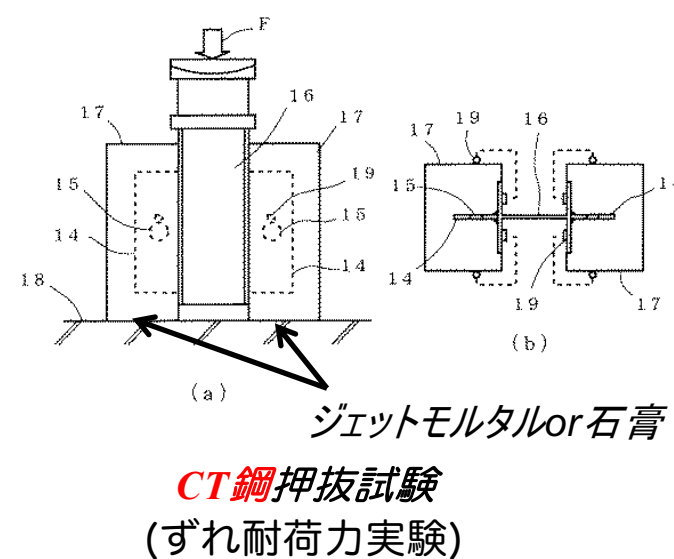


孔あき鋼板ジベル(PBL)

54

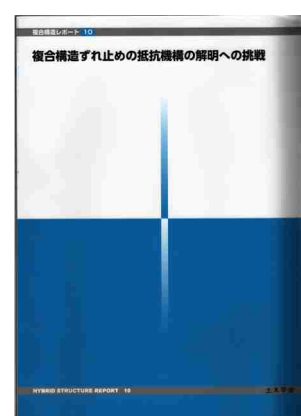


合成桁の孔あき鋼板ジベル



CT鋼押抜試験

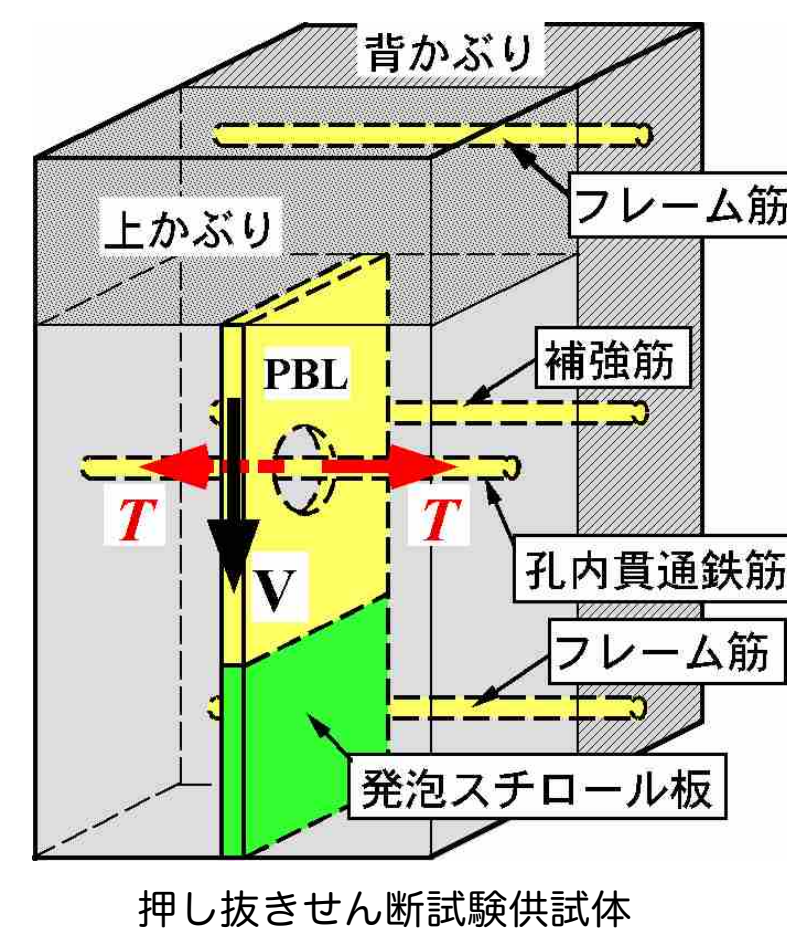
JSSC「頭付きスタッドの押し抜きせん断試験方法(案)」(1996)
当時、我が国の要素試験はこれに準拠: CT鋼押抜試験



土木学会論文集A, Vol.64, No.2, 2008.

押し抜きせん断試験をしてみると

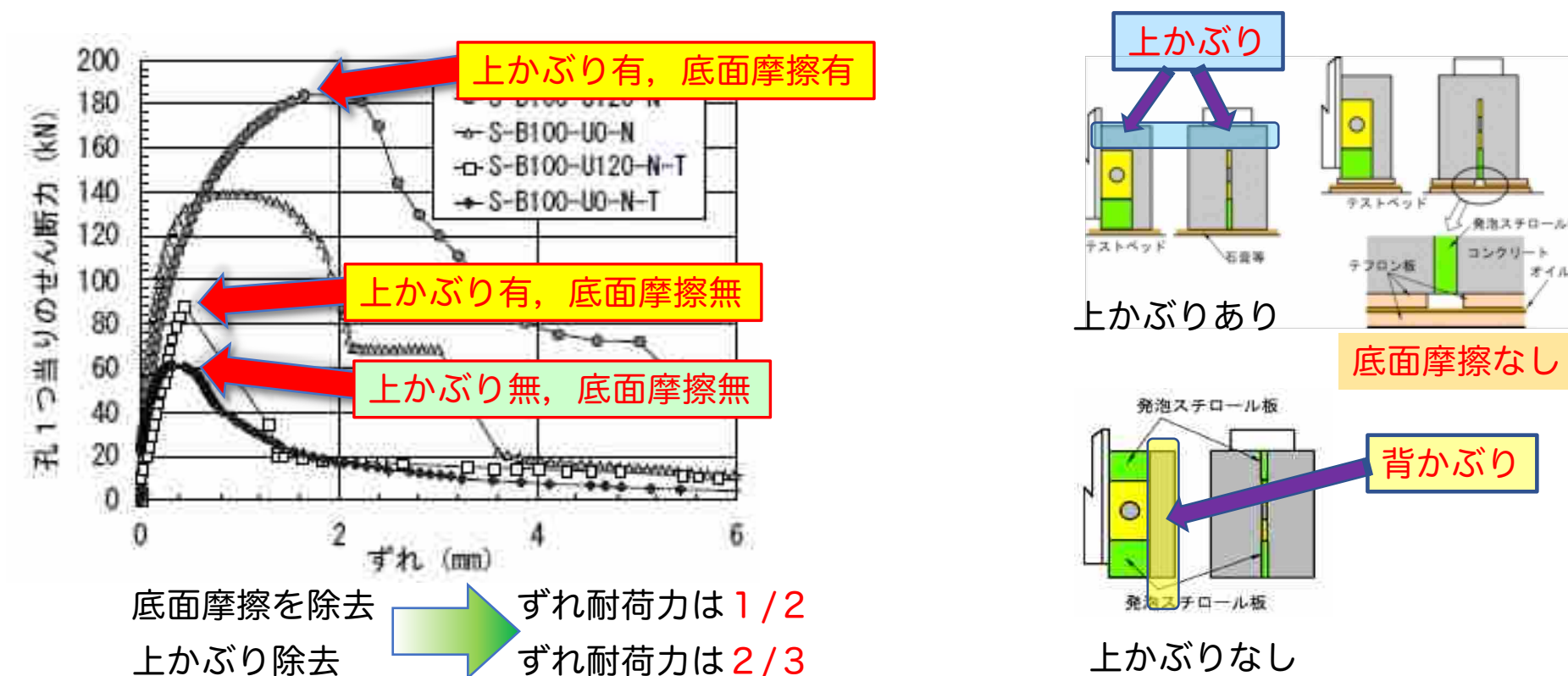
55



試験後の破壊状態
コンクリートが2つに分裂

ずれ力-ずれ曲線とずれ耐荷力(CT鋼押し抜き試験)

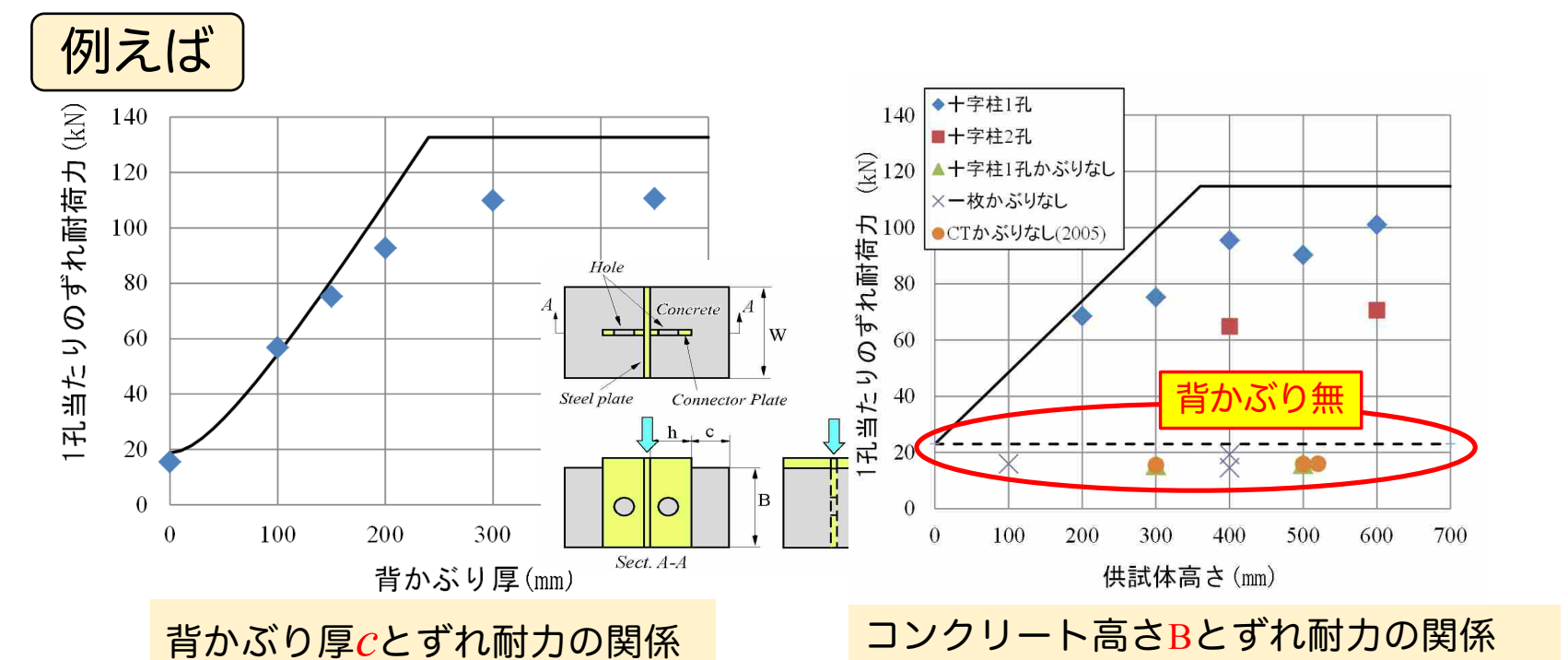
56



同じせん断試験でも、**供試体形状**や摩擦条件などに大きく影響される
 → 実際の合成桁のずれ挙動やずれ耐荷力は一体どうなの？

ずれ耐荷力は**供試体形状**に大きく影響される！

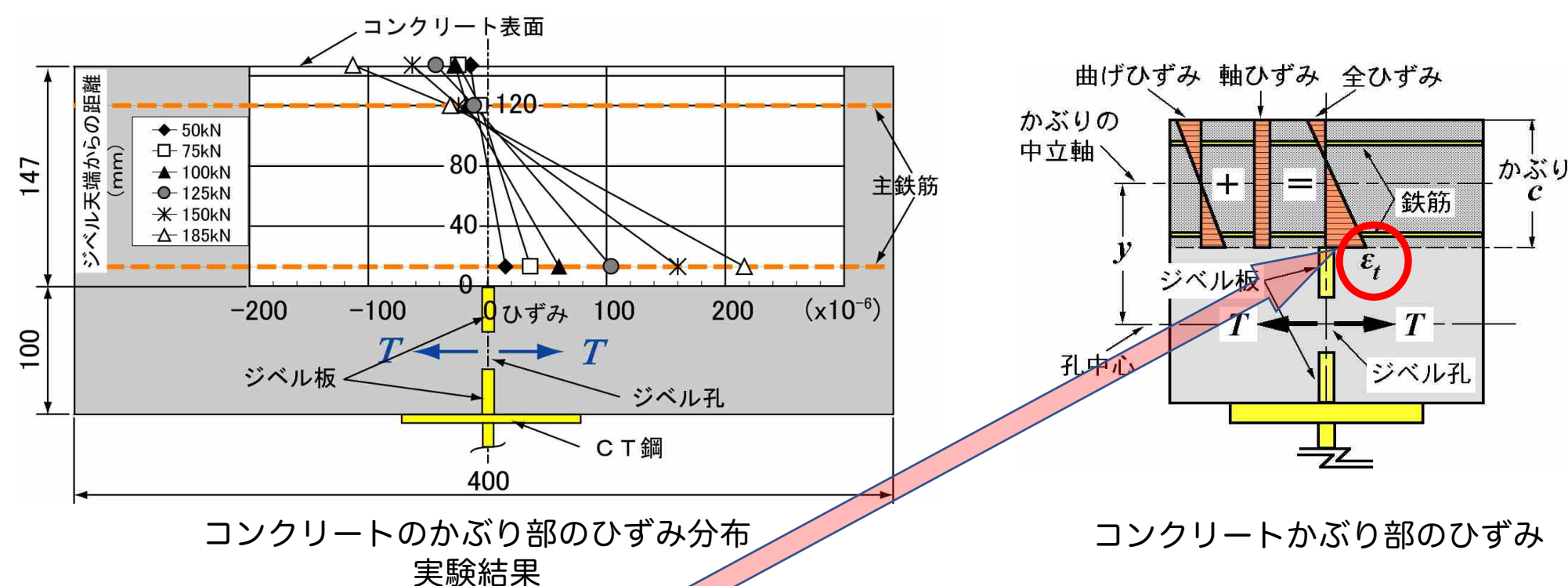
57



背かぶり内の橋軸直角方向軸ひずみ分布

58

孔部には**押し広げ力 T** が発生するのではないか!?



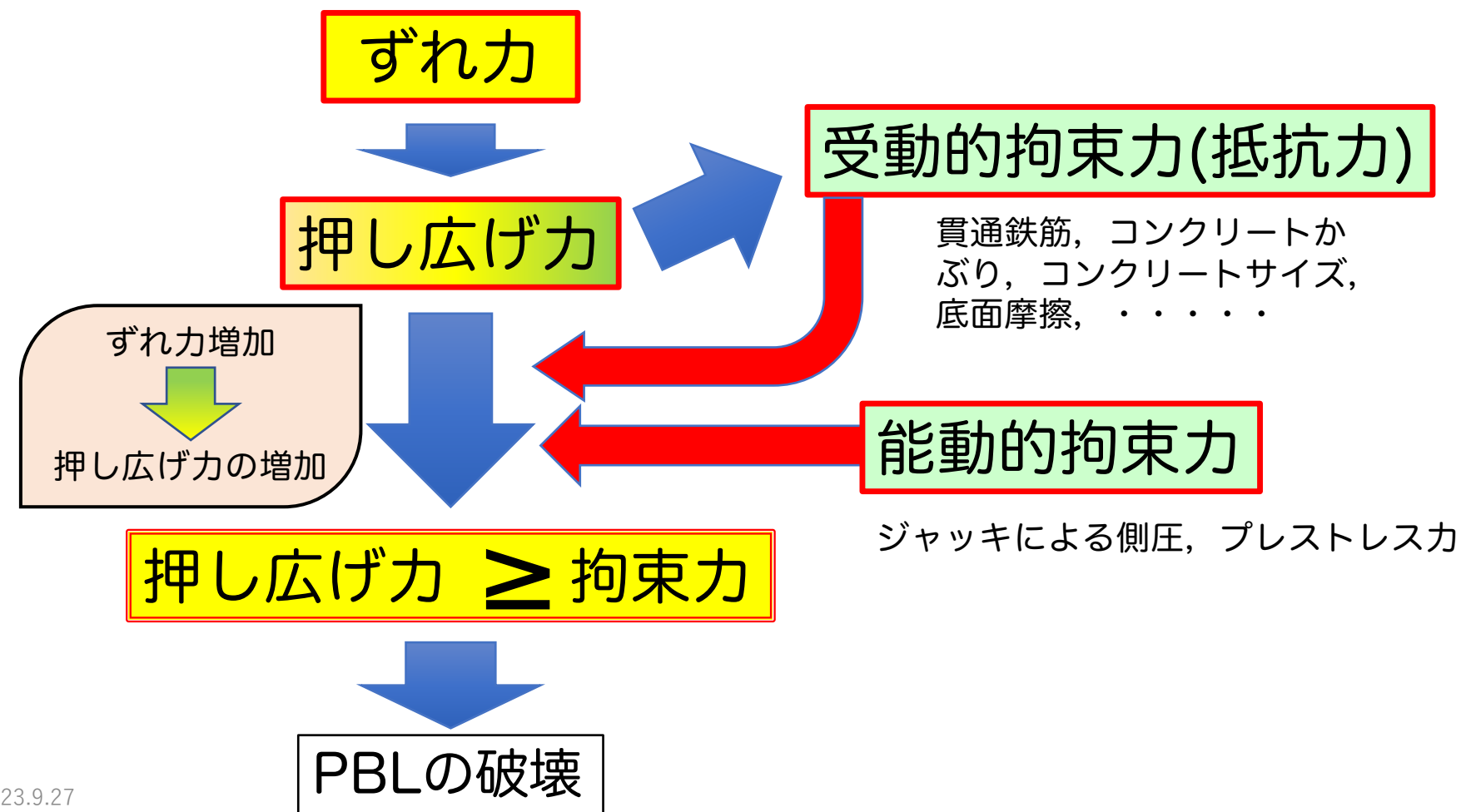
コンクリート背かぶり部には、**曲げモーメントと軸引張力が発生!!**
 → かぶりの下縁応力が引張強度に達した時に破壊する?!

PBLの破壊メカニズム

59

- 1) 孔あき鋼板ジベルに**ずれ力 V** が作用すると、孔付近のコンクリートを割裂させようとする力(**押し広げ力 T**)が発生する。
- 2) **押し広げ力**は、**ずれ力の増加とともに増加**し、これがコンクリートの破壊に起因するジベルの破壊(**孔内および孔周辺のコンクリートのひび割れ**)を発生させる。
- 3) 一方、押し広げ力に対して**コンクリート等の拘束因子による抵抗力**が発生する。
 拘束因子：ずれ耐力試験においては、**孔内貫通鉄筋**、**上かぶり**、**背かぶり**、かぶり内に配置された**補強筋**や**フレーム筋**、押し抜き試験では供試体の**底面摩擦力**がある。
 もし、これらの拘束がなければ、ずれ耐力は、ジベル孔面のコンクリートのせん断強度 V_{int} のみで決まる。
- 4) PBLの破壊は、押し広げ力が種々の拘束因子による抵抗力を上回ったときに起こる。PBLのずれ耐力(最高荷重)は、ジベル孔コンクリートにひび割れが発生した時点、あるいは孔あき鋼板ジベルプレートの天端にひび割れが発生した時点に対応する。
- 5) 最高荷重後は、押し広げ力がその時点での拘束因子による抵抗力に釣り合うまで**ずれ耐力は低下**し、ずれは増加する。
 もしも、最高荷重後において、抵抗力がなければ急激なずれ耐力低下を起こす。貫通鉄筋などにより抵抗力が持続できる場合には、ずれ耐力は緩やかに低下する。

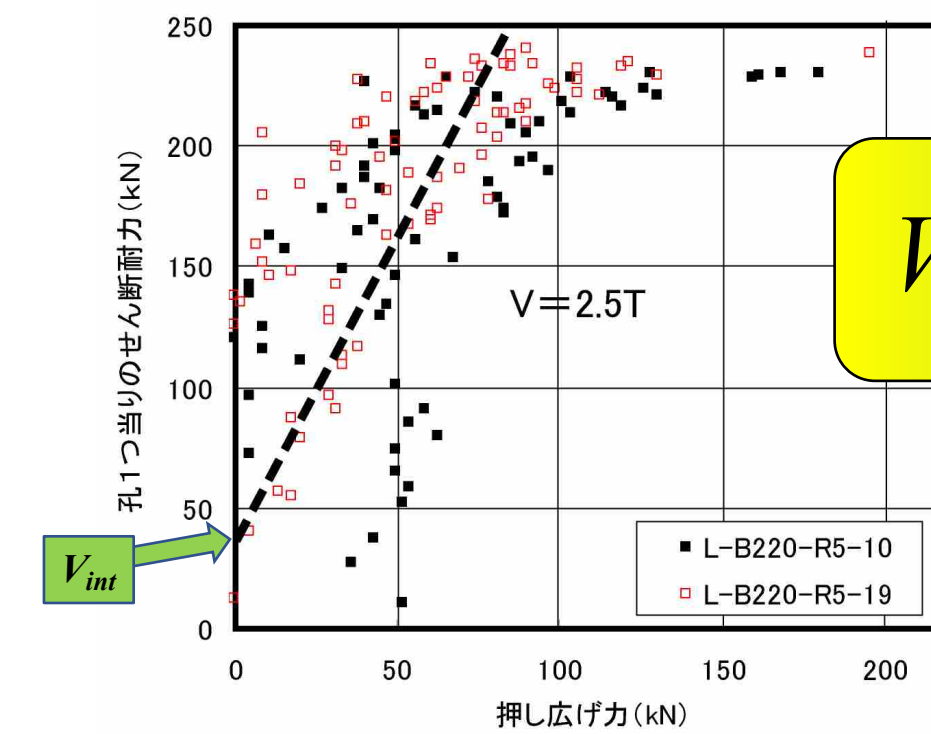
PBLの破壊機構とモデル化



2023.9.27

60

ずれ力(せん断力)と押し広げ力の関係



$$V = V_{int} + 2.5T$$

- V : ずれ力
- V_{int} : 切片(「かぶり無し」のずれ耐荷力)
- T : 押し広げ力

孔内貫通鉄筋のひずみから押し広げ力を求めた

V_{int} : 拘束力が無い時のずれ耐荷力

• 2面せん断破壊の場合

$$V_u = V_{int} + 2.5T_R$$

$$V_{int} = 2 \left\{ \frac{\pi d^2}{4} + (n-1)A_s \right\} \tau_{ct}$$

d : ジベル孔の直径,
 A_s : 貫通鉄筋の断面積,
 n : 鉄筋とコンクリートの弾性係数比
 τ_{ct} : コンクリートのせん断強度
 (=コンクリートの引張強度 f_{ct})

62

T_R : 押し広げ力に対する抵抗力

$$V_u = V_{int} + 2.5T_R$$

$$T_R = T_s + T_{cb} + T_{cu} + T_f + P$$

T_s : ジベル孔貫通鉄筋による拘束力
 T_{cb}, T_{cu} : かぶり(背かぶり, 上かぶり)による拘束力
 T_f : 供試体の底面摩擦による拘束力
 P : 能動的拘束力 (プレストレス力等)

61

63

T_s : ジベル孔内貫通鉄筋による拘束力

$$T_s = E_s A_s \varepsilon_s$$

E_s : 貫通鉄筋の弾性係数

A_s : 貫通鉄筋の断面積 (貫通鉄筋のない場合 $A_s = 0$)

ε_s : 貫通鉄筋によるひび割れ拘束ひずみ

$\varepsilon_s = 400\mu$ (種々の試験における貫通鉄筋の最高荷重時のひずみは概ね300~500 μ であることから決めた)

T_{cu} : 上かぶりの拘束力

$$T_{cu} = \frac{f_{ct}}{\frac{e_u y_u}{I_{cu}} + \frac{1}{A_{cu}}}$$

e_u : 上かぶりの中立軸からジベル上縁までの距離

y_u : ジベル孔中心から上かぶりの中立軸までの距離

注意 : 実際の合成桁では上かぶりは無い

I_{cu} : 上かぶりの断面2次モーメント
鉄筋の無い場合

$$I_{cu} = h c_u^3 / 12$$

A_{cu} : 上かぶりの断面積

$$A_{cu} = h c_u$$

T_{cb} : 背かぶりコンクリートの拘束力

$$T_{cb} = \frac{f_{ct}}{\frac{e_b y_b}{I_{cb}} + \frac{1}{A_{cb}}}$$

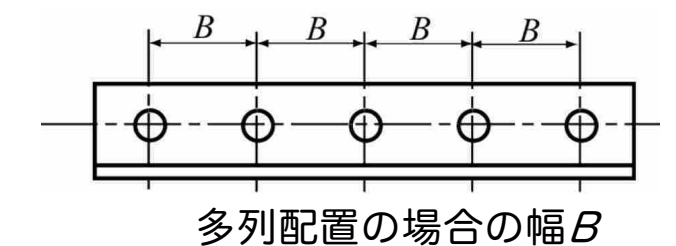
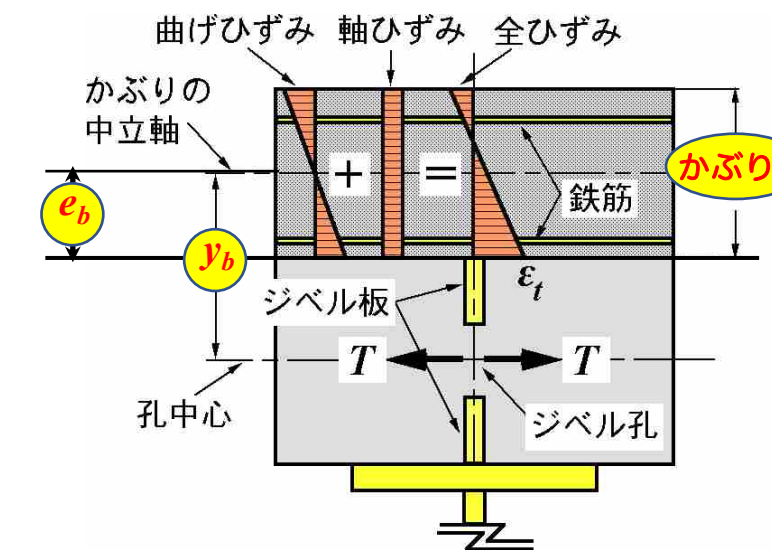
f_{ct} : コンクリート引張強度

I_{cb} : 背かぶりの断面2次モーメント
鉄筋のない場合

$$I_{cb} = B c^3 / 12$$

A_{cb} : 背かぶりの断面積

$$A_{cb} = B c$$



T_f : 底面摩擦による拘束力

注意 : 実際の合成桁では底面摩擦は無い

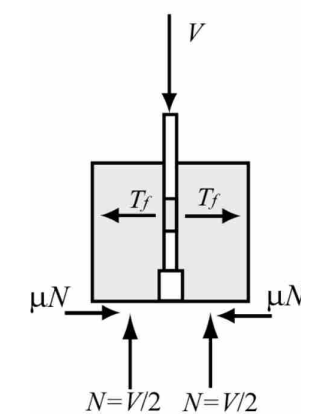
$$T_f = \mu N$$

上式をずれ耐力式

$$V_u = V_{int} + 2.5T$$

$$= V_{int} + 2.5(T_s + T_{cb} + T_{cu} + \mu V_u / 2)$$

に代入して、ずれ耐荷力 V_u を求めると・・・



μ : 摩擦係数
 N : 垂直抗力
 $= V_u / 2$

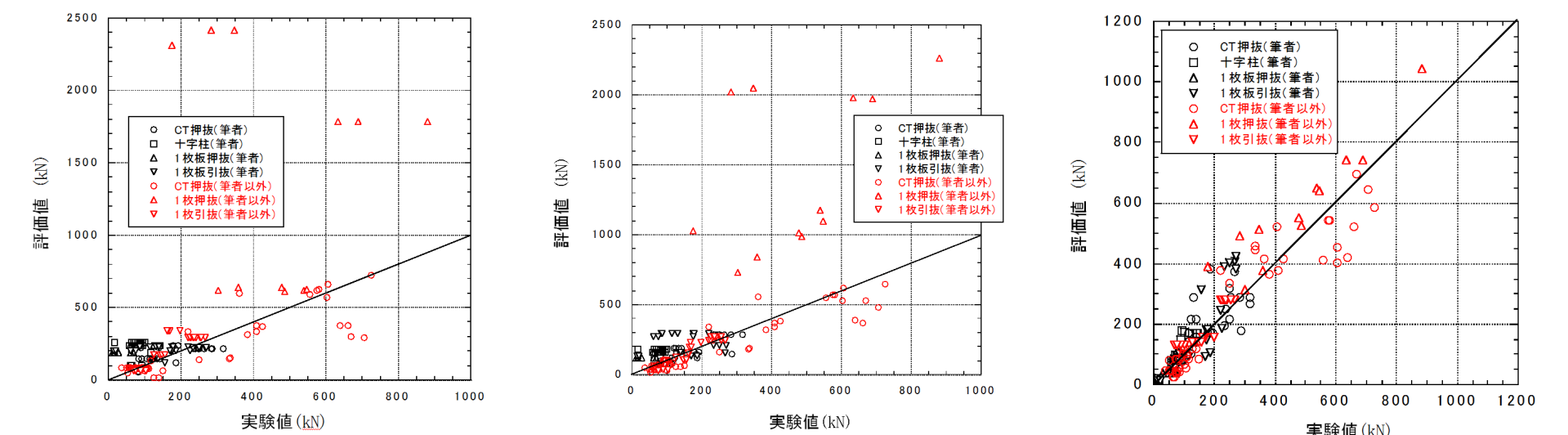
CT鋼押し抜き試験における 1孔当たりのPBLずれ耐力評価式

$$V_u = \frac{V_{\text{int}} + 2.5(T_s + T_{cb} + T_{cu})}{1 - 1.25\mu}$$

が得られる。

上式は、押し抜き試験における貫通鉄筋と上かぶりおよび背かぶりがある場合の、PBLずれ耐力評価式です。もし他の拘束力がある場合は、さらにそれらを考慮して V_u を求めれば良い。なお、底面摩擦の摩擦係数は供試体底面の支持状態によって決まります。

ずれ耐力(せん断耐力)評価結果と 試験結果の比較



Leonhardt

複合構造標準示方書

本提案式

図から、本提案式は実験結果をうまく捉えているようにみえます。

以上、PBL押し抜き試験結果について、仮定とモデル化の一つの考えを示しました。アプローチの仕方は多様ですが、力学的に説得できれば一層良いと思います。

さて、合成桁の1孔当たりのPBLずれ耐力評価式は

$$V_u = V_{\text{int}} + 2.5(T_s + T_{cb})$$

ここに、

V_u : 1孔当たりのずれ耐力,
 V_{int} : ジベル孔のせん断耐力,

$$V_{\text{int}} = 2 \left\{ \frac{\pi d^2}{4} + (n-1)A_s \right\} \tau_{ct}$$

T_s : 貫通鉄筋の拘束力,

$$T_s = E_s A_s \varepsilon_s$$

T_{cb} : 背かぶりの拘束力,

$$T_{cb} = \frac{f_{ct}}{\frac{e_b y_b}{I_{cb}} + \frac{1}{A_{cb}}}$$

d : ジベル孔径,

E_c : コンクリートの弾性係数,

E_s : 貫通鉄筋の弾性係数,

$n = E_s / E_c$

A_s : 貫通鉄筋の断面積,

$\varepsilon_s = 400\mu$: ひび割れ拘束ひずみ

(実験結果より決定)

最高荷重では、ひずみは300~500 μ を考慮,

τ_{ct} : コンクリートのせん断強度= f_{ct}

f_{ct} : コンクリート引張強度,

I_{cb} : 背かぶりの断面2次モーメント

鉄筋のない場合: $I_{cb} = Bc^3 / 12$

A_{cb} : 背かぶりの断面積: $A_{cb} = Bc$

B : ジベル孔間隔

c : かぶり(背かぶり)厚

合成桁用ずれ耐力式へ修正

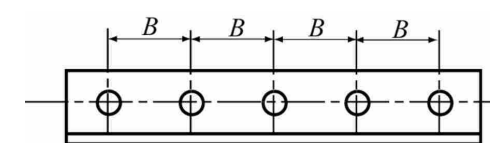
押し抜き試験のずれ耐力式:

$$V_u = \frac{V_{\text{int}} + 2.5(T_s + T_{cb} + T_{cu})}{1 - 1.25\mu}$$

ところが、合成桁では、

1) 上かぶりが無い $\rightarrow T_{cb} = 0$

2) 底面の摩擦は発生しない $\rightarrow \mu = 0$



ジベル孔配置
多列配置の場合の幅B

結局 (年寄りのたわごと……!?)

「仮定の設定」「モデル化」を行うためには、

- ・破壊や挙動など、実現象を緻密に観察し、
- ・現象を理解・消化して、一般化・体系化し、
- ・幾つかの仮定を導入して、その概念を簡単な数学モデルで表現する
- ・現象を再現するためのモデルは、できるだけ単純かつ簡単なものがよい
- ・結果は使えるほどの正確さがあれば良い(実務で使える)

そのためには、実験がとても重要です。

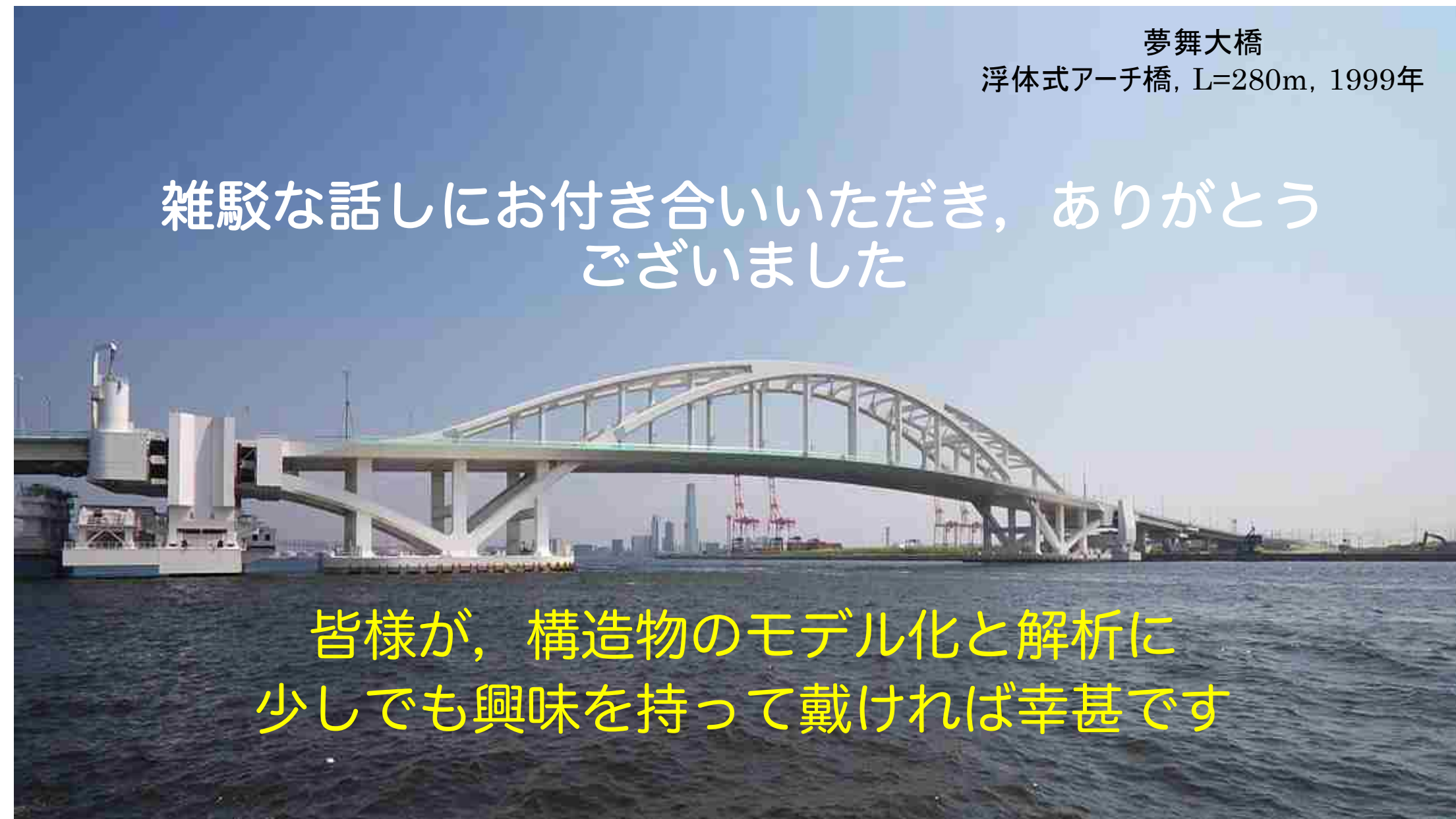
それができれば

- ・寿命の長い論文が書ける(いつまで論文が生き続けられるか?)
- ・「○○式」「△△モデル」が長期間に亘って社会に貢献できるのではないのでしょうか!!

夢舞大橋
浮体式アーチ橋, L=280m, 1999年

雑駁な話しにお付き合いいただき、ありがとうございました

皆様が、構造物のモデル化と解析に
少しでも興味を持って戴ければ幸甚です



鋼コンクリート複合構造に関する基礎的研究

(株)HRC研究所
中島章典

土木学会研究委員会活動歴

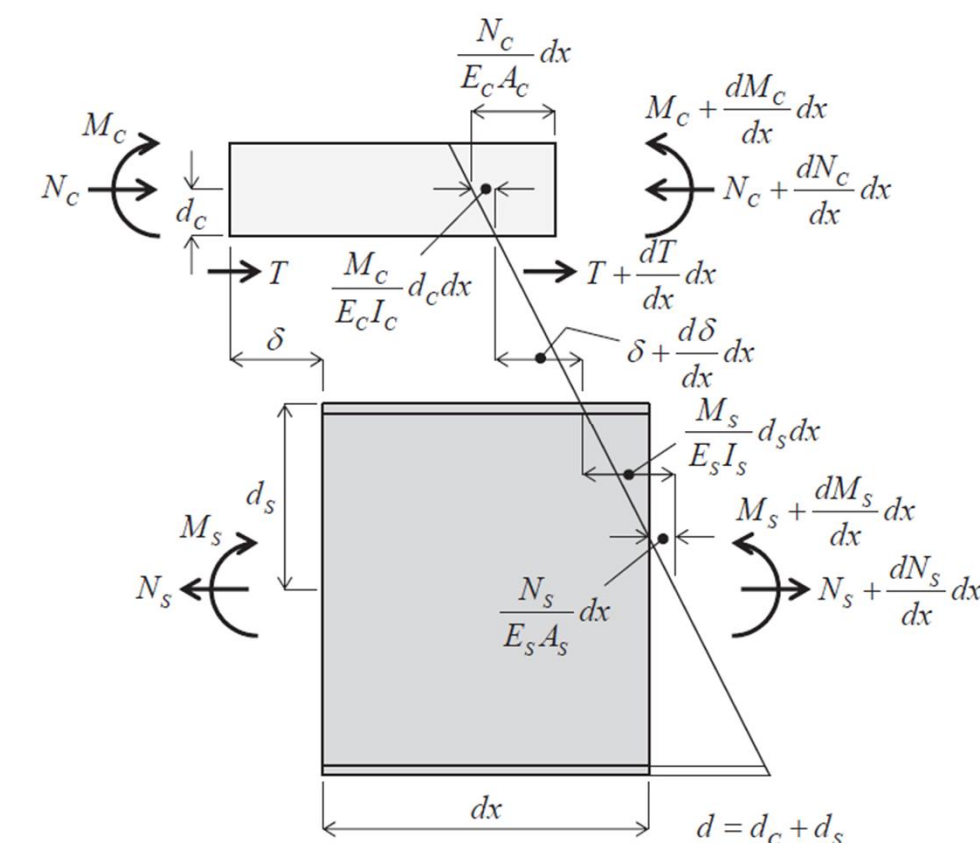
- 鋼構造委員会
 - 耐震, 合成構造
- 構造工学委員会
 - 橋梁振動モニタリング
- 複合構造委員会
 - 複合構造
- 地震工学委員会
- コンクリート委員会

略歴

- 1978年東北大学工学部土木工学科卒業
- 1980年東北大学大学院土木工学専攻博士課程前期修了
- 1983年同博士課程後期修了
博士論文 橋梁構造および部材の動的終局強度に関する基礎的研究(指導教員:倉西茂先生)
- 1983年～1985年 東北大学工学部土木工学科助手
- 1985年～ 宇都宮大学工学部助手
阿部英彦先生の研究室で合成構造の研究に携わる.
- 1989年～ 同助教授
- 2001年～2020年 同教授
- 2020年 (株)HRC研究所 技術顧問

2

不完全合成梁の実験と解析

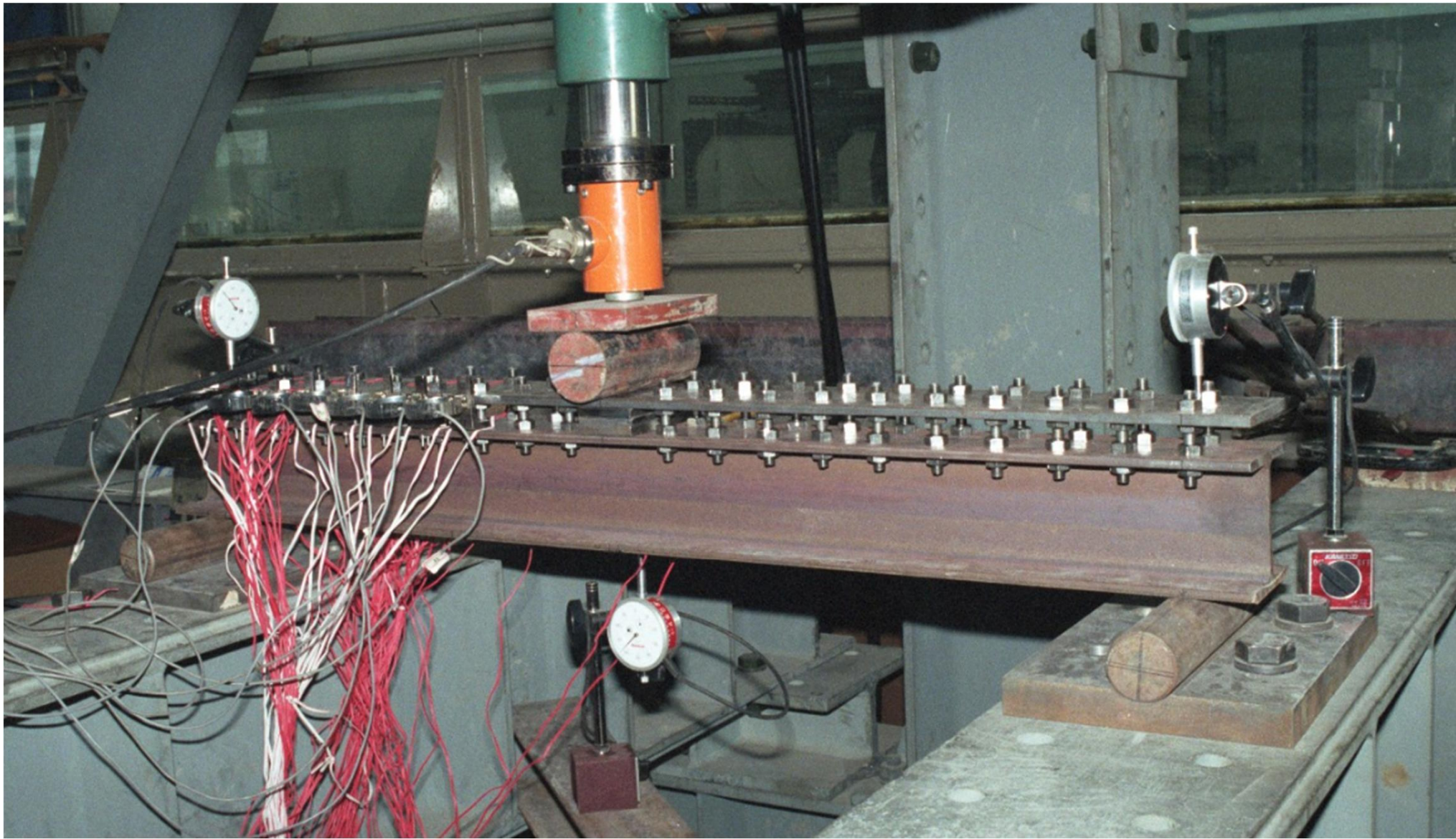


Newmark, N.M. et.al. : Test and analysis of composite beams with incomposite interaction, Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis, Vol.9, No.1, pp.75-92, 1951.

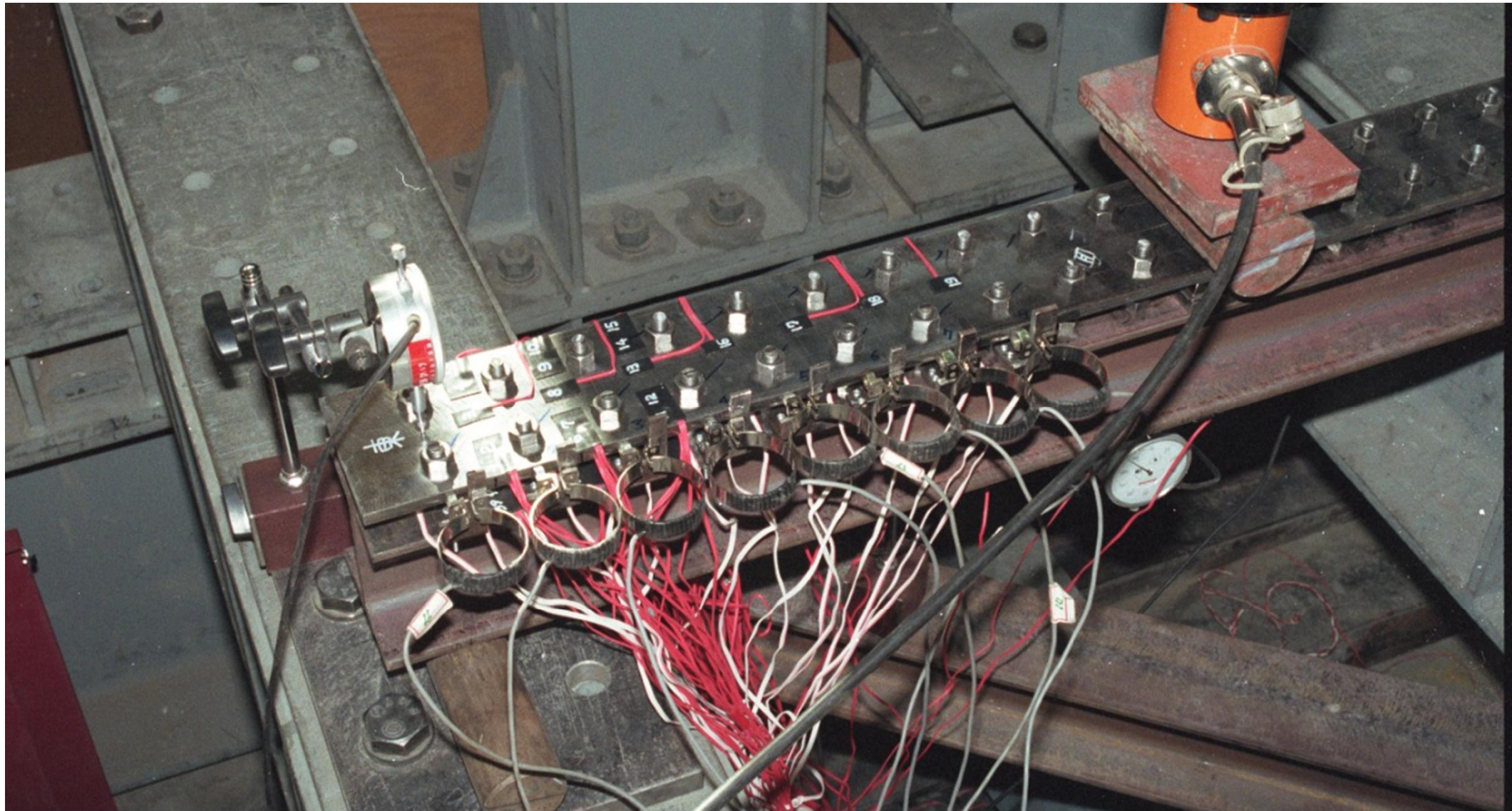
3

4

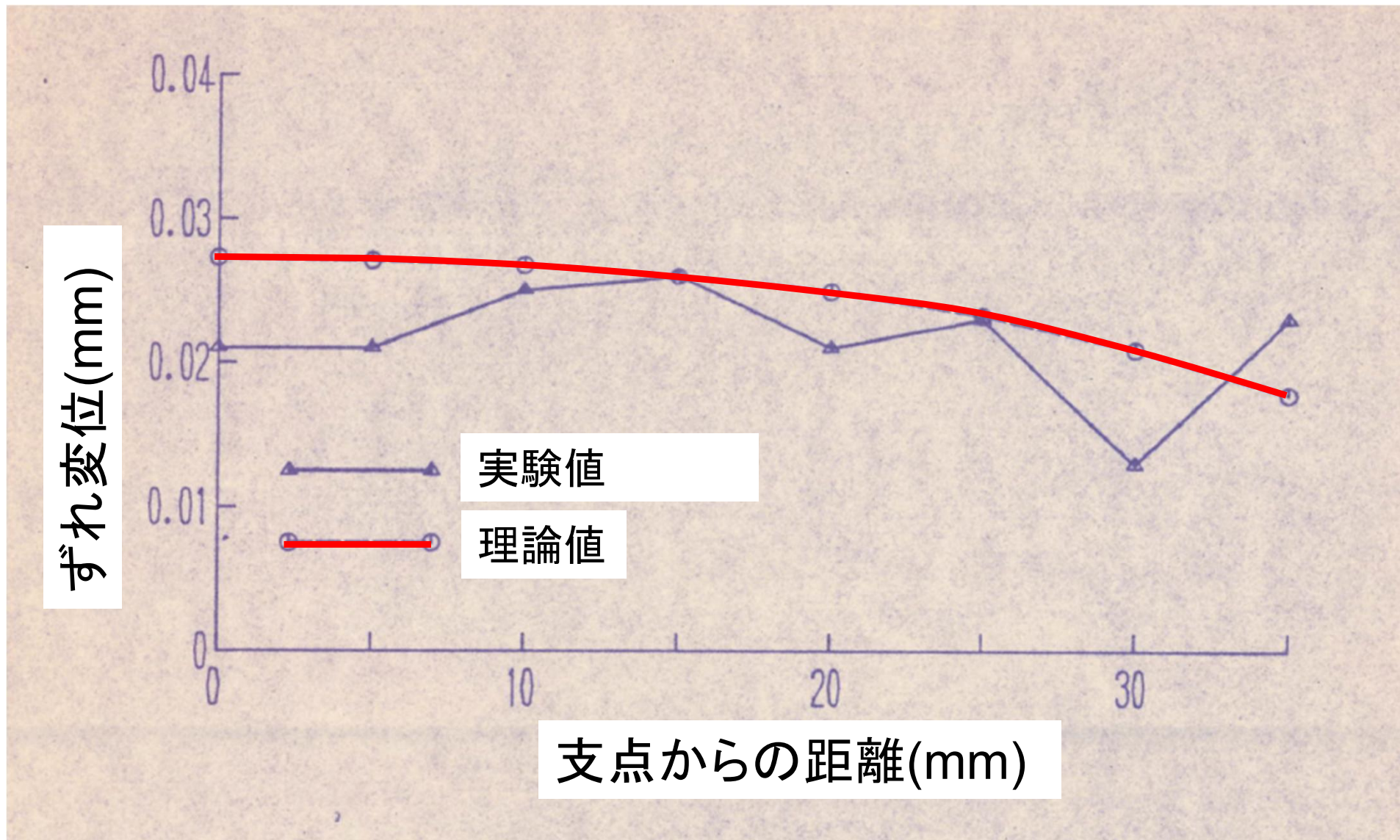
不完全合成梁理論の確認(1990年)



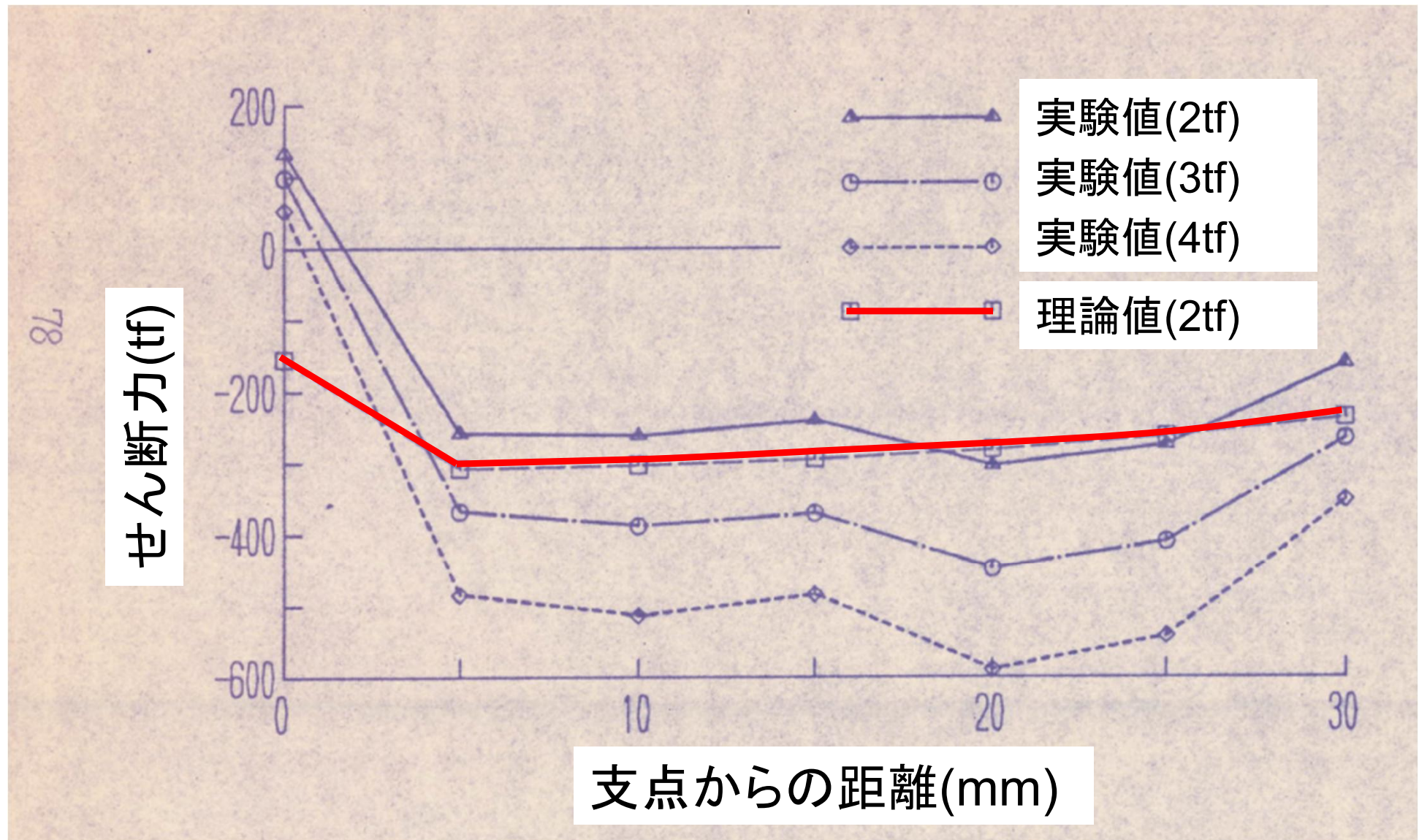
鋼材を用いた合成梁の模型試験体
スパン1m, ボルト径9mm, ボルト配置間隔50mm



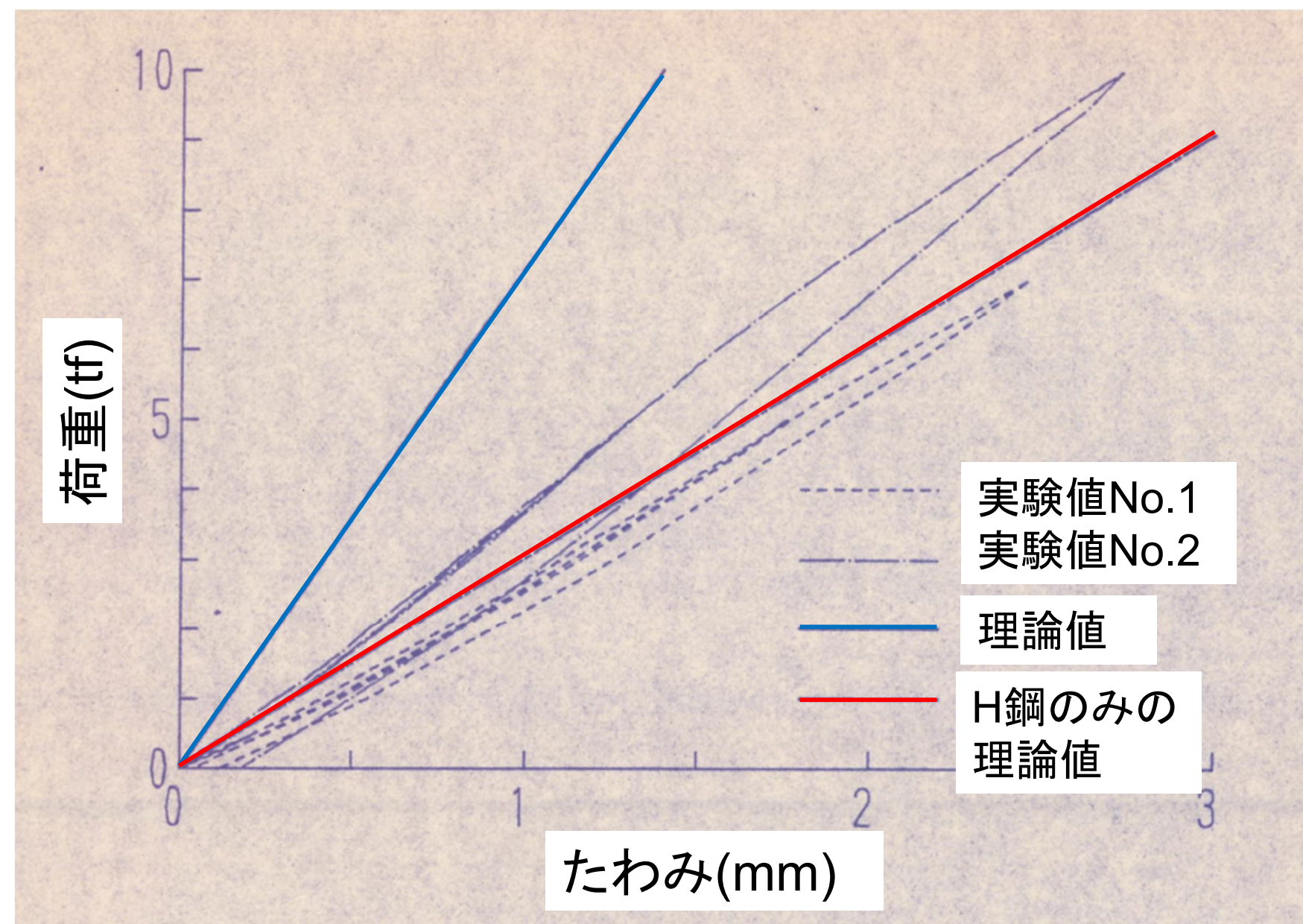
鋼材を用いた合成梁の模型試験体



橋軸方向のずれ変位分布(荷重2tf)
(Newmarkの理論値との比較)



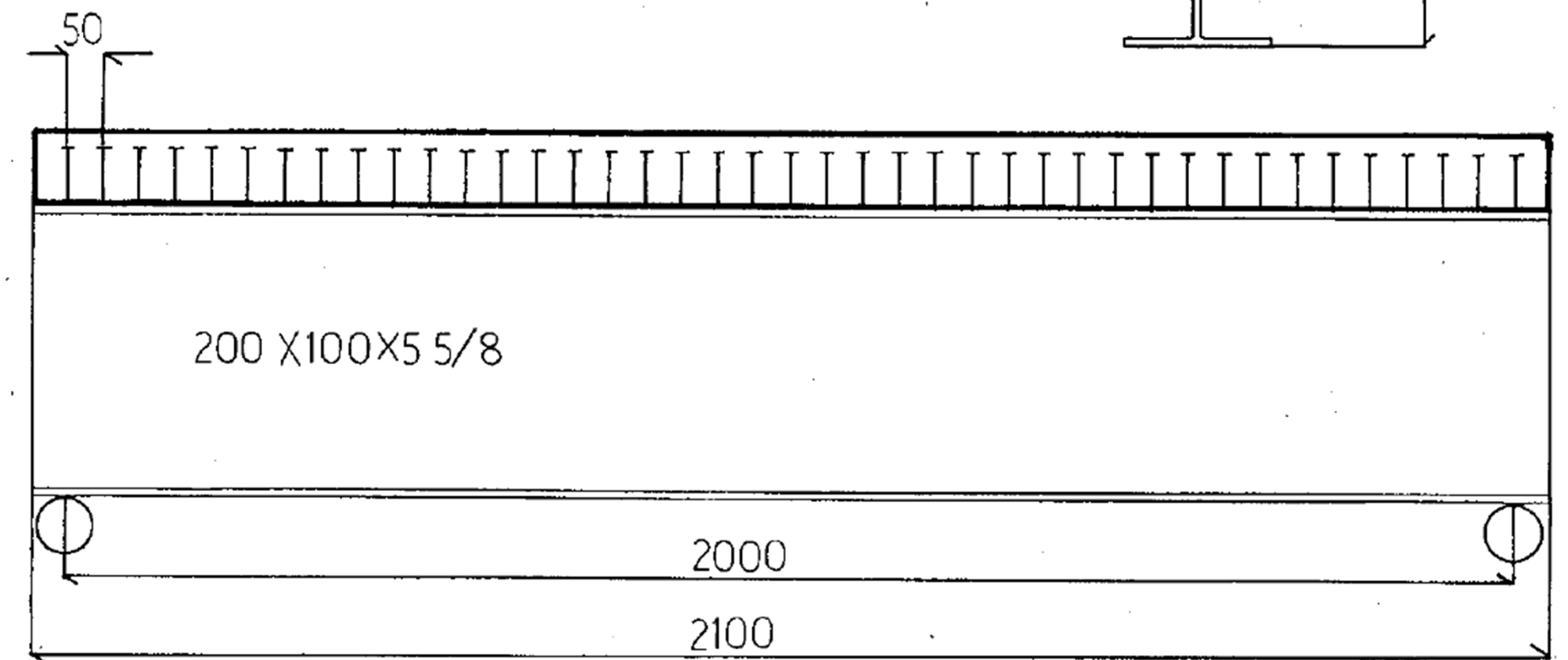
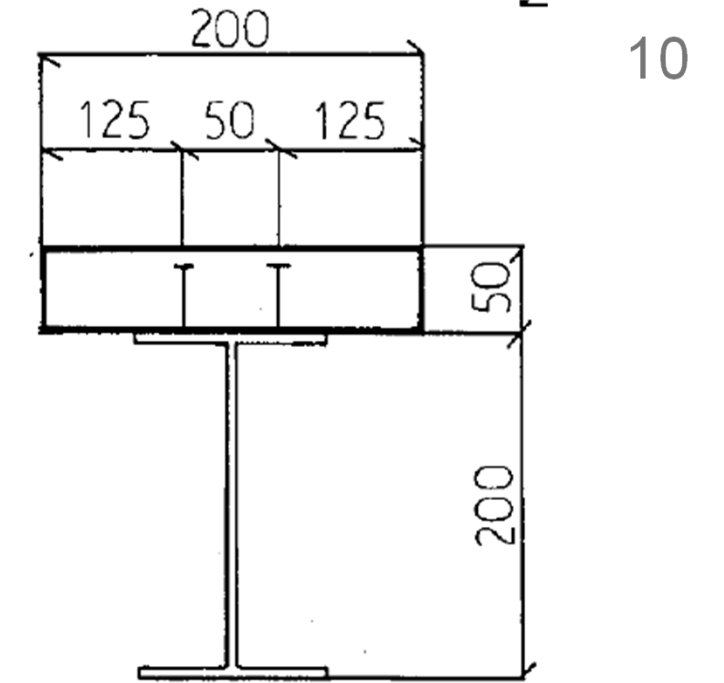
橋軸方向のせん断力分布
(床版の軸力分布から算定)



荷重－たわみ関係
(H鋼のみの理論値に近い, ボルト孔の影響)

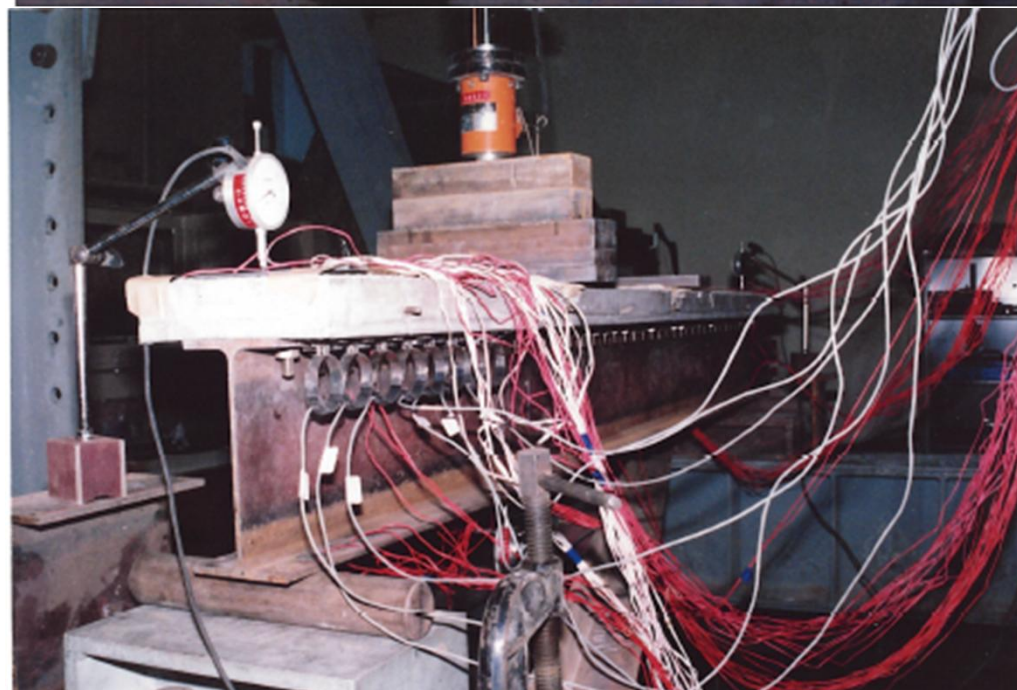
H鋼とコンクリート床版を用いた不完全合成梁の実験(1991年)

ずれ止めにボルト用いた試験体
ボルト径12mm, ボルト高さ40mm,
ボルト配置間隔50mm

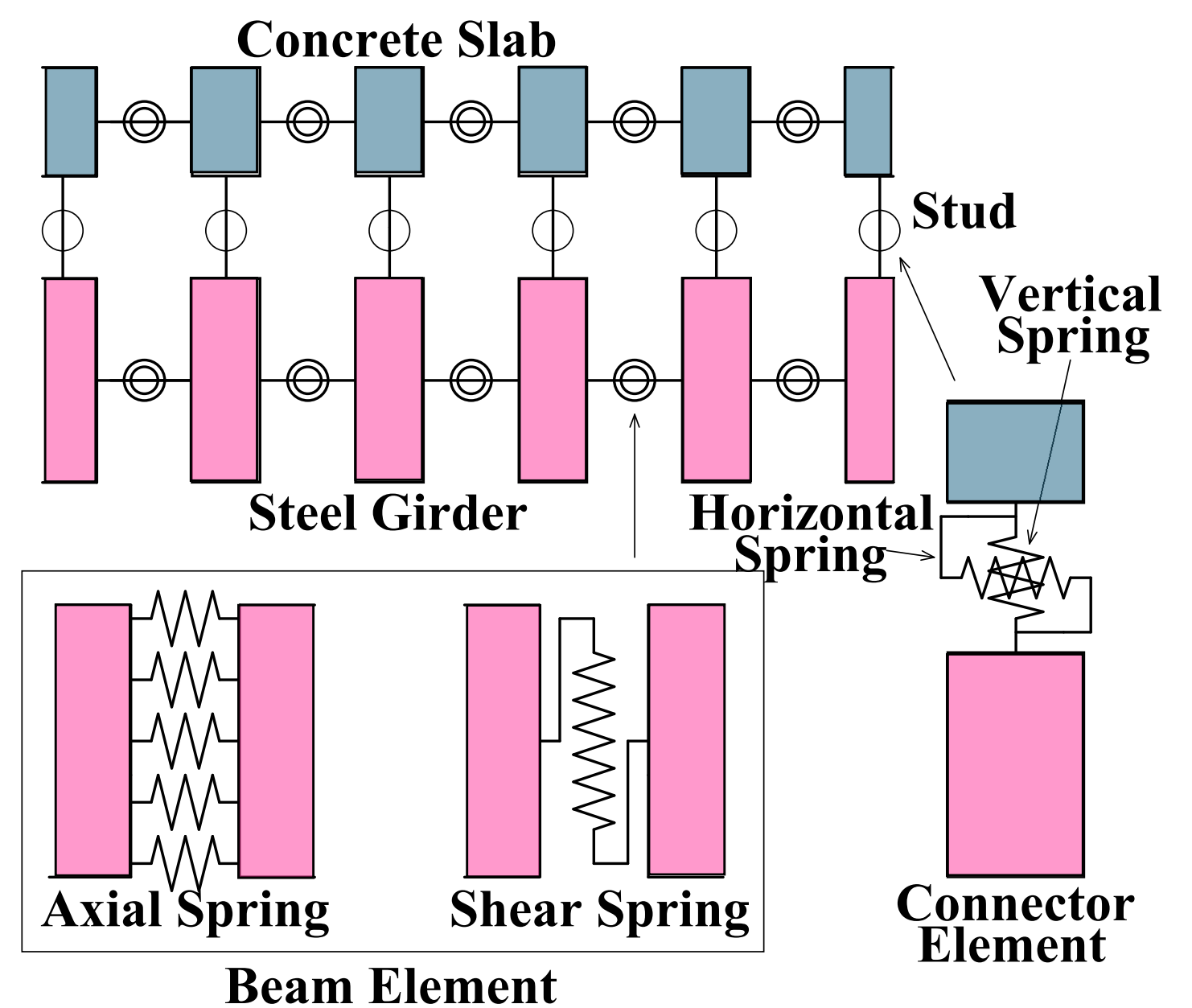


9

H形鋼とボルトを用いた合成梁試験体 (スパン2m)



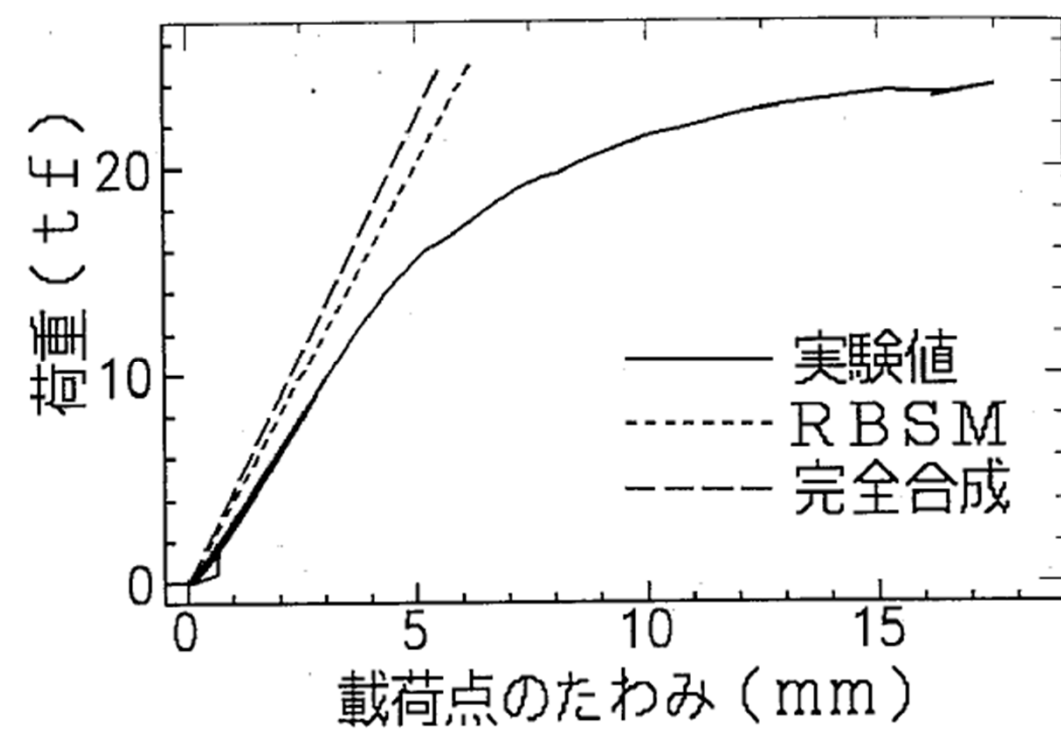
フランジに孔あけ, ねじ切り, 溶接



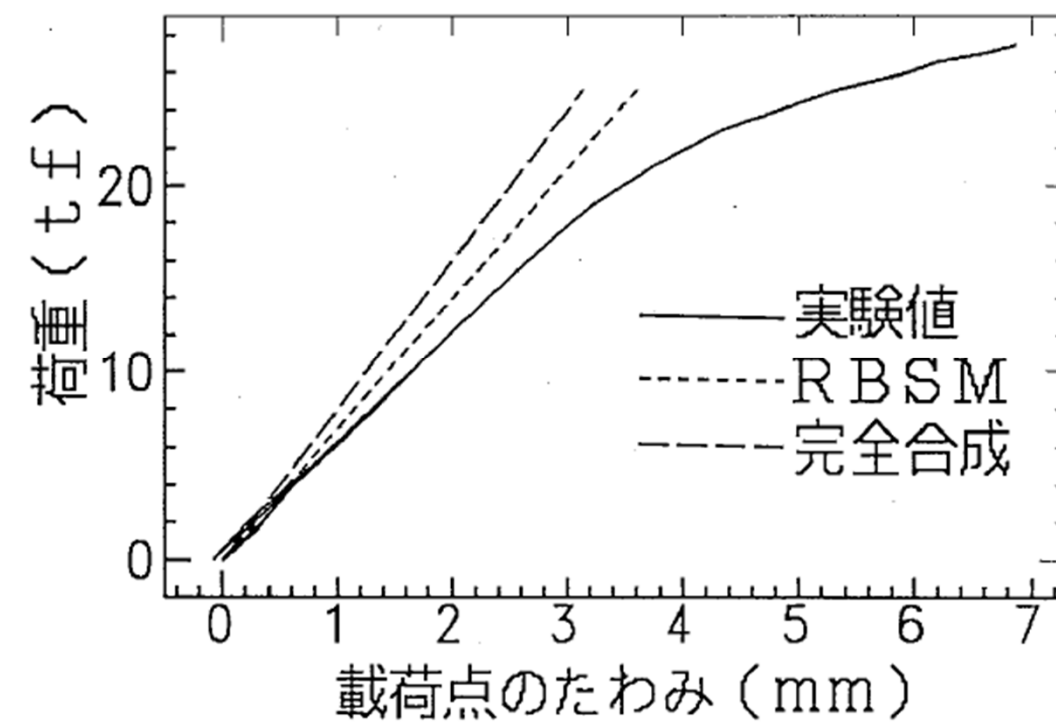
不完全合成梁の剛体ばねモデル (弾性解析)

11

12

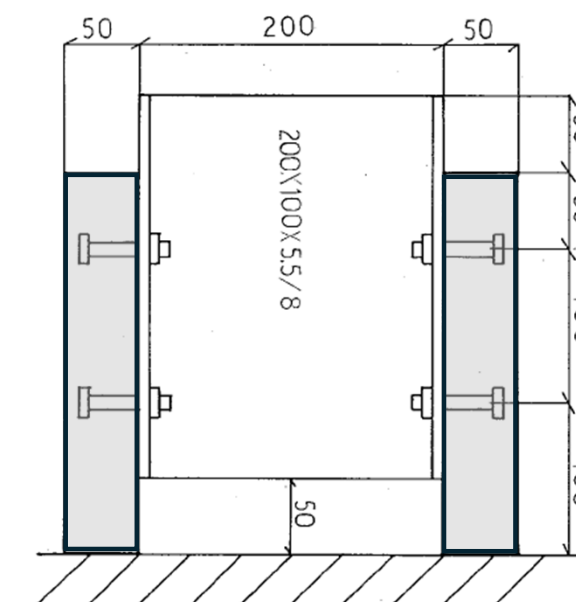
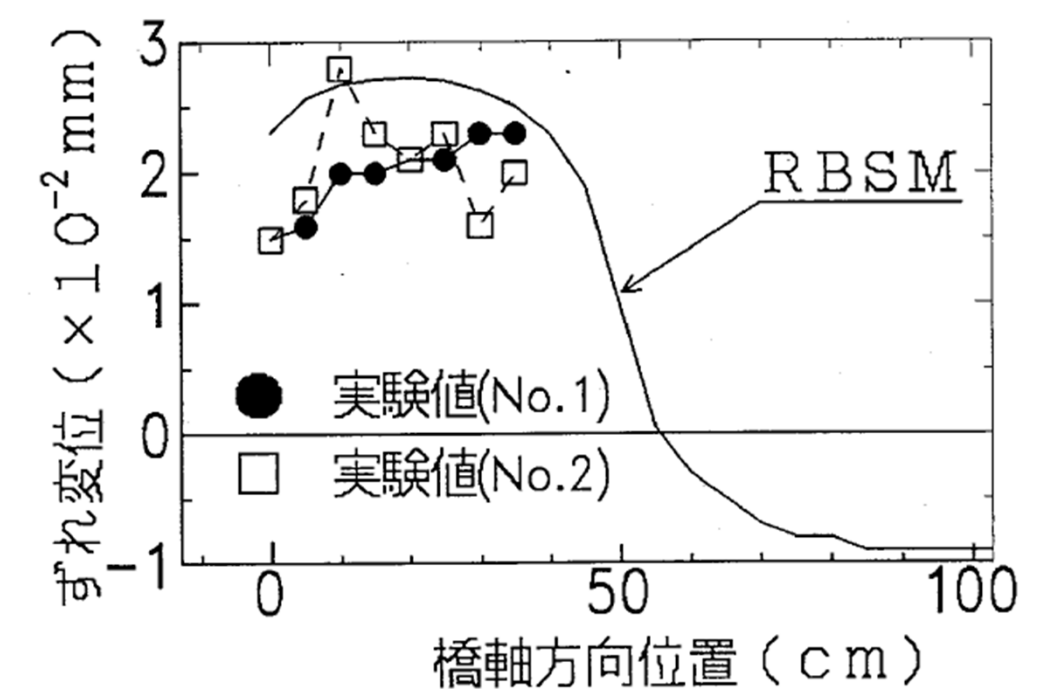
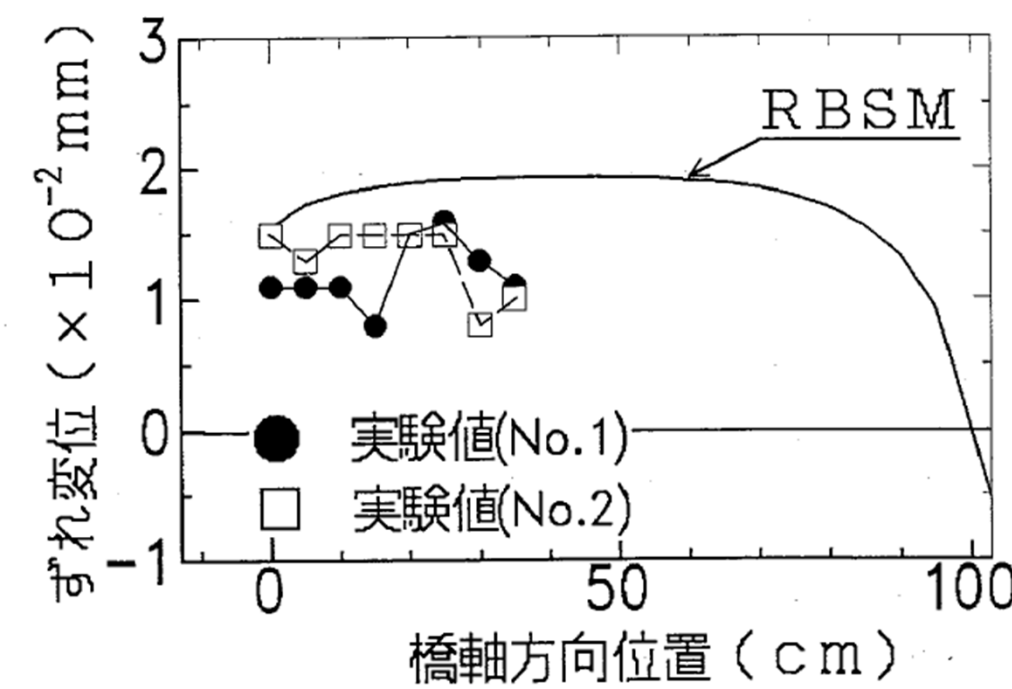


荷重と載荷点のたわみ (1/2点載荷)



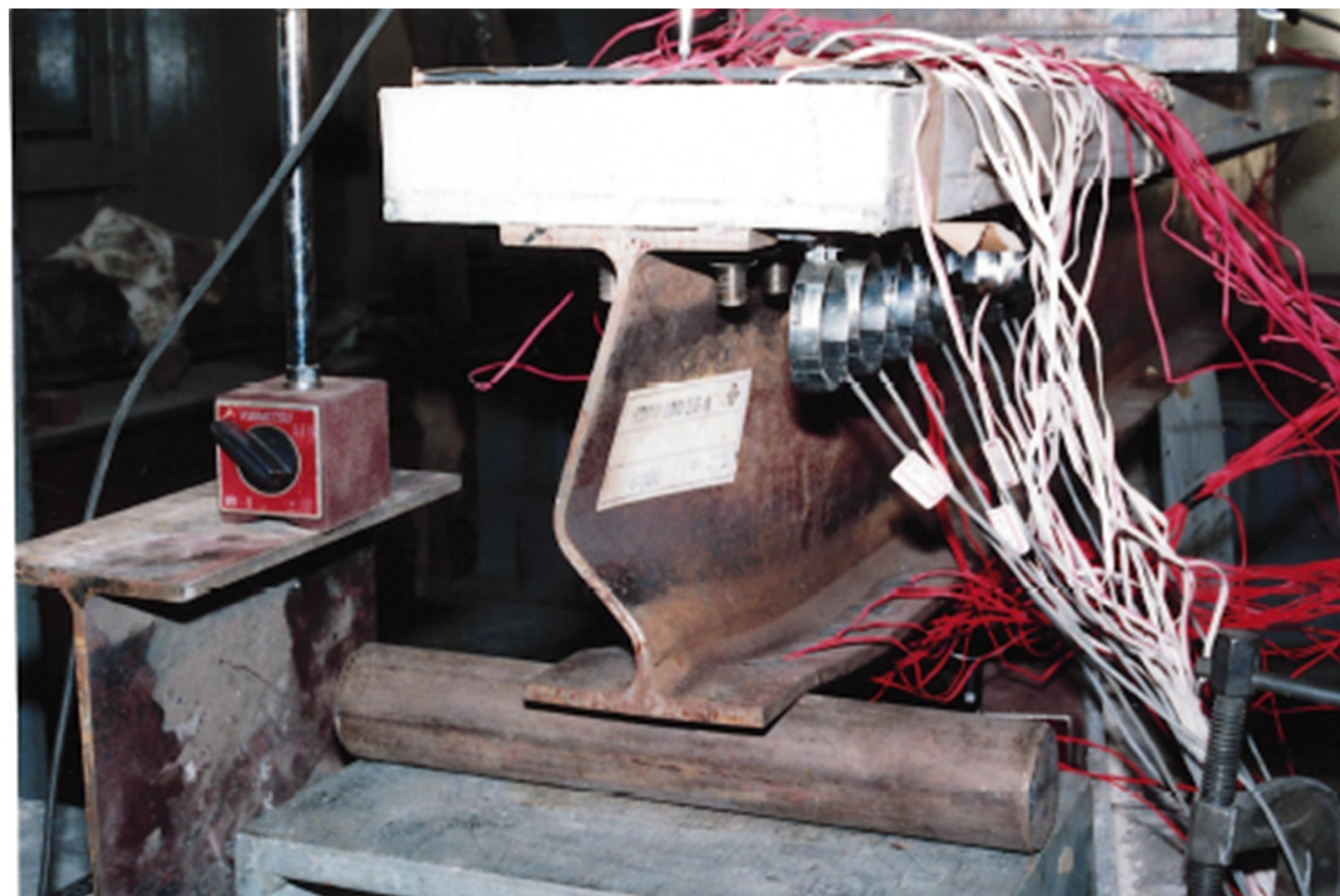
完全合成の理論値に比較して
剛性が低い，ボルト孔の影響

13



ずれ変位分布(1/4点載荷,
荷重10tf)

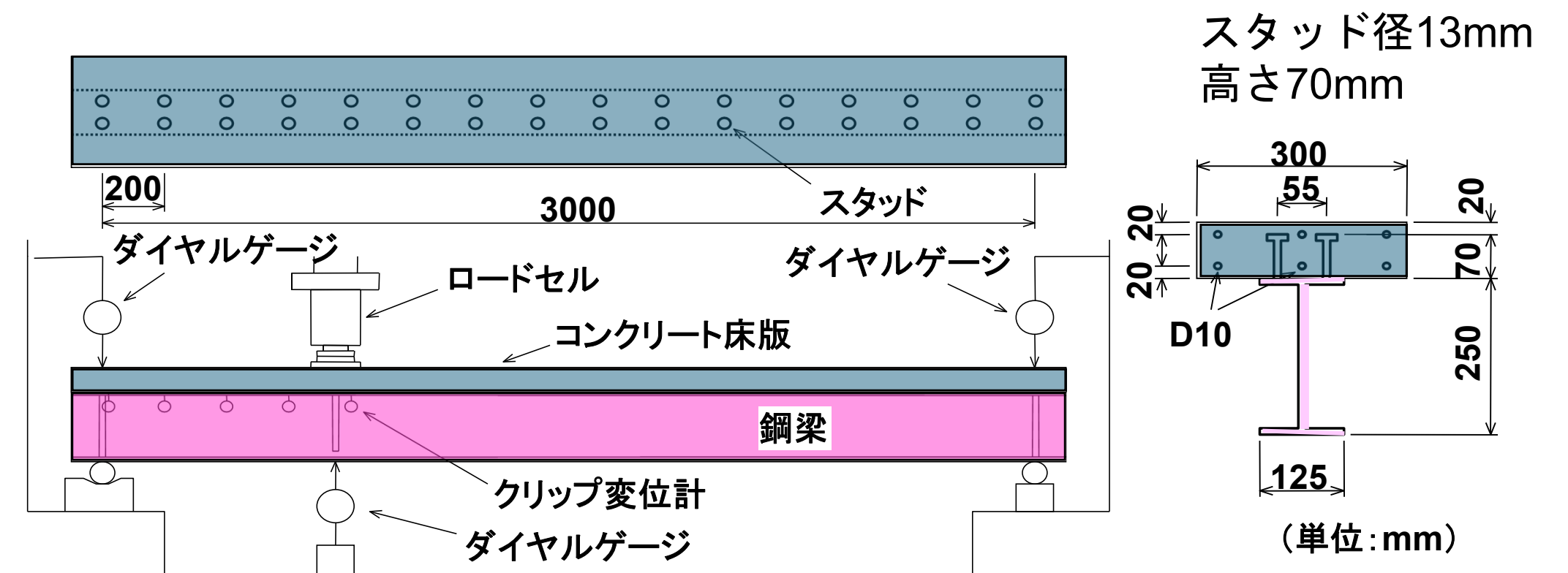
14



支点部の鋼梁ウェブの座屈

15

スタッドを用いた不完全合成梁の実験(1994年)



不完全合成梁試験体の概要

押抜き試験結果の利用

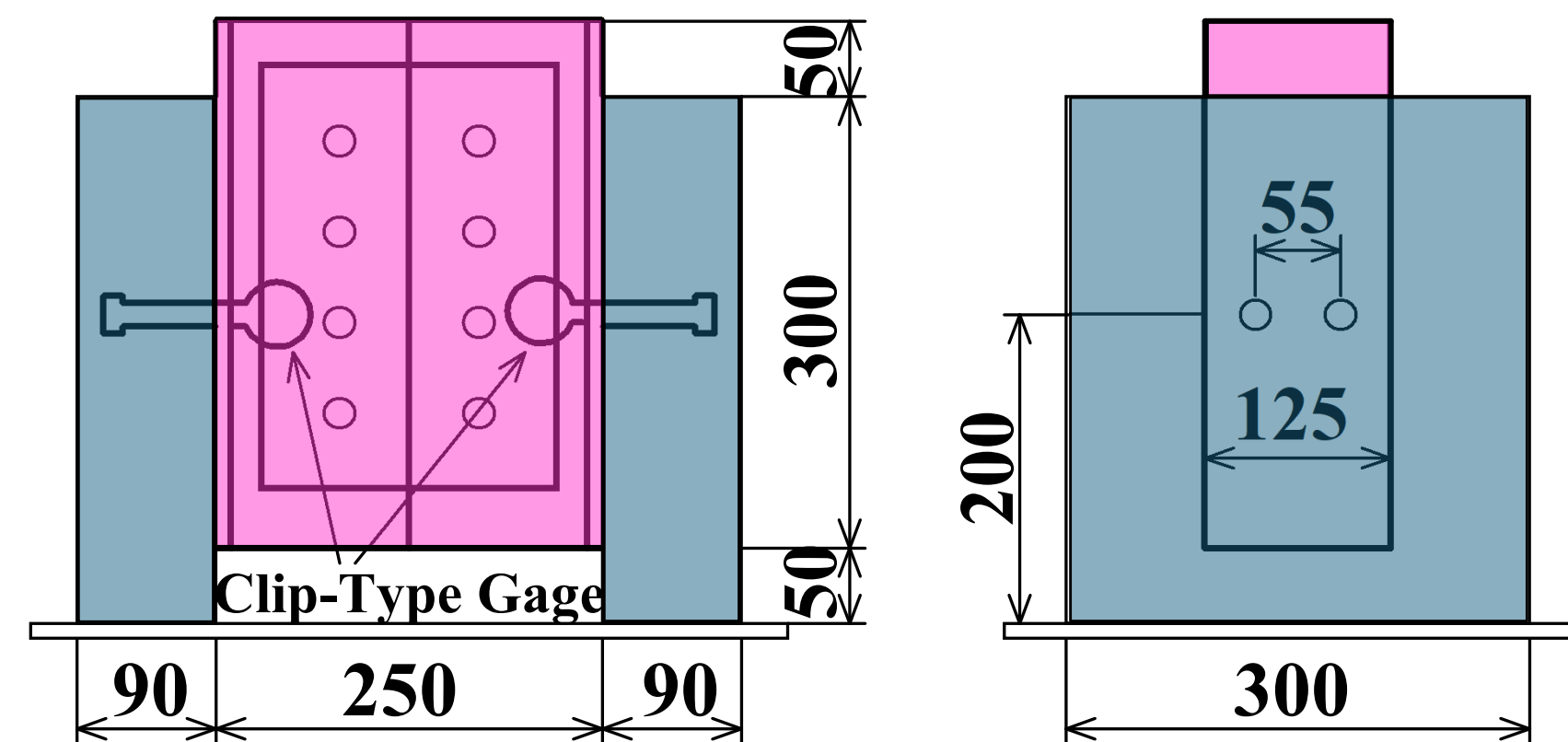
(JSSC頭付きスタッドの押抜き試験の標準化策定中)

16



合成梁の試験状況

17

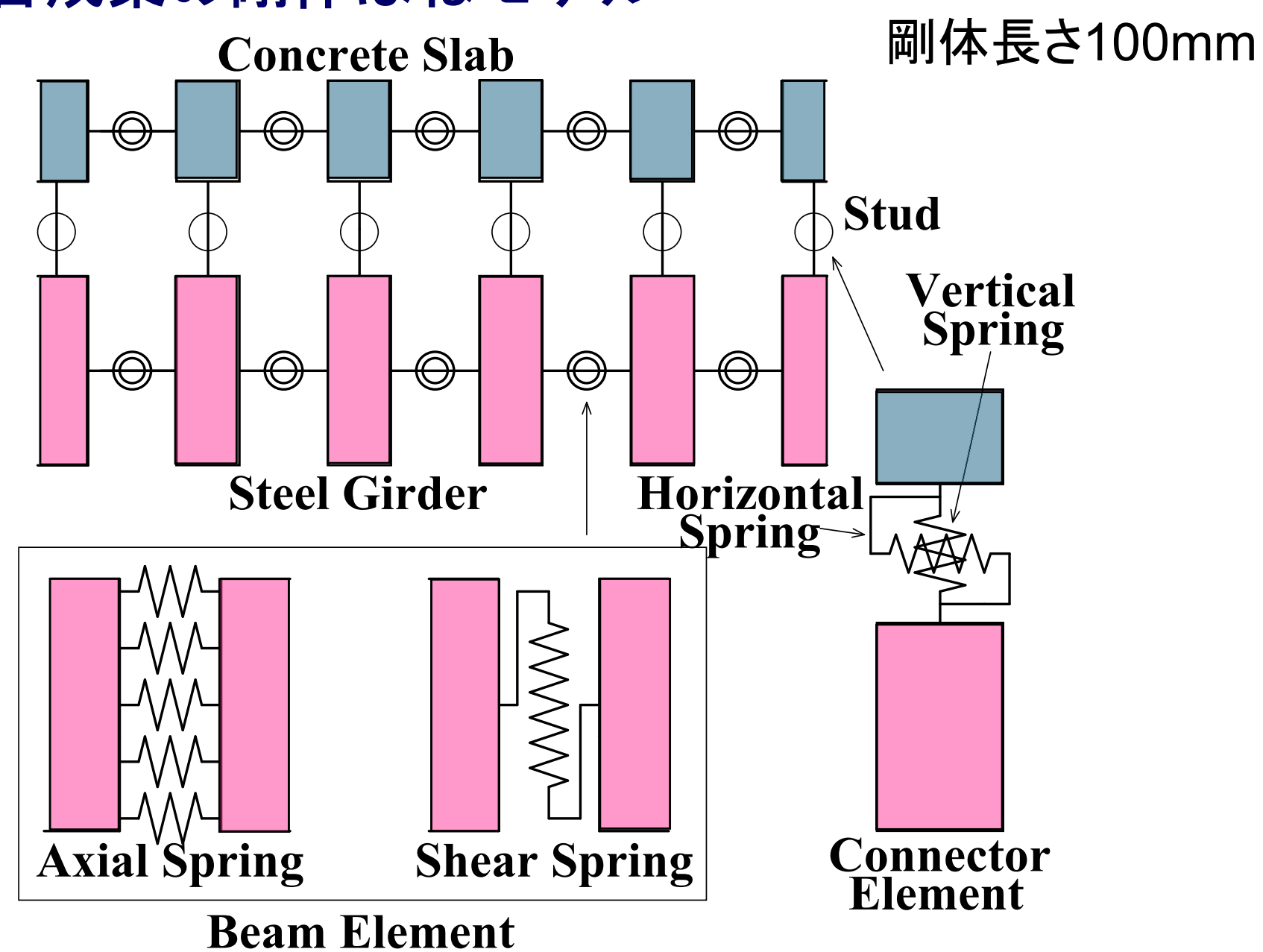


(Dimensions in mm)

押抜き試験体の概要

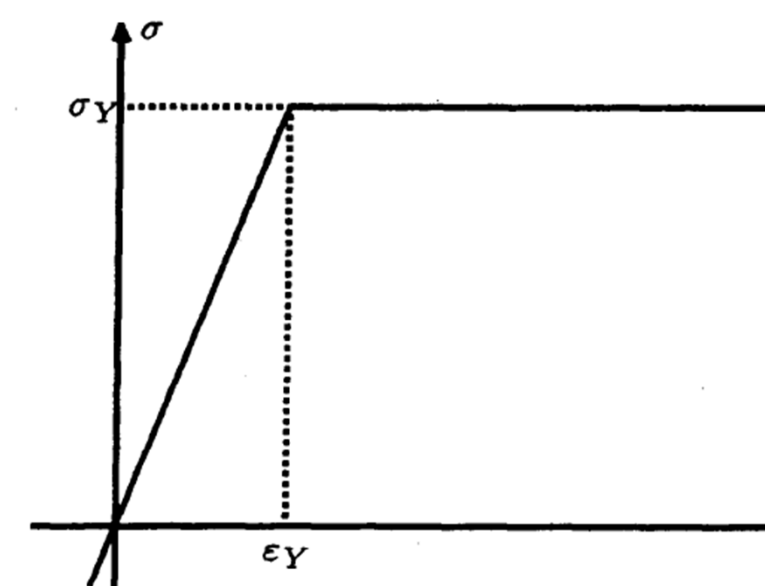
18

不完全合成梁の剛体ばねモデル

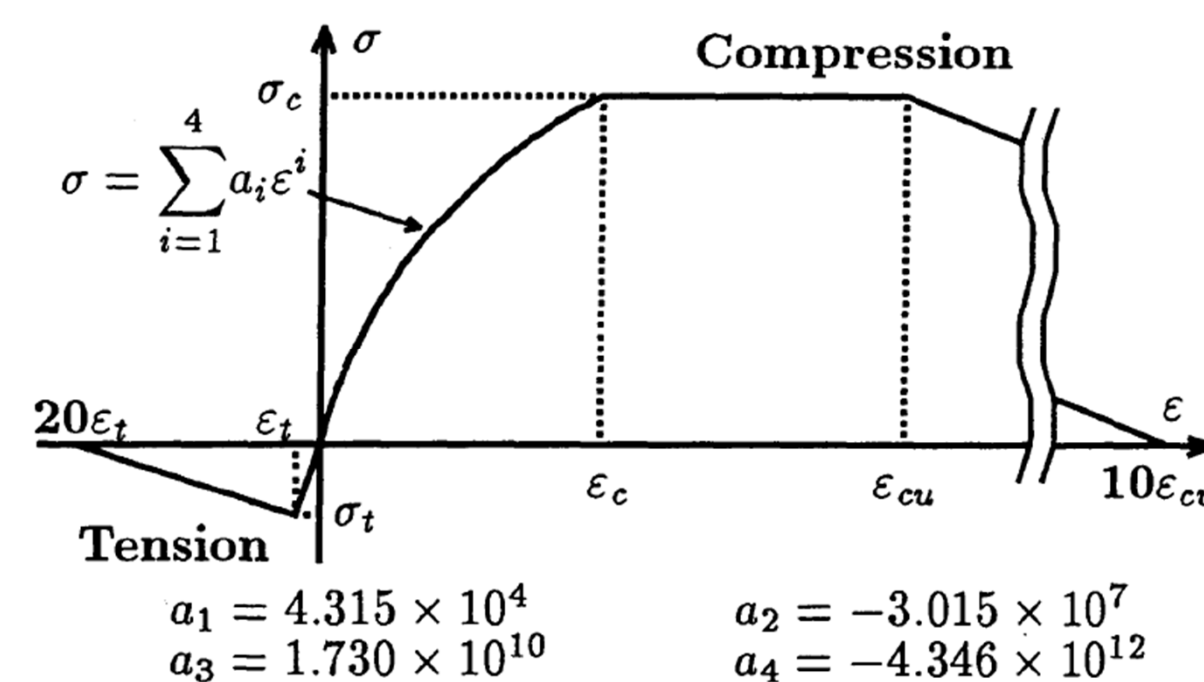


(伊藤, 野上, 尾崎: 剛体棒要素モデルによるアーチの面内座屈解析, 構造工学論文集A, Vol.33, 1987)

19

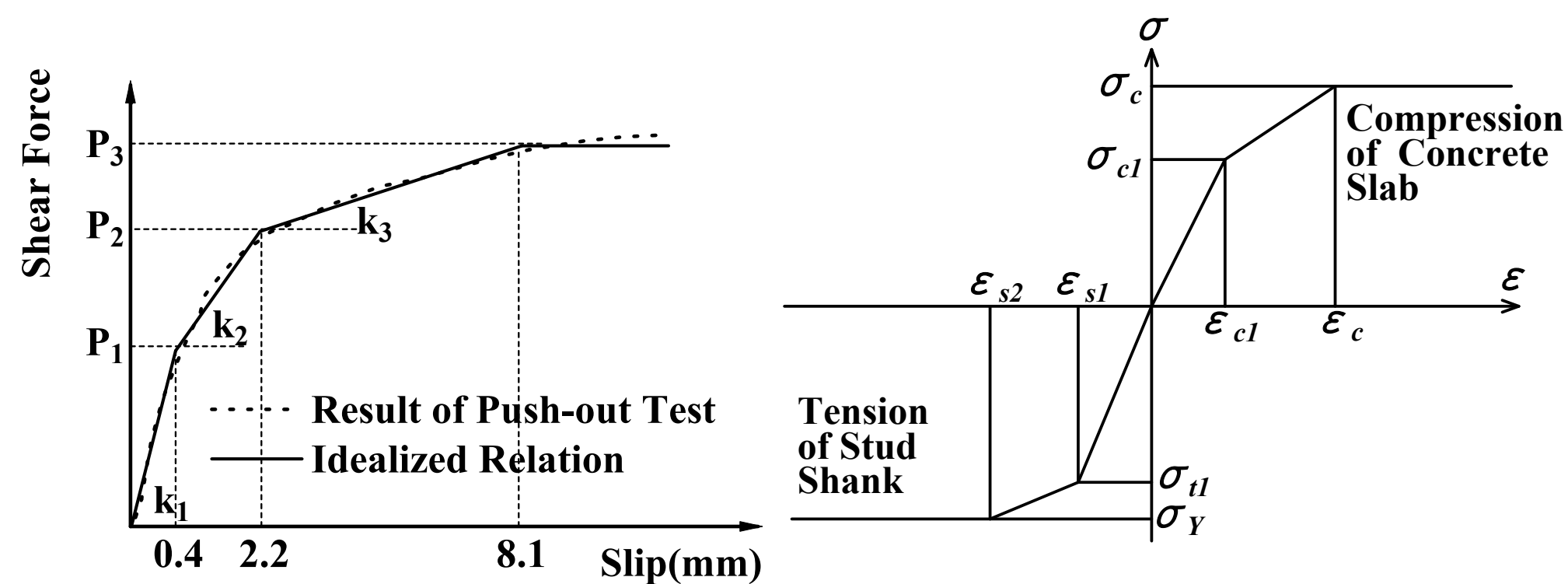


鋼材・鉄筋の応力-ひずみ関係



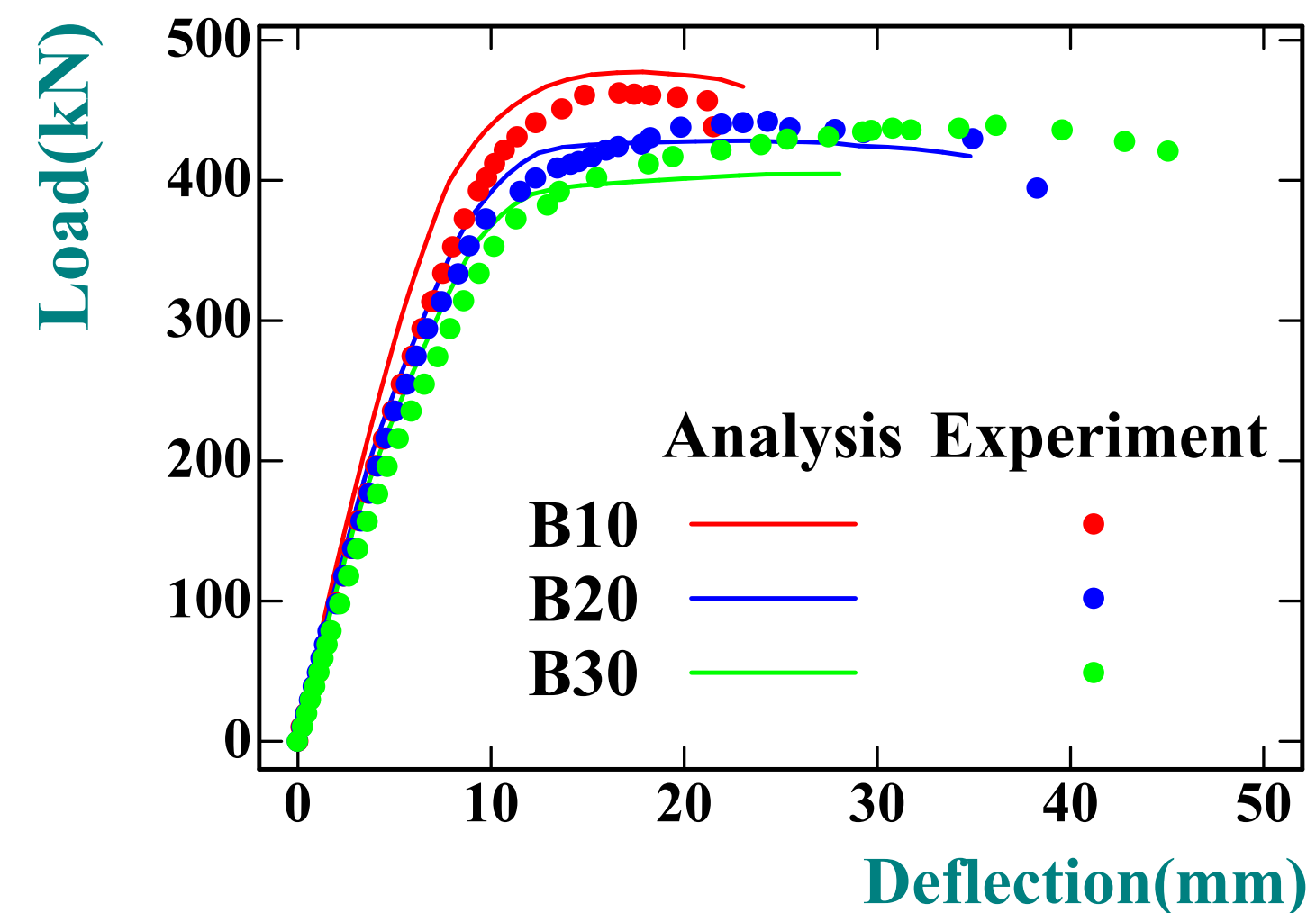
コンクリートの応力-ひずみ関係

20



スタッドの水平ばね
の材料特性

スタッドの軸ばね
の材料特性

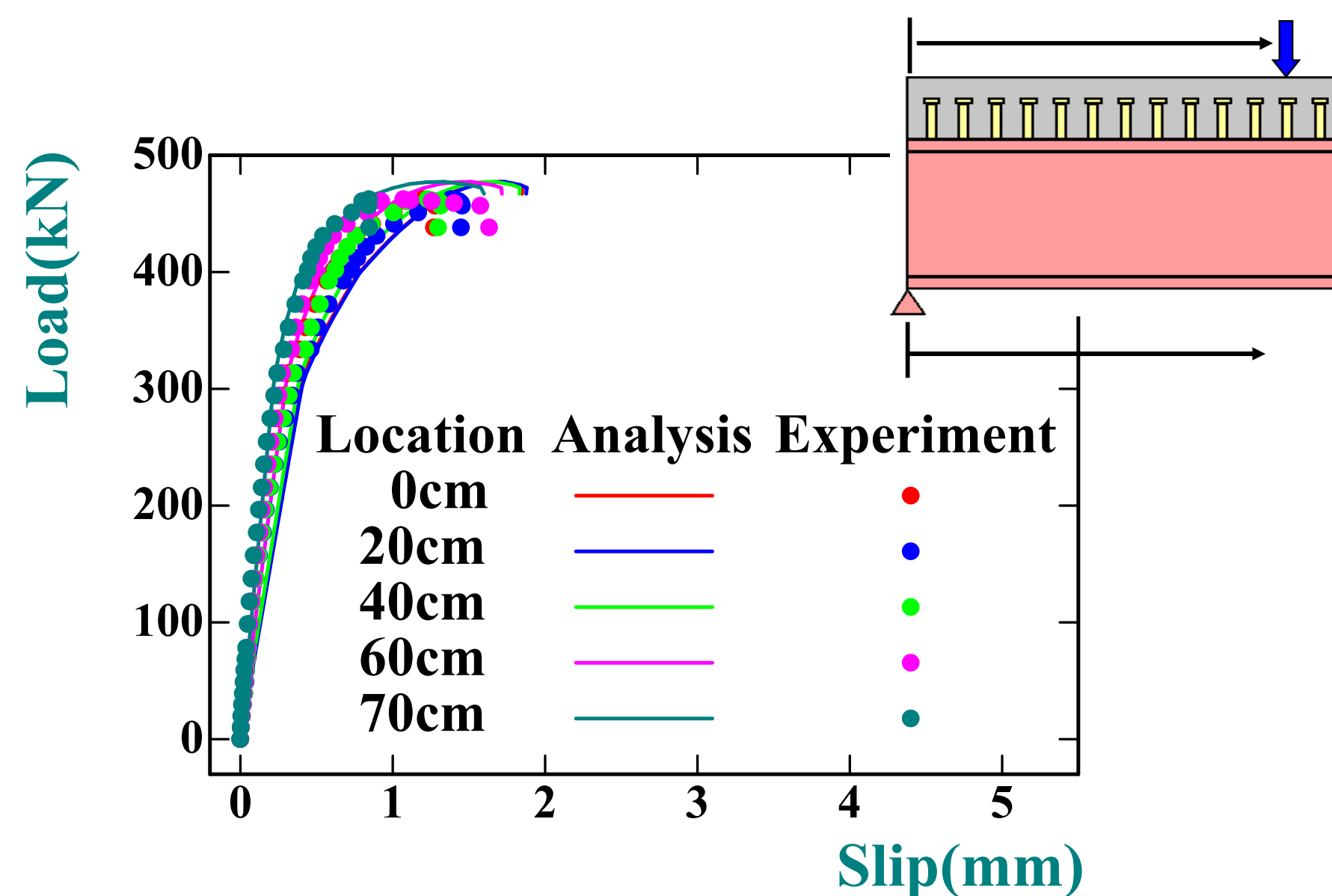


荷重載荷点における荷重—たわみ関係

スタッド配置間隔が狭いほど剛性が高く、最大荷重も大きいですが、最大荷重の差異は大きくない。

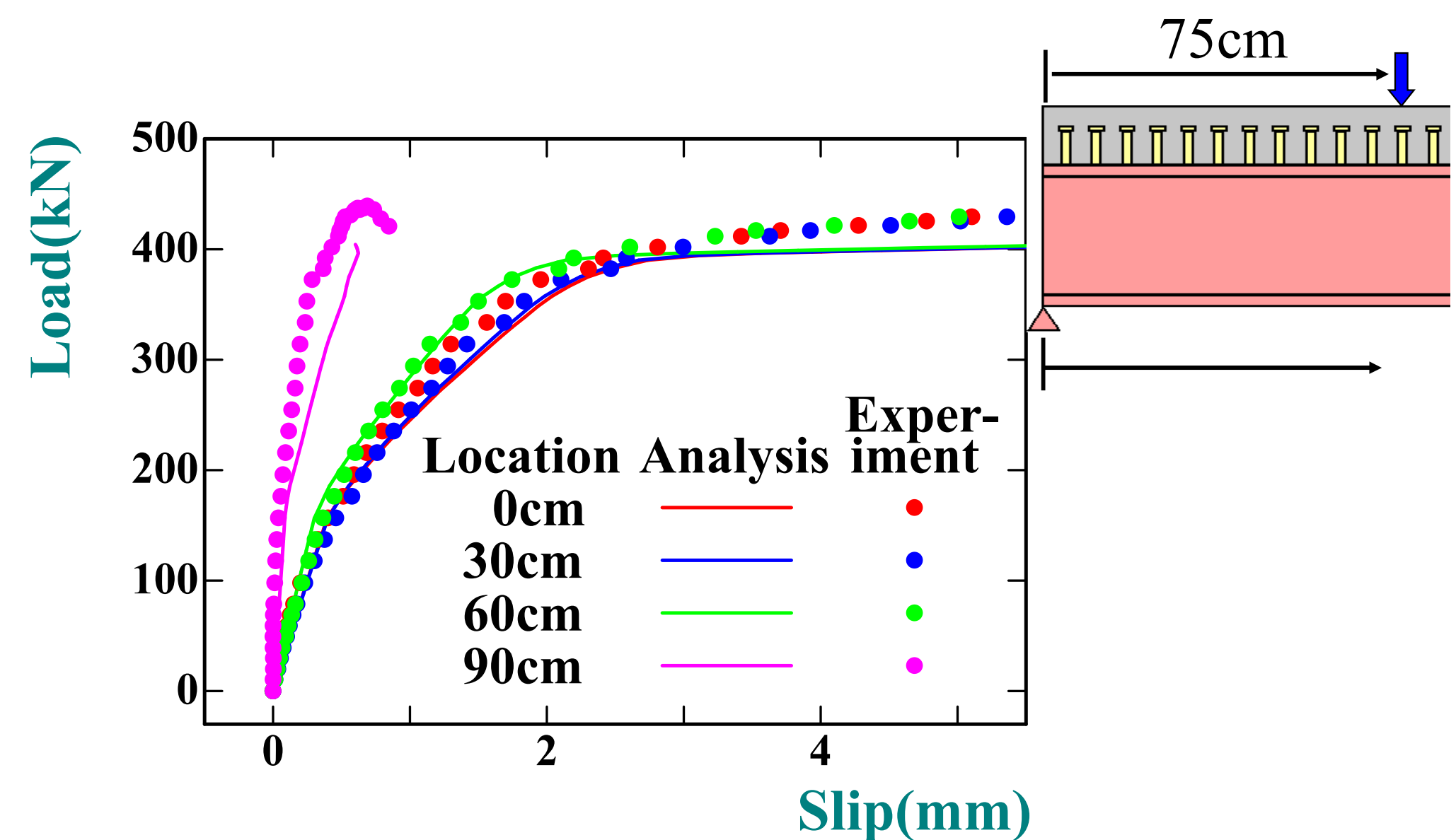
21

22



荷重—ずれ変位関係 (B10試験体)

最大荷重時のずれ変位は1mm程度

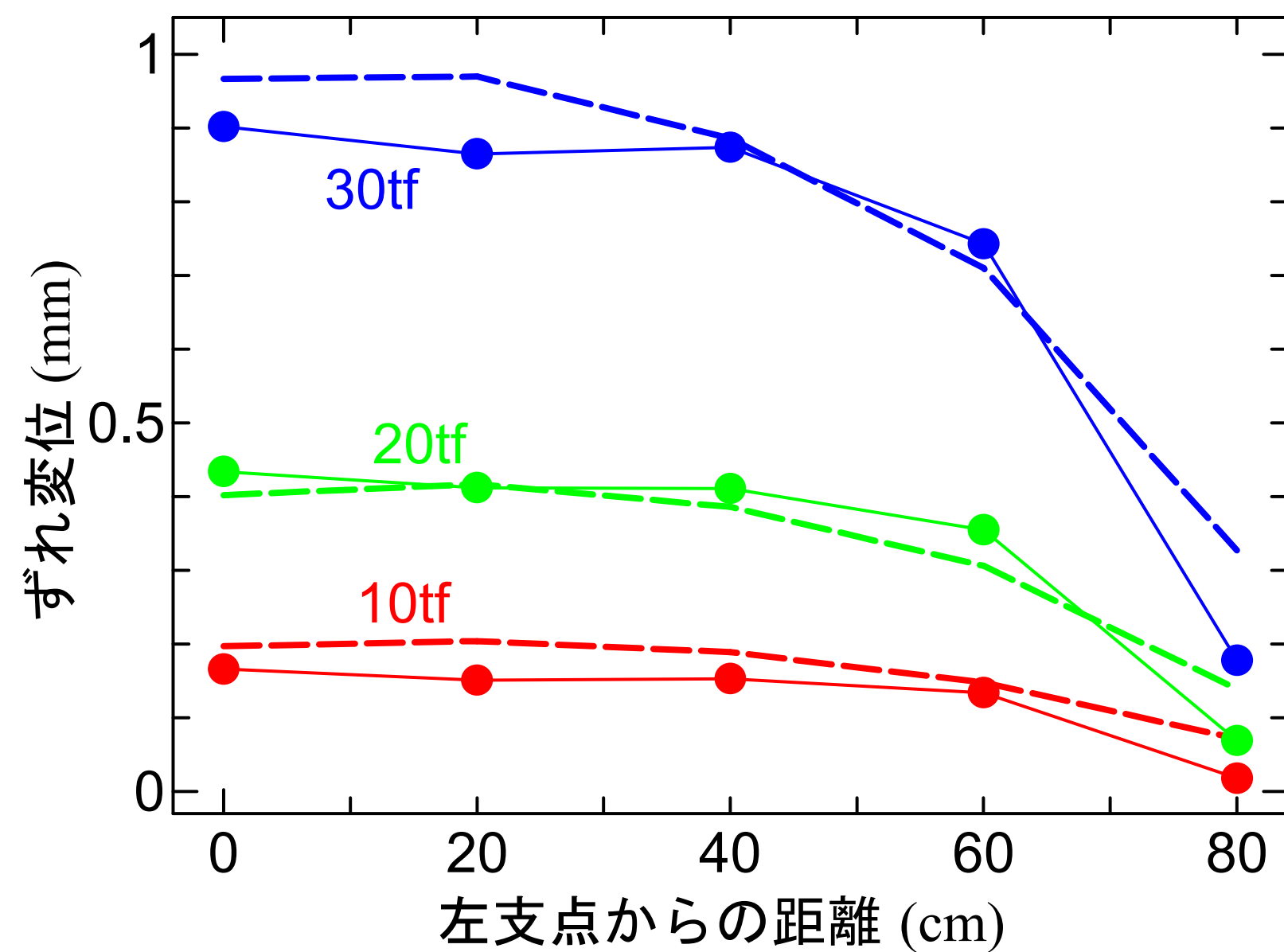


荷重—ずれ変位関係 (B30試験体)

最大荷重時のずれ変位は4～5mm以上

23

24



ずれ変位分布 (B20試験体)

25

連続合成梁の実験と解析 (1998～2000年)

- 2径間連続合成梁試験体を用いて、負曲げ領域を含む連続合成梁の力学性状を確認する。
- 剛体ばねモデル解析により、負曲げ領域を含む連続合成梁の挙動の再現を試みる。

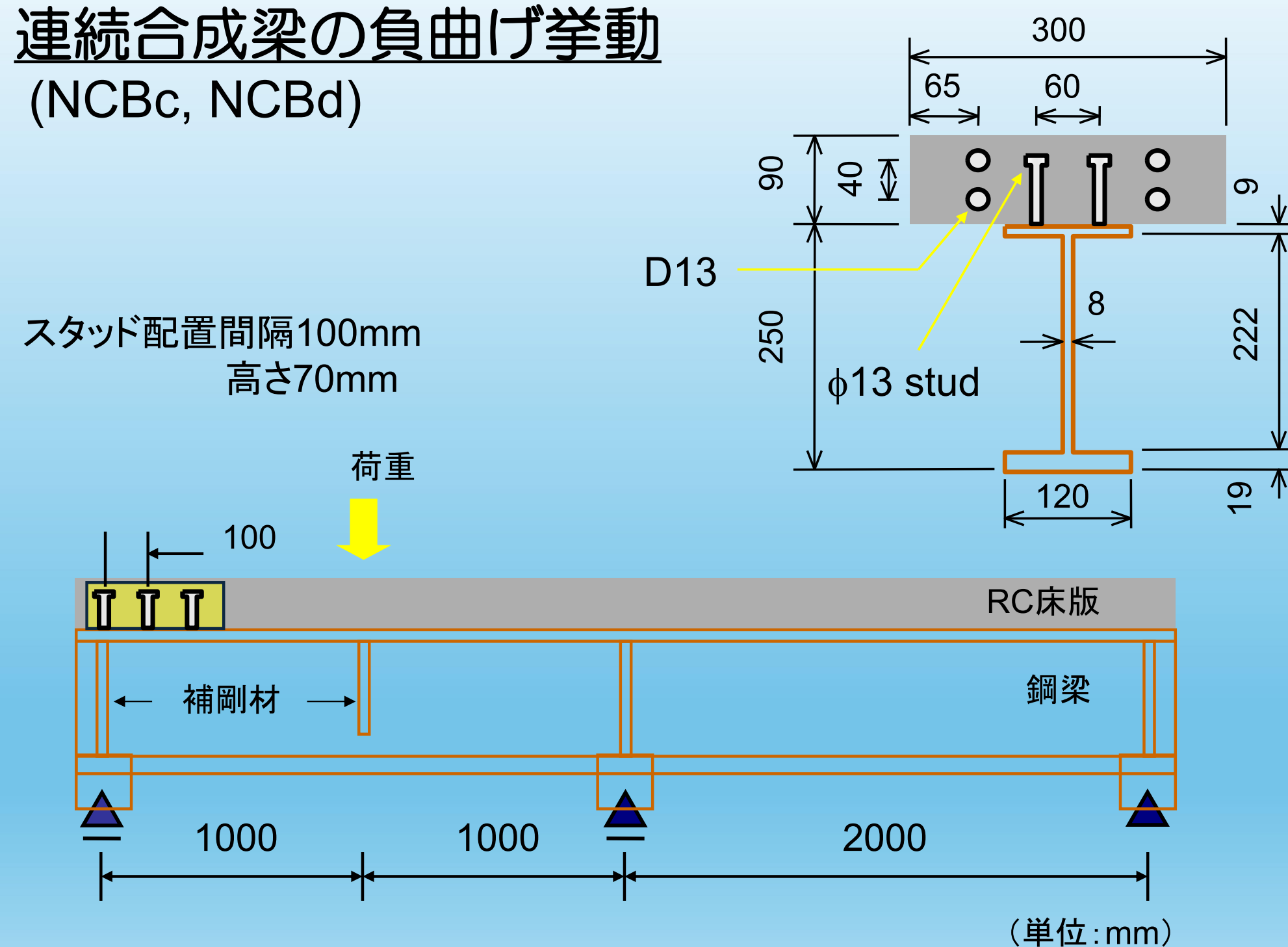
27

まとめ

- 鋼材およびコンクリートの材料特性に加えて、スタッドの押抜き試験によって得られたせん断力-ずれ変位関係を考慮して、剛体ばねモデル解析によって、不完全合成梁の弾塑性挙動をある程度追跡できることを確認した。

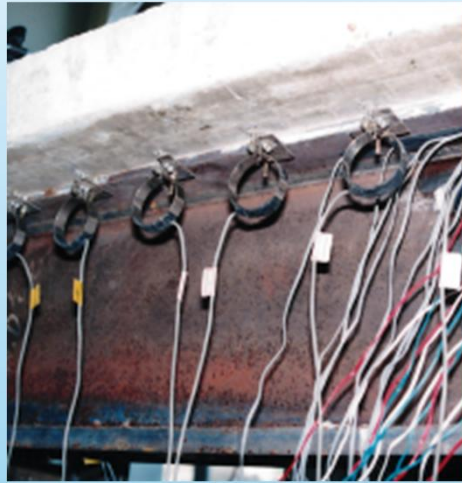
26

連続合成梁の負曲げ挙動 (NCBc, NCBd)

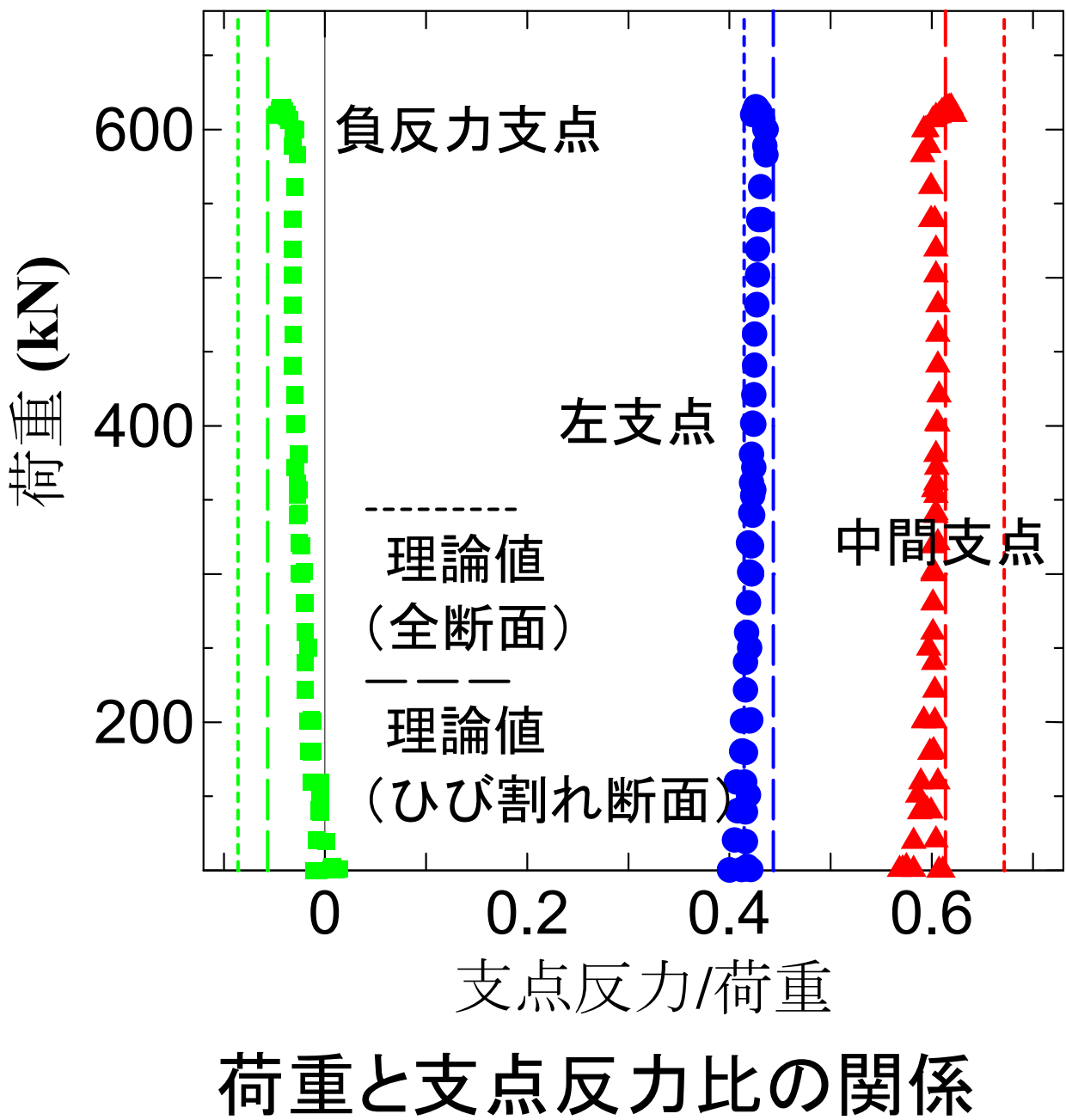
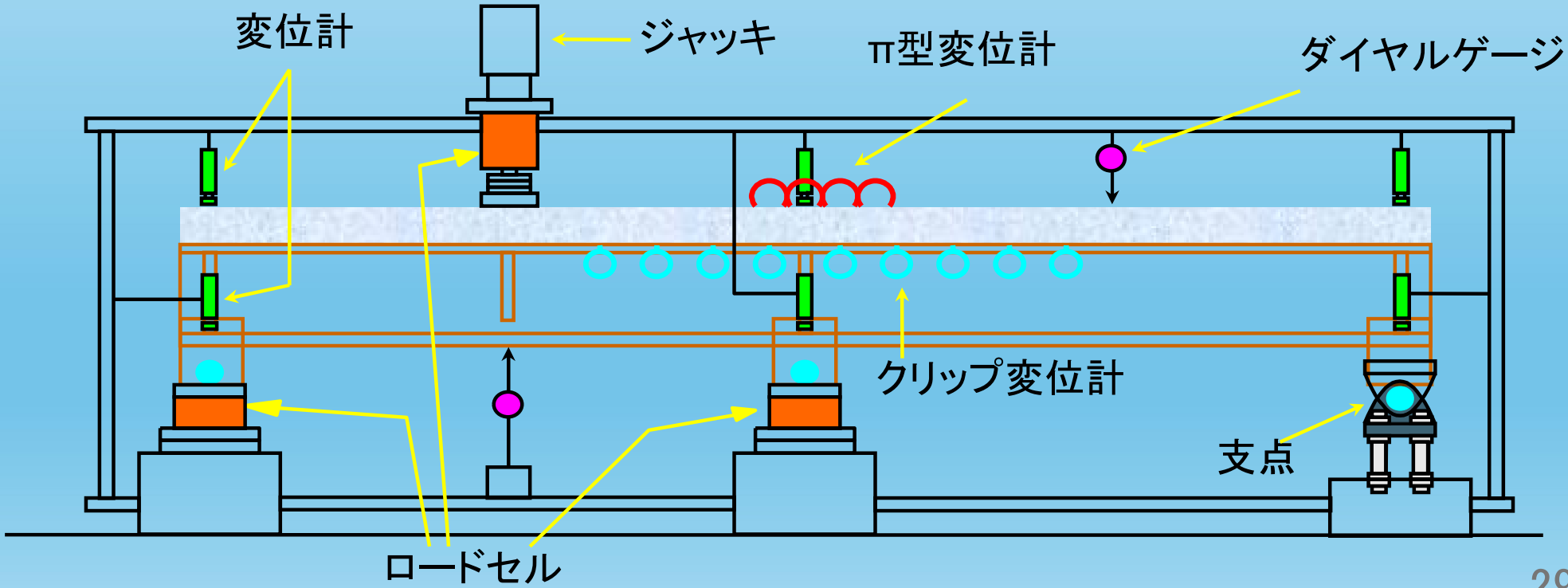


28

載荷試験の状況



クリップ変位計



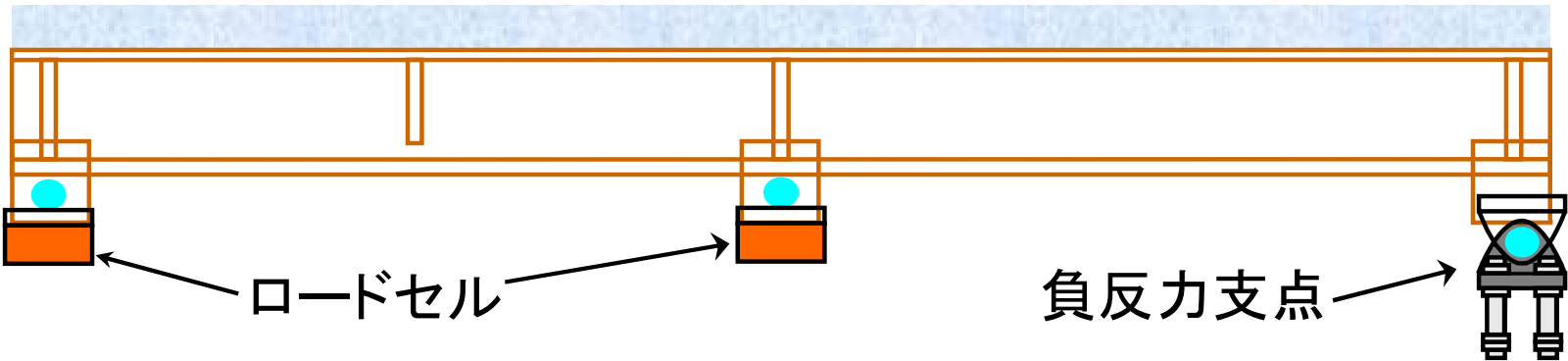
支点の状況



支点反力測定用ロードセル設置
(左支点, 中間支点)

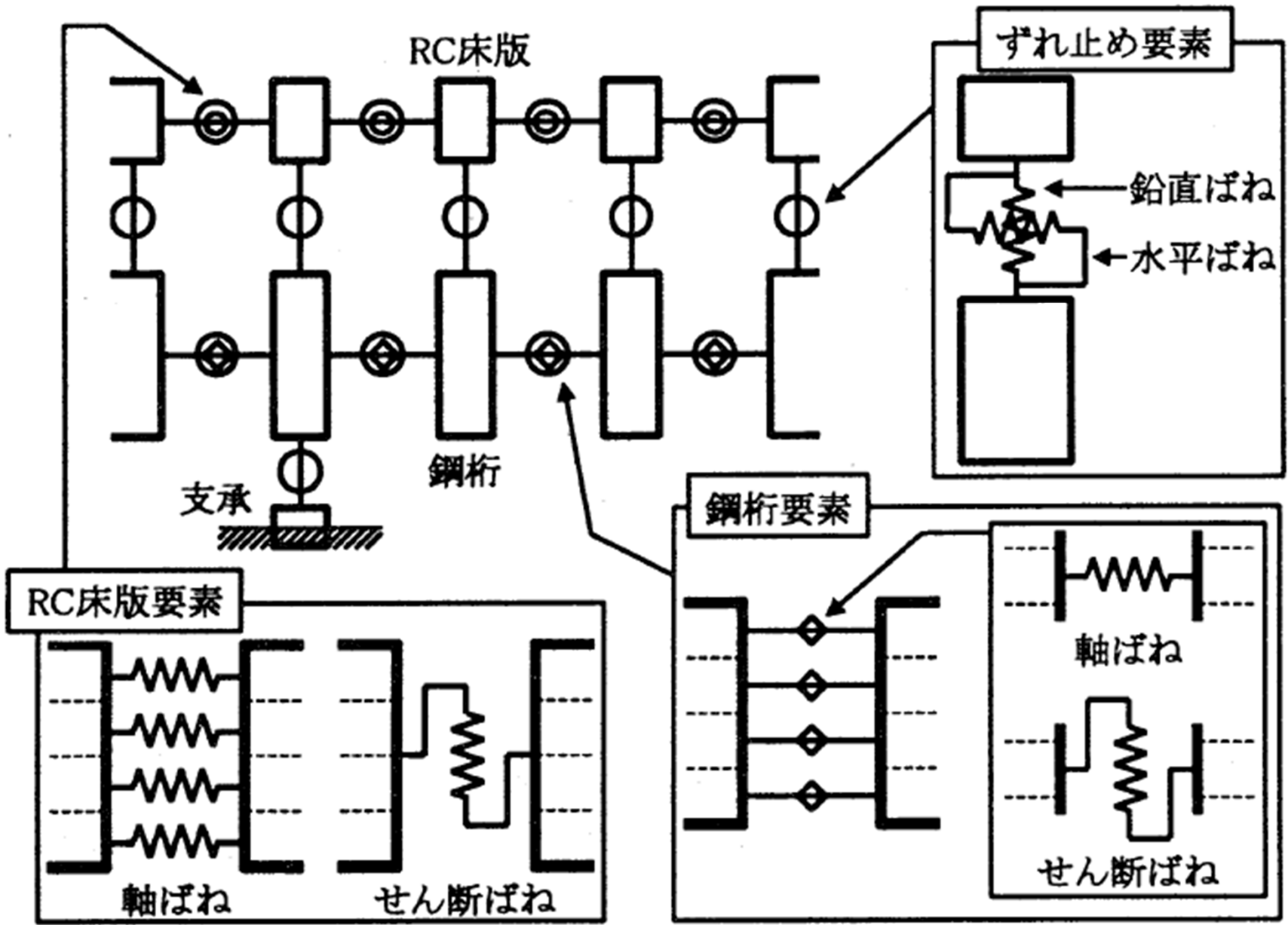


負反力支点(右支点)
高さ調整: 不等沈下による応力の発生を抑制

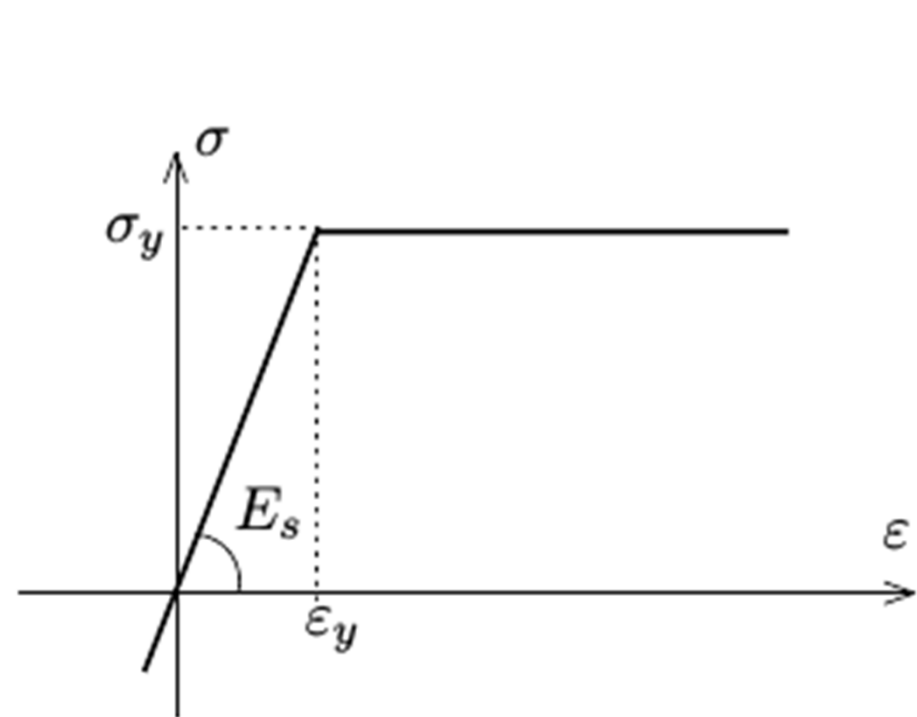


剛体ばねモデル解析

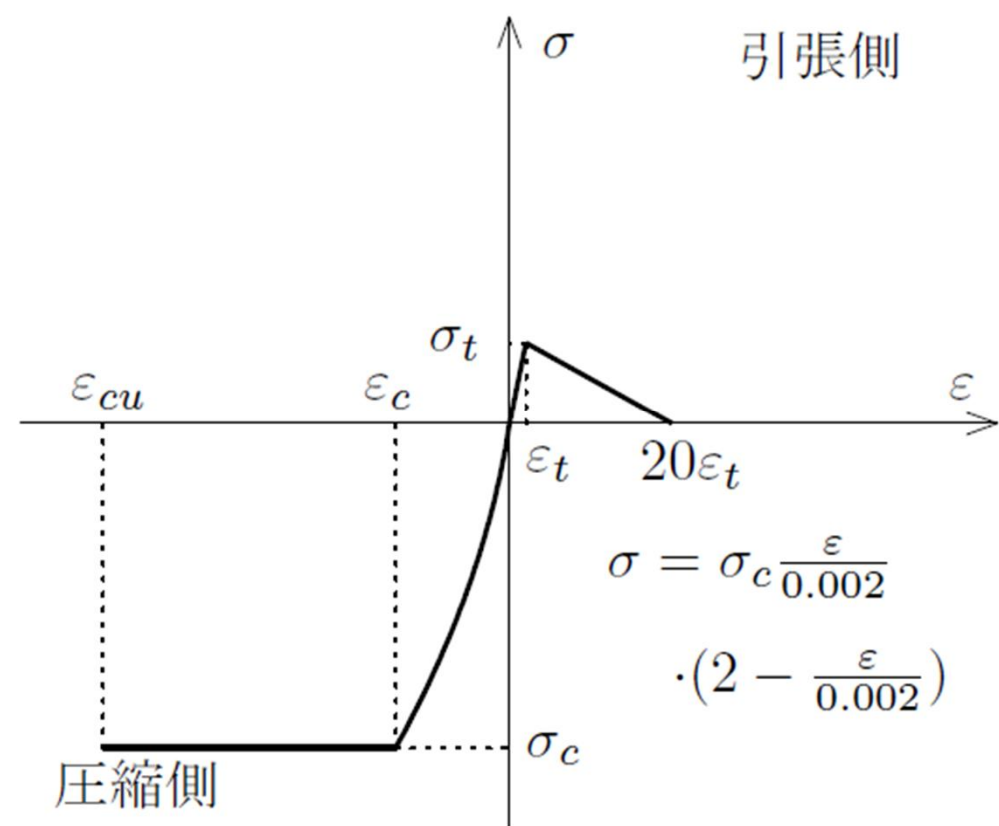
剛体長さ100mm



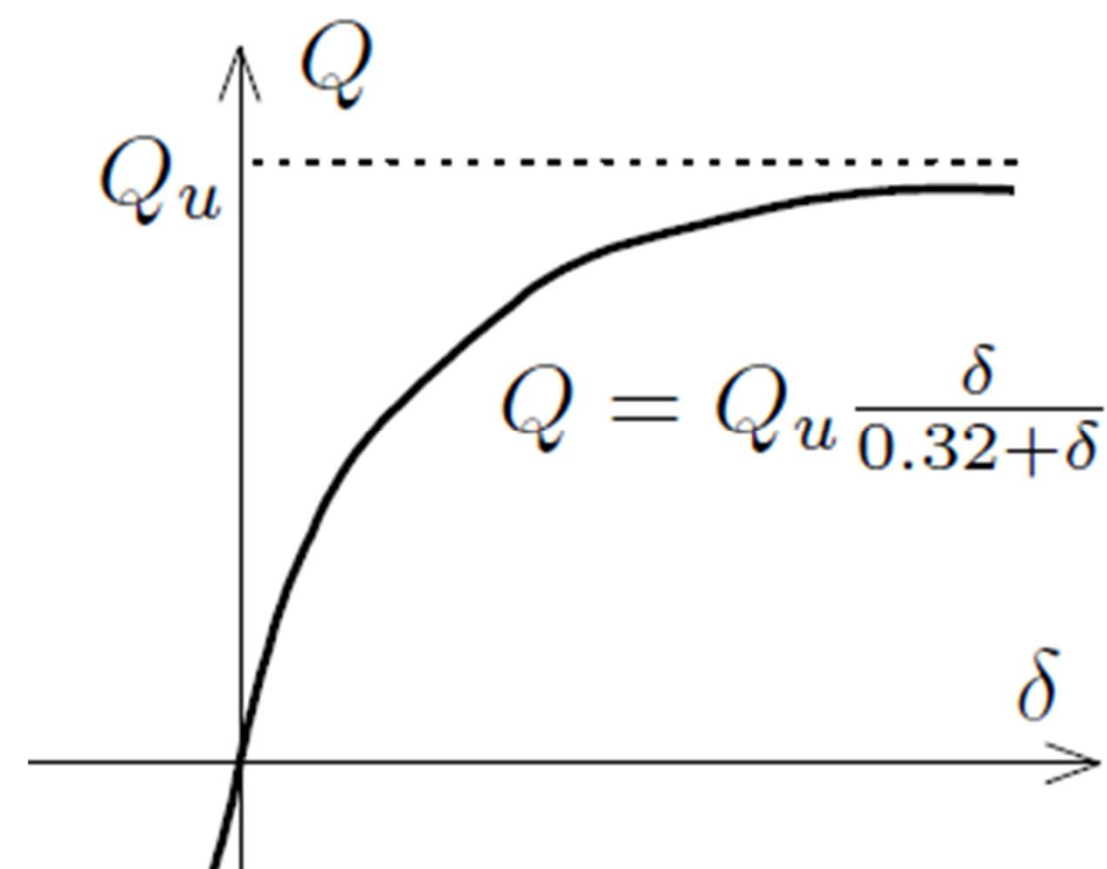
降伏に及ぼすせん断応力の影響を考慮



鋼材の応力-ひずみ関係
(せん断応力の影響を考慮)



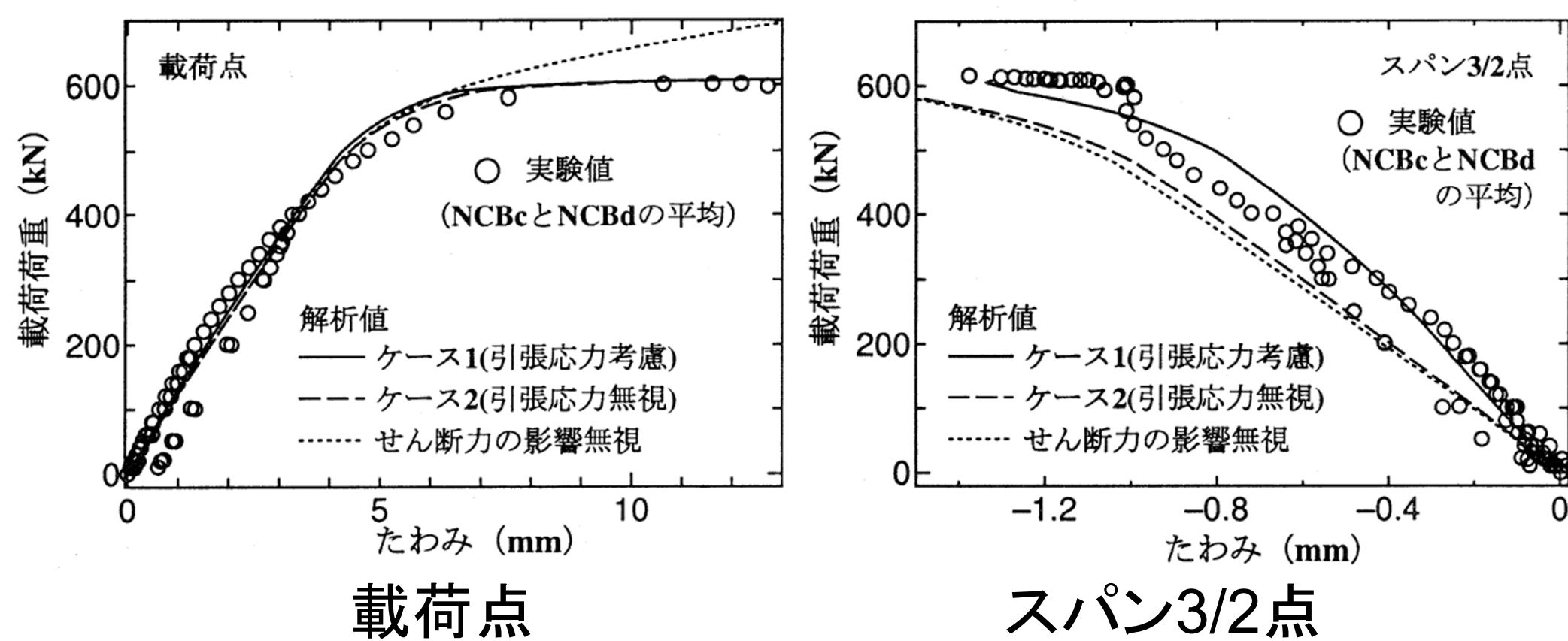
コンクリートの
応力-ひずみ関係



ずれ止めのせん断力-ずれ変位関係
(Fisherらの提案式)

33

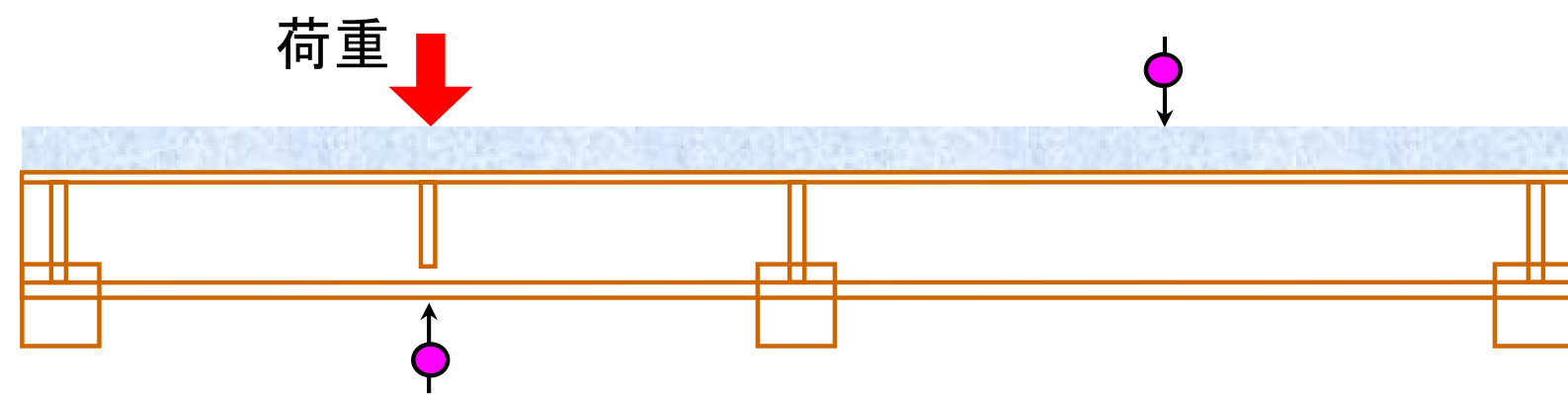
34



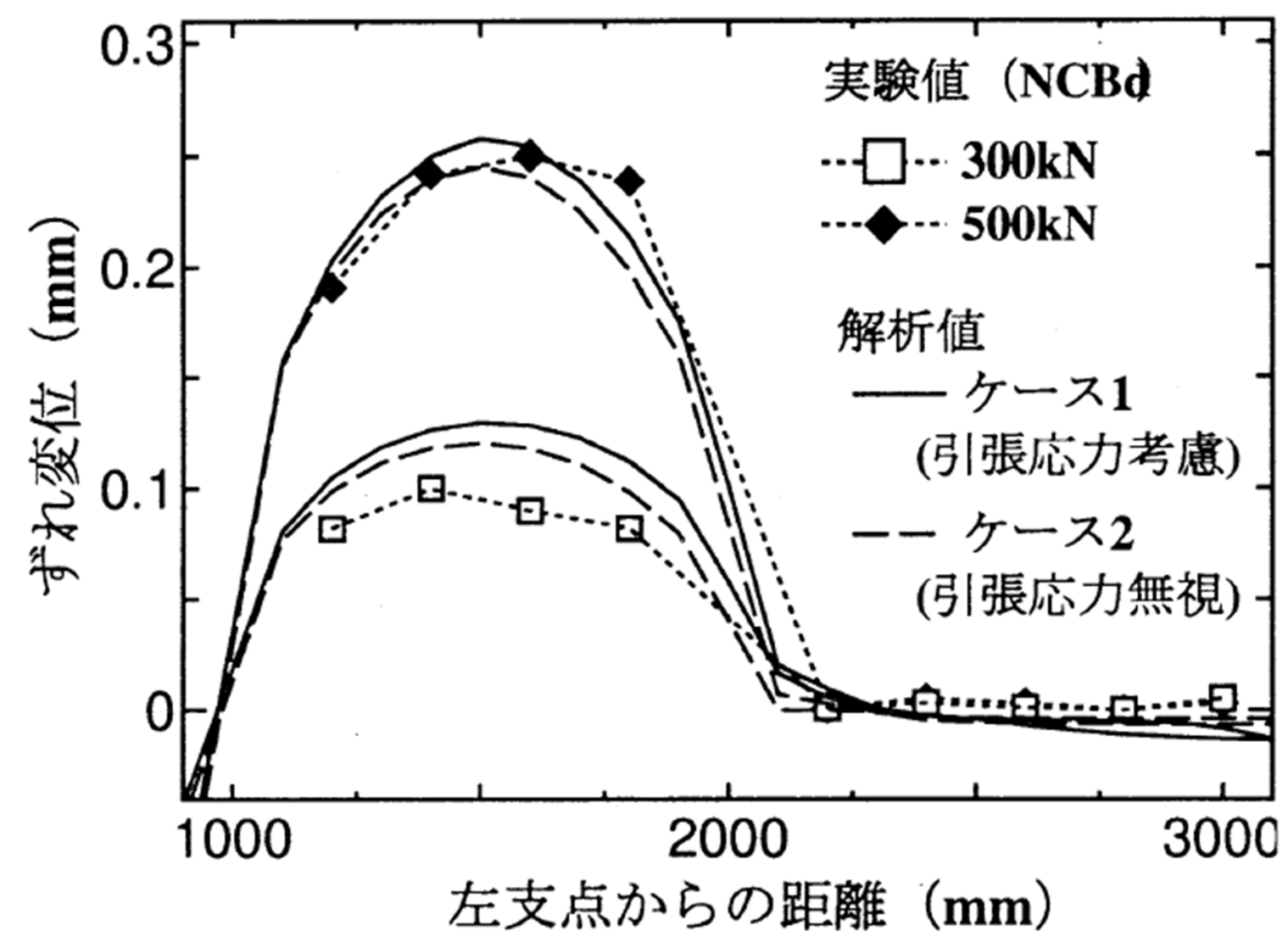
载荷点

スパン3/2点

荷重-たわみ関係

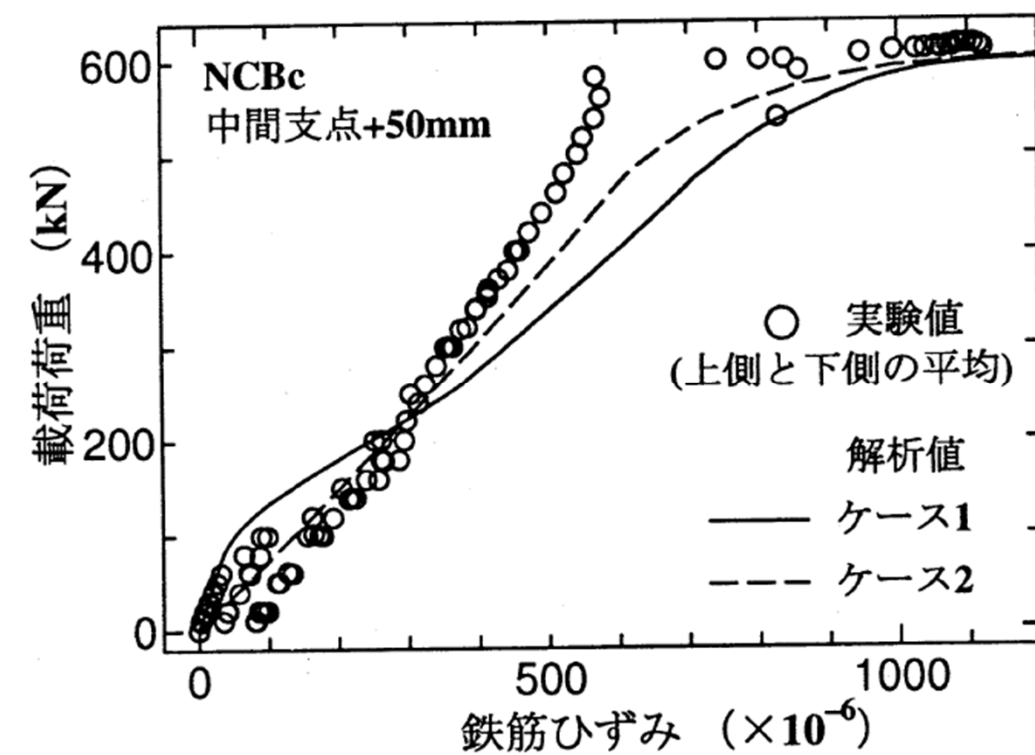


35

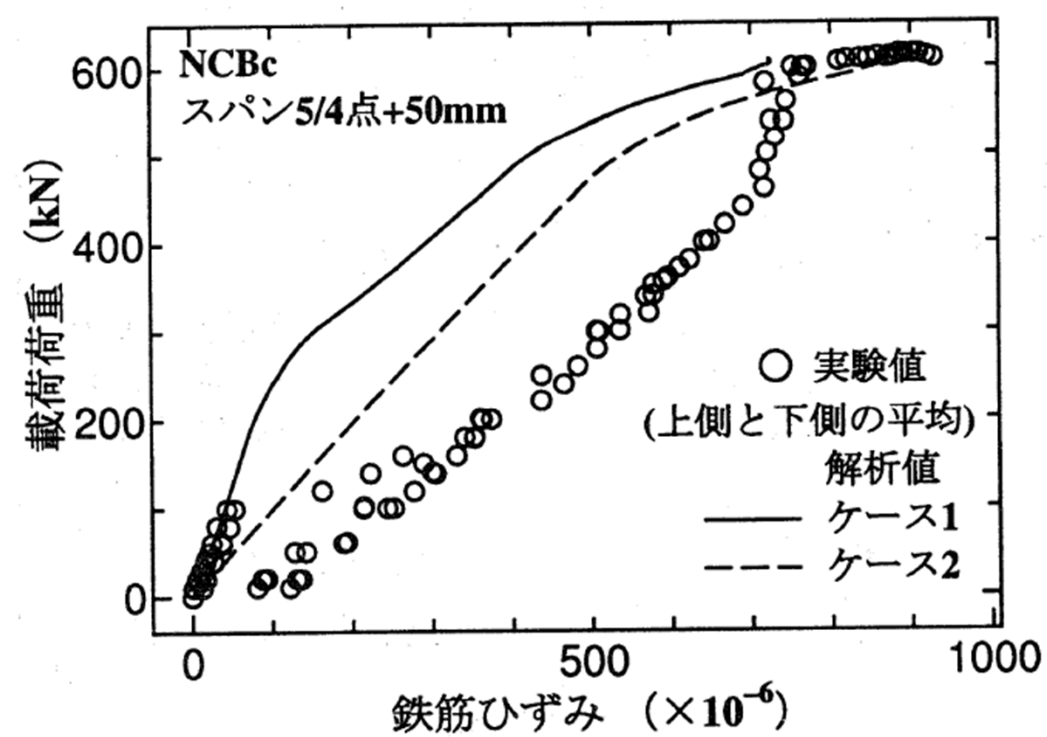


橋軸方向ずれ変位分布

36



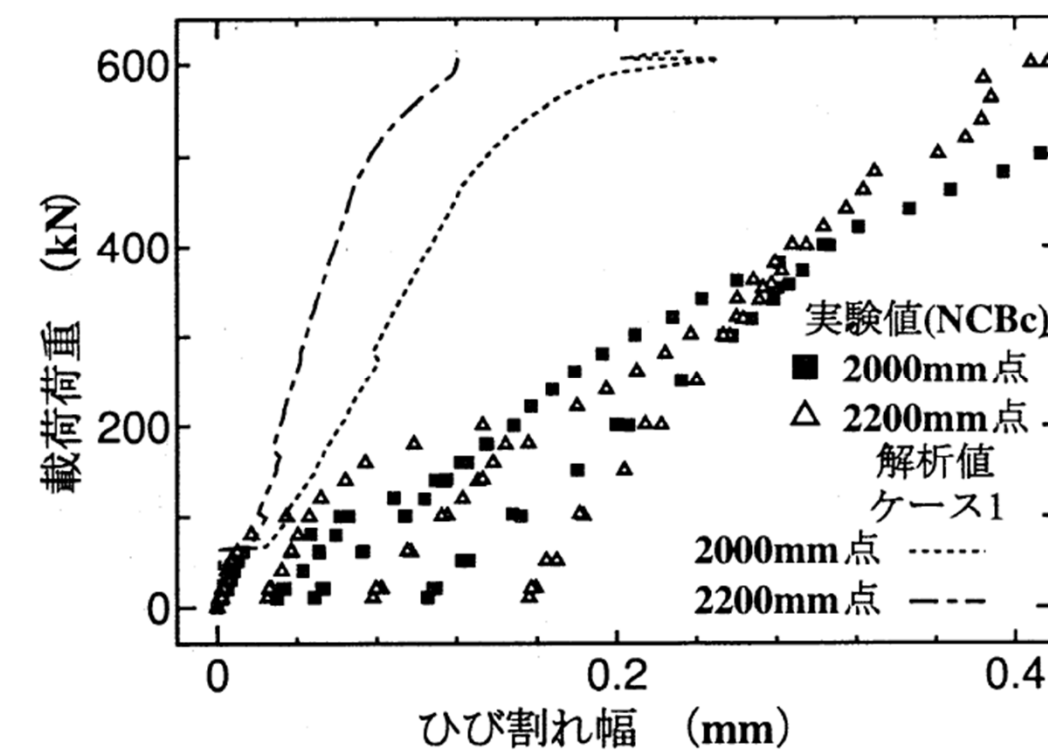
中間支点+50mm位置



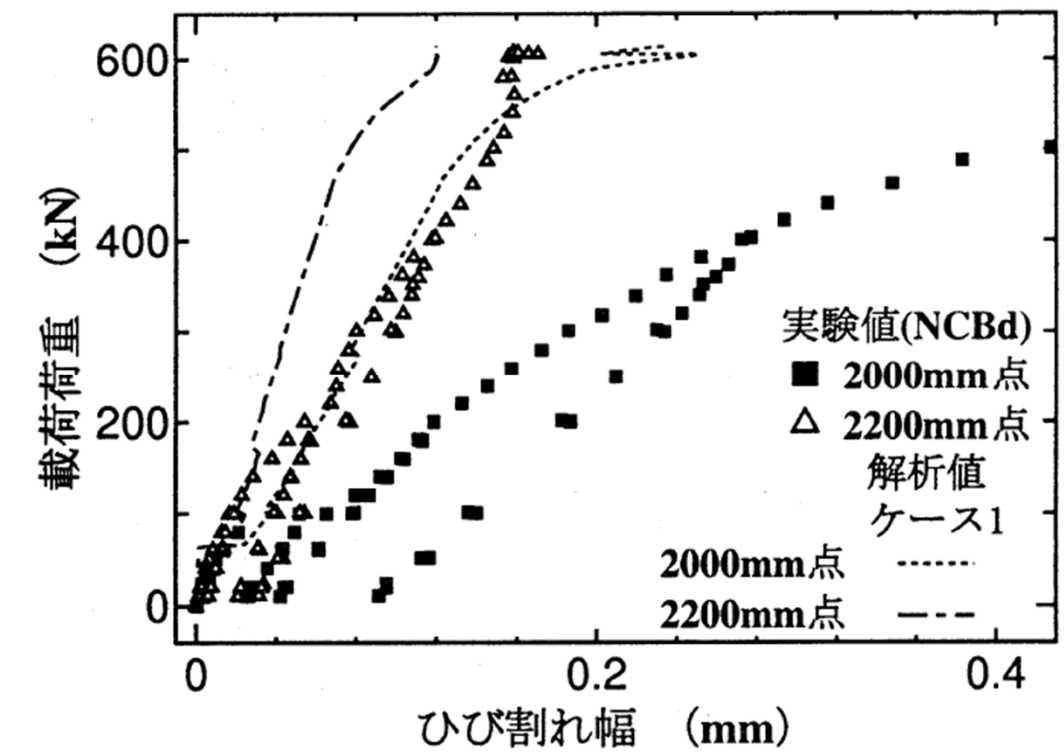
スパン5/4点+50mm位置

荷重－鉄筋ひずみ関係

37



試験体NCBc

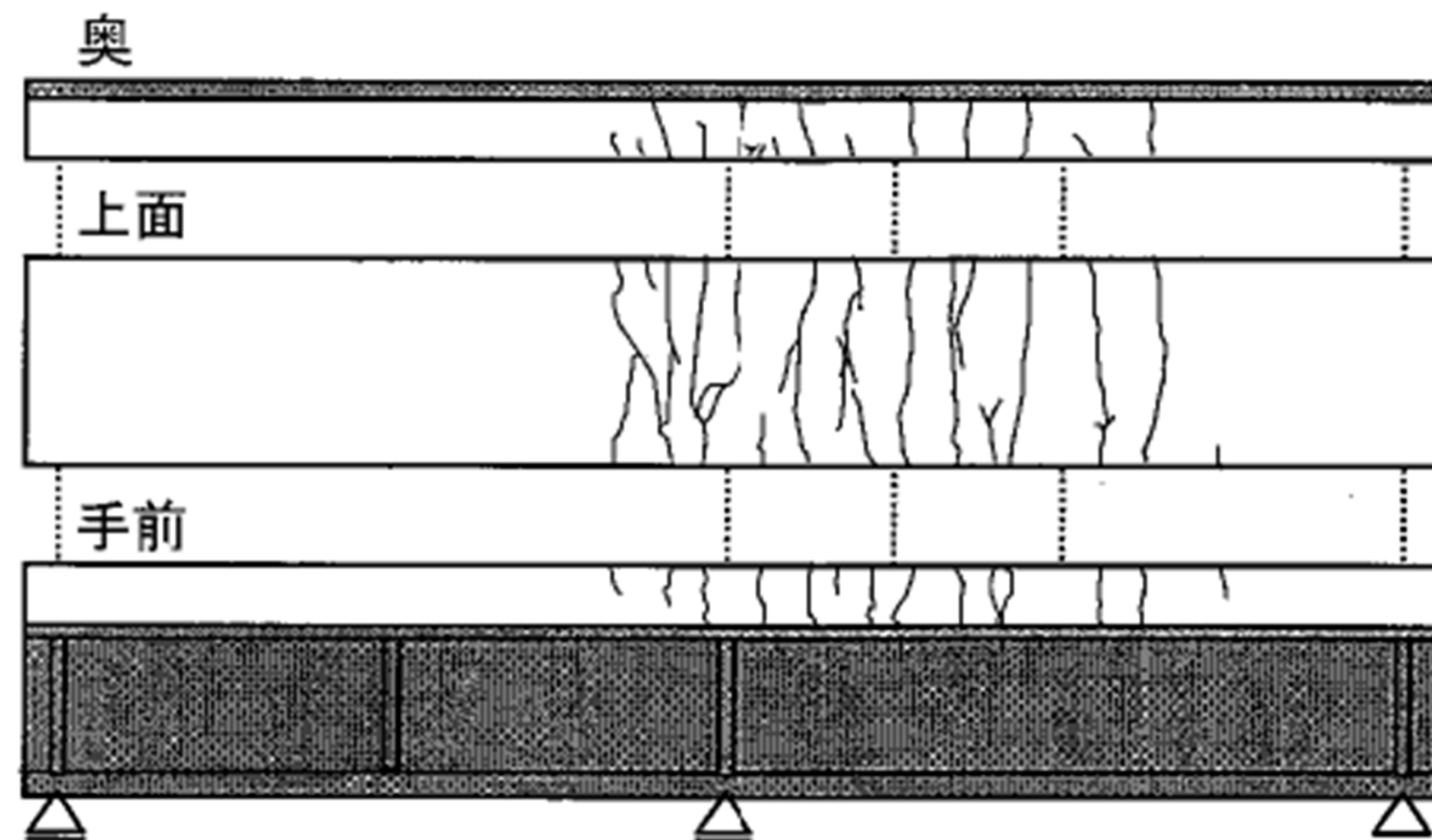


試験体NCBd

荷重－ひび割れ幅関係

- 解析では、剛体長さ100mmとしたときの剛体間の開きをひび割れ幅として算定
- 実験結果に対して解析結果のひび割れ幅は1/2程度

38



最大荷重時におけるひび割れ性状(NCBc)

39

まとめ

- 2径間連続合成梁試験体の載荷試験により、負曲げ領域を含む連続合成梁の挙動を確認した。
- 剛体ばねモデル解析により、負曲げ領域を含む2径間連続合成梁の挙動をある程度追跡できた。
- ただし、剛体ばねモデル解析による床版のひび割れ幅は実験値の1/2程度となり、必ずしも適切に算定できていない。

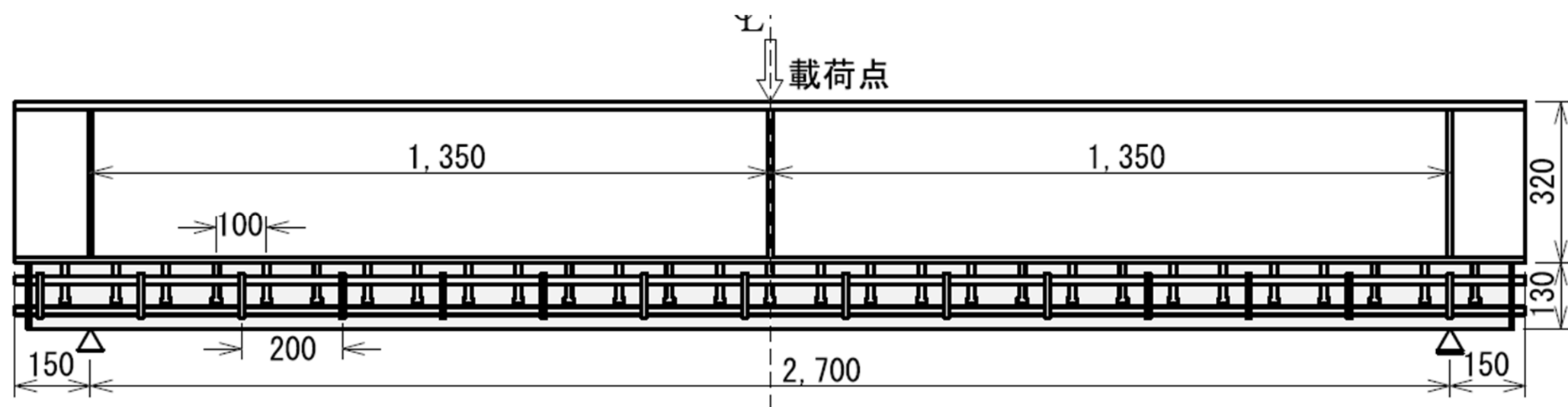
40

合成梁の負曲げ実験と解析 (2005～2007年)

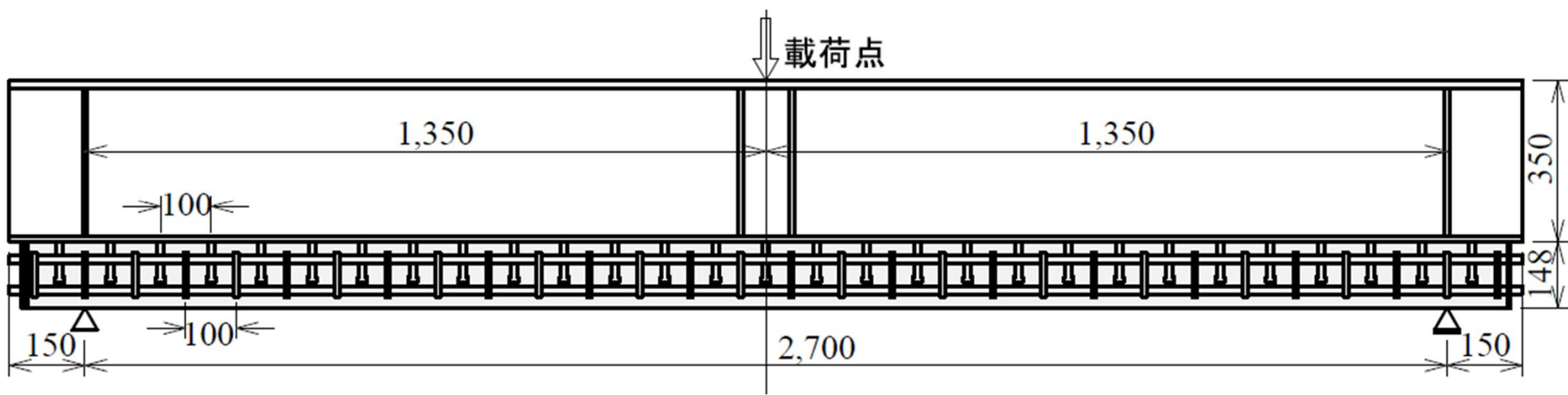
- RC床版と鋼梁の上下を反転させた合成梁試験体の負曲げ載荷試験を行い、ひび割れの進展に伴う鉄筋のひずみを詳細に測定した。
- 剛体ばねモデル解析において、鉄筋とコンクリートの付着を考慮してRC床版内の鉄筋のひずみ挙動およびひび割れ挙動の追跡を試みた。

41

試験体側面図



Type1-2(スタッド配置間隔100mm, スターラップ配置間隔200mm)

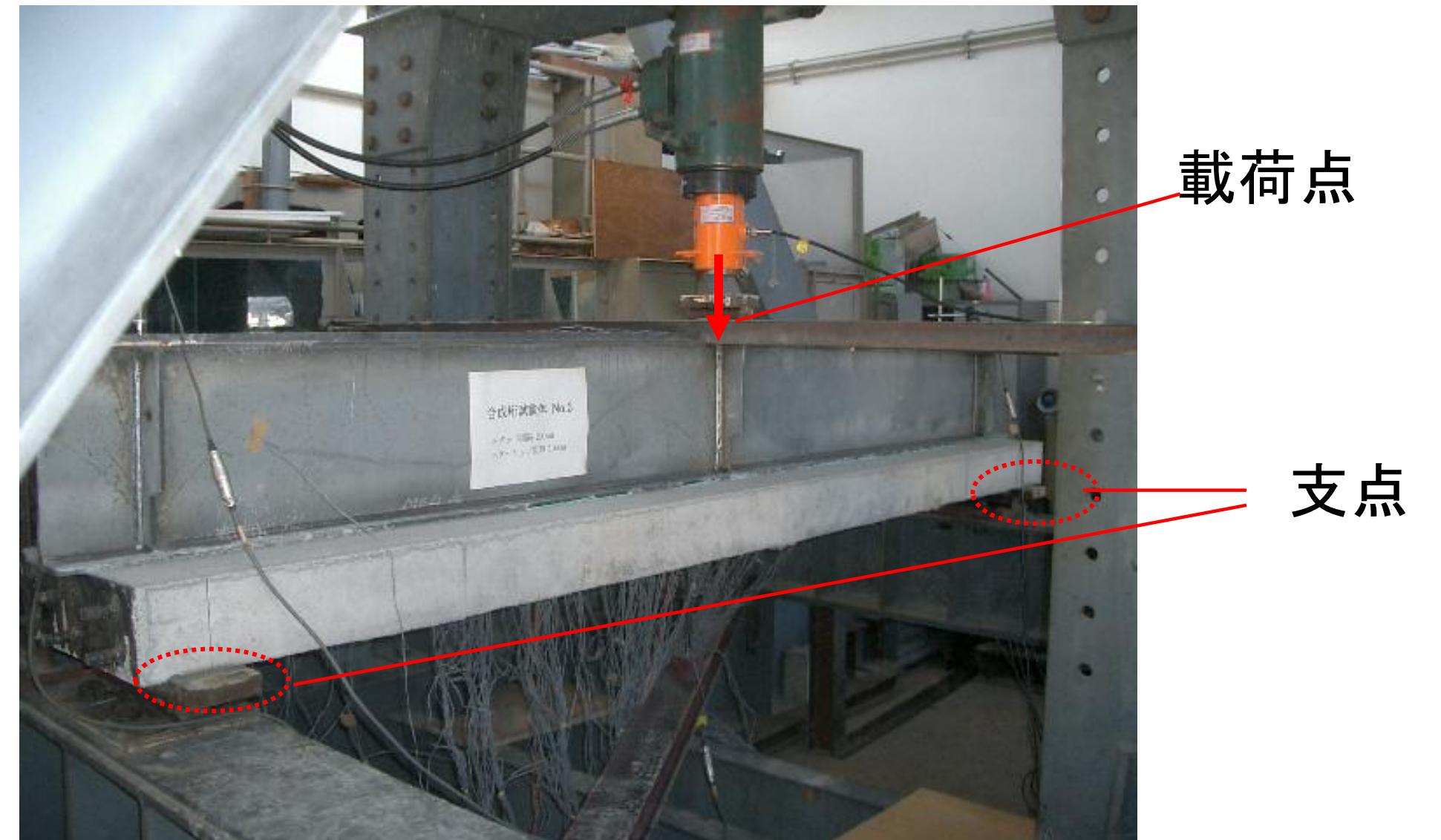


Type2-3(スタッド配置間隔100mm, スターラップ配置間隔100mm)

43

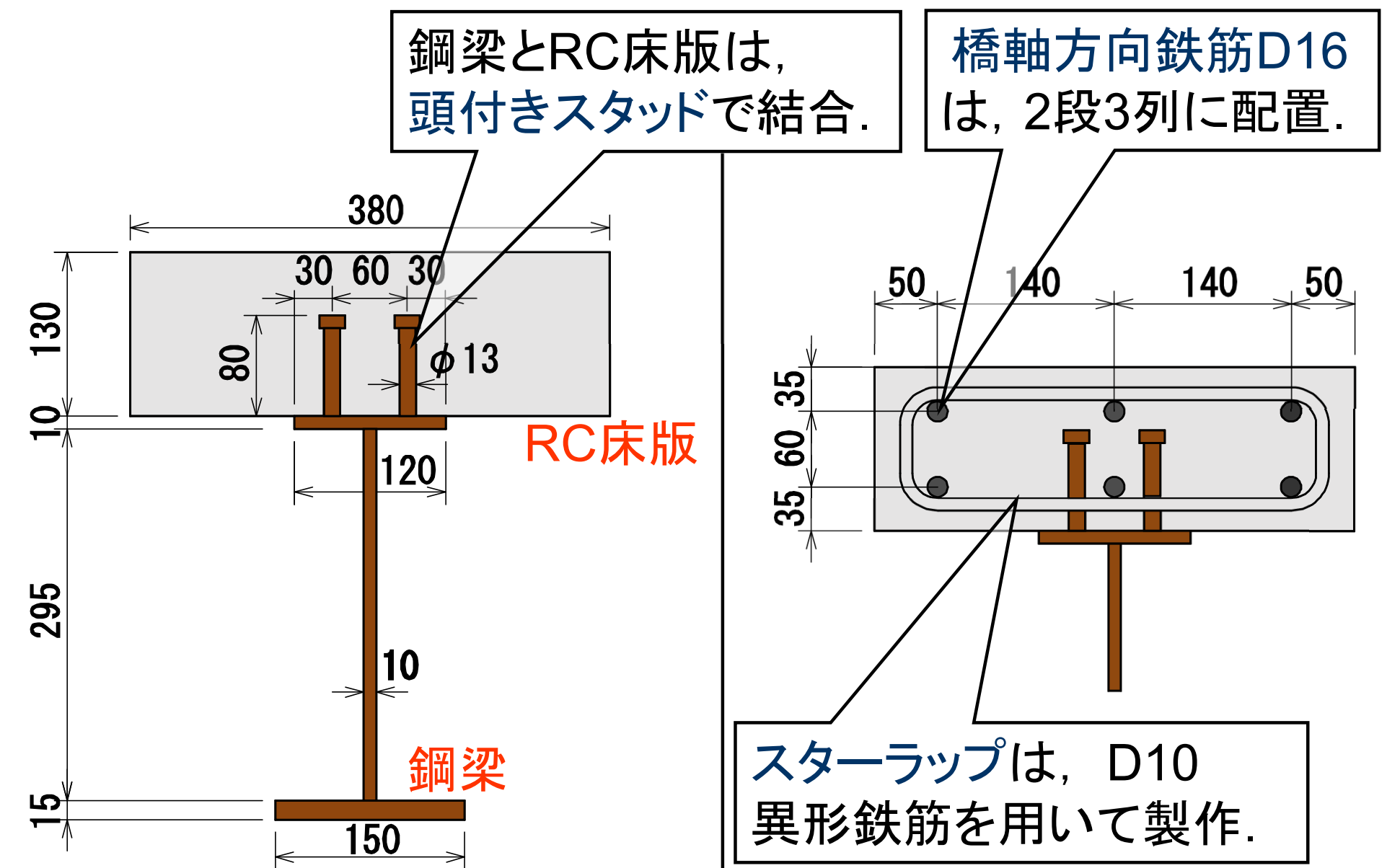
合成梁模型試験体の負曲げ載荷試験状況

全長3m, スパン2.7m



42

試験体 (Type1-2)

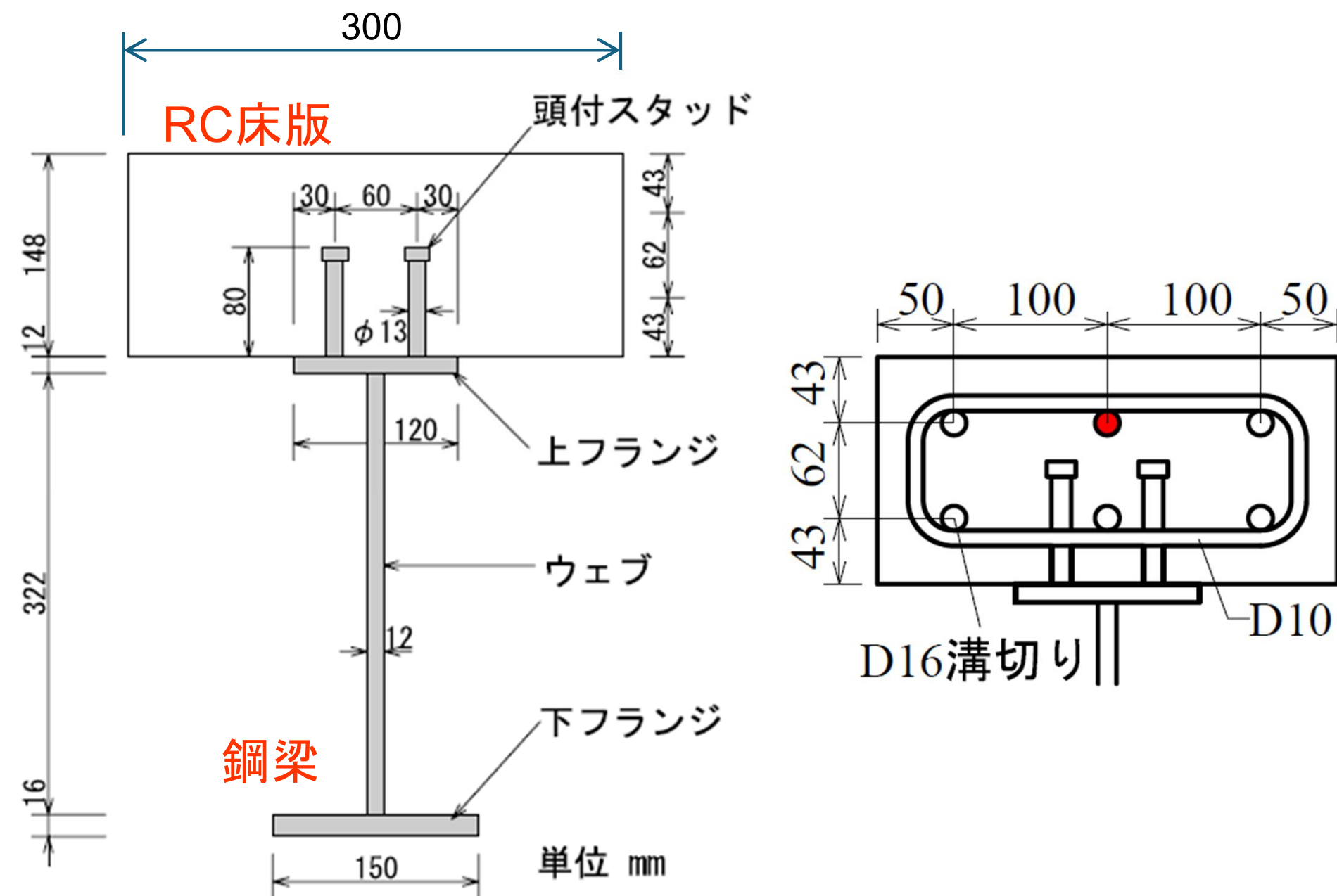


試験体断面図

配筋図 (単位mm)

44

試験体 (Type2-3)



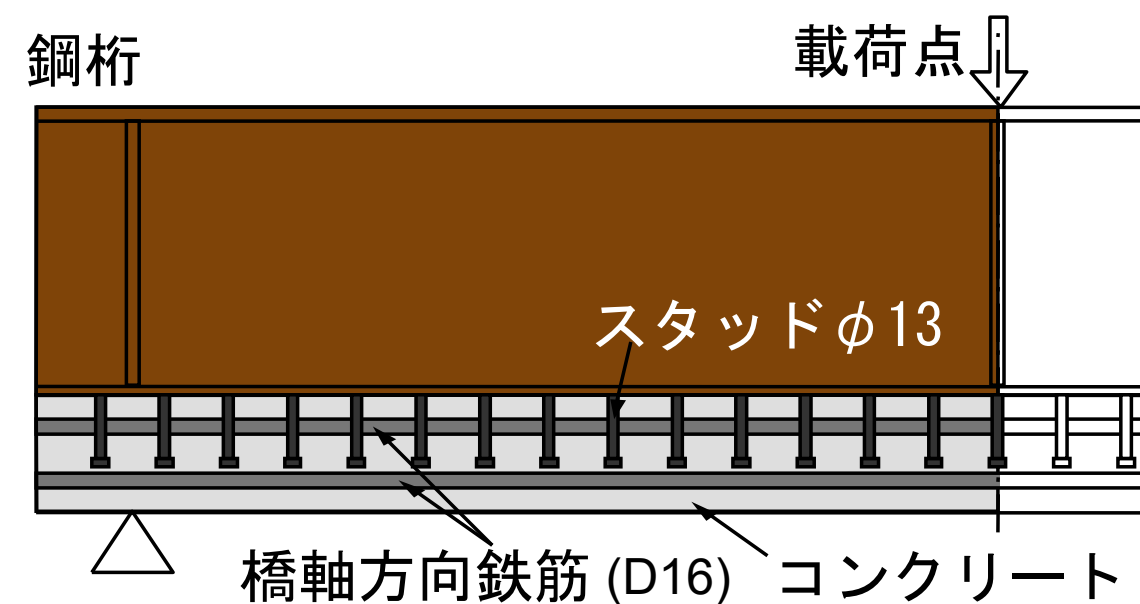
試験体断面図 (単位mm)

45

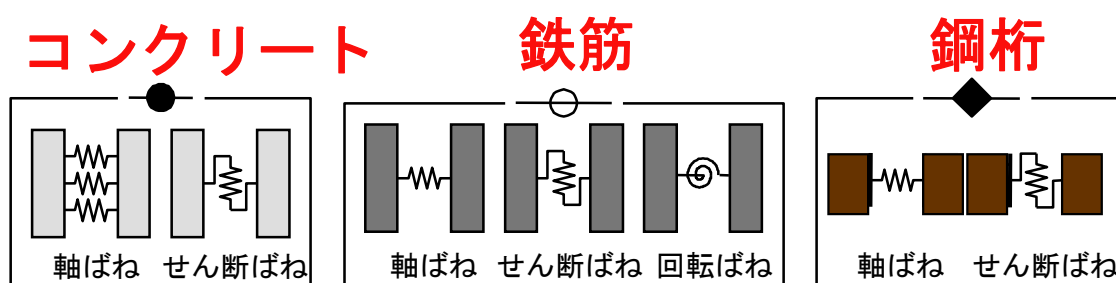
モデル化

モデル化手法に、剛体ばねモデルを採用。

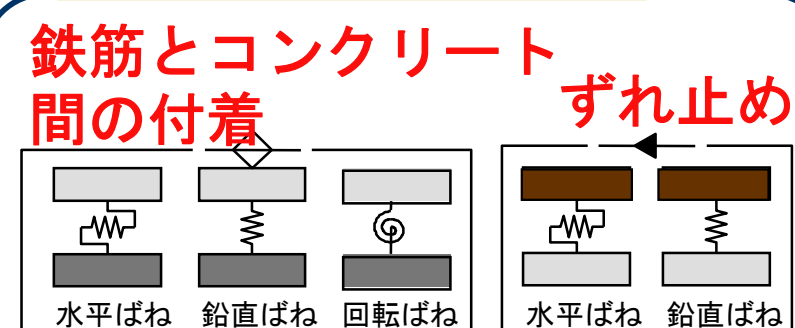
- 剛体ばねモデルを用いて合成桁を5種類のばねで全長の1/2をモデル化。
- 要素長さ12.5mm



ばね要素 (材料特性)



ばね要素 (接触面特性)



47

ひずみゲージの貼付け方法

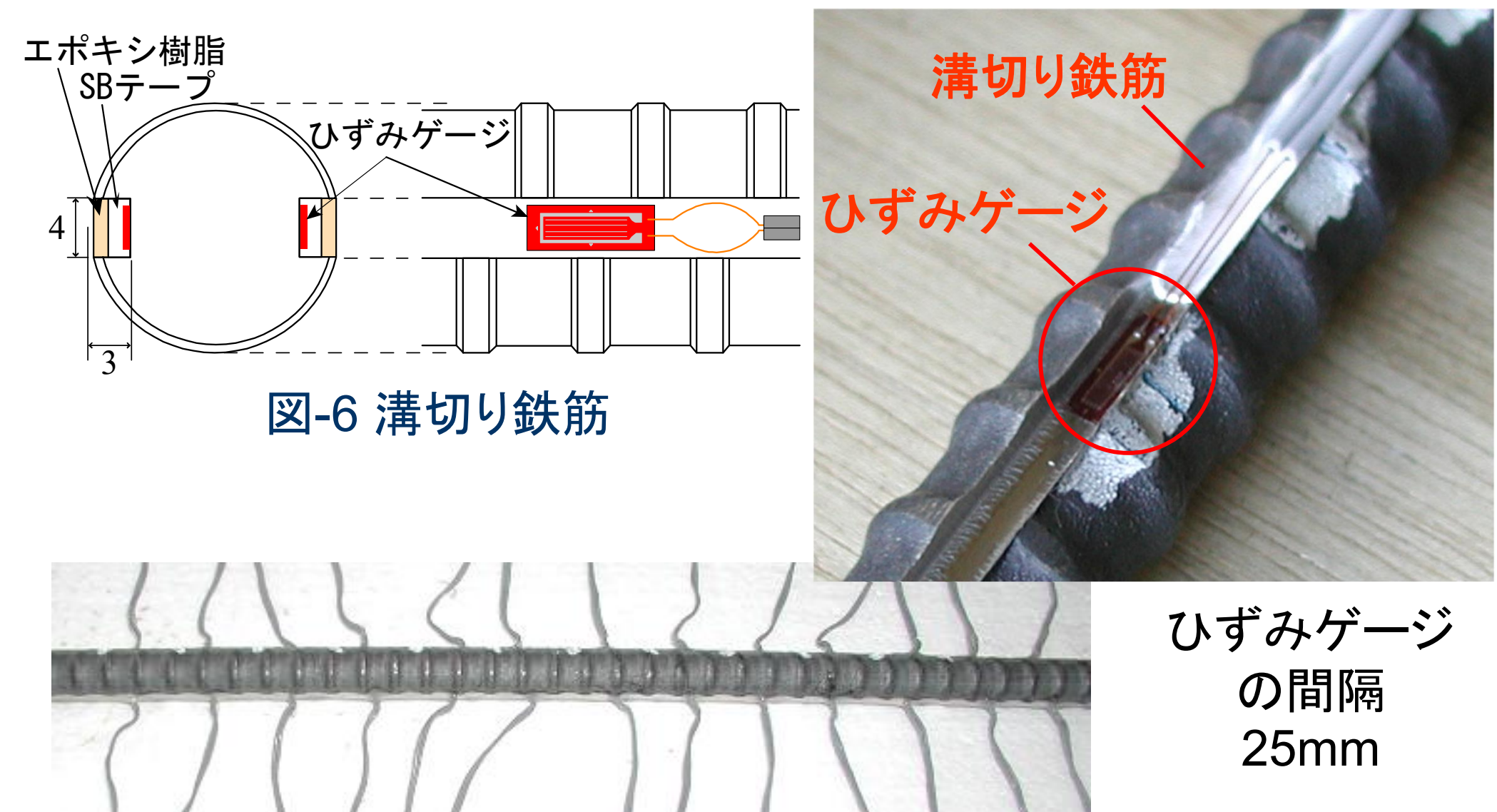


図-6 溝切り鉄筋

- ✓ 橋軸方向鉄筋に、D16異形鉄筋を溝切り加工したものを使用
- ✓ 溝にひずみゲージを貼付け、コーティングを施す

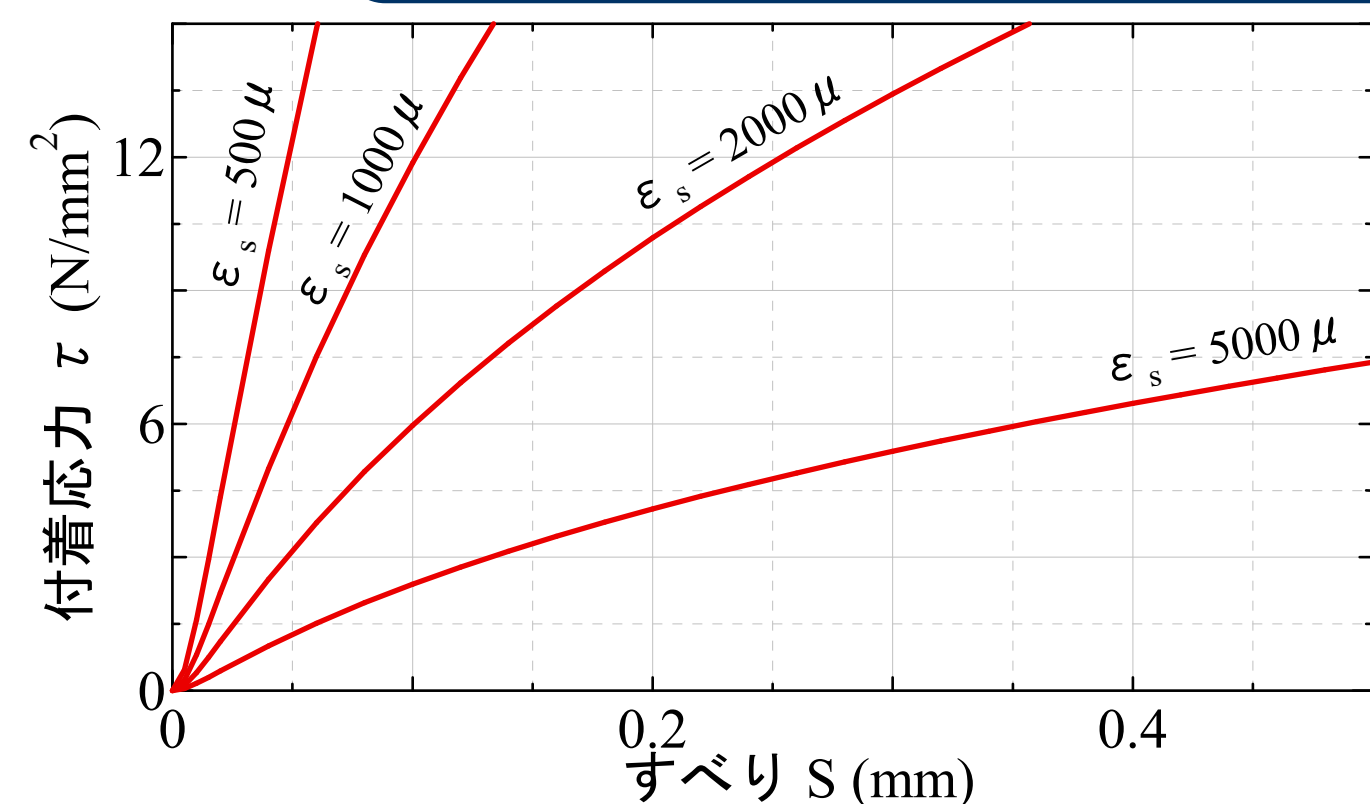
46

付着ばね要素特性

いかなる境界条件(すべりと鉄筋ひずみ)の場合に対しても適用可能な、付着-すべり-鉄筋ひずみ関係式を採用。

$$\tau(\varepsilon_s, S) = f'_c \cdot 0.73 \left(\ln \left(1 + 5000 \frac{S}{D} \right) \right)^3 \frac{1}{1 + \varepsilon_s \times 10^5}$$

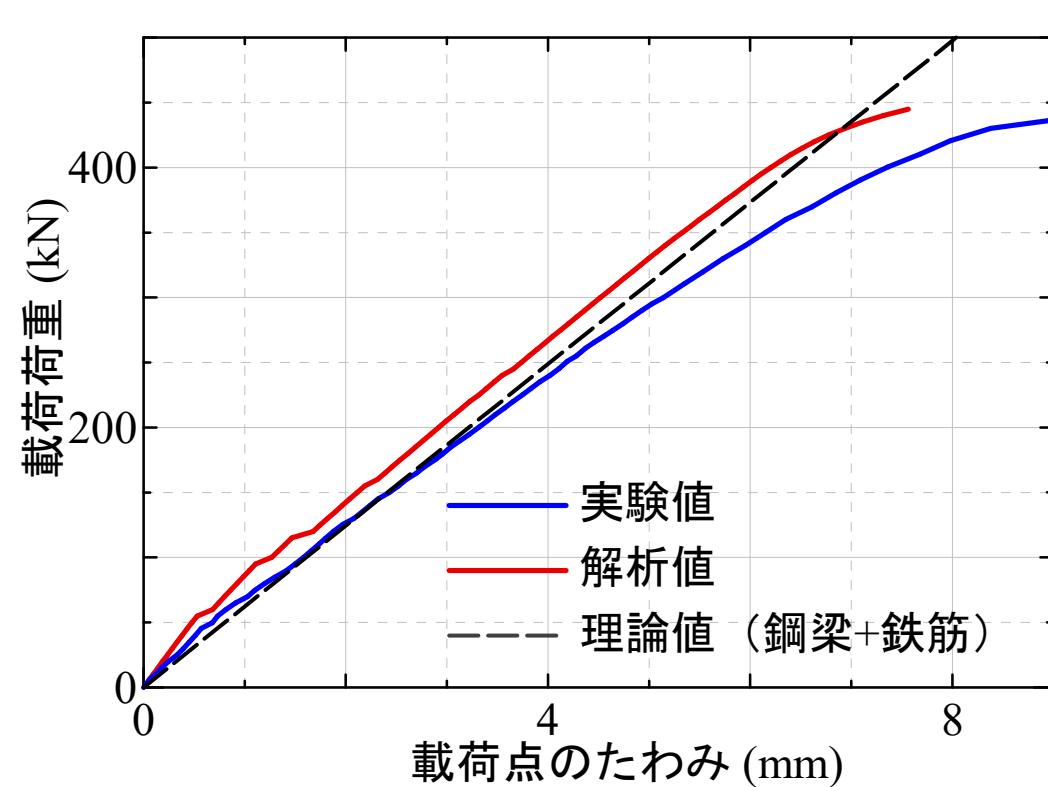
島先生らの提案式



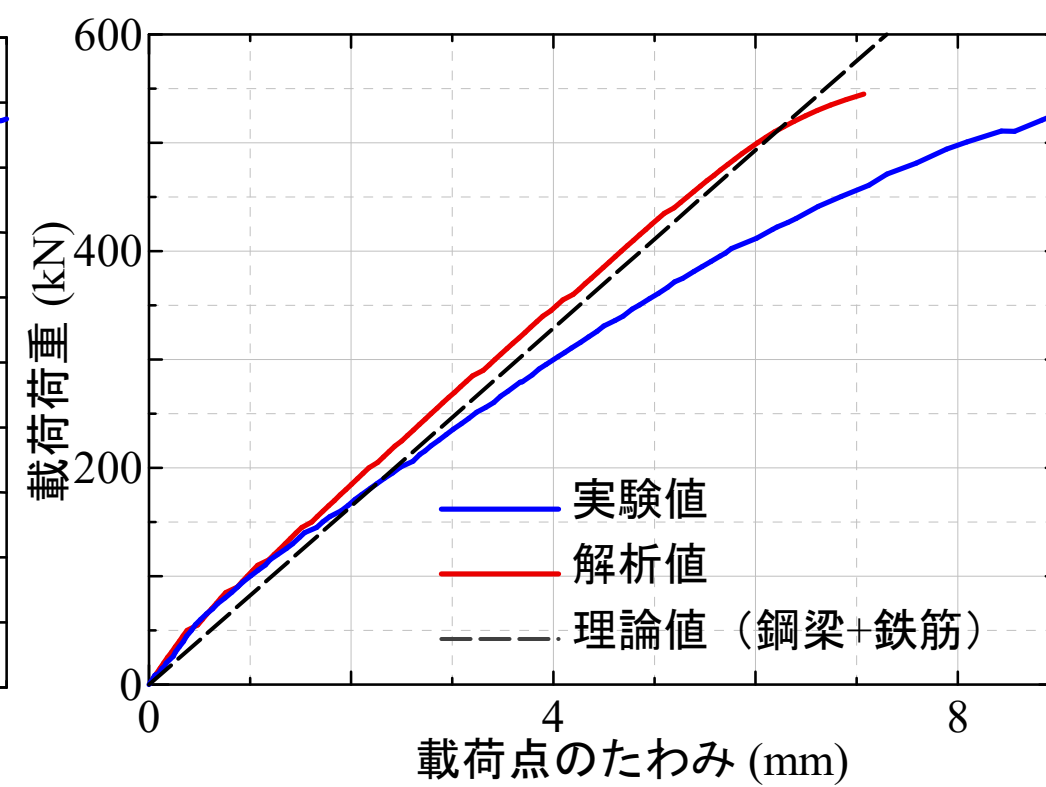
$\tau(\varepsilon_s, S)$: 付着応力
 ε_s : 鉄筋のひずみ
 S : すべり
 f'_c : コンクリート圧縮強度
 D : 鉄筋径

鉄筋とコンクリート間の付着ばね要素の水平ばね構成則

48



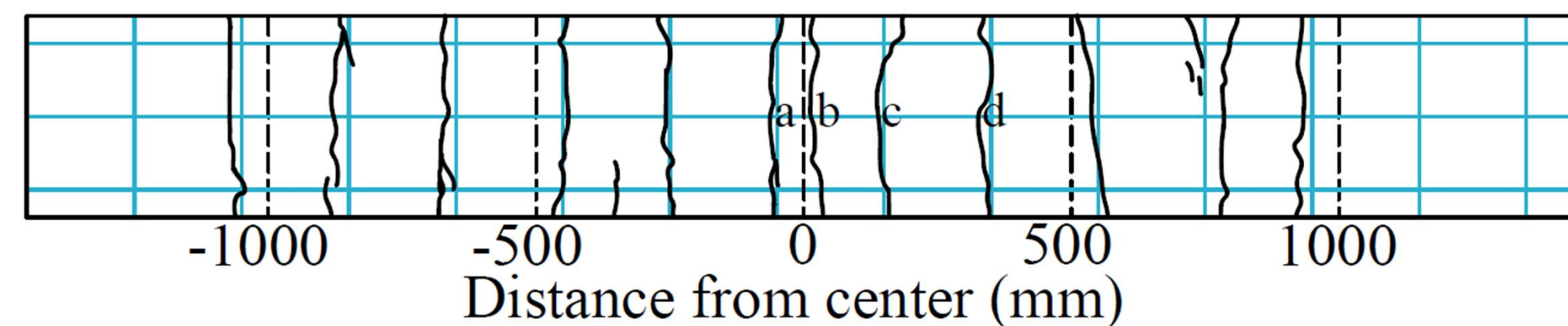
Type1-2試験体



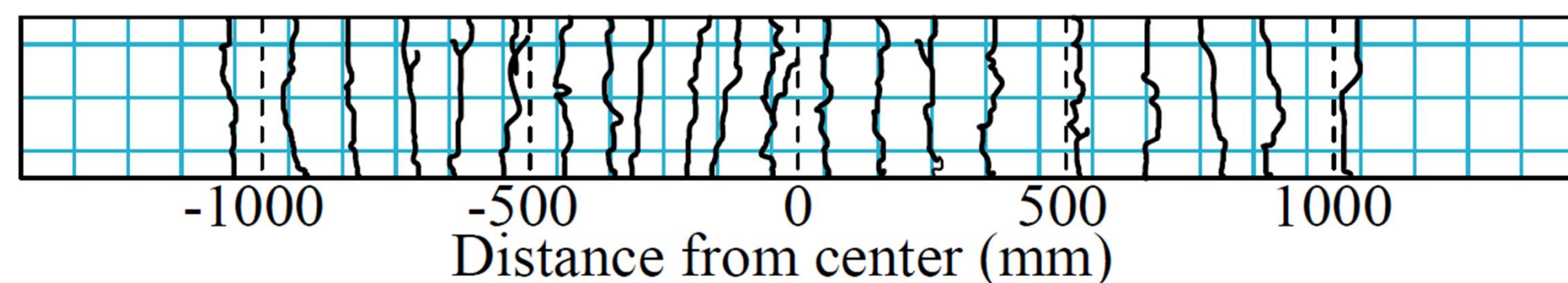
Type2-3試験体

荷重－たわみ関係

ひび割れ発生状況(載荷終了時)



Type1-2(スターラップ配置間隔200mm)



Type2-3(スターラップ配置間隔100mm)

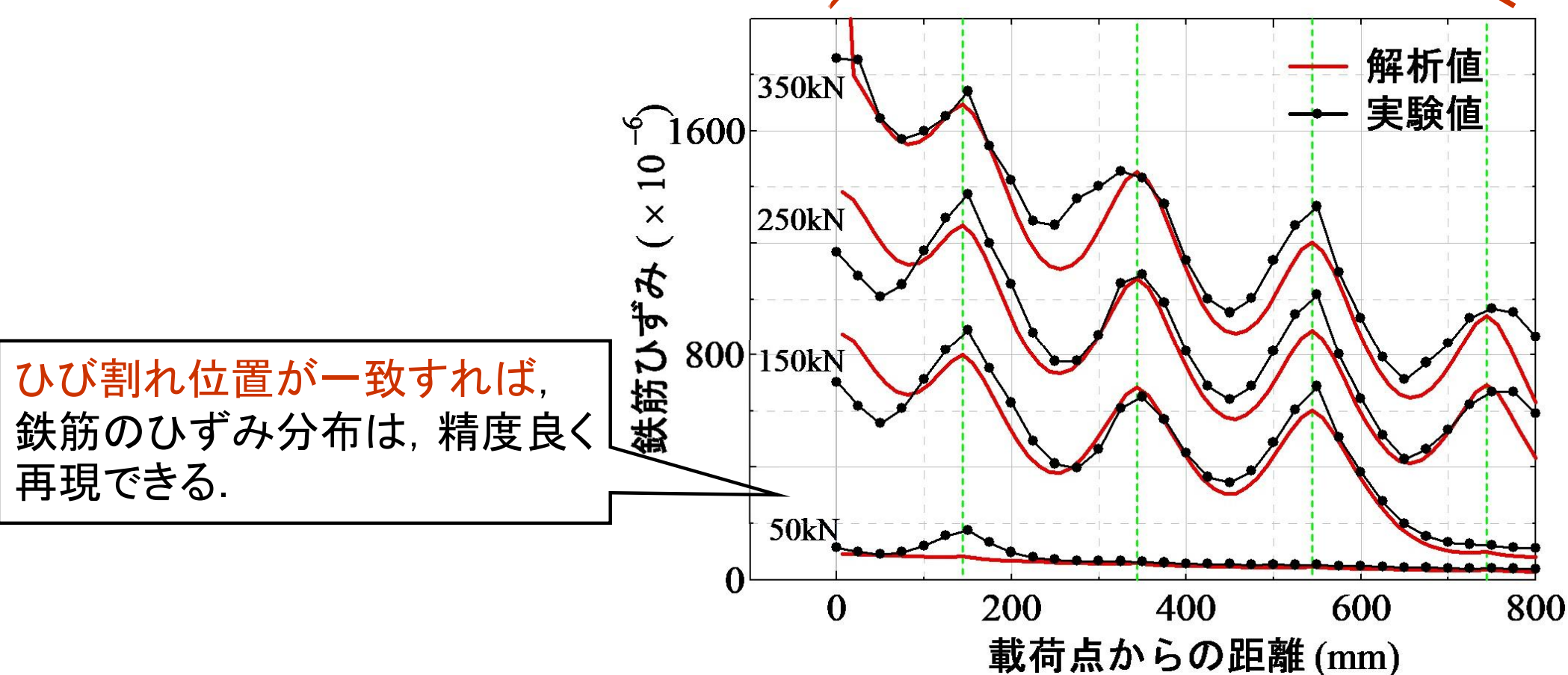
49

50

実験結果と解析結果の比較 (鉄筋ひずみ分布)

荷重50kNから100kNごとの鉄筋のひずみ分布.

試験体Type1-2
スターラップ間隔200mm



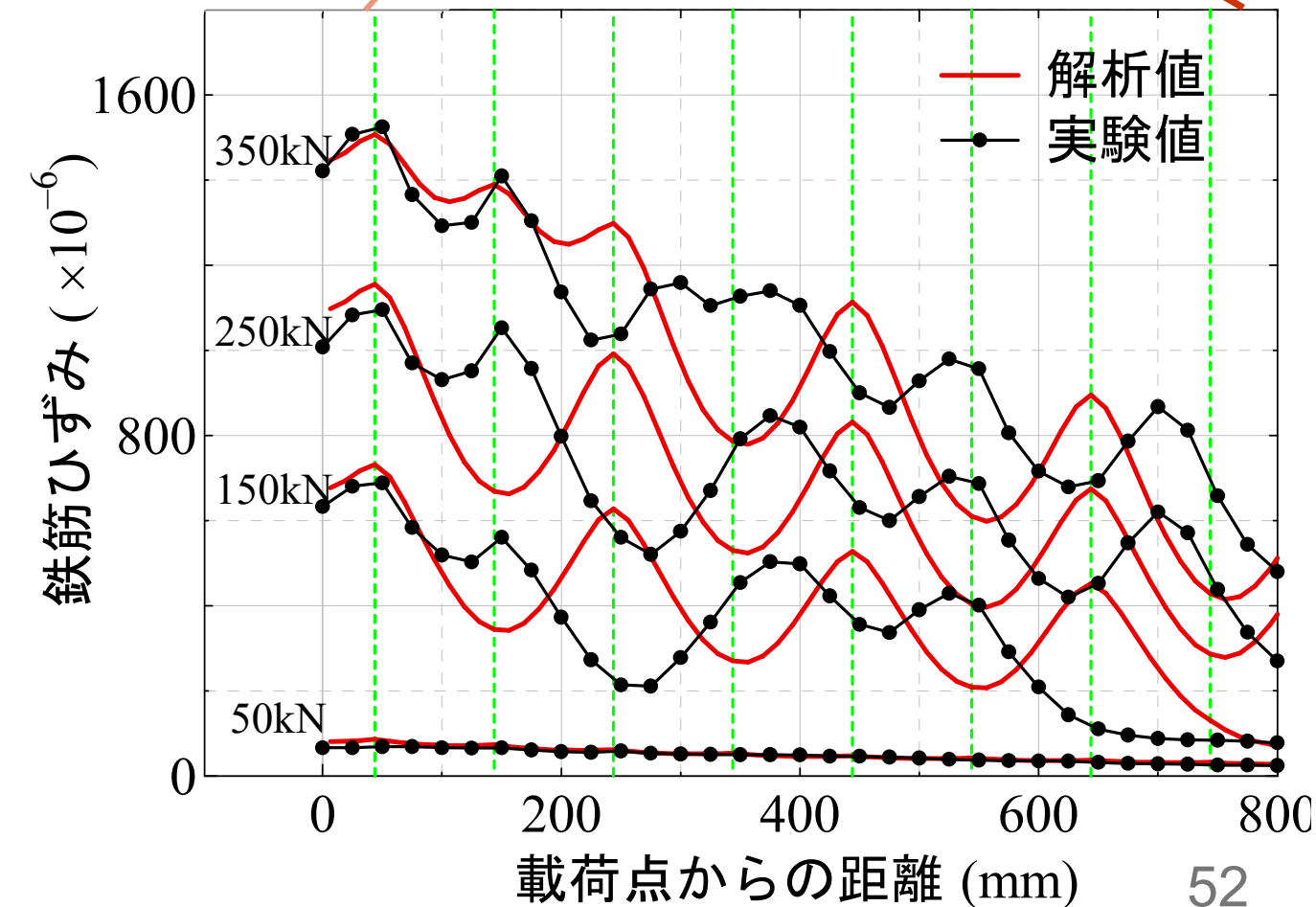
ひび割れ位置が一致すれば、鉄筋のひずみ分布は、精度良く再現できる。

51

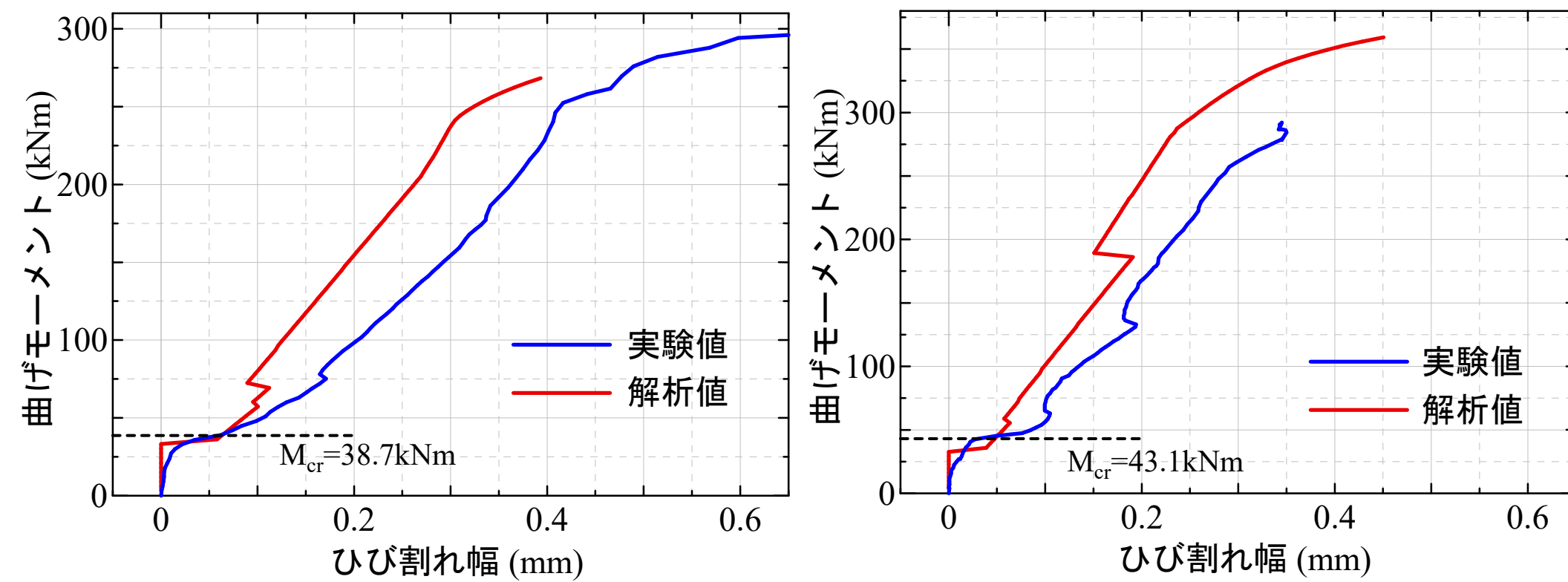
実験結果と解析結果の比較 (鉄筋ひずみ分布)

荷重50kNから100kNごとの鉄筋のひずみ分布.

試験体Type2-3
スターラップ間隔100mm



52



Type1-2試験体
(スパン中央から150mm位置)

Type2-3試験体
(スパン中央から50mm位置)

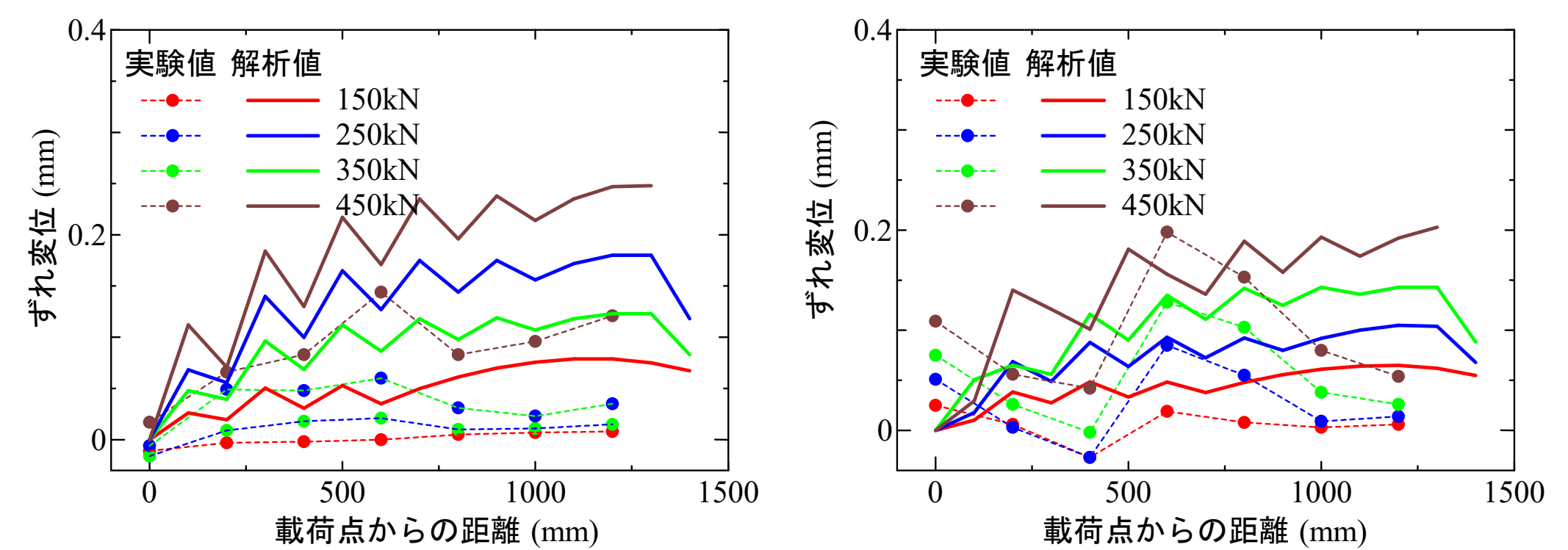
曲げモーメントとひび割れ幅の関係

53

まとめ

- RC床版と鋼梁の上下を反転させた合成梁の負曲げ実験において、鉄筋のひずみを詳細に計測.
- また、RC床版内の鉄筋とコンクリートの付着を考慮した剛体ばねモデル解析により、鉄筋のひずみ挙動や床版ひび割れ挙動を再現.
- 実橋への適用は難しい.

55



Type1-2試験体

Type2-3試験体

橋軸方向ずれ変位分布

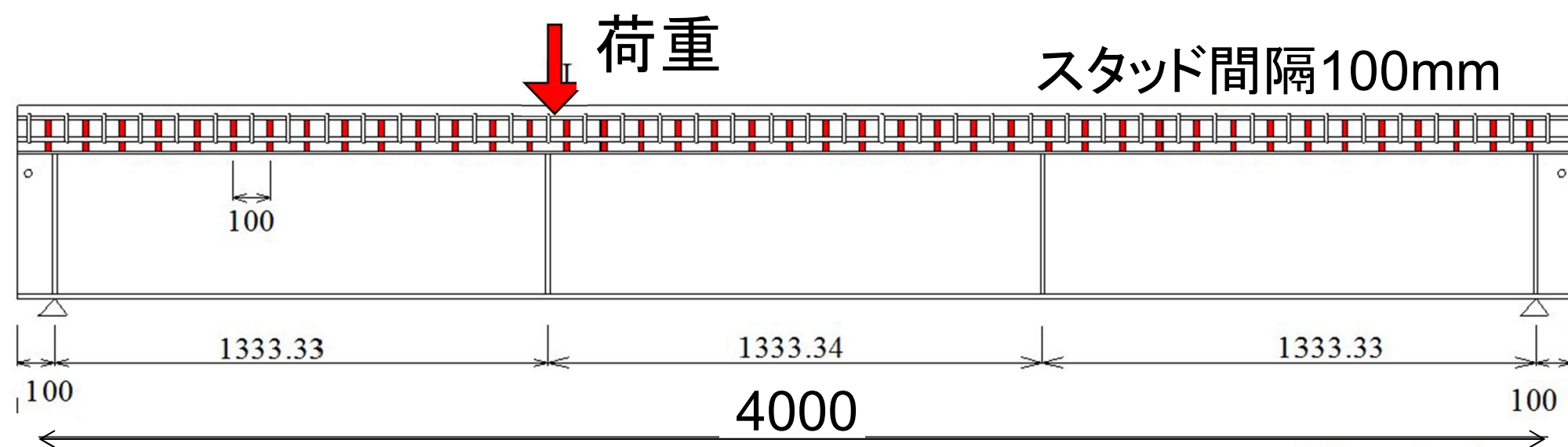
ひび割れ位置との関係で、ずれ変位が脈動する.

54

合成梁・非合成梁の実験と解析 (2015～2017年)

- ずれ止めとして用いたスタッドの挙動を含む合成梁および非合成梁の挙動を詳細に把握するため、模型試験体の静的載荷試験.
- 並行して押抜き試験を行い、梁試験体中のスタッドの挙動と押抜き試験体中のスタッドの挙動との対応関係の確認.
- スタッドの押抜き試験で得られたせん断力-ずれ変位関係などを用いた解析による不完全合成梁の挙動の再現.

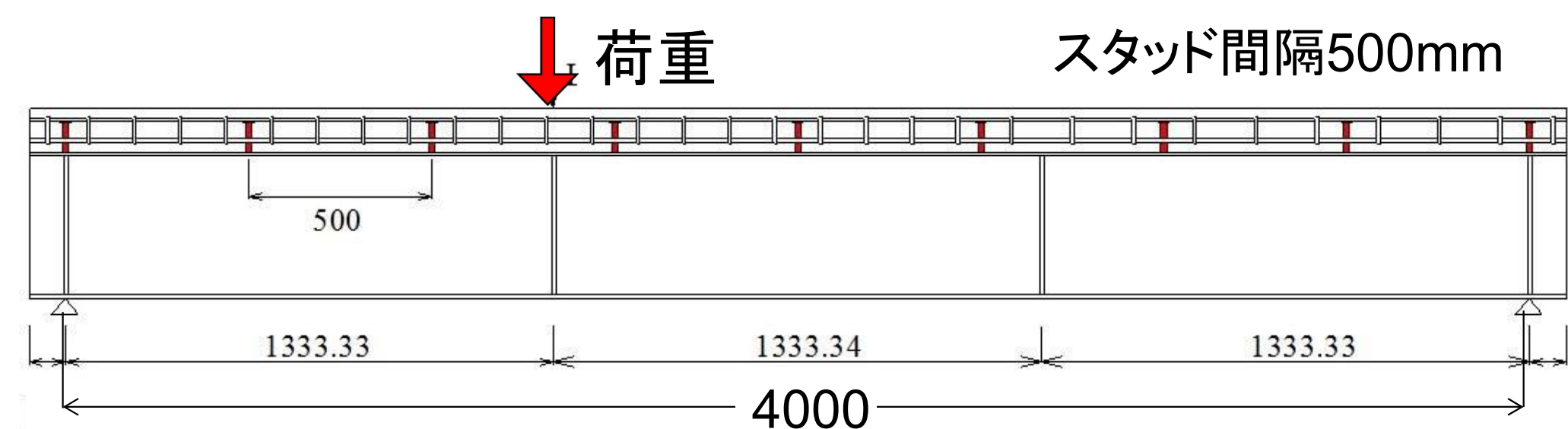
56



合成梁試験体(スタッド軸径16mm, 高さ90mm)

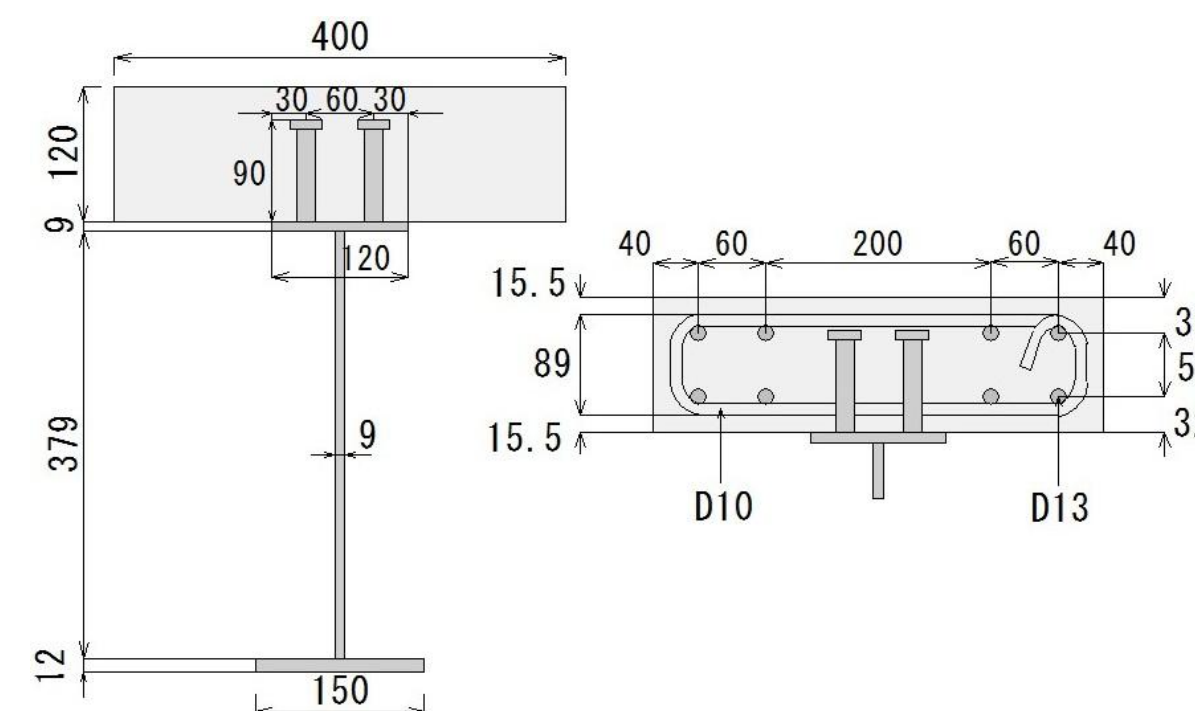
鋼梁高400mm
床版断面400×120mm
軸方向鉄筋D13 8本
スターラップD10

57



非合成梁試験体

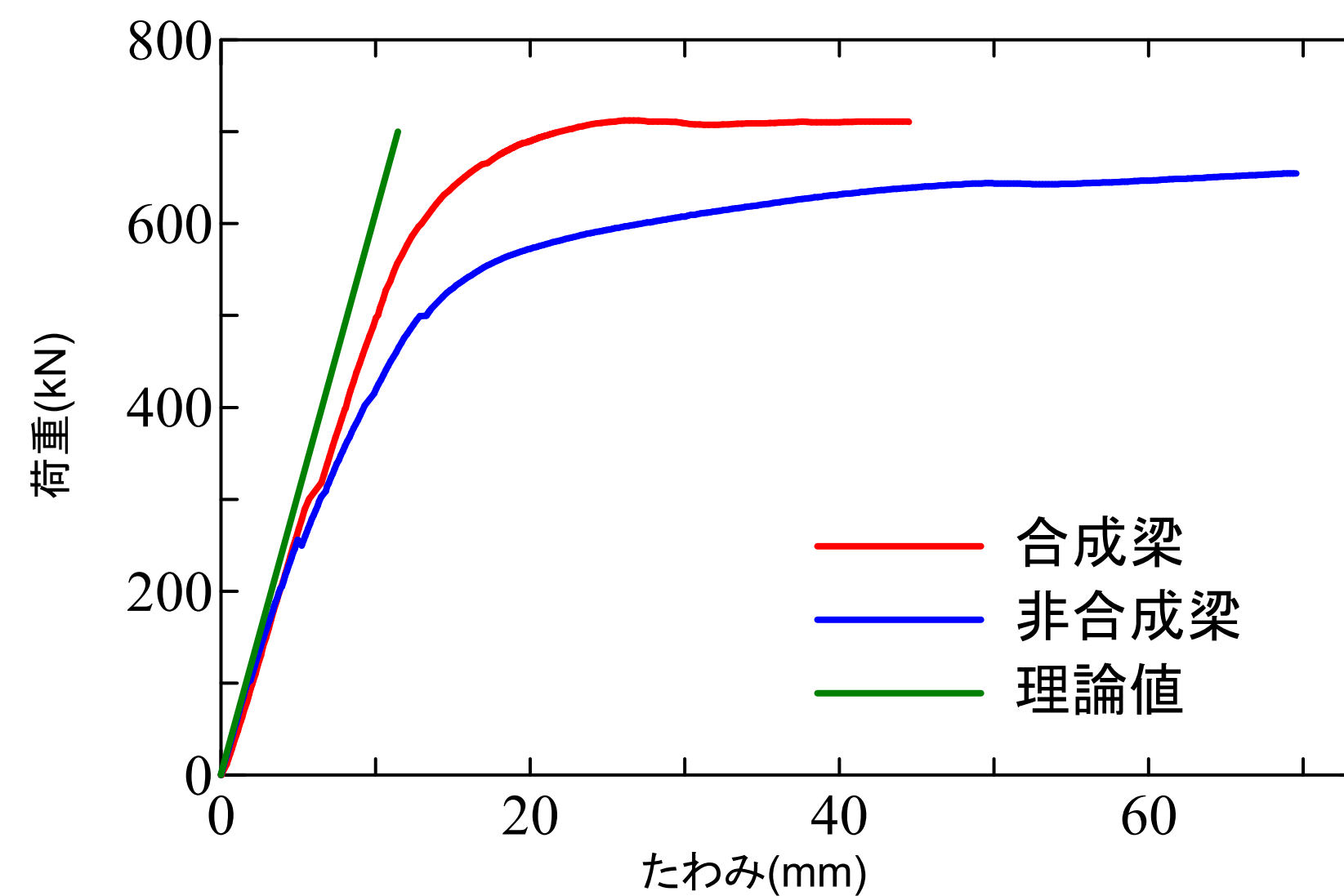
(Dimensions in mm)



58



59



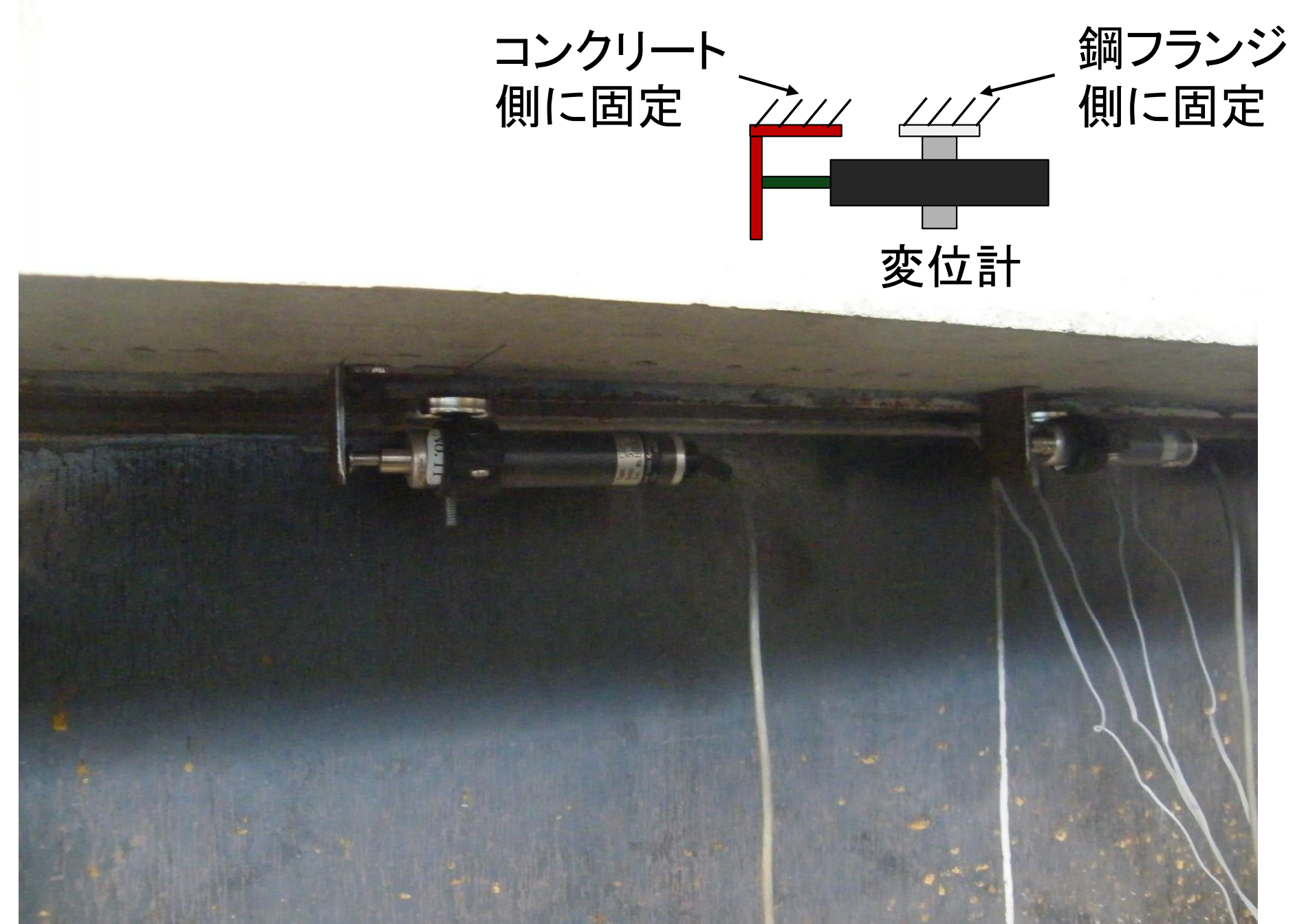
荷重と載荷点のたわみ関係

60



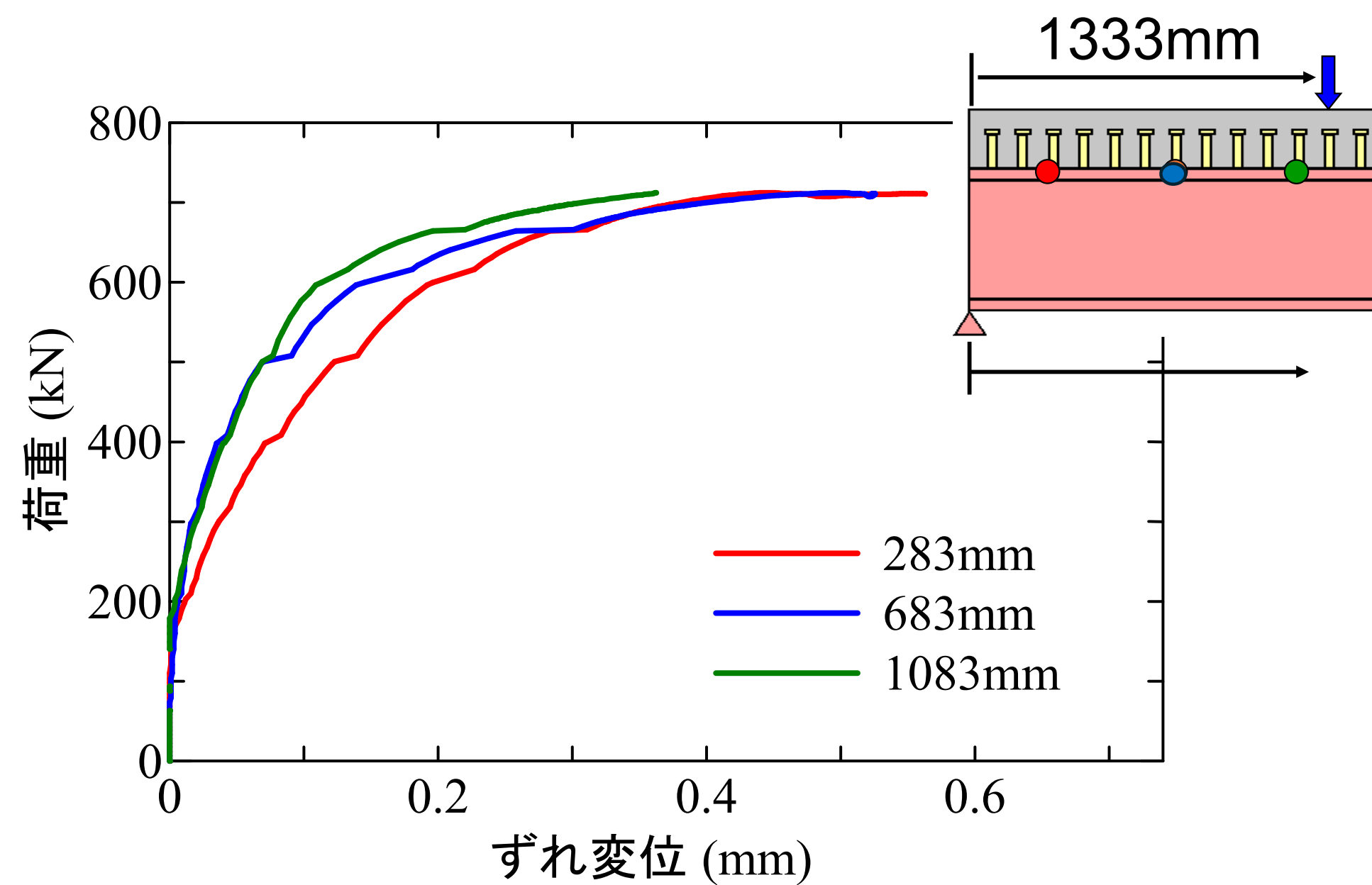
ずれ変位の計測状況

61



ずれ変位の計測状況(高感度変位計)

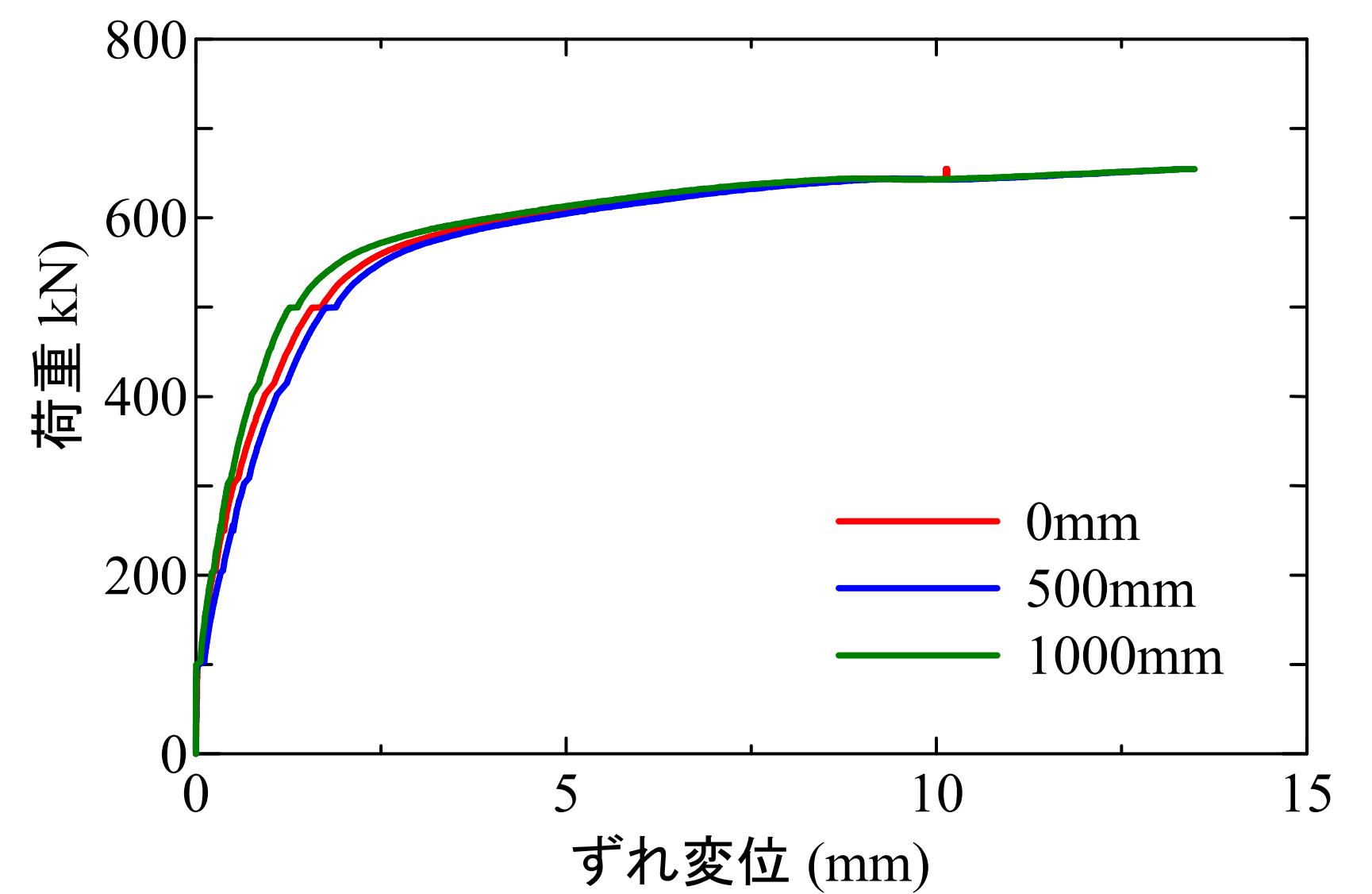
62



荷重とずれ変位関係(合成梁)

最大荷重時のずれ変位は1mm以下

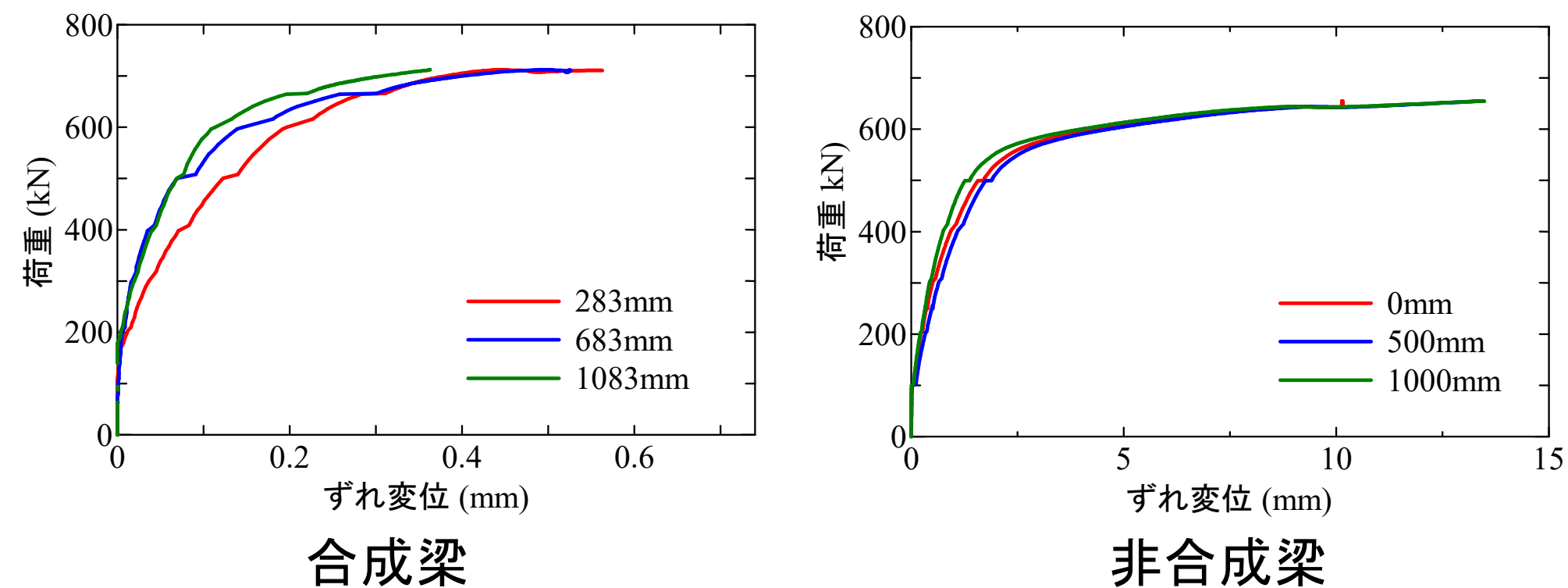
63



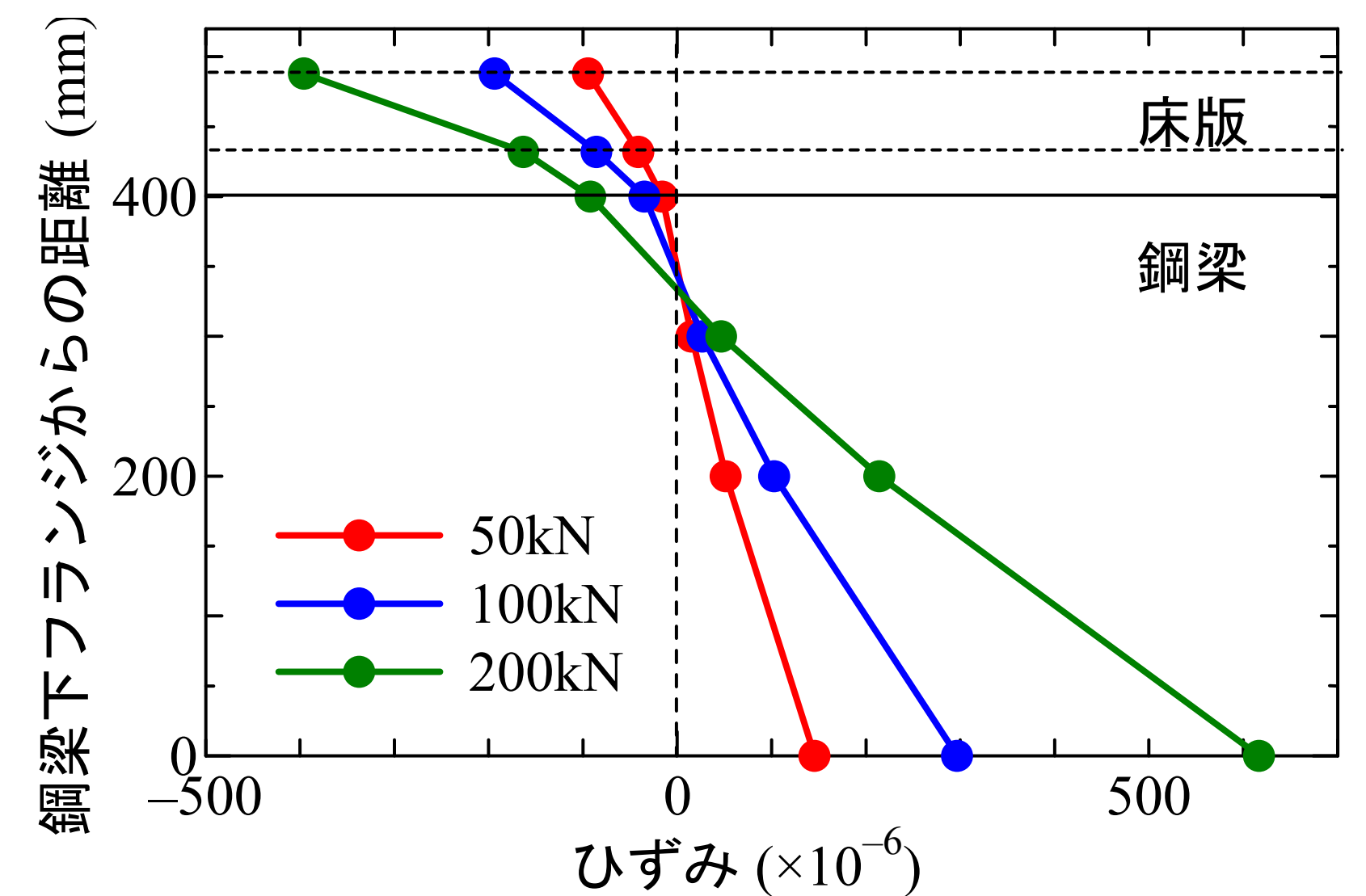
荷重とずれ変位関係(非合成梁)

最大荷重時のずれ変位は10mm以上

64



合成梁と非合成梁の荷重とずれ変位関係の比較

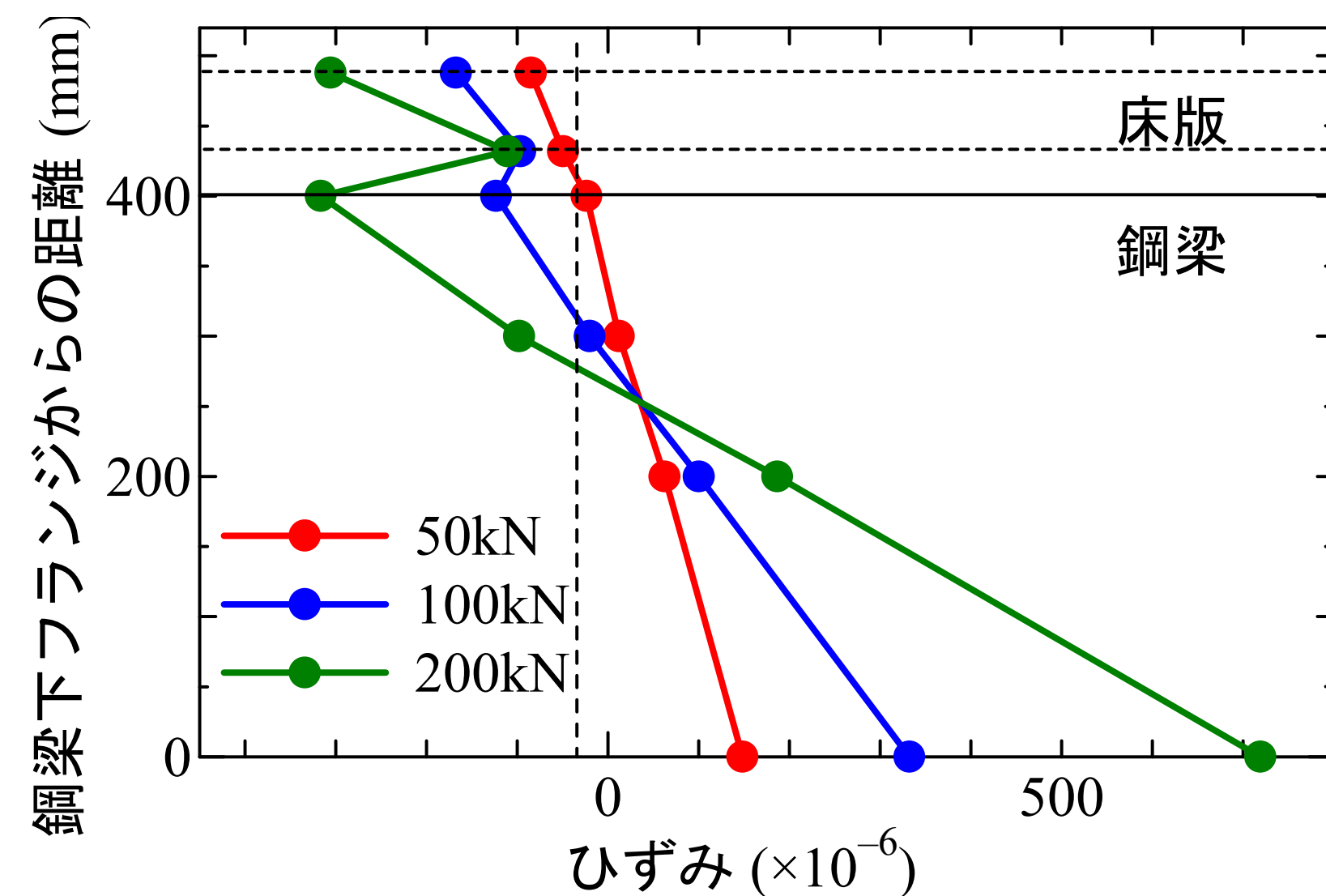


梁高方向のひずみ分布(合成梁)

載荷荷重200kN以下では断面平面保持に近い。

65

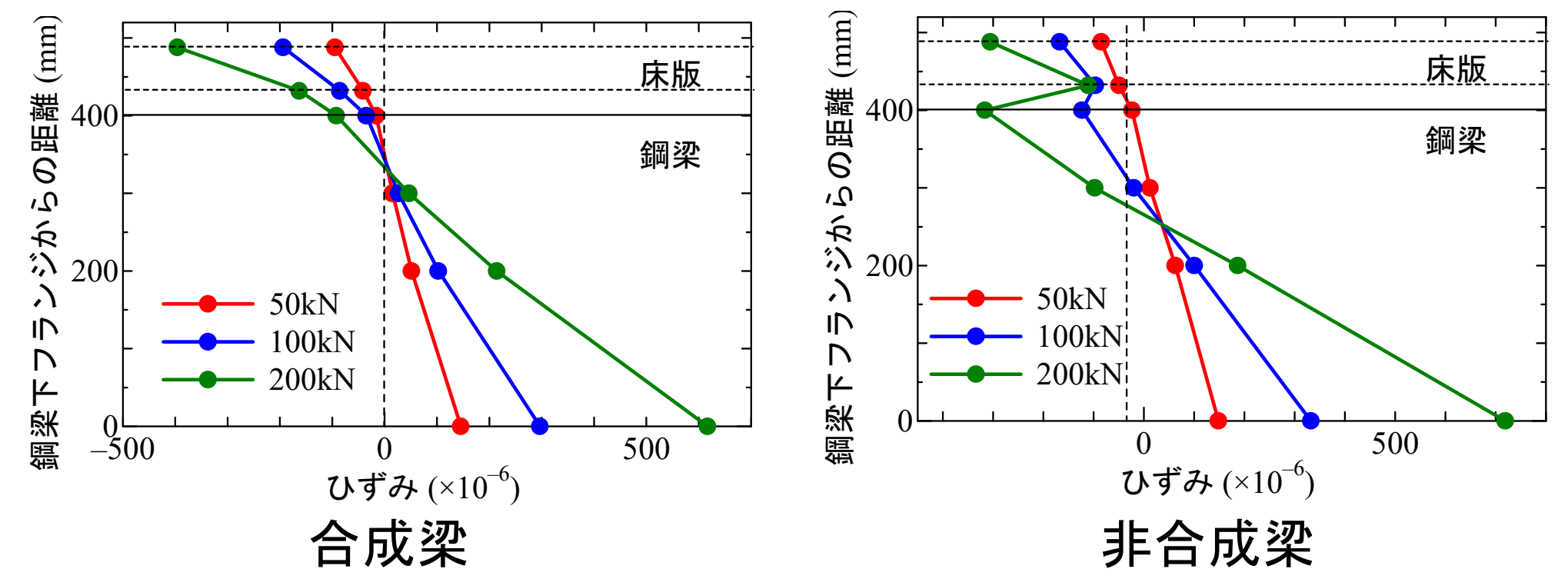
66



梁高方向のひずみ分布(非合成梁)

載荷荷重100, 200kNでは床版下側鉄筋と鋼梁上フランジ間のひずみに段差がある。

67



合成梁と非合成梁の梁高方向のひずみ分布の比較

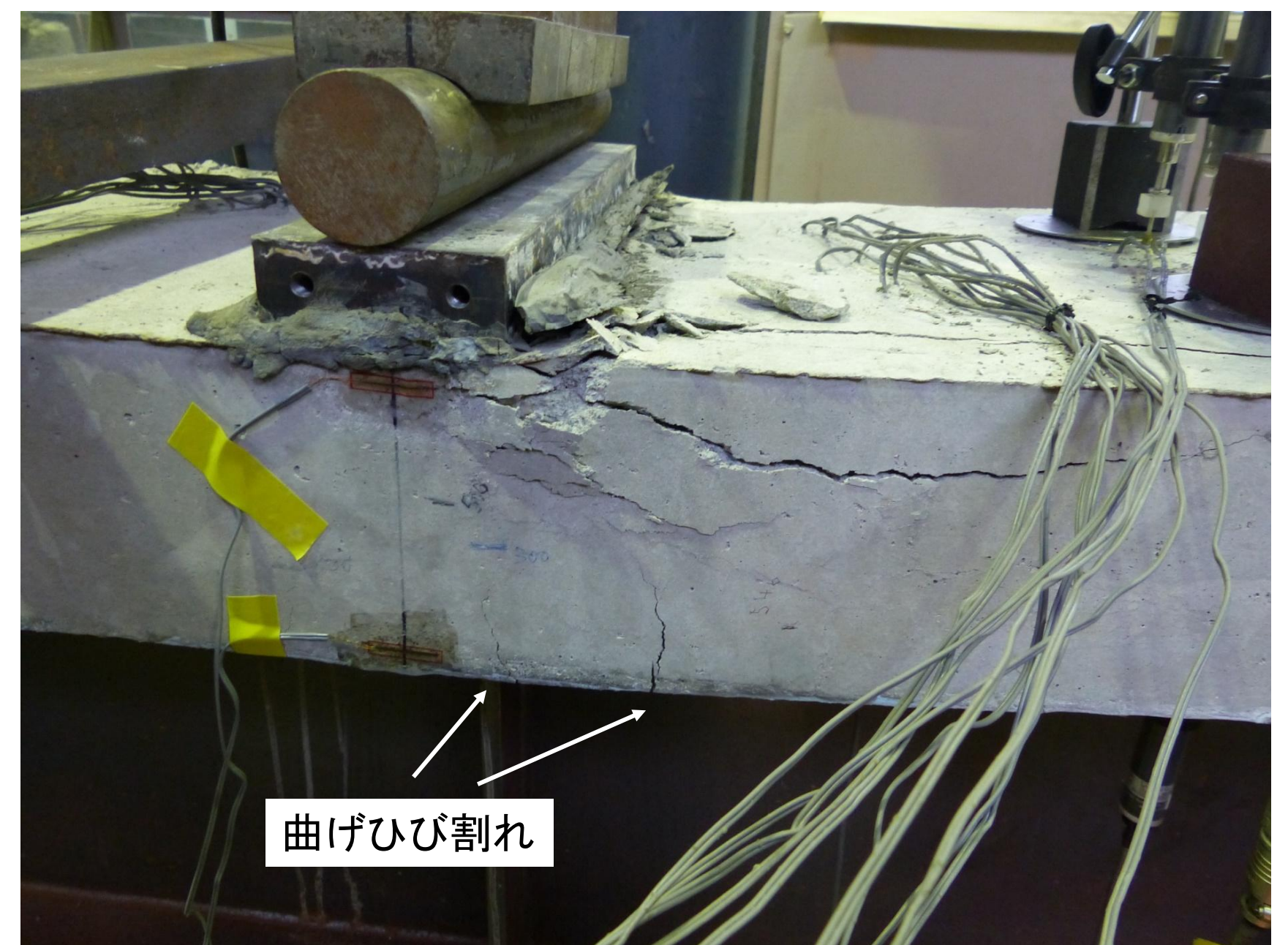
- 両者で鋼梁下縁の引張ひずみは同程度
- 鋼梁上縁の圧縮ひずみは非合成梁のほうが大きい。

68



合成梁試験体の破壊状況(床版コンクリートが圧壊)

69



非合成梁試験体の破壊状況
(載荷点部床版コンクリート下縁に曲げひび割れ)

70



実験終了後のスタッドの状況(非合成梁)

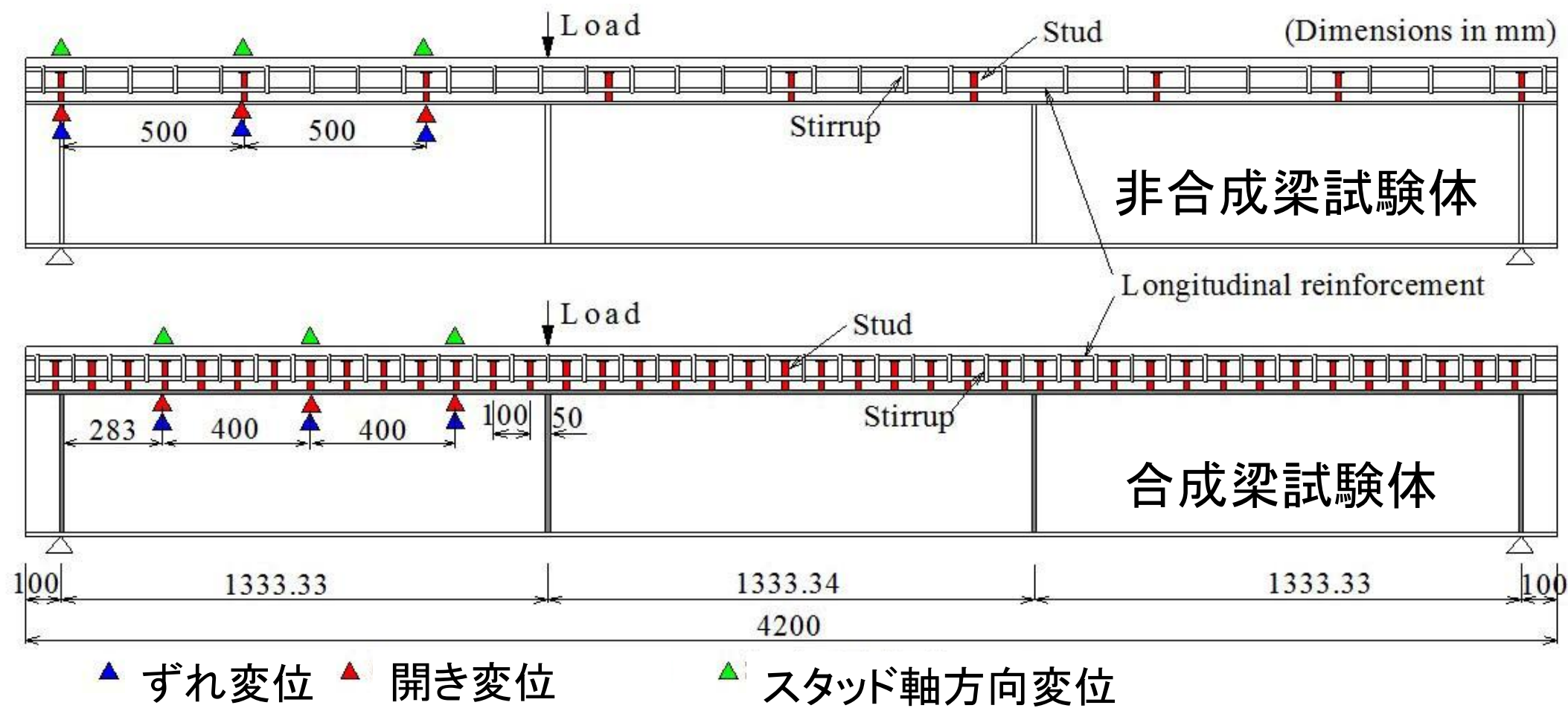
71

梁試験体中のスタッドの挙動と押抜き試験体中のスタッドの挙動の対応関係

- ずれ変位
- スタッドのひずみ
- 床版と鋼フランジの開き変位
- スタッドの軸方向変位
- スタッド前後の鋼フランジのひずみ

72

非合成・合成梁試験体の計測項目

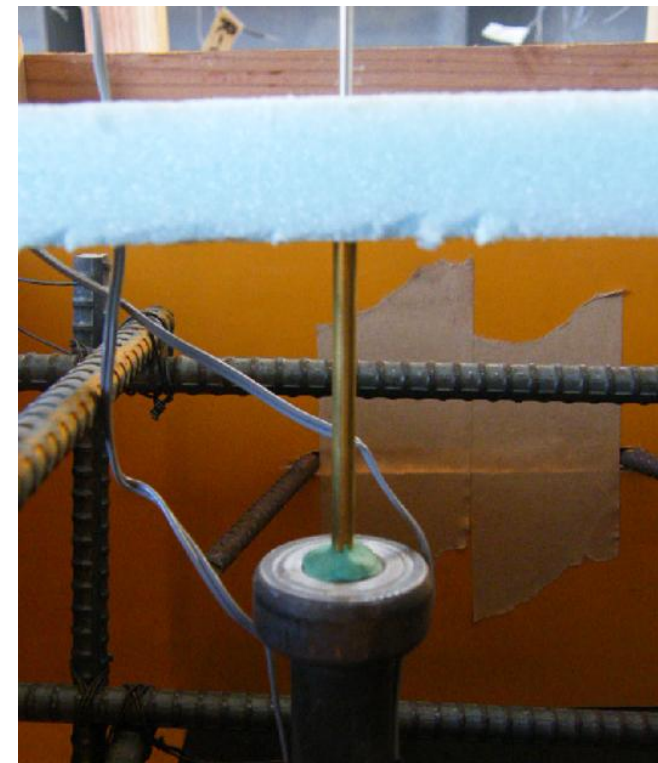


計測項目

- 載荷点のたわみ, ずれ変位, 床版と鋼上フランジの開き変位, スタッドの軸方向変位
- スタッドの軸ひずみ, 鋼梁, 鉄筋のひずみ

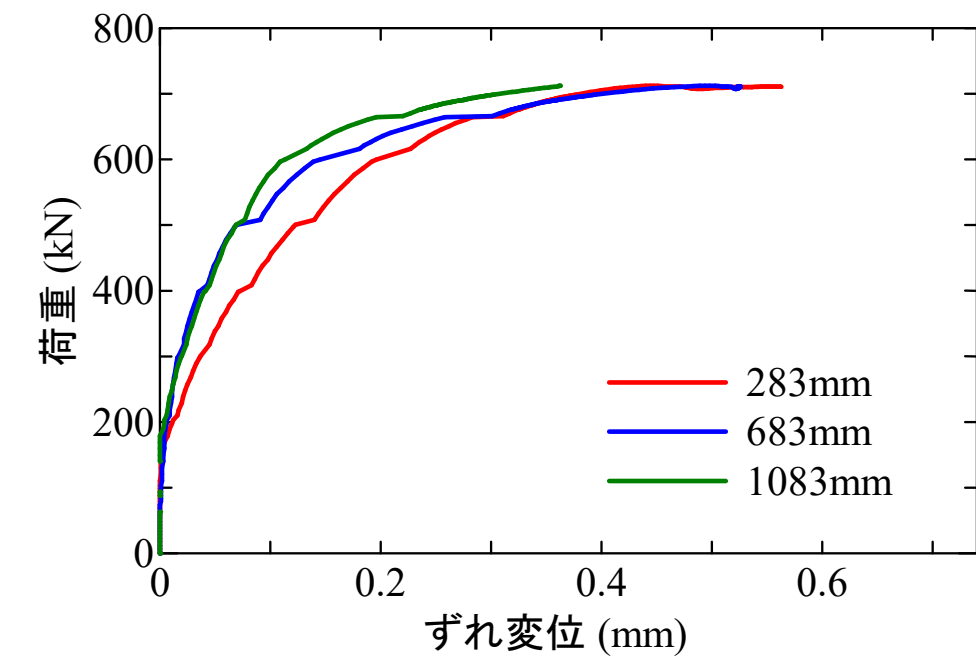
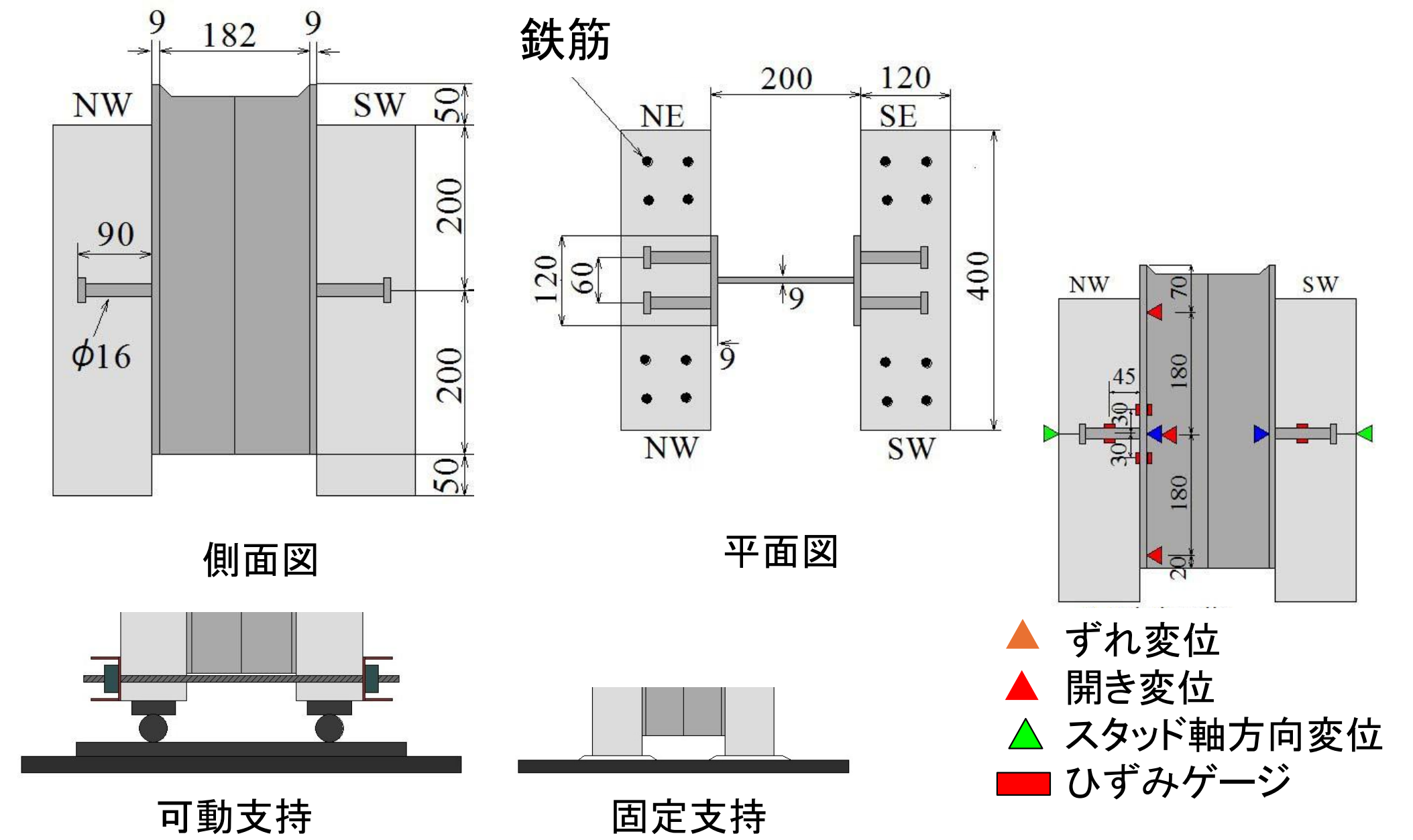


床版と鋼フランジの開き変位計測

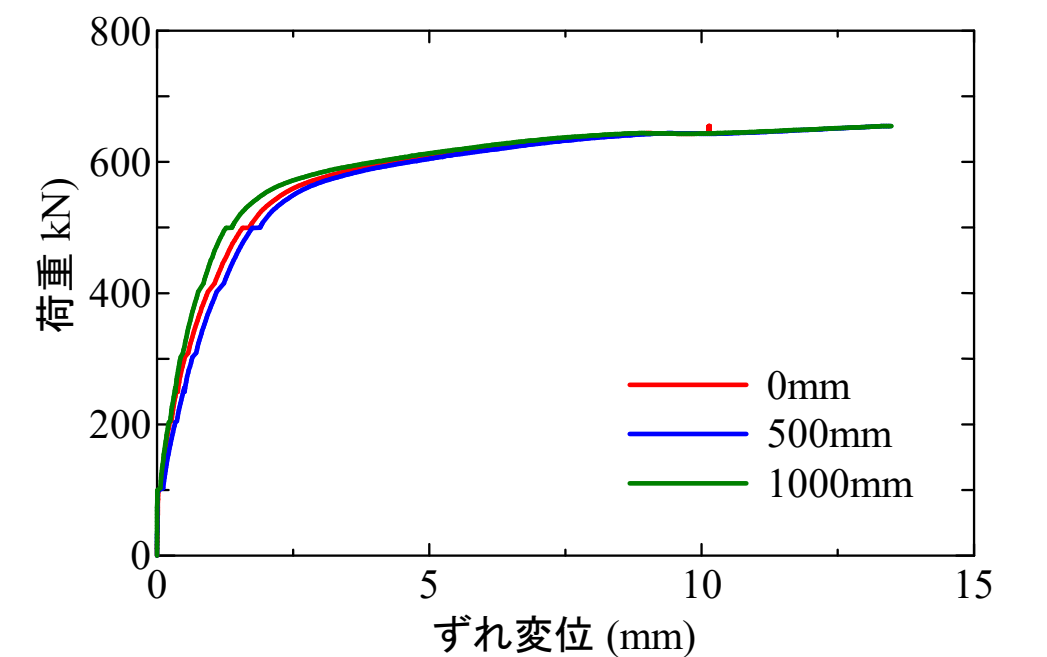


スタッド軸方向変位計測関係

押抜き試験体



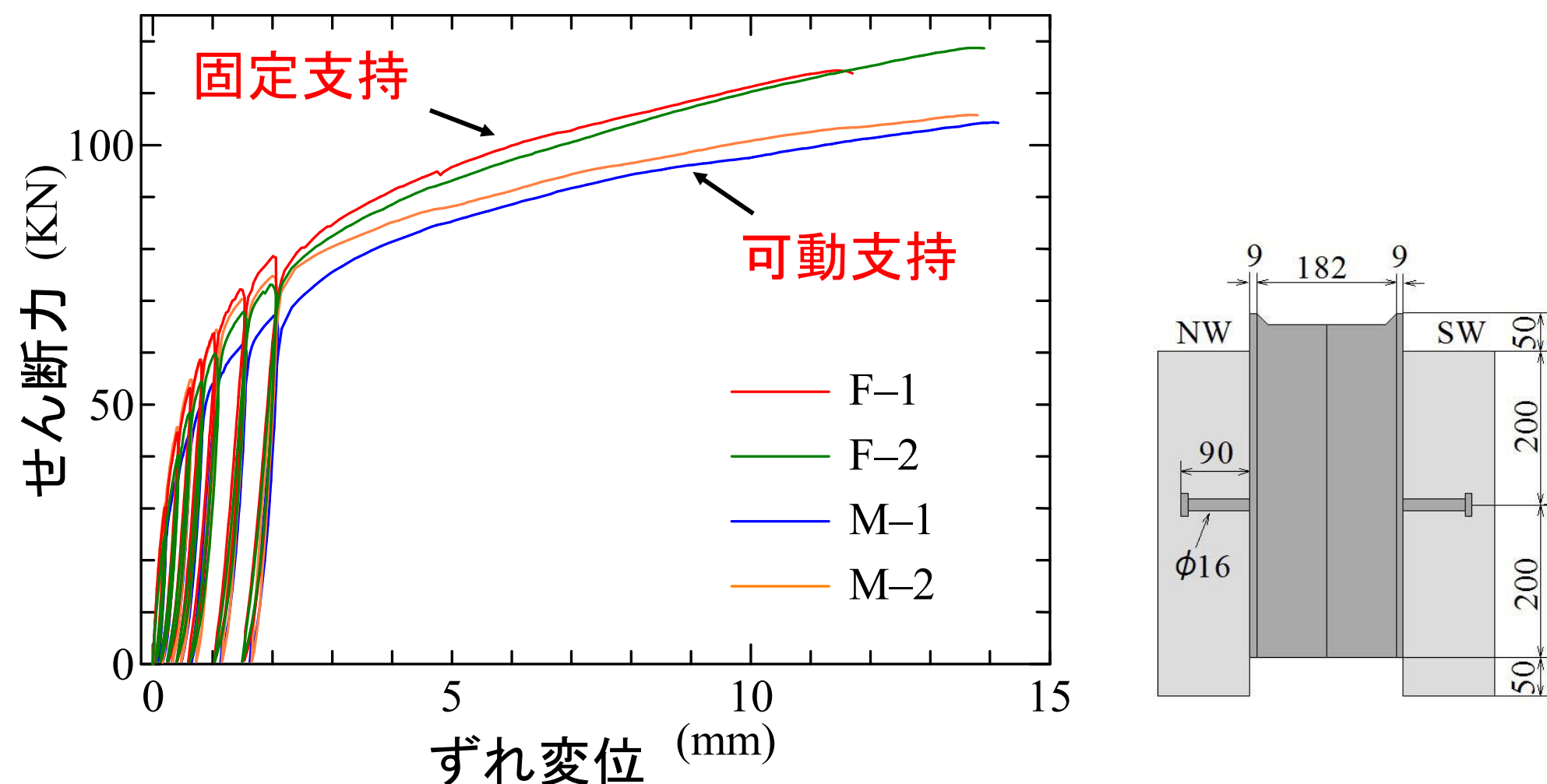
合成梁



非合成梁

合成梁と非合成梁の荷重とずれ変位関係の比較

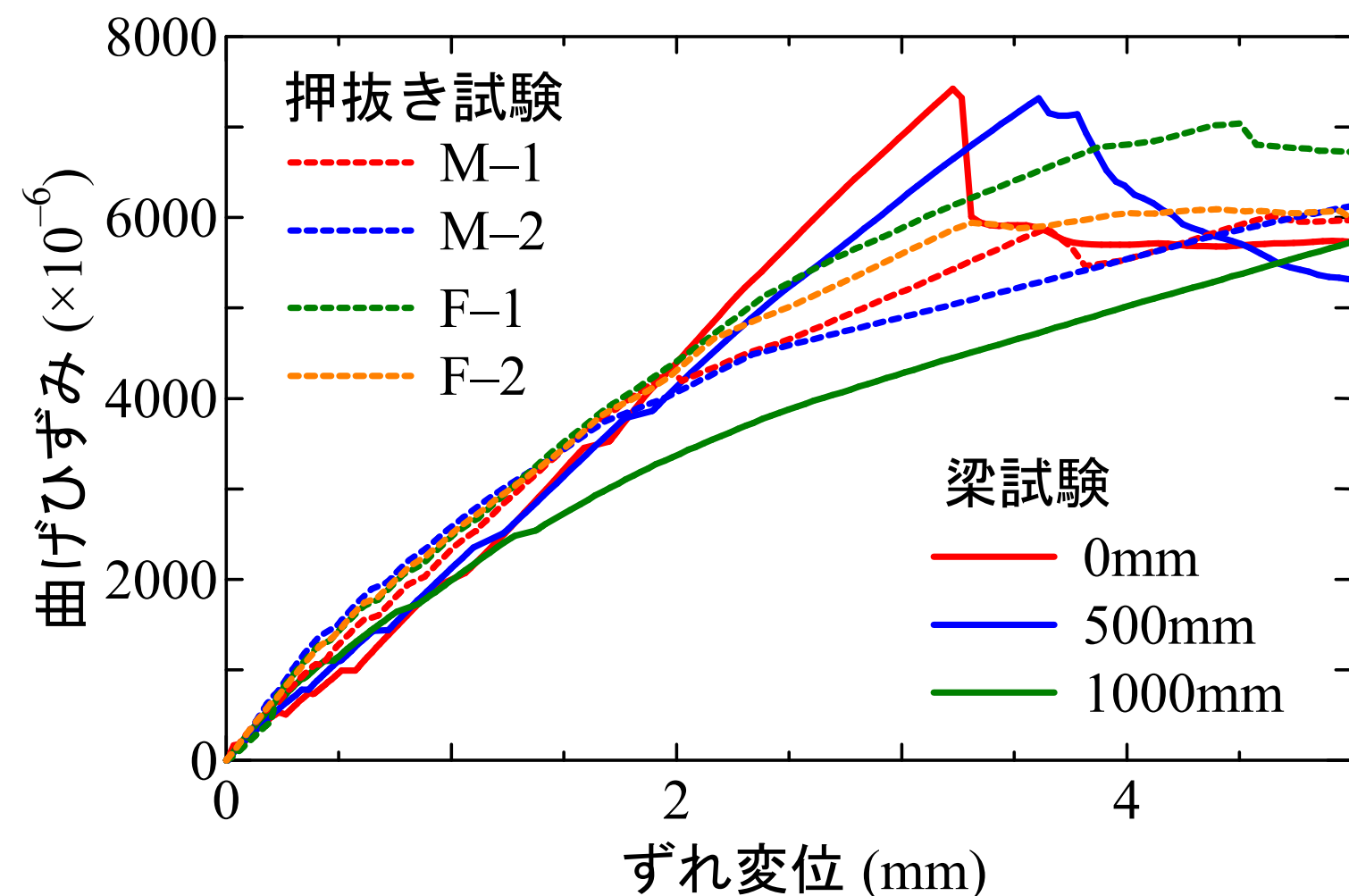
押抜き試験体のせん断力ーずれ変位関係



固定支持よりも可動支持の場合のほうがせん断耐力は小さい。

77

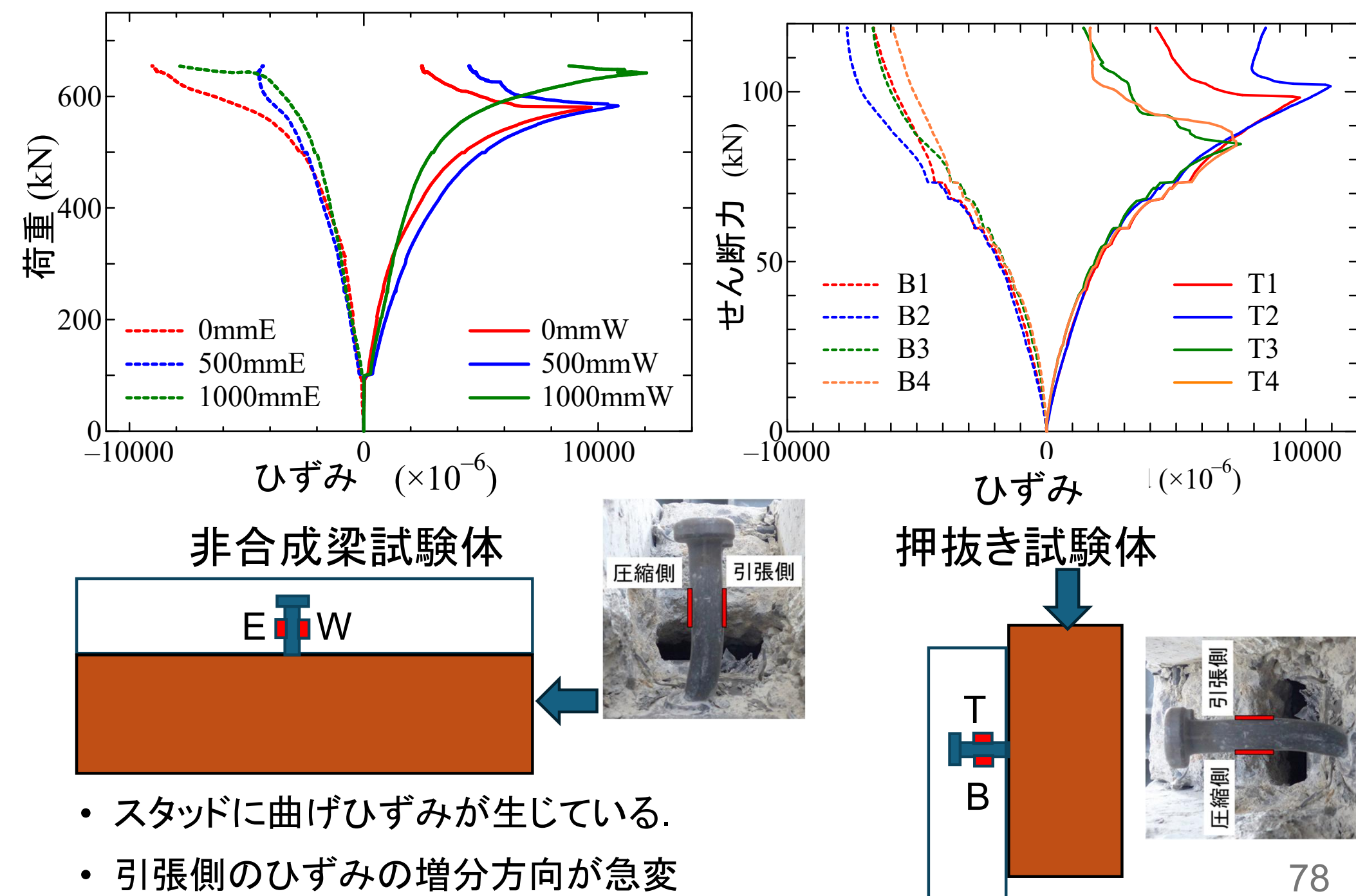
スタッドの曲げひずみとずれ変位の関係



梁試験体と押抜き試験体のスタッドの曲げひずみとずれ変位の関係の対応から、梁試験体中のスタッド曲げひずみあるいはずれ変位からせん断力が推定できる。

79

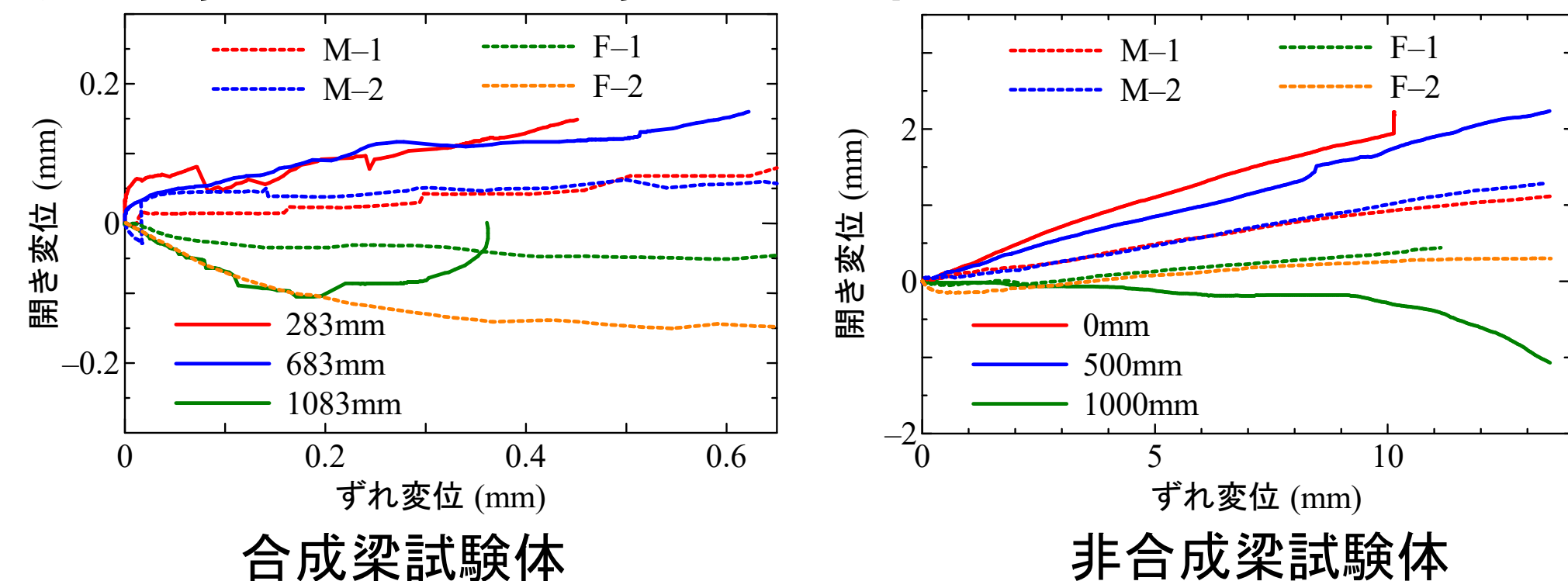
スタッドのひずみ挙動



- スタッドに曲げひずみが生じている。
- 引張側のひずみの増分方向が急変

78

ずれ変位と開き変位の関係

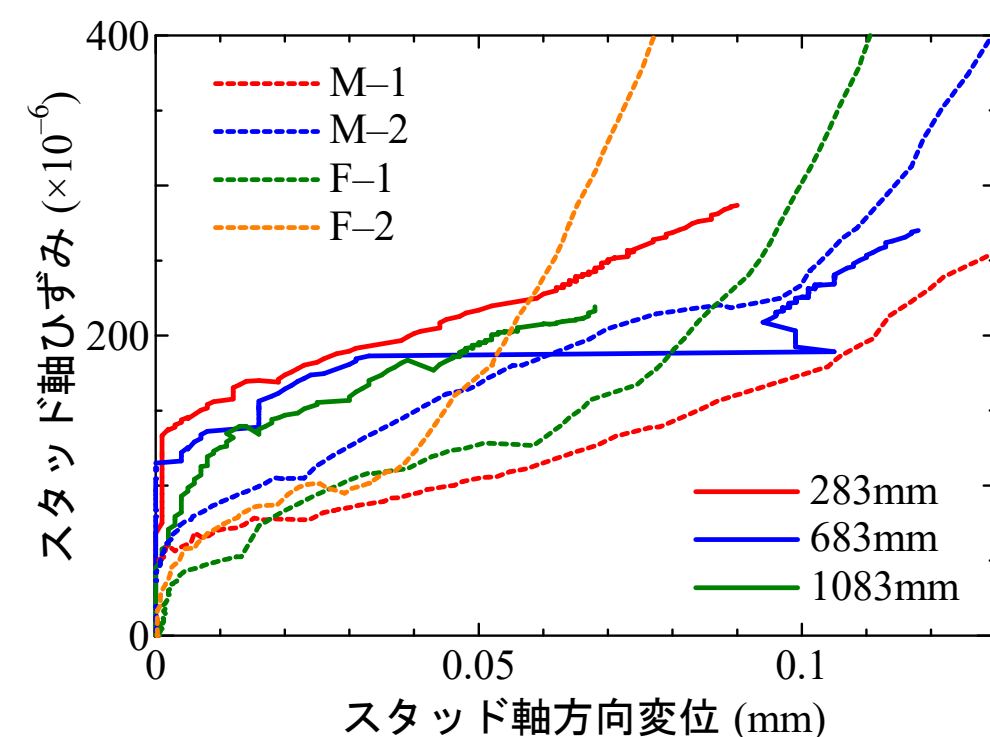


基本的にずれ変位に伴って開き変位が生じている。

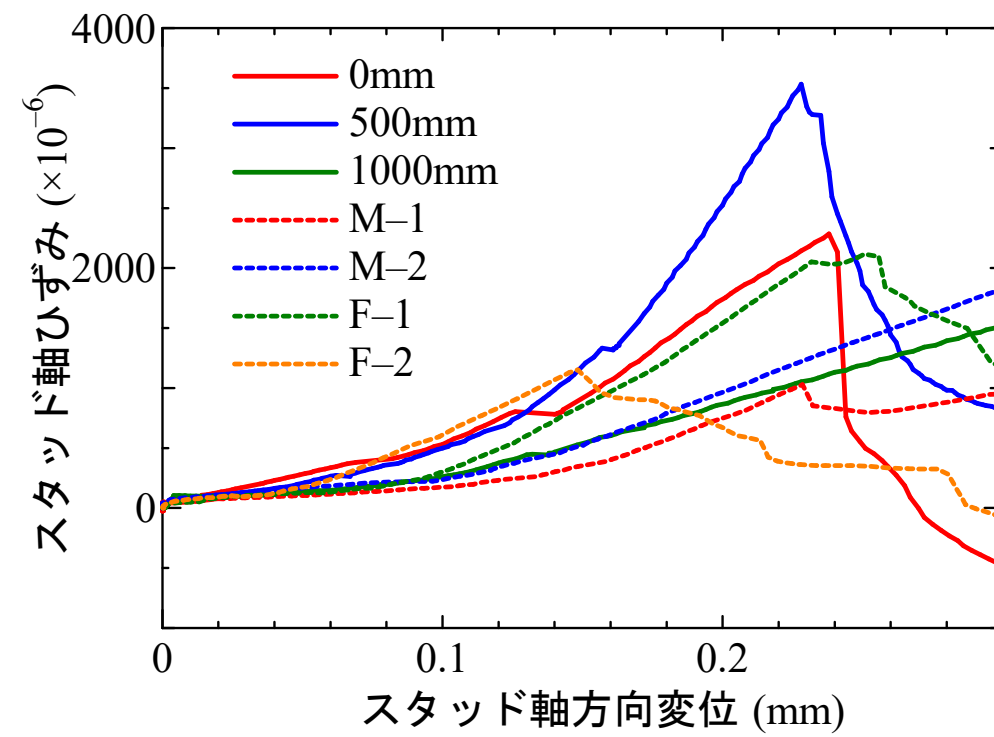


80

スタッド軸ひずみと軸方向変位関係



合成梁試験体



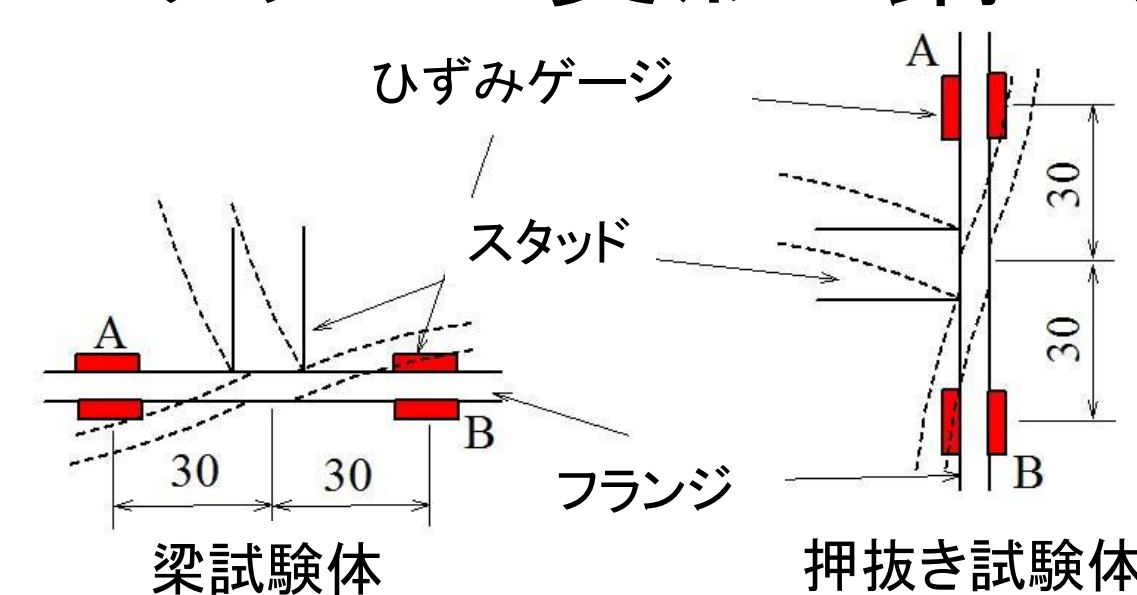
非合成梁試験体

荷重载荷に伴い、スタッドに対して床版は上方に移動し、スタッドには引張軸ひずみが生じている。

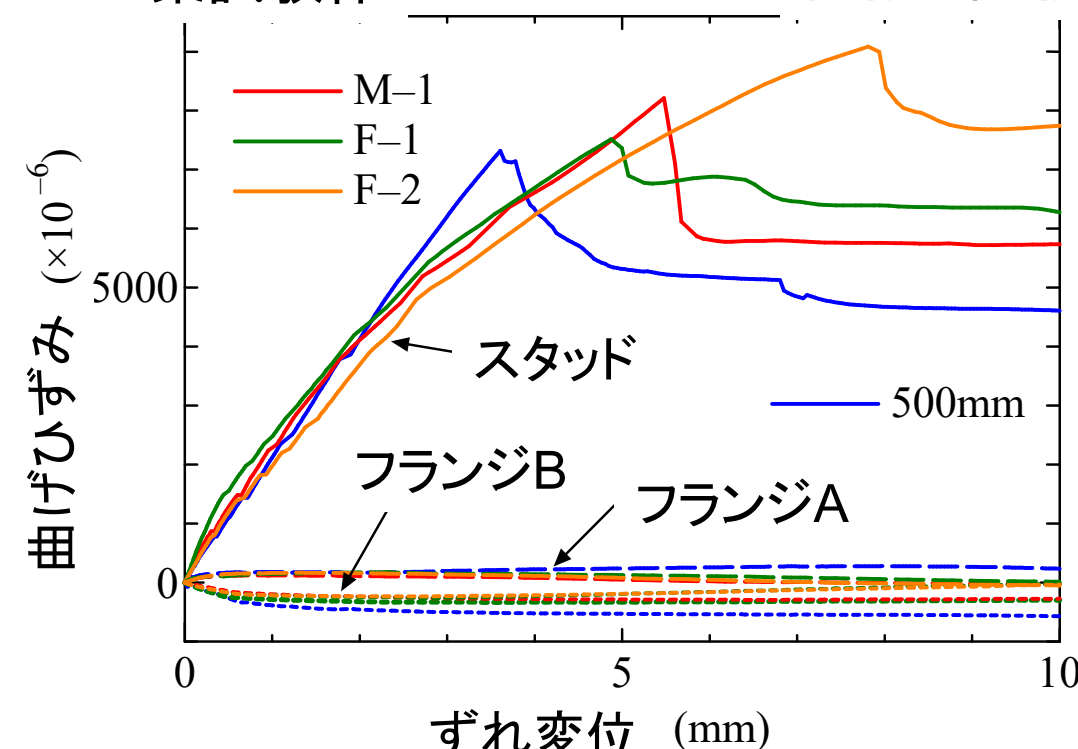


81

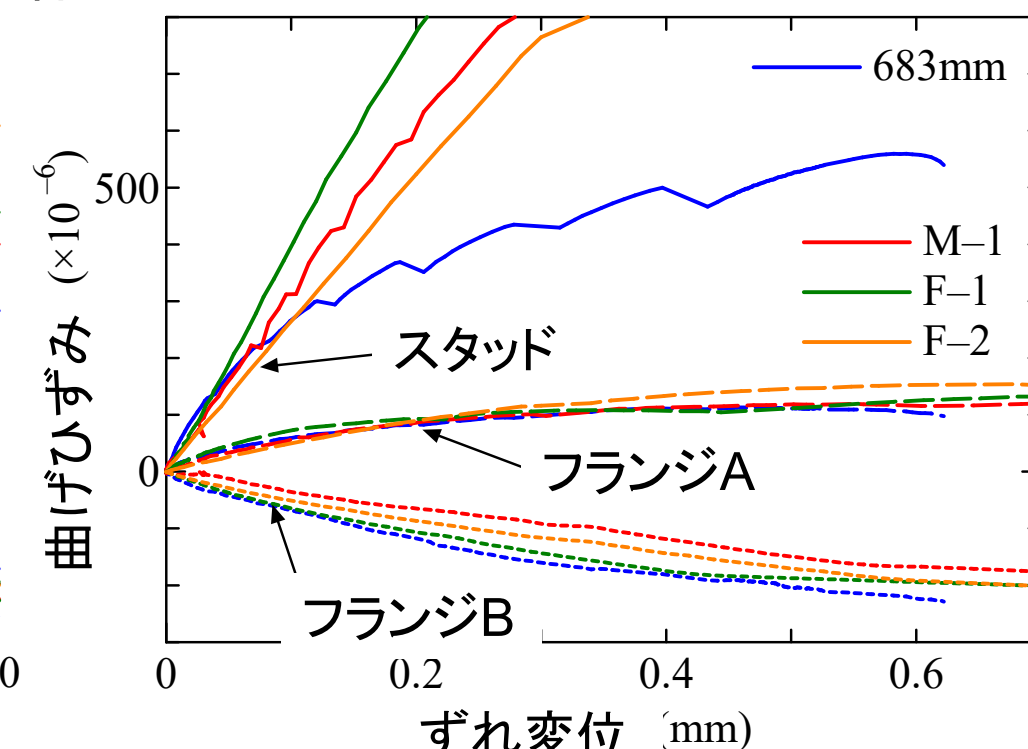
スタッドの変形と鋼フランジの変形



- スタッドの曲げに伴ってスタッド前後の鋼フランジの曲げ変形は梁試験体と押抜き試験体で対応している。



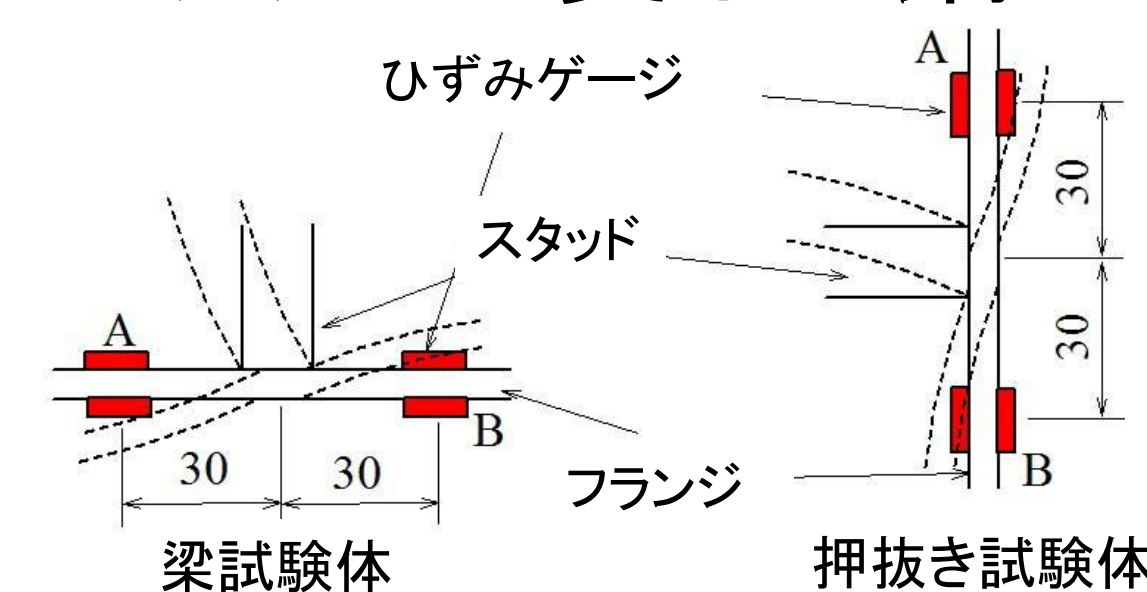
非合成梁と押抜き試験体の比較



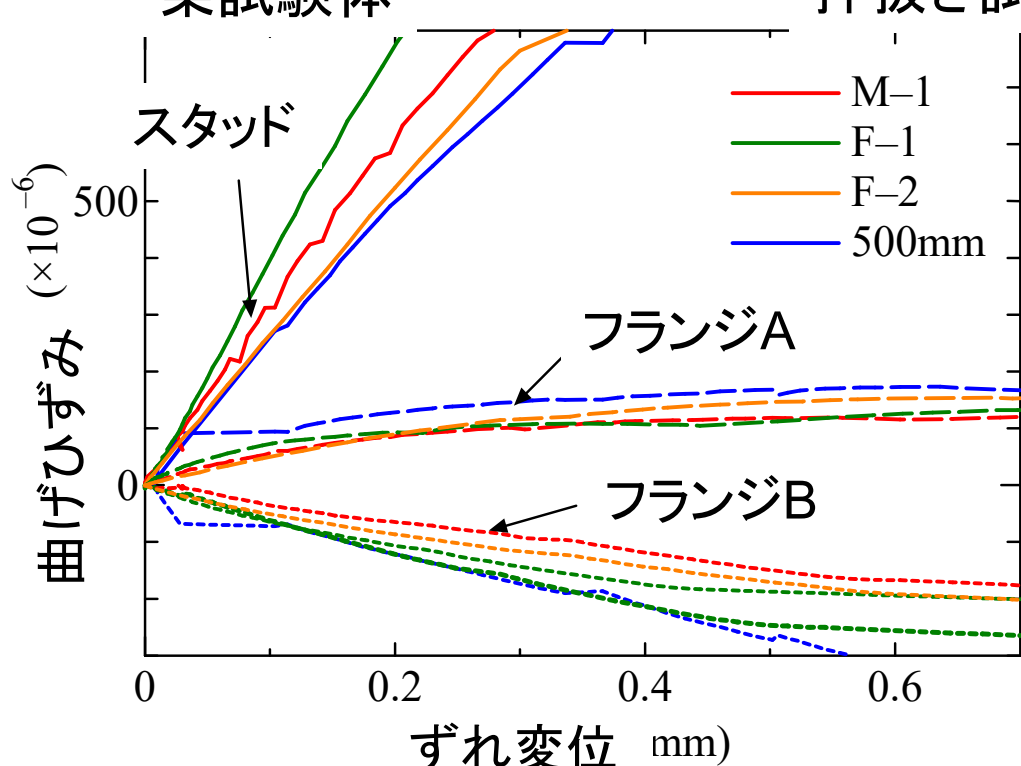
合成梁と押抜き試験体の比較

82

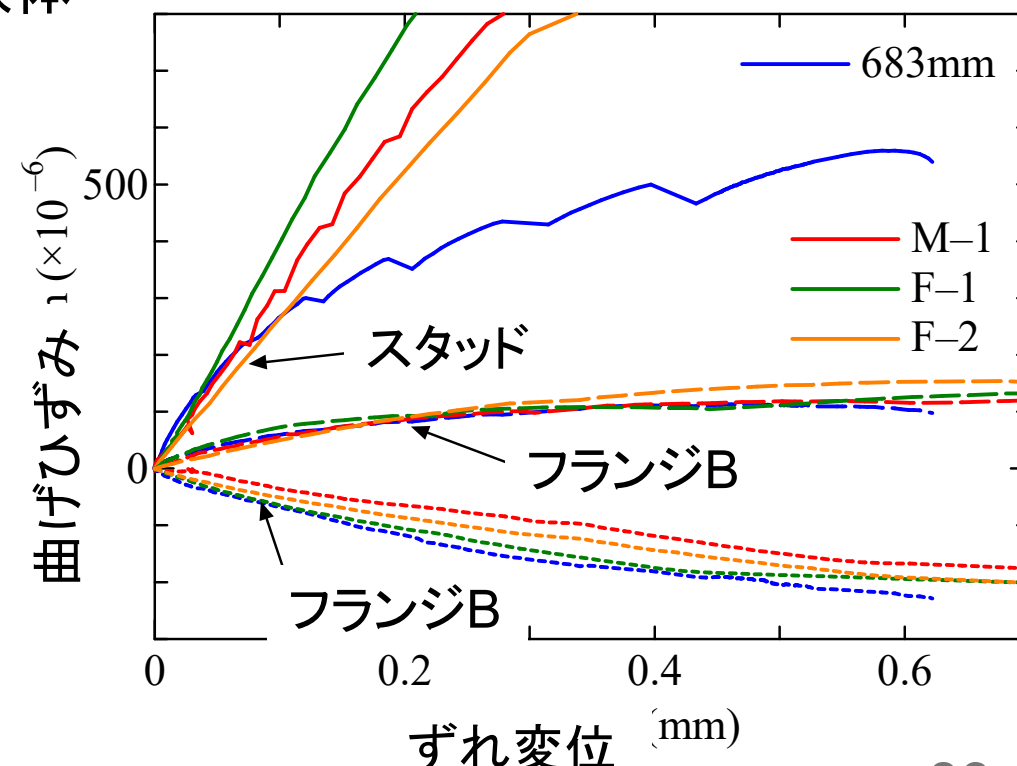
スタッドの変形と鋼フランジの変形



- スタッドの曲げに伴ってスタッド前後の鋼フランジの曲げ変形は梁試験体と押抜き試験体で対応している。



非合成梁と押抜き試験体の比較



合成梁と押抜き試験体の比較

83

スタッド押抜き試験の動画

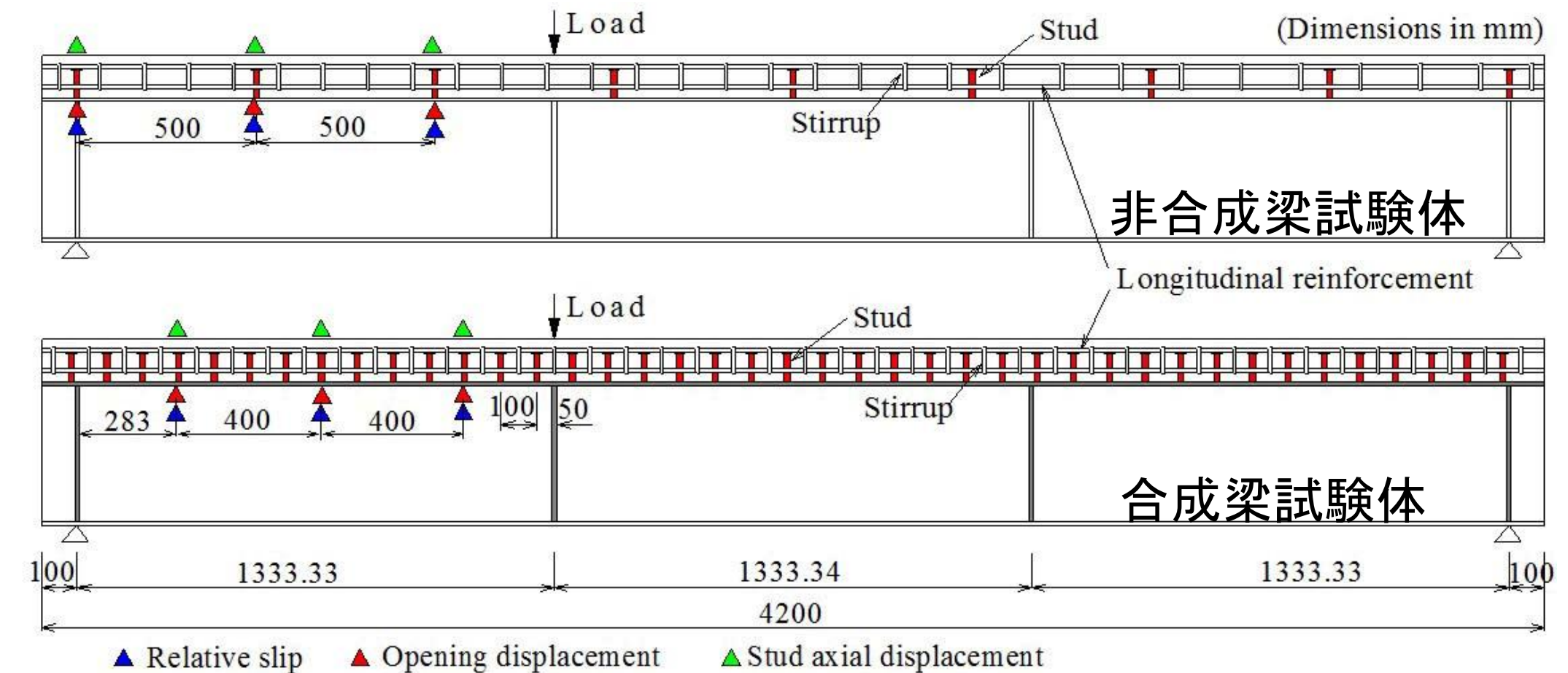


84

まとめ

- 合成梁および非合成梁の基本的な弾塑性挙動を実験的に確認した.
- 合成梁および非合成梁中のスタッドの挙動と押抜き試験体中のスタッドの挙動の対応関係を, 種々の計測項目から検討し, 両者がある程度対応していることを確認した.

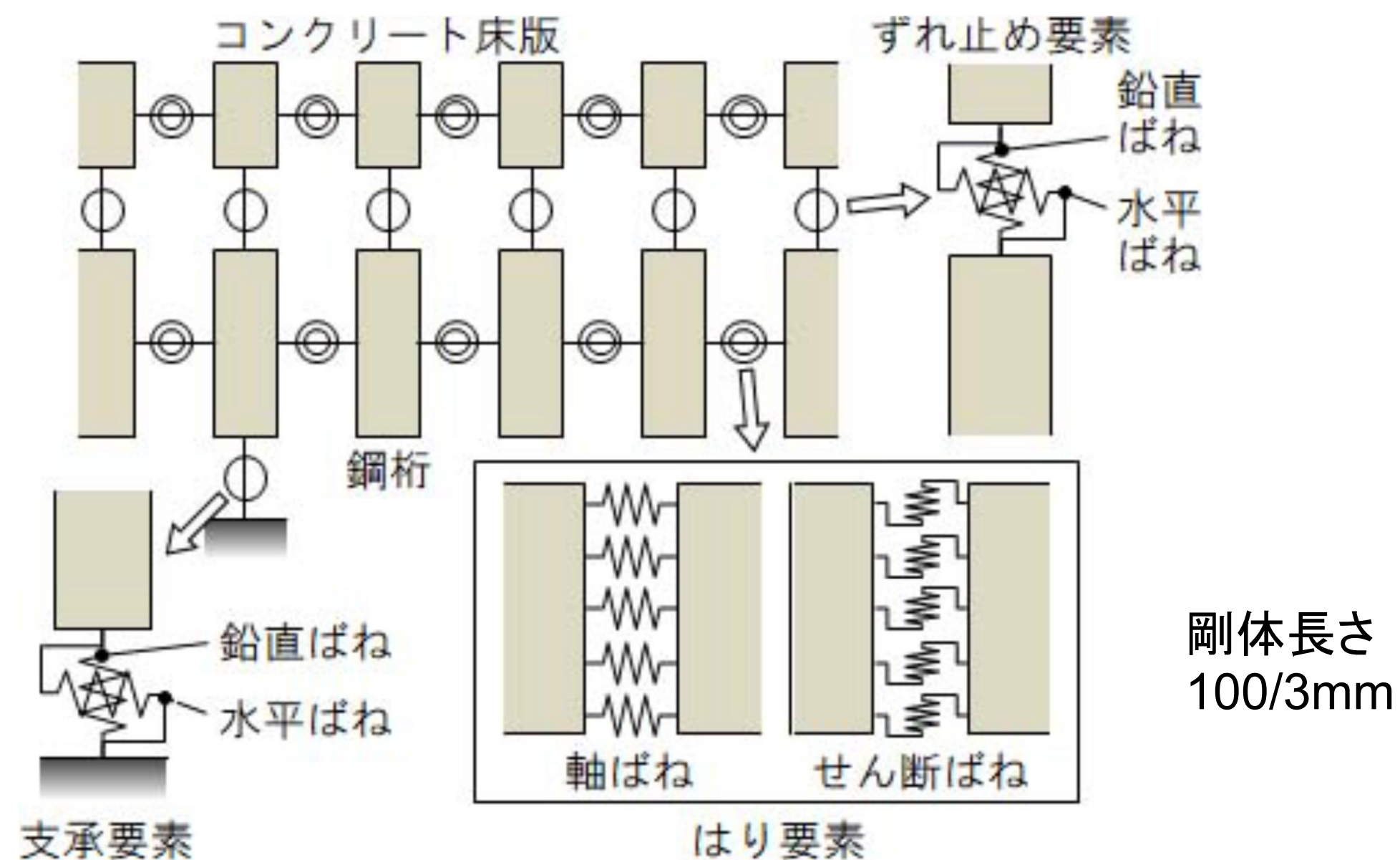
不完全合成梁の実験と解析の比較



85

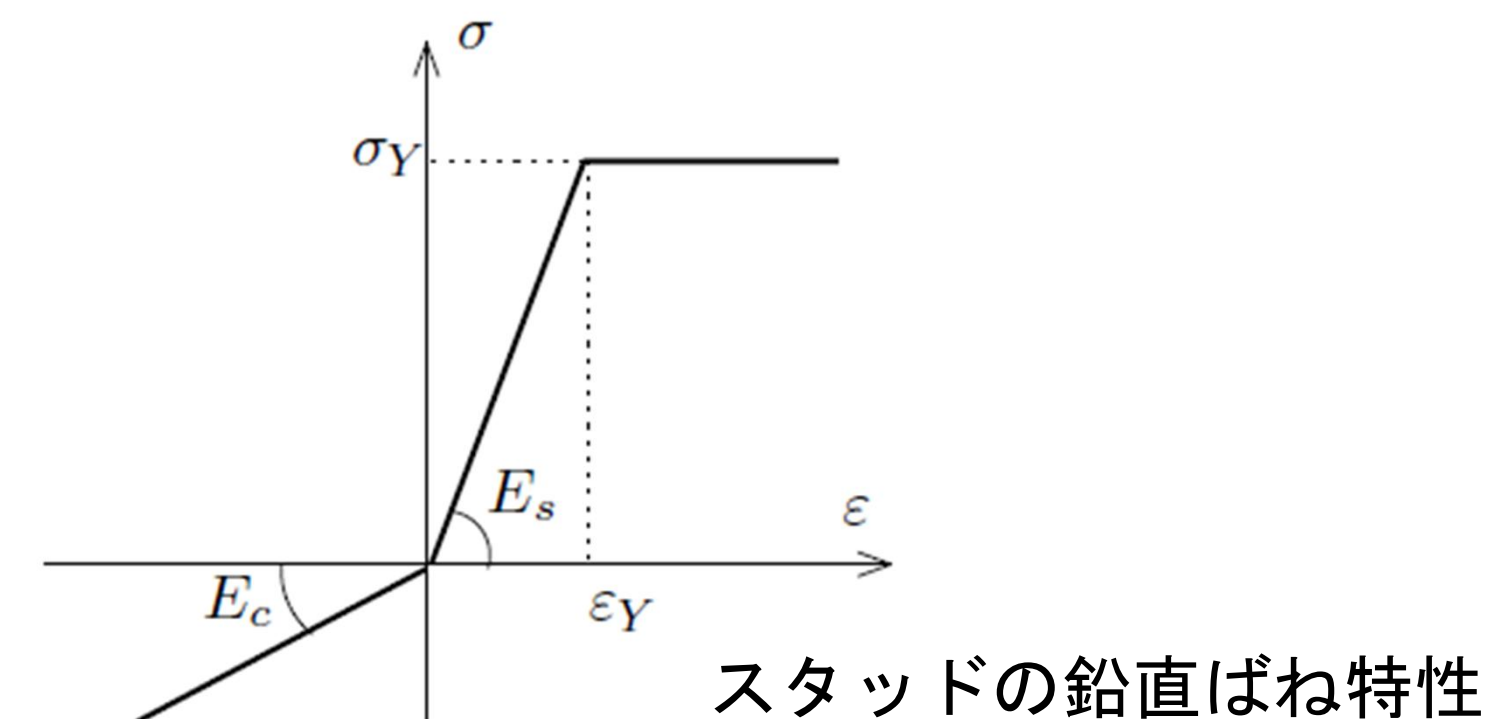
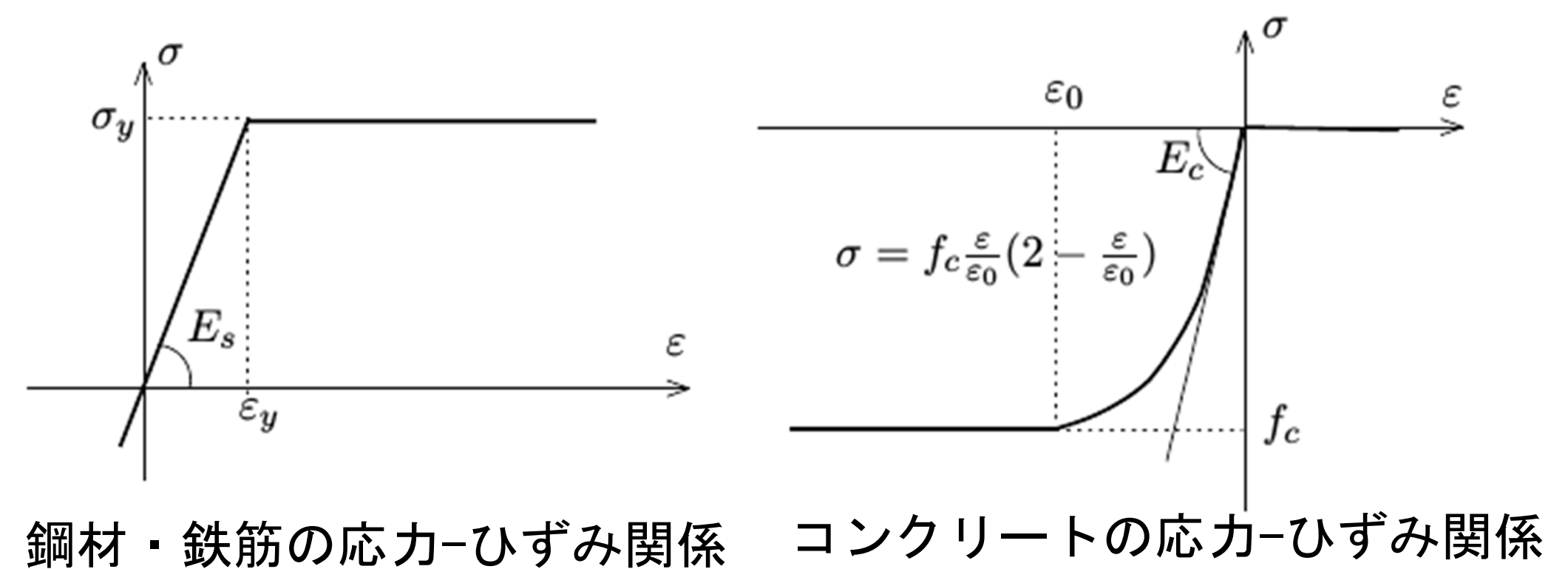
86

剛体ばねモデル解析



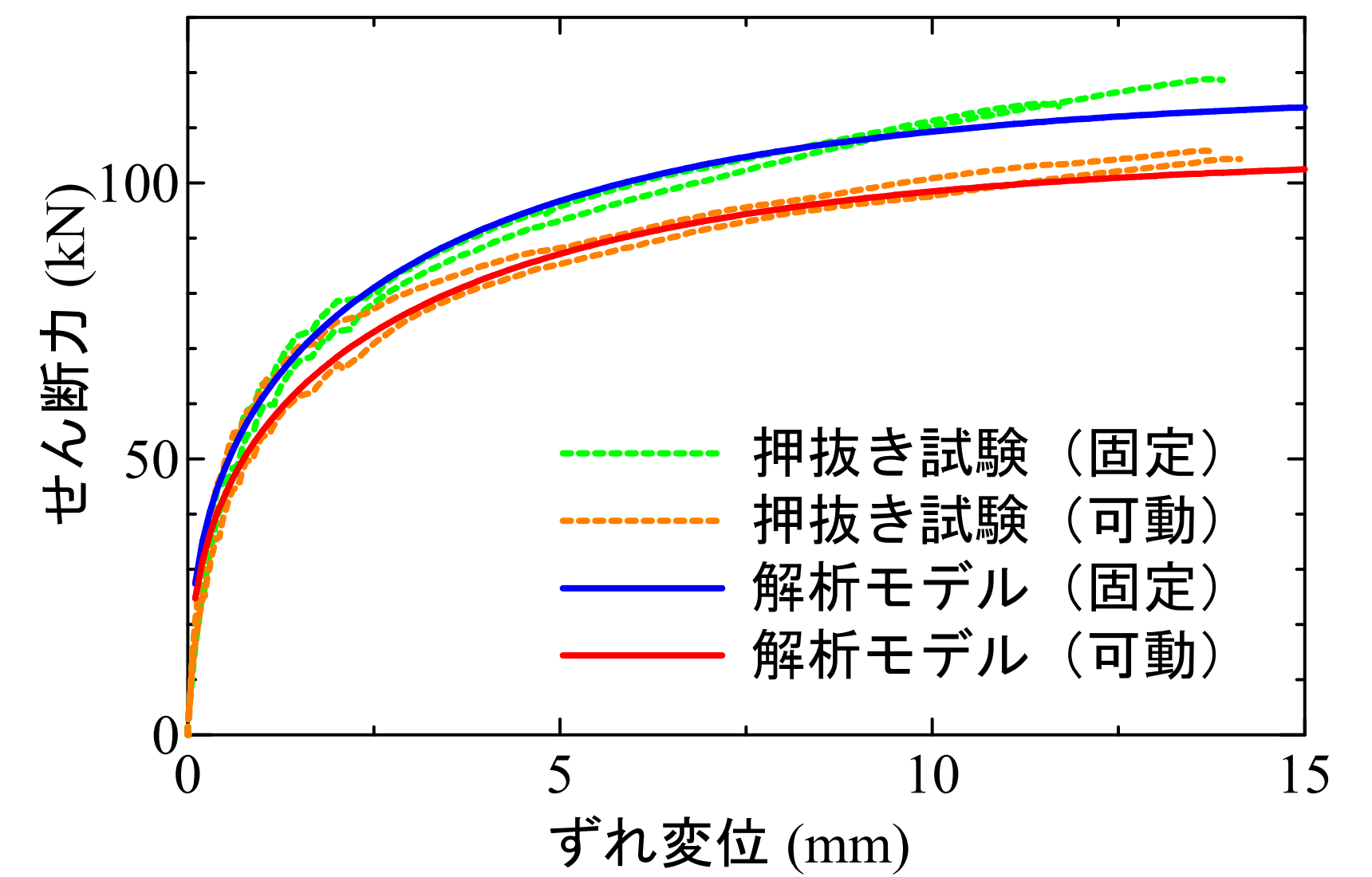
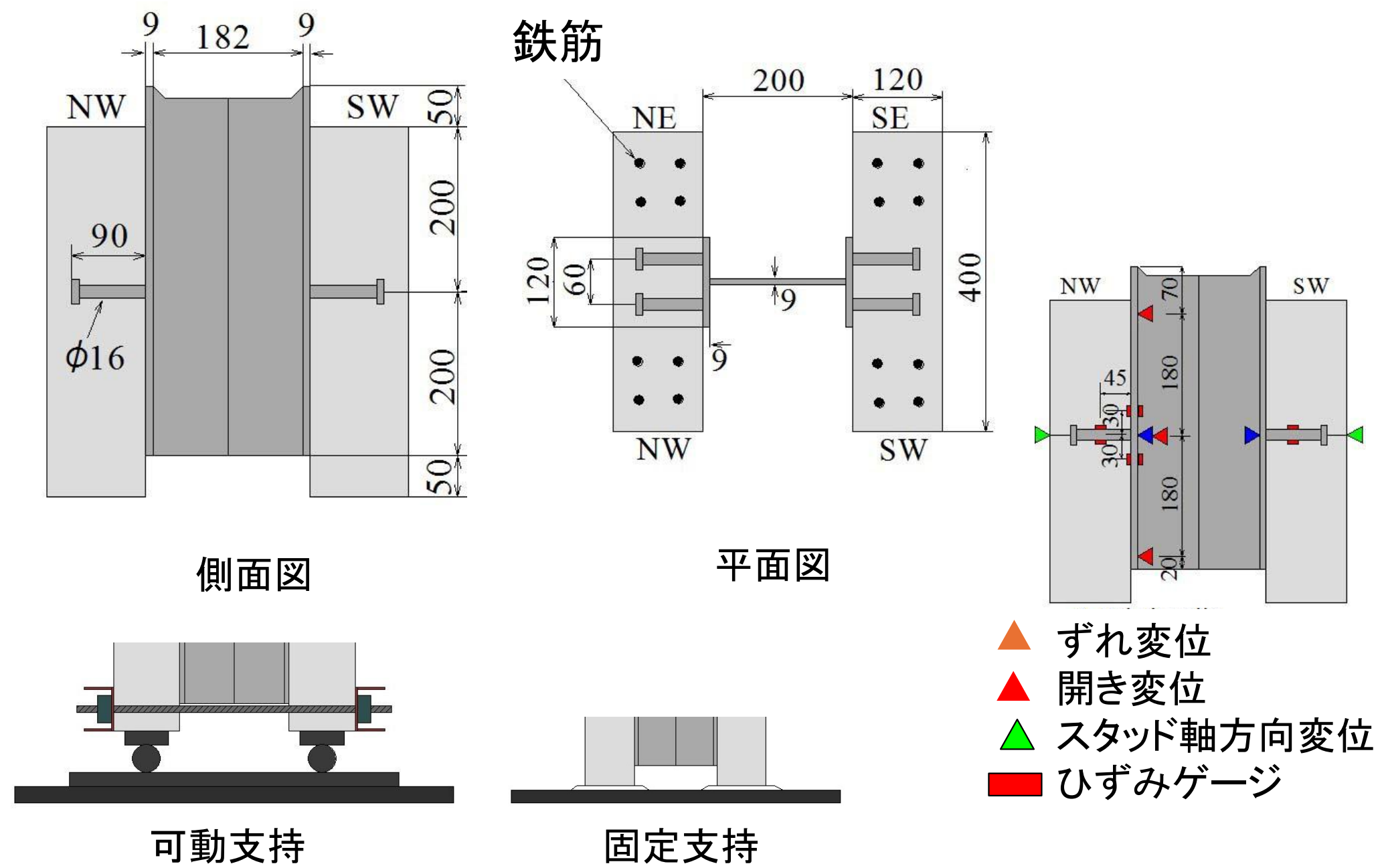
鋼梁の残留応力を考慮

87



88

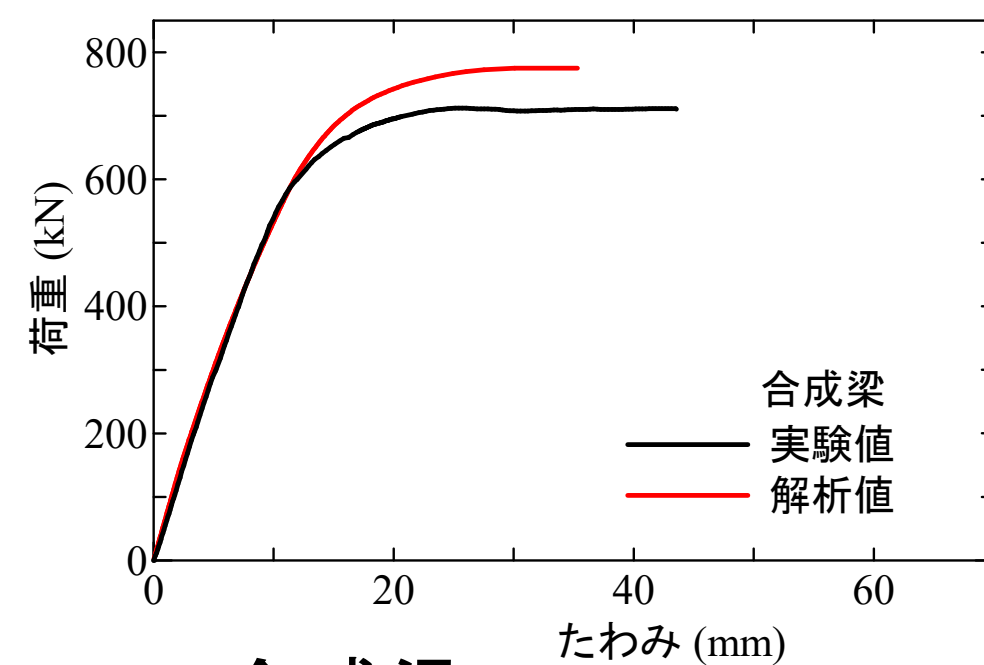
押抜き試験体



複合構造標準示方書スタッドのせん断力ーずれ変位関係式

$$V_{ss} = V_{ssud} \left(1 - e^{\alpha \delta_{ss} / d_{ss}} \right)^{\beta} \quad (1)$$

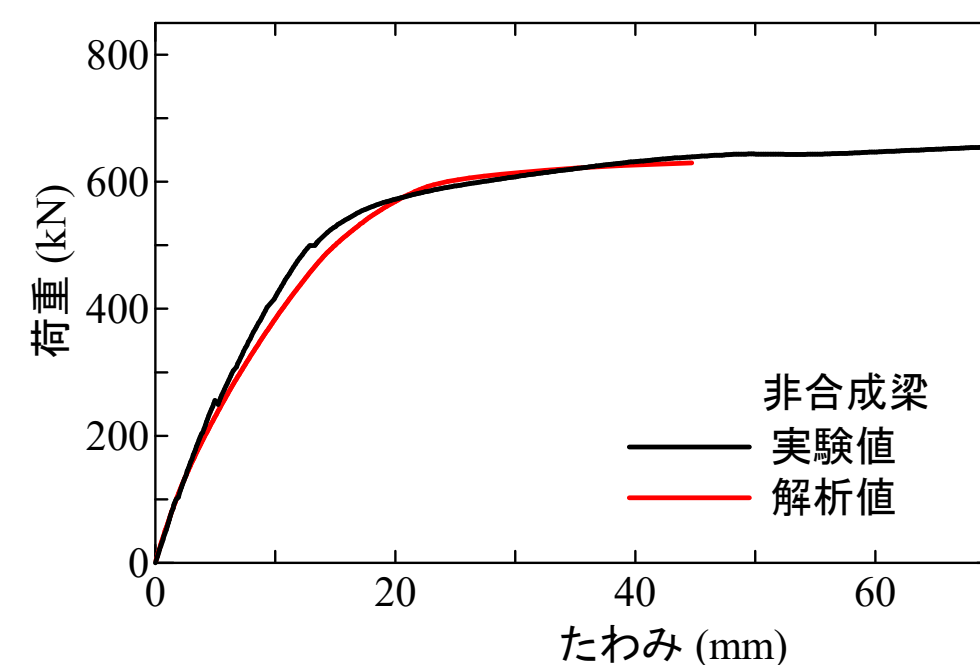
載荷点の荷重ーたわみ関係



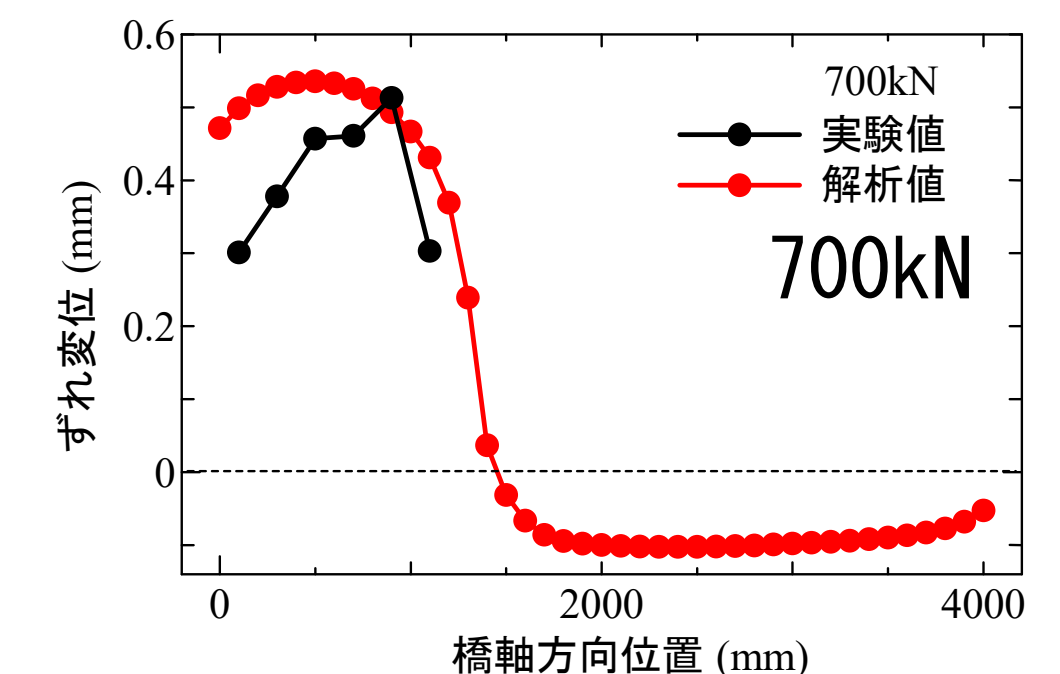
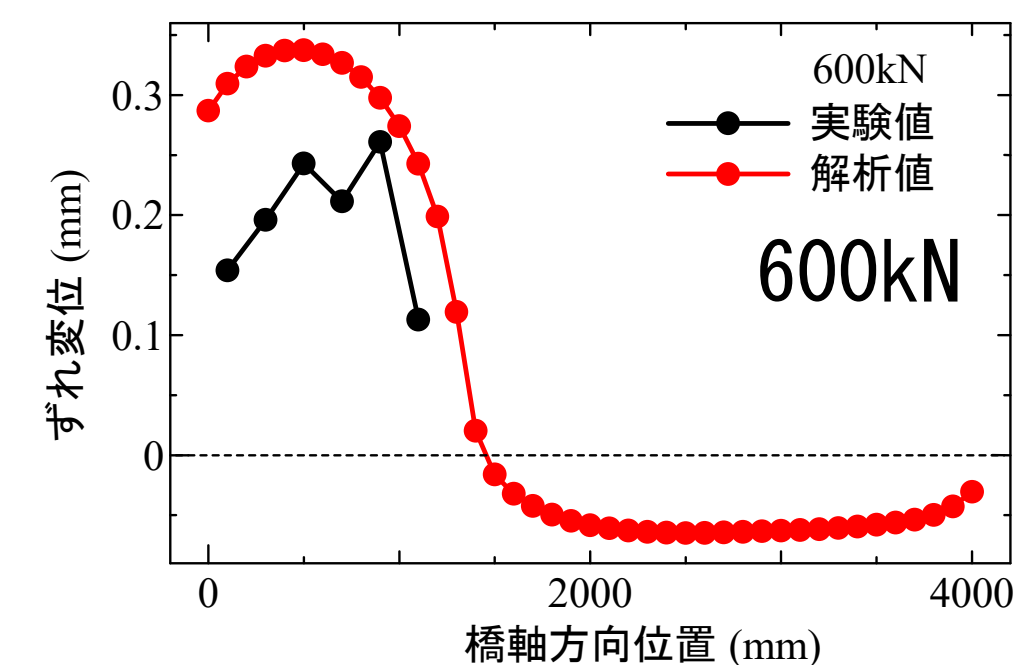
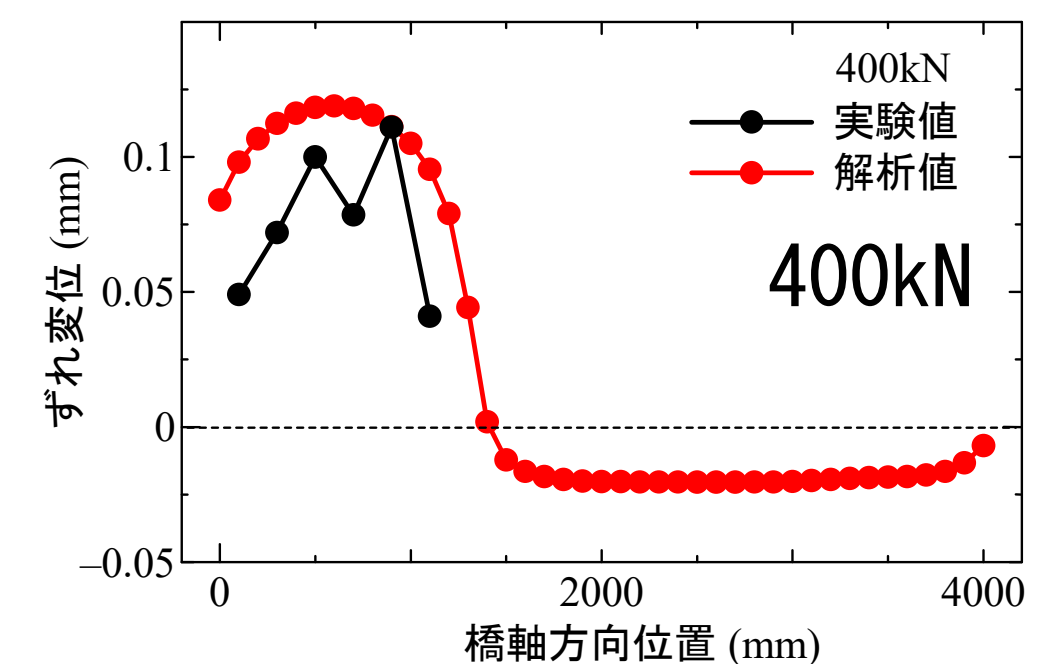
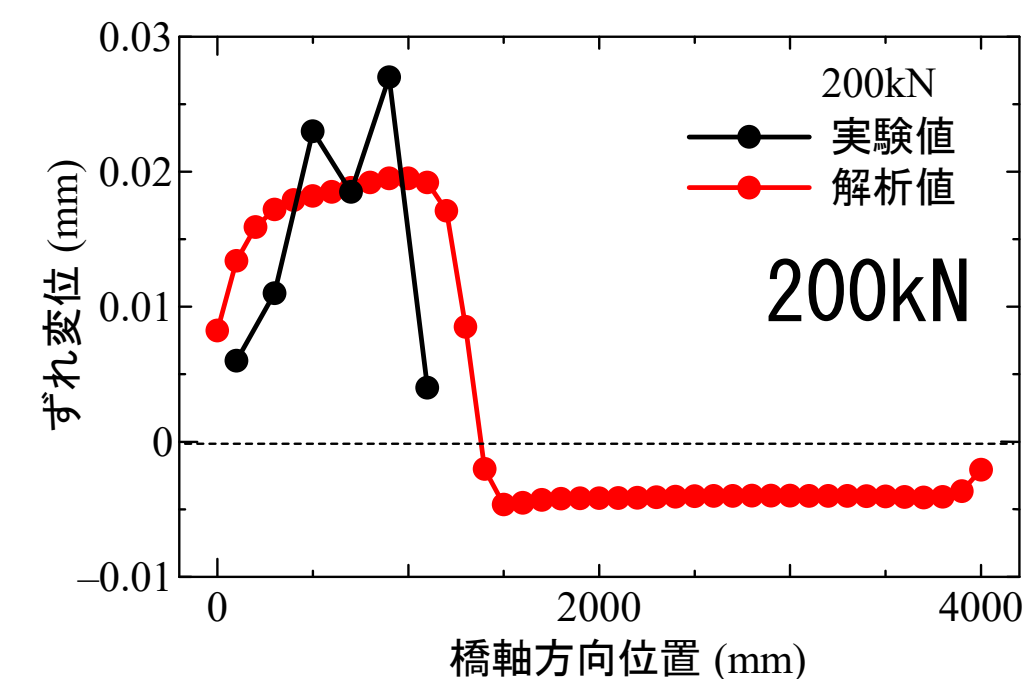
合成梁



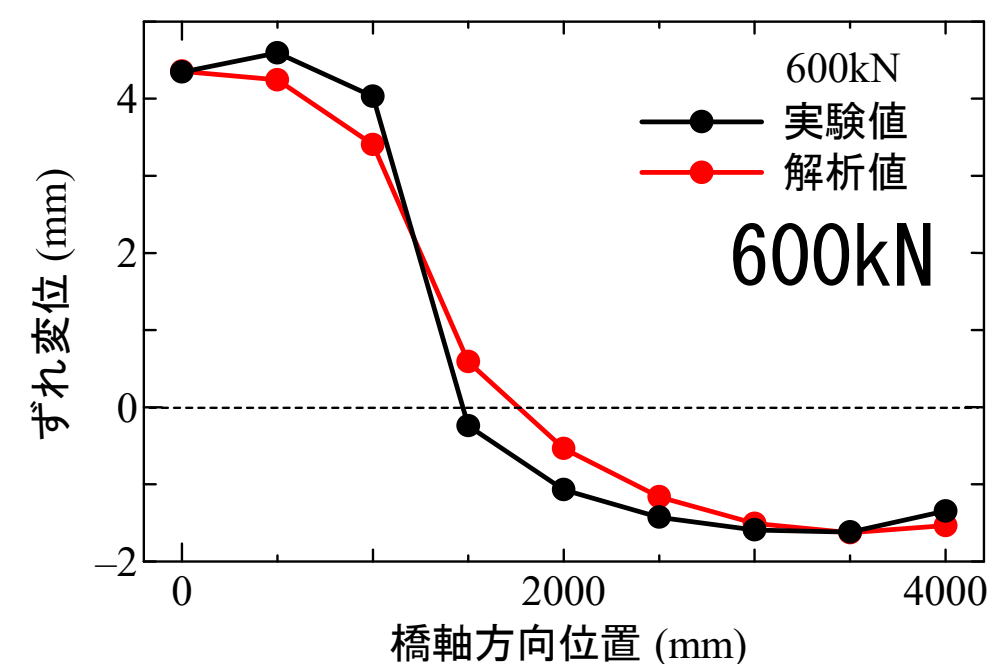
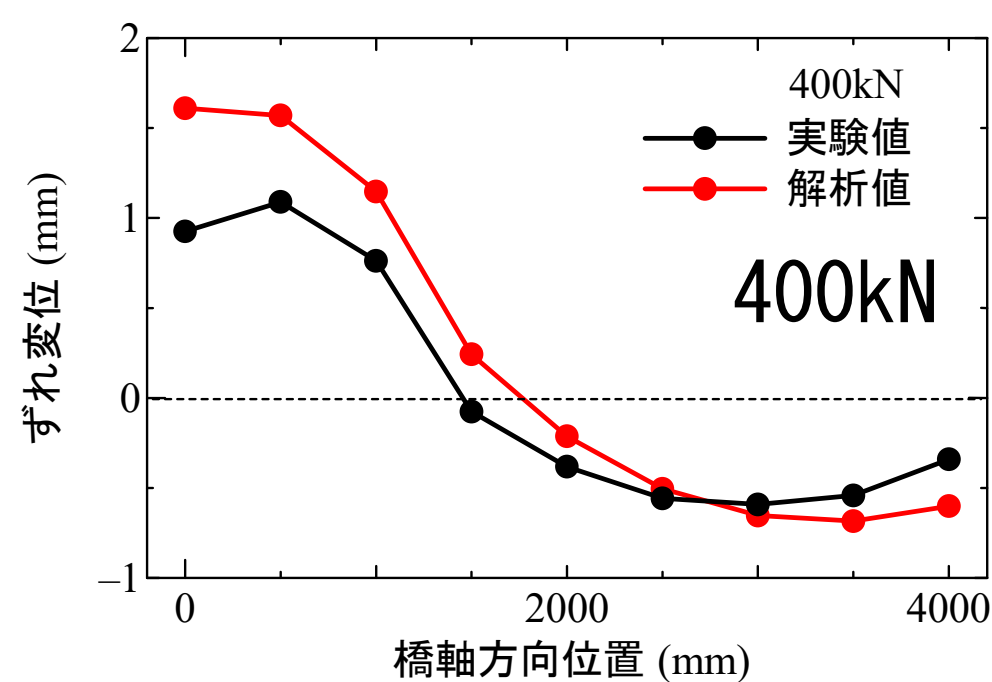
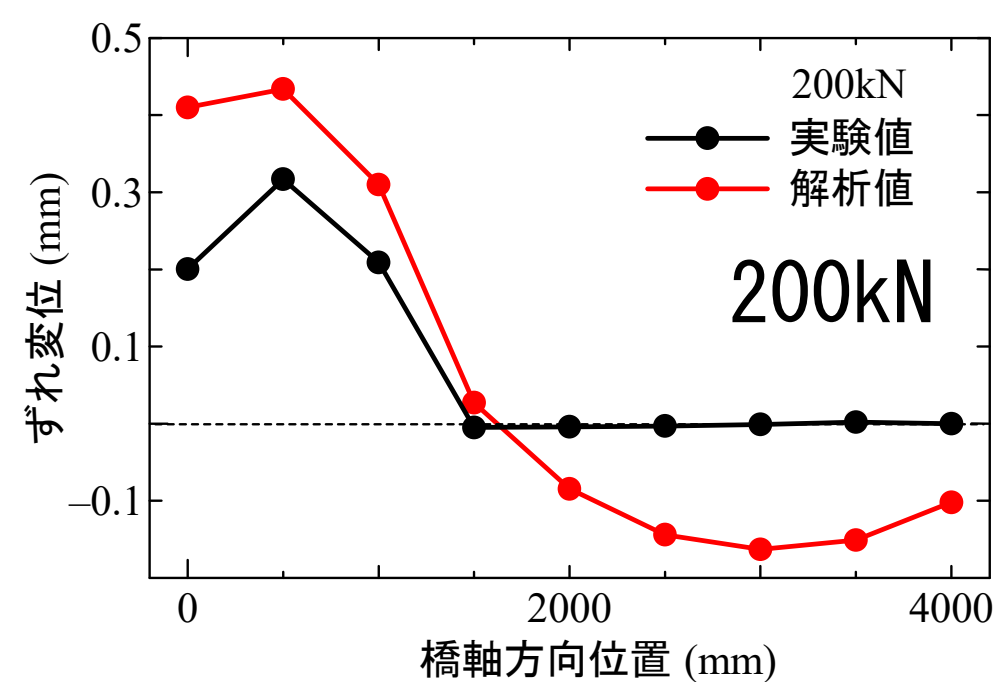
(解析においては鋼梁の
残留応力を考慮)



非合成梁

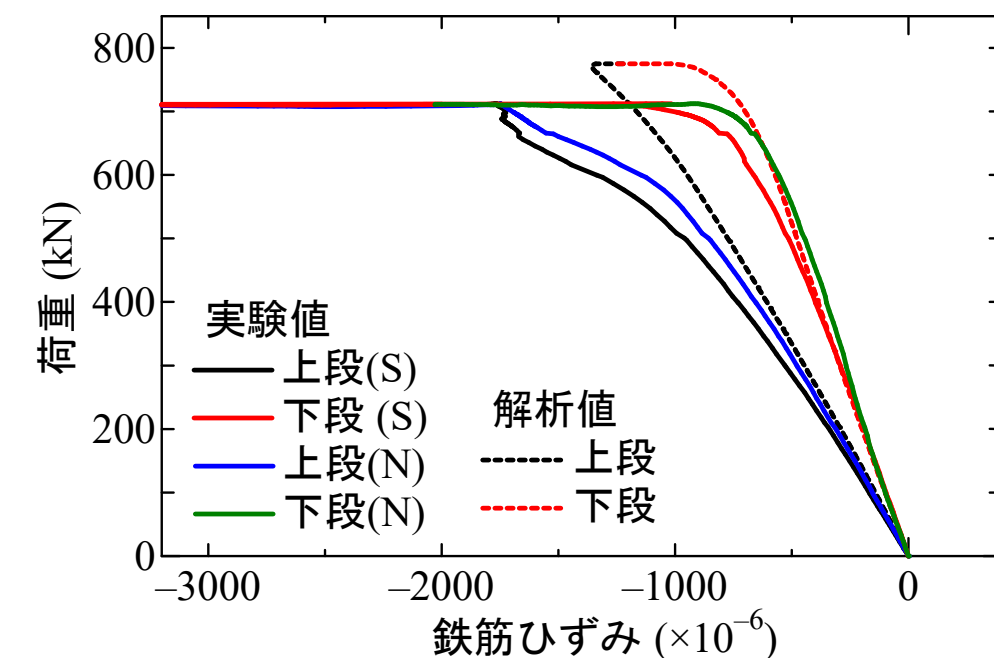


合成梁のずれ変位分布

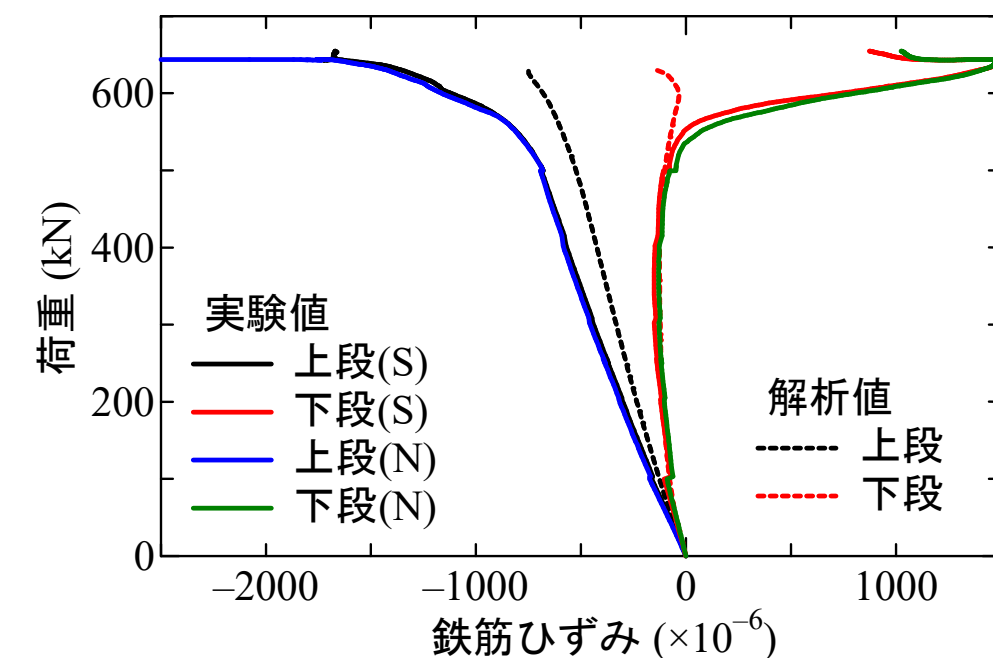


非合成梁のずれ変位分布

93



合成梁

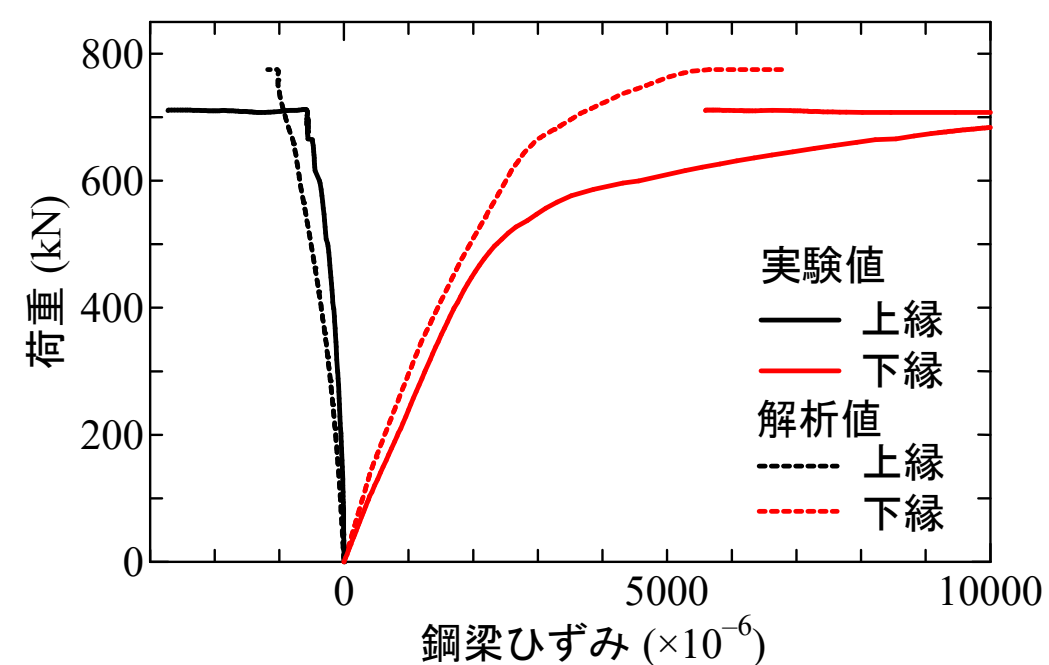


非合成梁

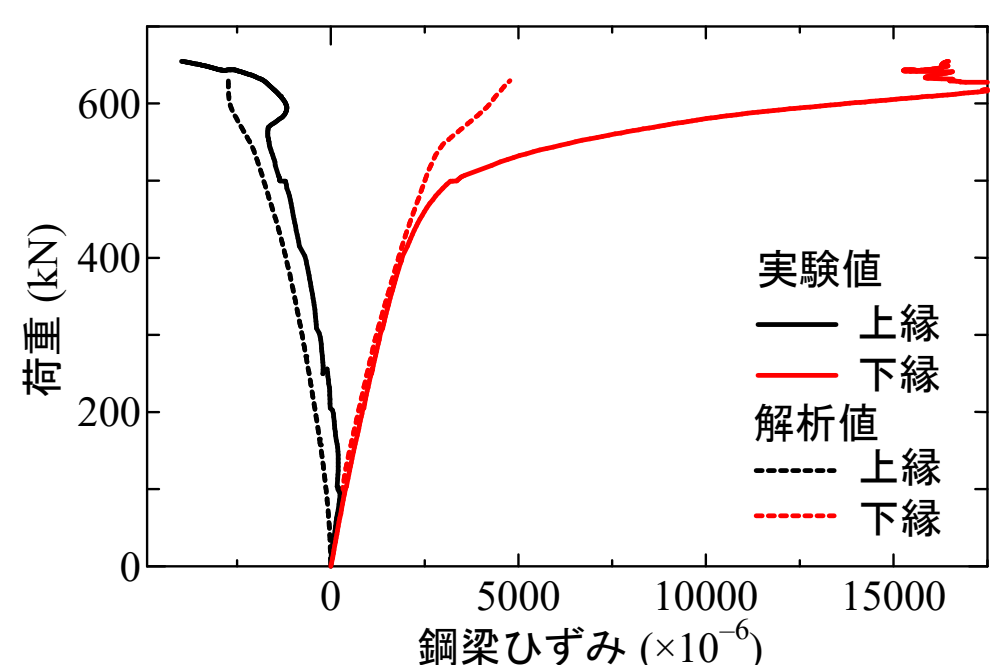
荷重と鉄筋ひずみの関係

合成梁では、上縁、下縁とも圧縮ひずみ、非合成梁では、下縁は次第に引張ひずみ側になっている。

94



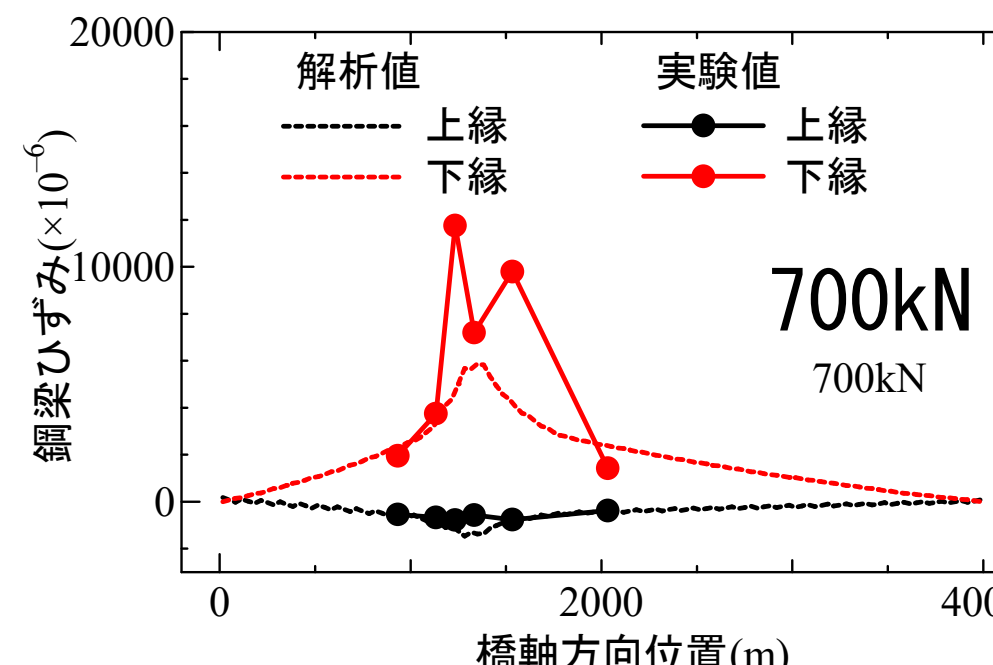
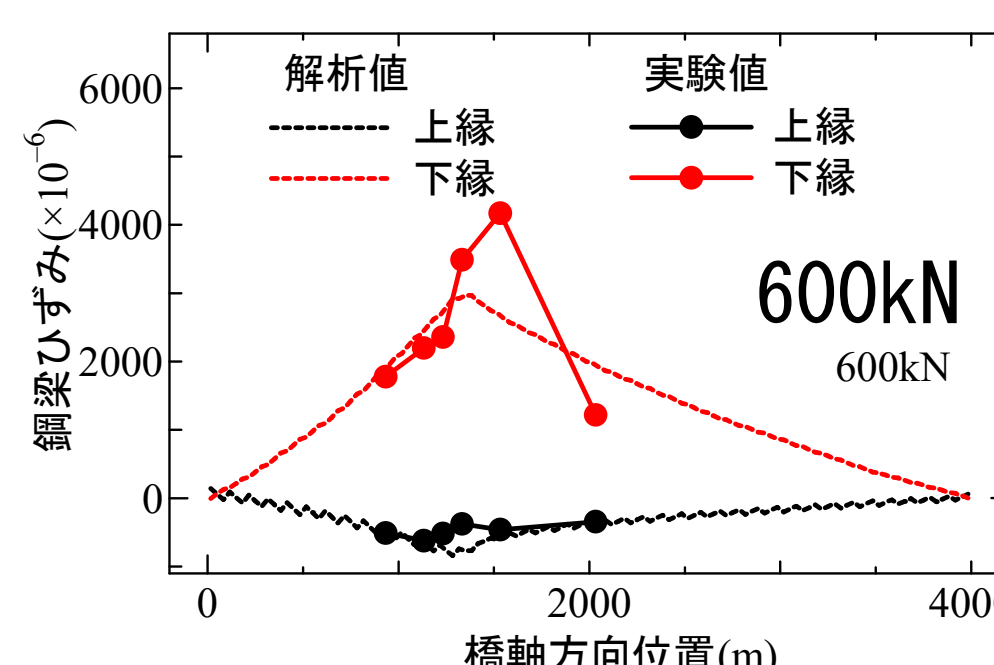
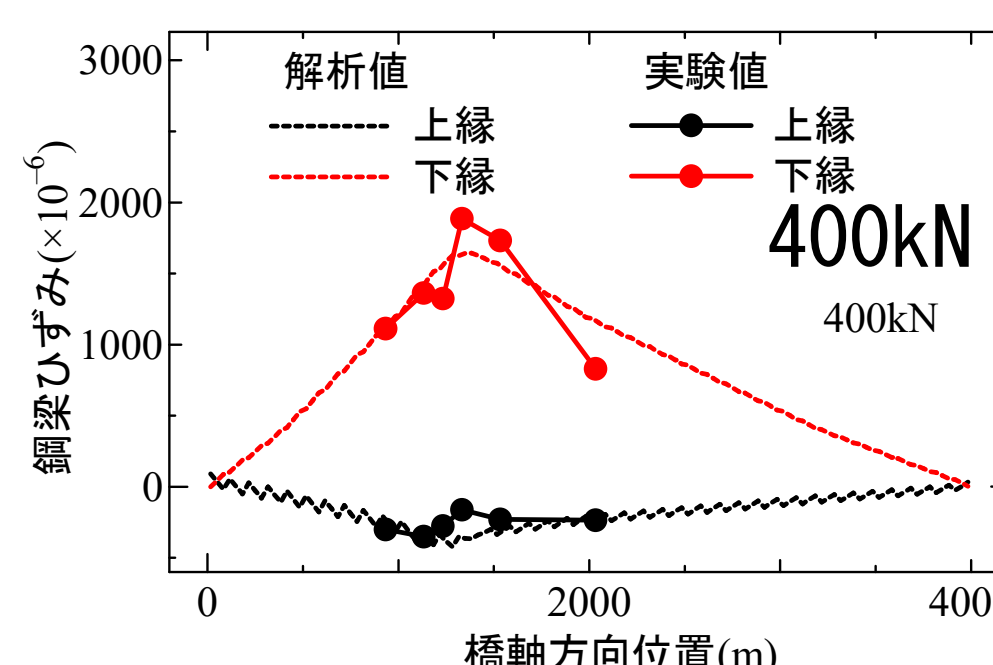
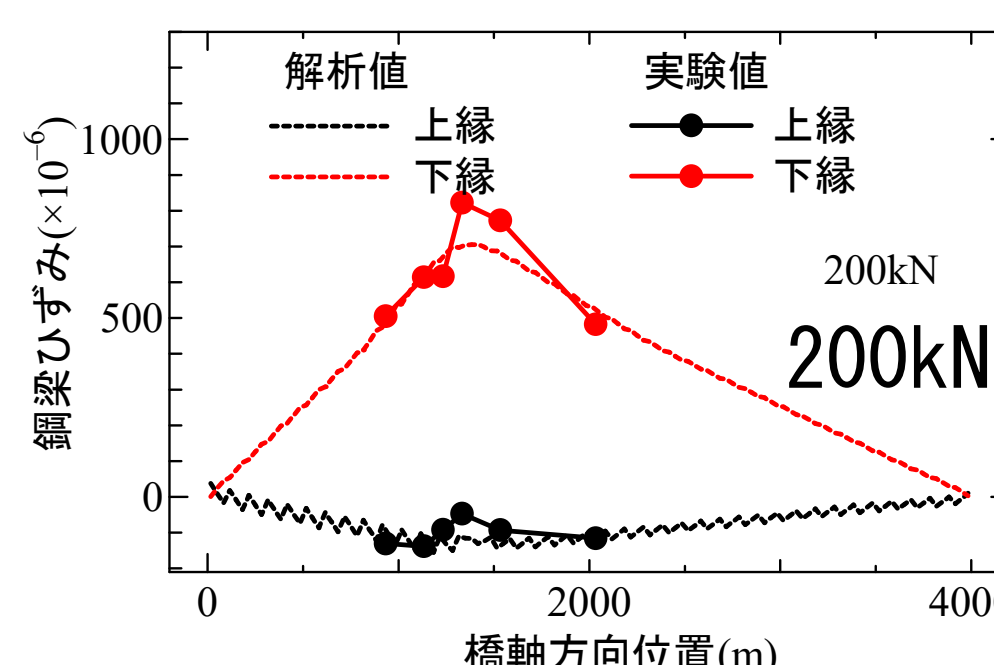
合成梁



非合成梁

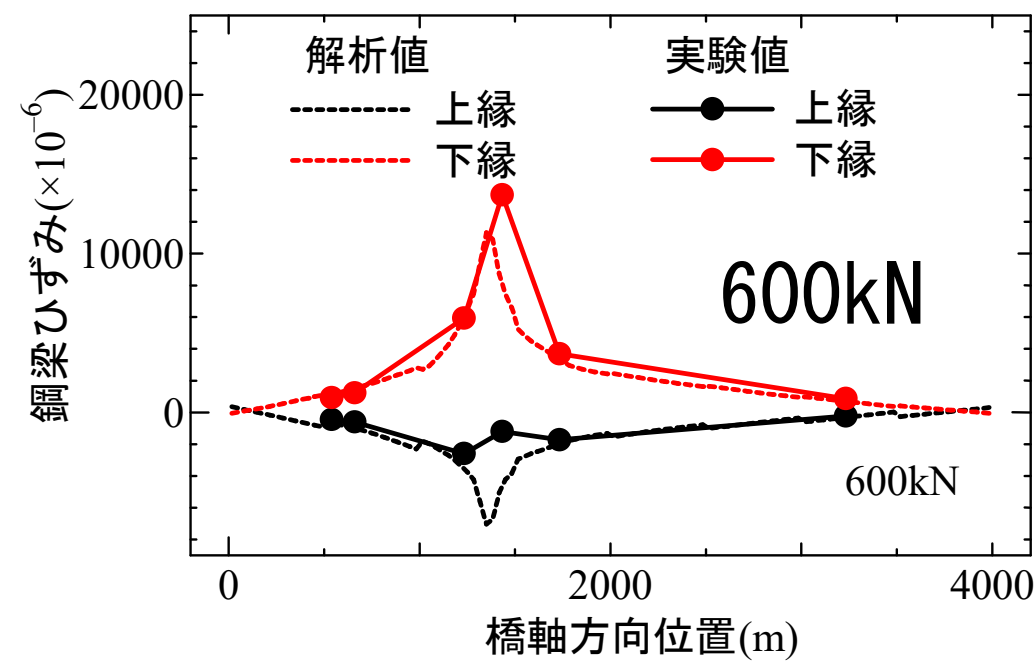
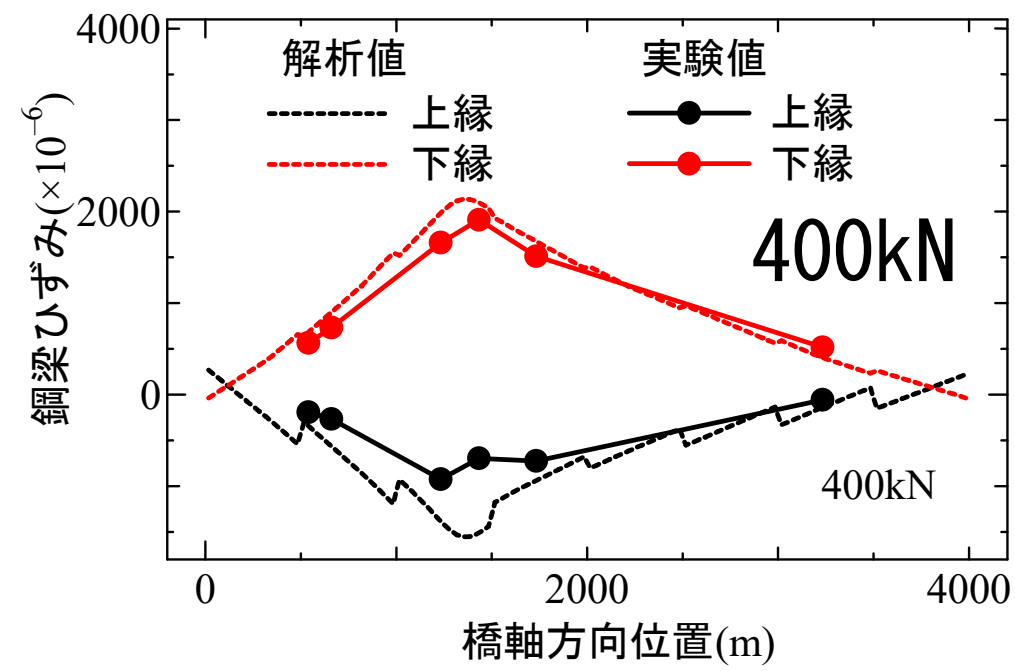
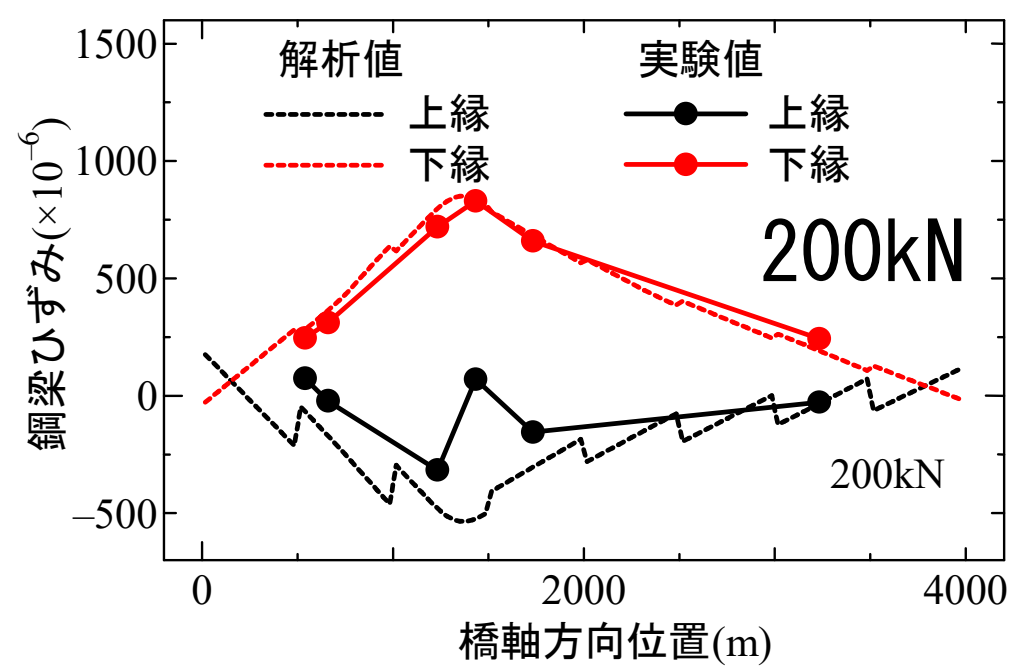
荷重と鋼梁ひずみの関係

合成梁上縁の圧縮ひずみよりも非合成梁上縁の圧縮ひずみが大きい。



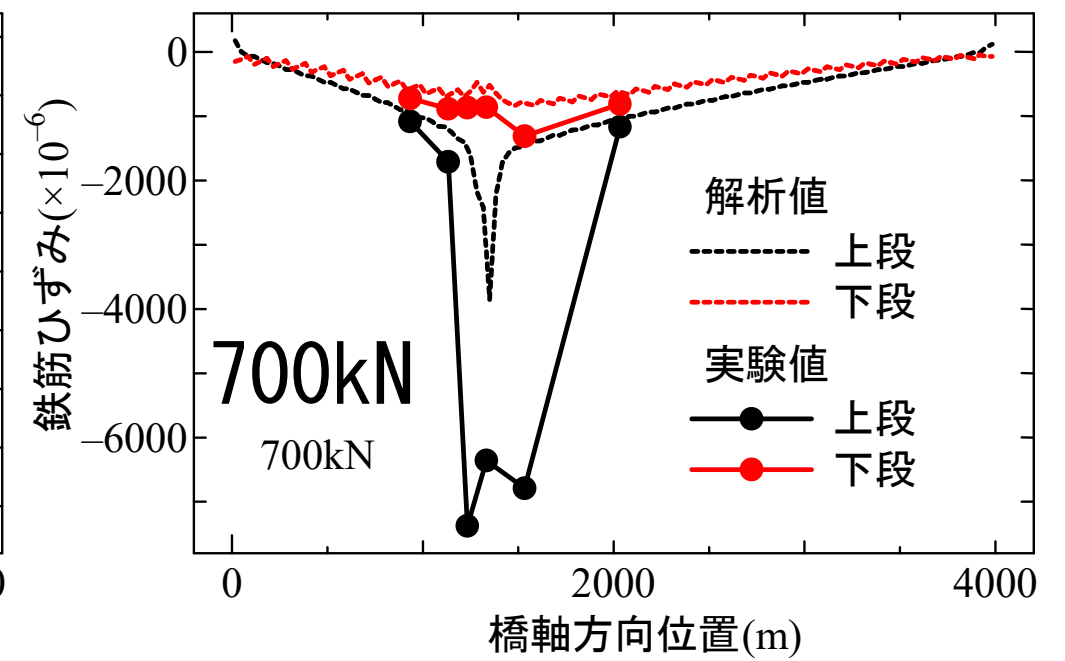
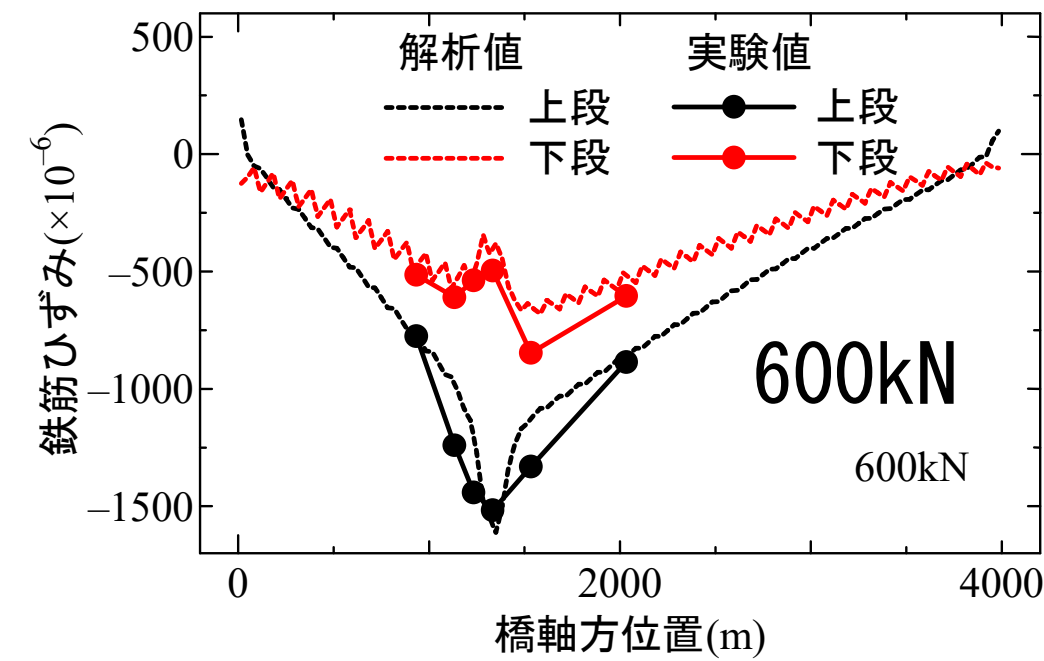
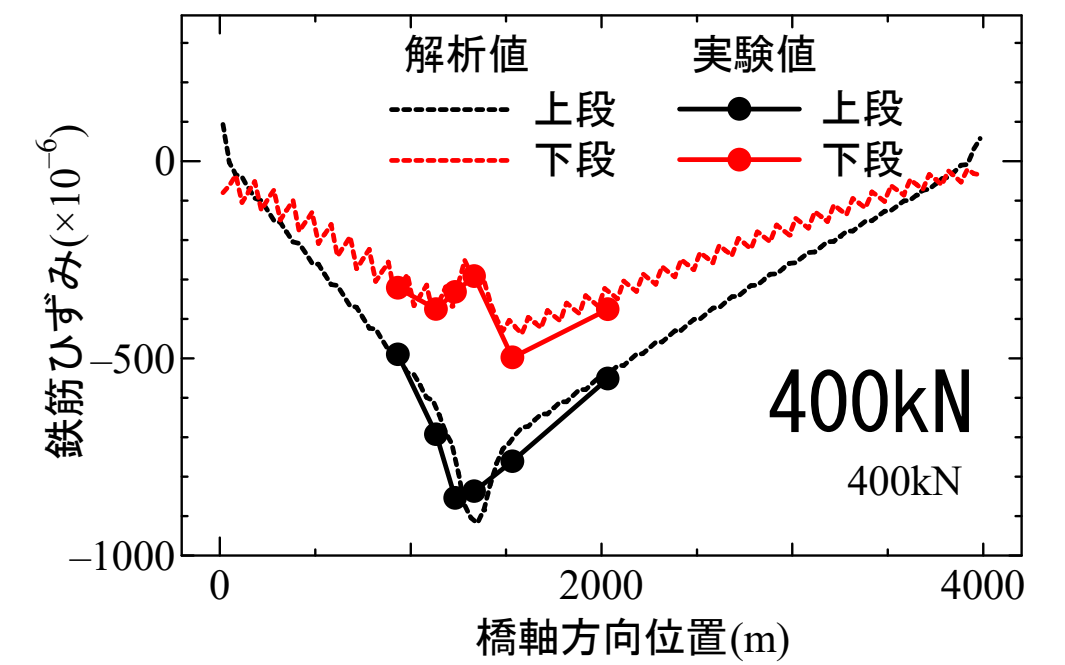
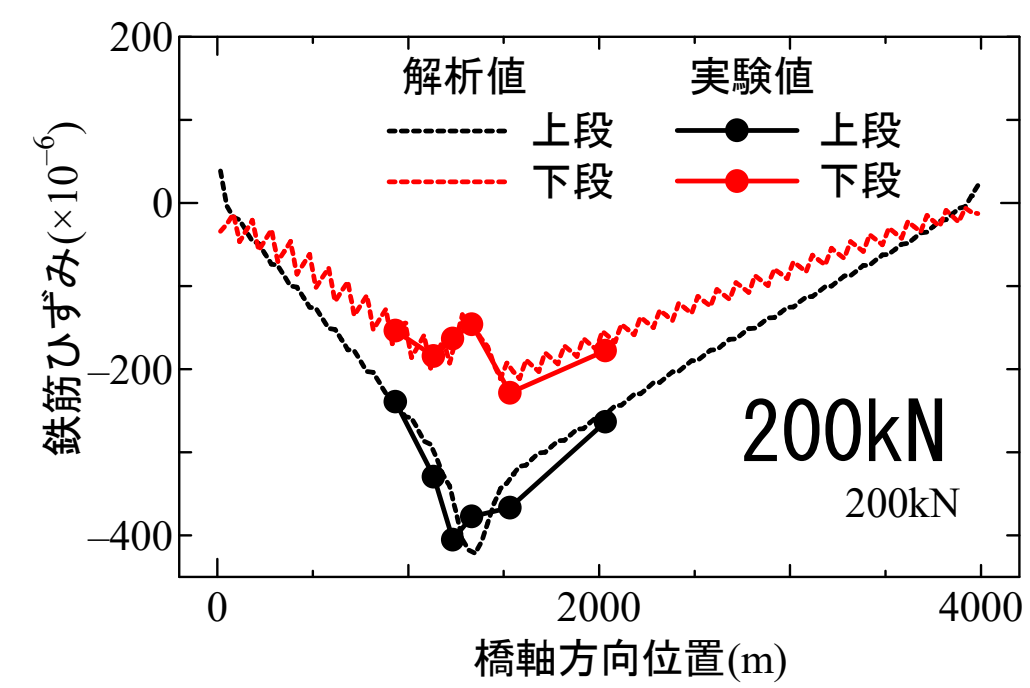
合成梁の鋼梁ひずみ分布

96



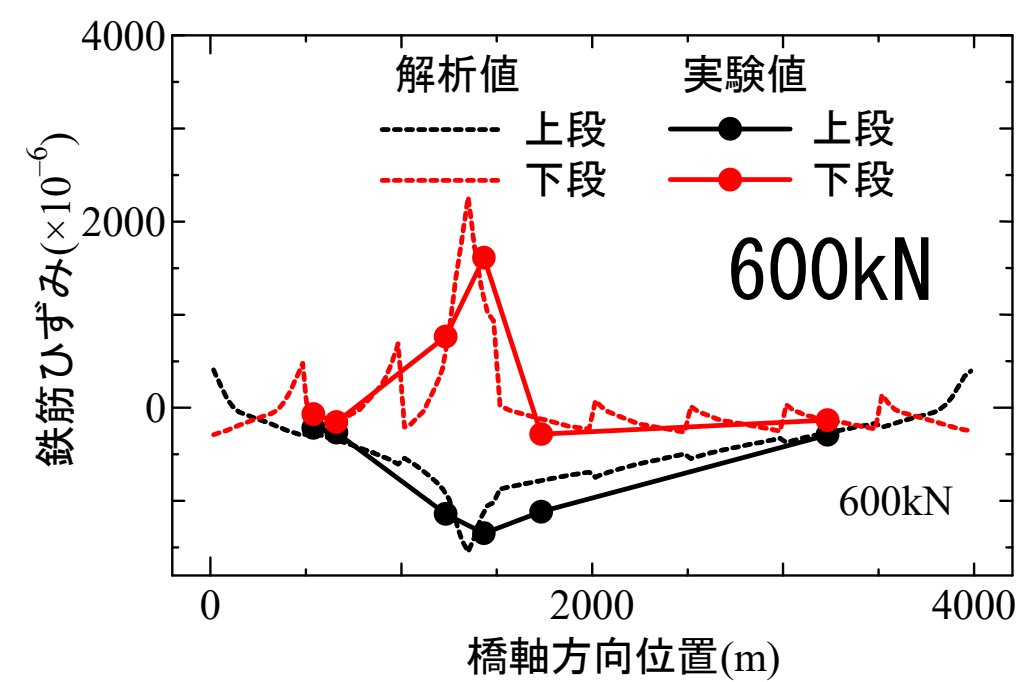
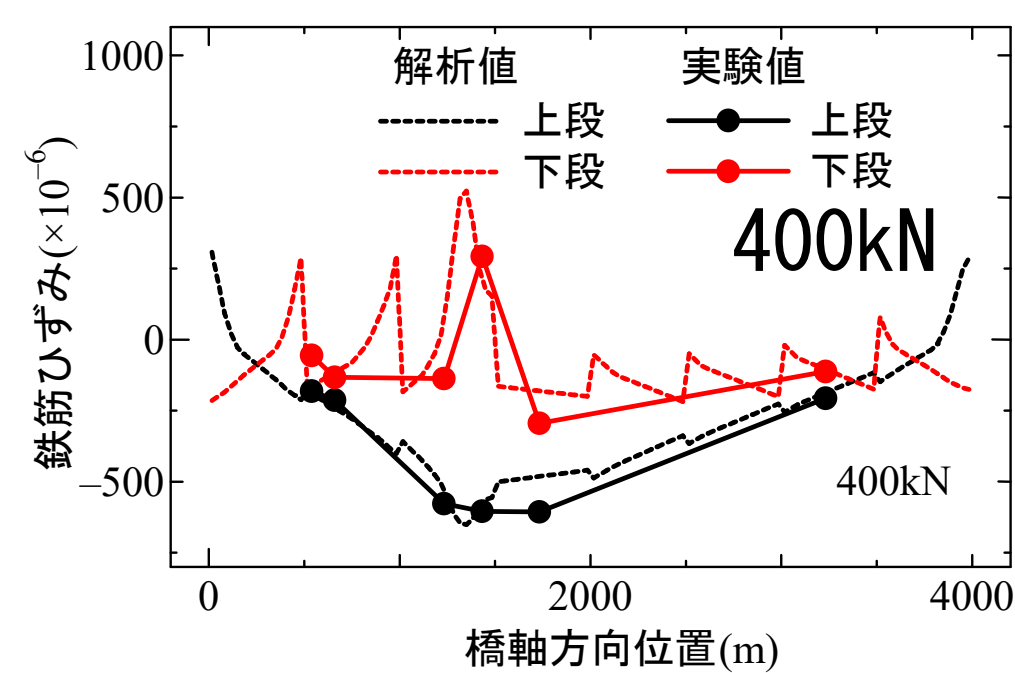
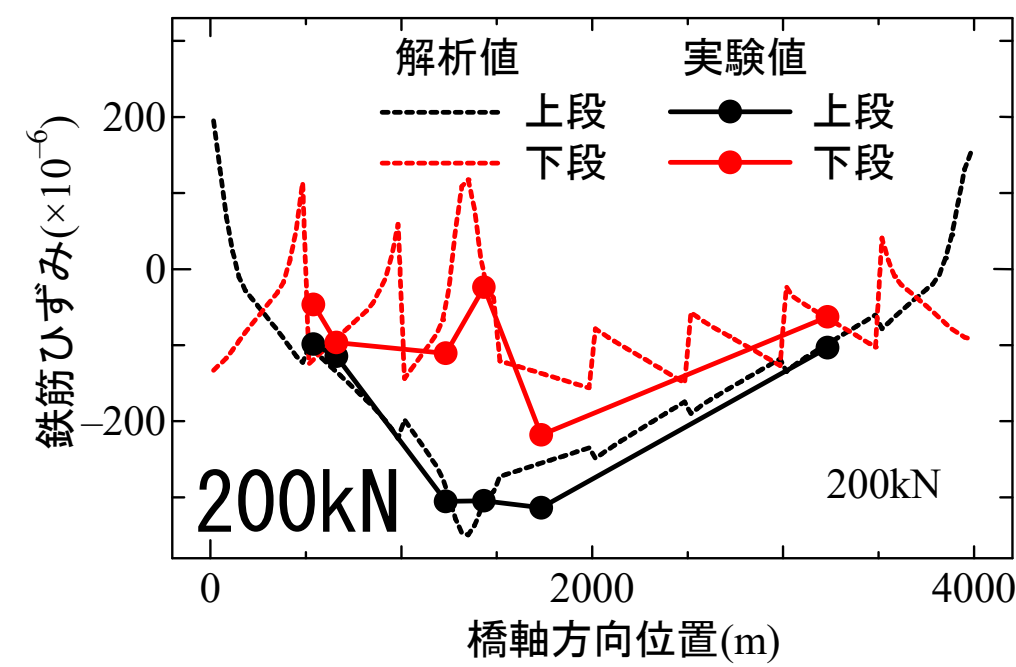
非合成梁の鋼梁ひずみ分布

97



合成梁の鉄筋ひずみ分布

98



非合成梁の鉄筋ひずみ分布

99

まとめ

- 合成梁および非合成梁の実験挙動を剛体ばねモデル解析結果がある程度再現できることを確認した。

スタッドのせん断力による
曲げの影響で下段の鉄筋ひ
ずみに脈動が見られる。

100

支圧力作用下における鋼コンクリート 接触面の付着に関する実験



合成桁



合成床版

- 鋼コンクリート複合構造物では、各所に鋼とコンクリートの接触面が存在する。

鋼コンクリート接触面の付着性状を確認するために支圧摩擦試験を実施した。

- 支圧応力分布が不均一な場合の付着性状。
- 摩擦および機械的作用の両者が存在する場合の付着性状。
- 同様の試験体を用いて、鋼コンクリート接触面の疲労性状。

付着作用

接着作用

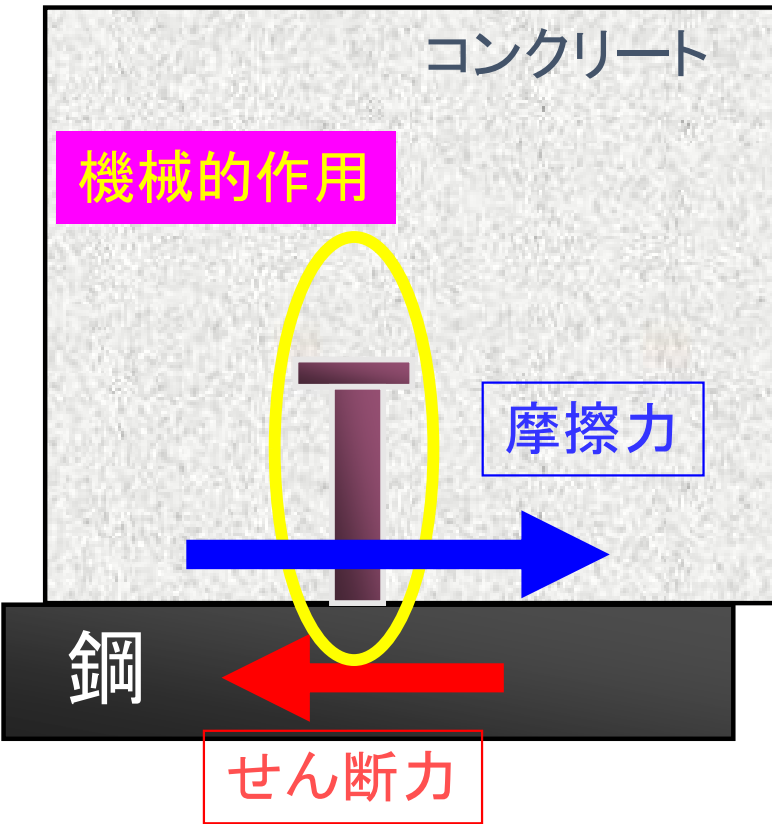
接着剤などによる付着作用。

摩擦作用

接触面の直圧により生じる摩擦力による付着作用。

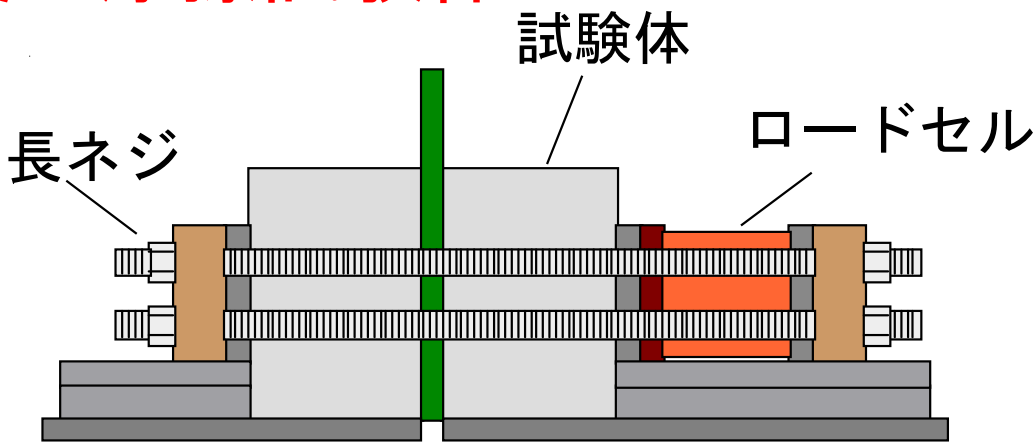
機械的作用

スタッドなどの突起物による機械的な付着作用。

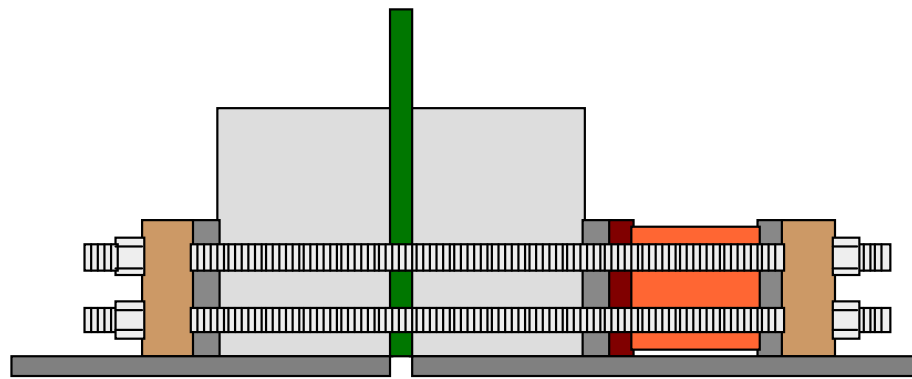


支圧応力分布が不均一な場合の付着性状

支圧摩擦試験体

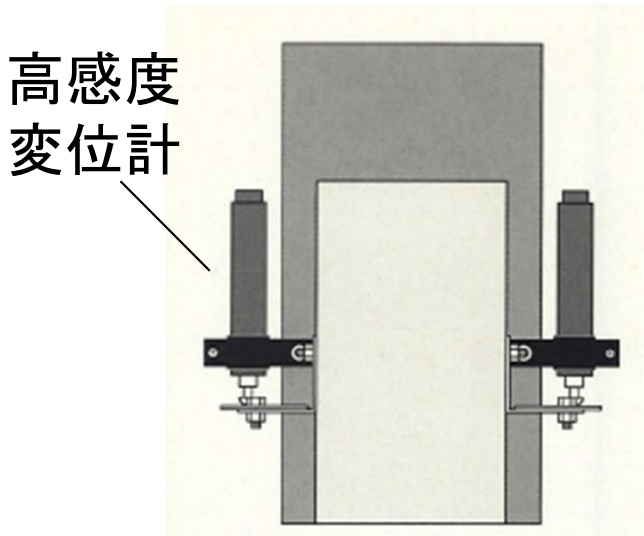
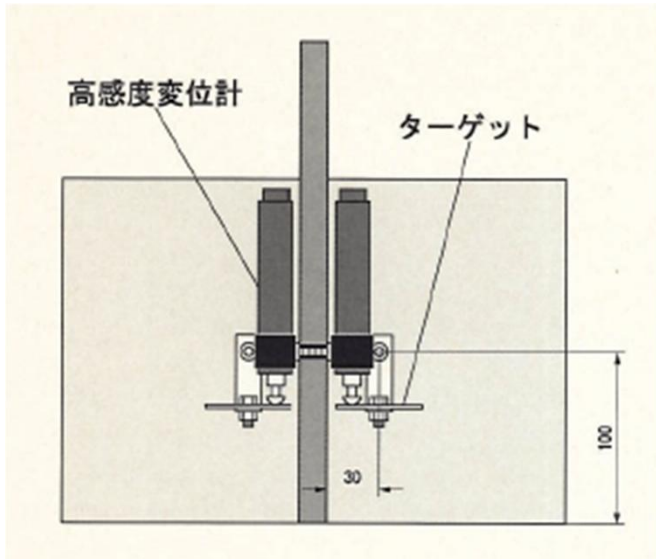


シリーズN (支圧応力の勾配なし)



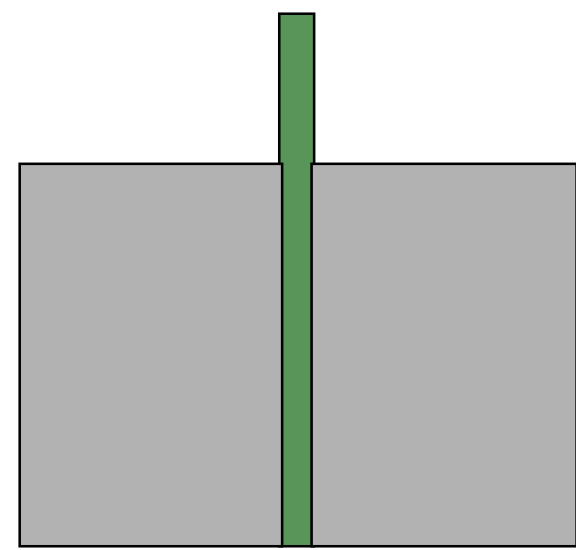
シリーズE (支圧応力の勾配あり)

鋼板表面無機ジンクプライマー塗布



ずれ変位の計測状況
コンクリート部
200 × 110mm

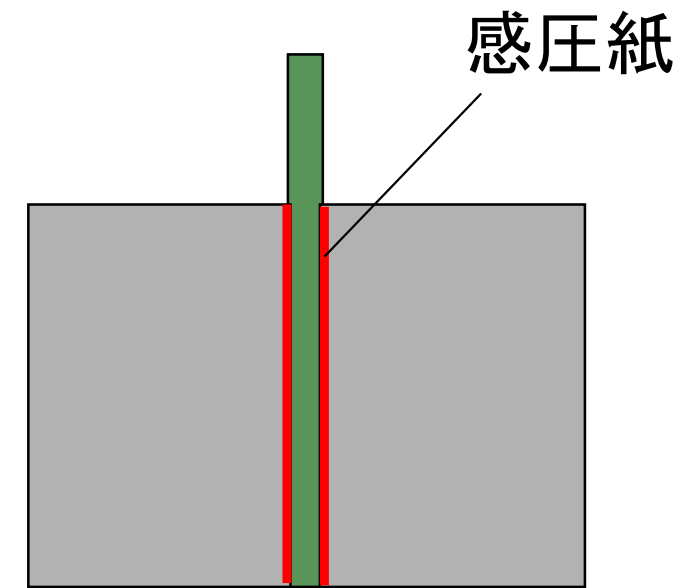
支圧摩擦試験体



支圧応力

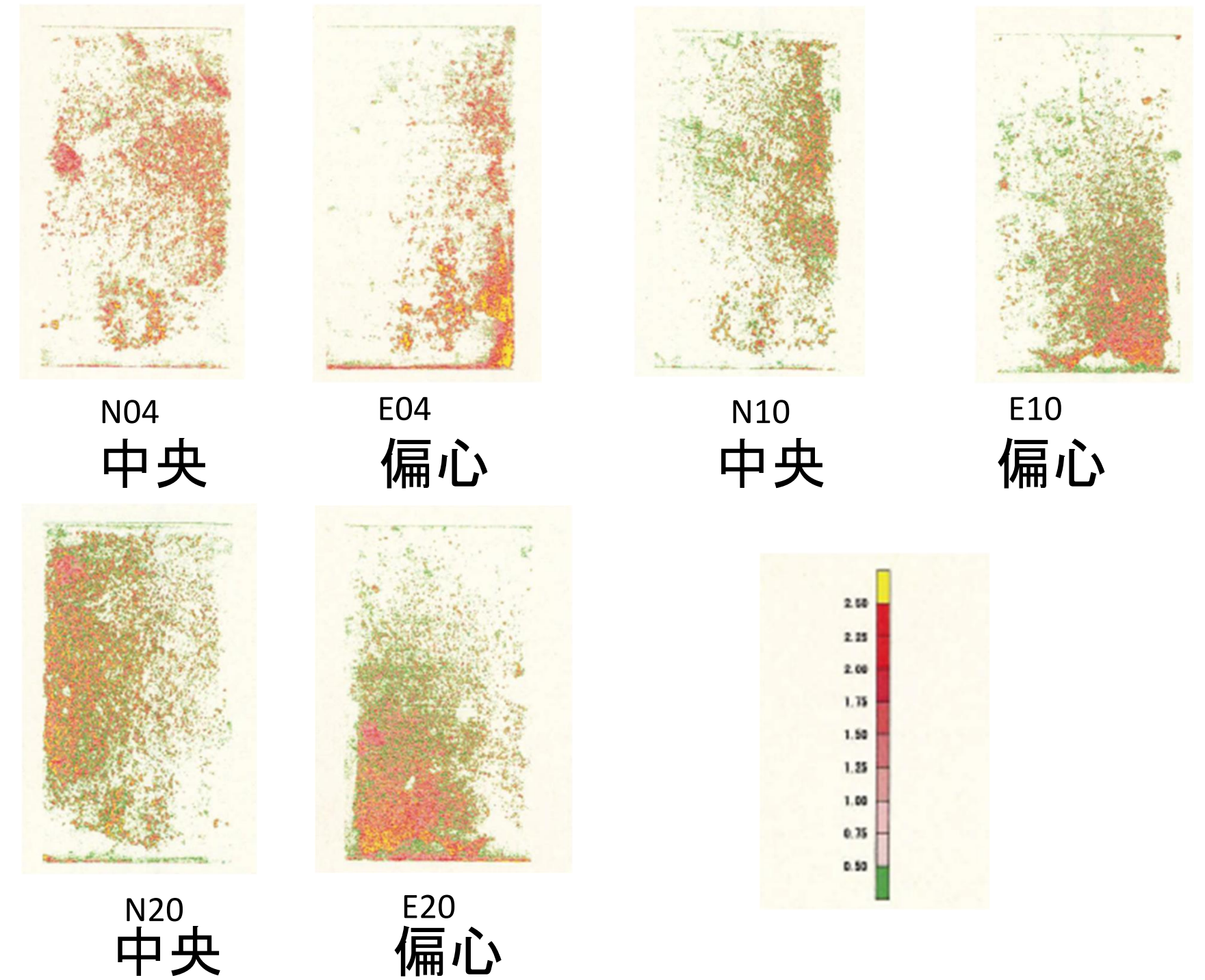
0.4, 1.0, 2.0N/mm²

支圧力分布試験



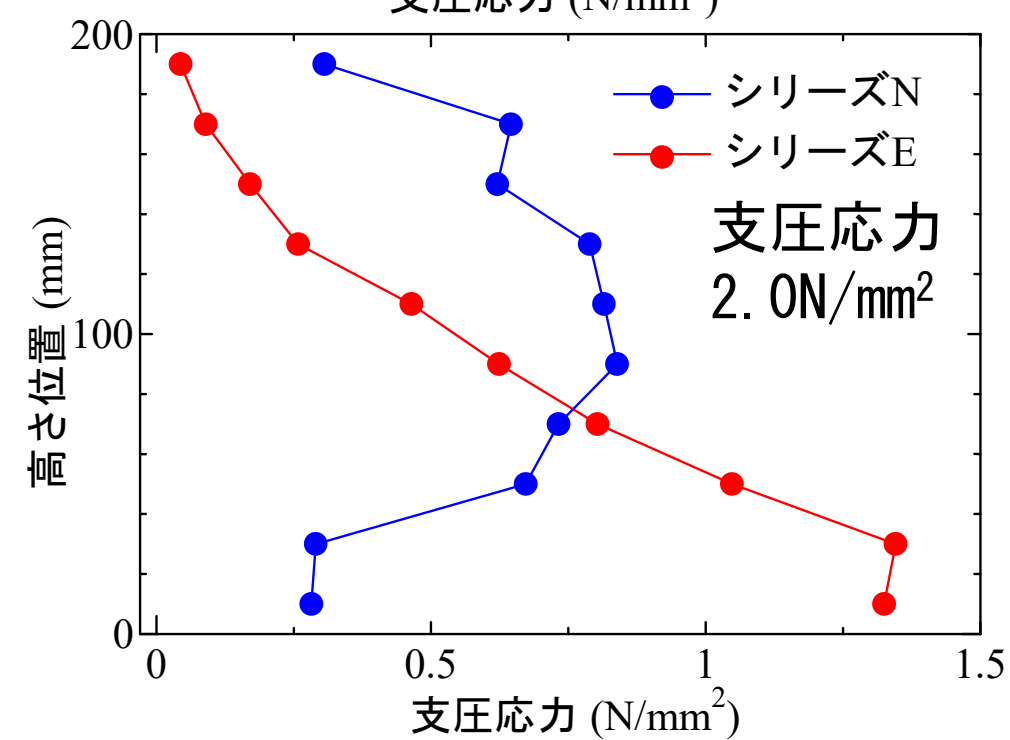
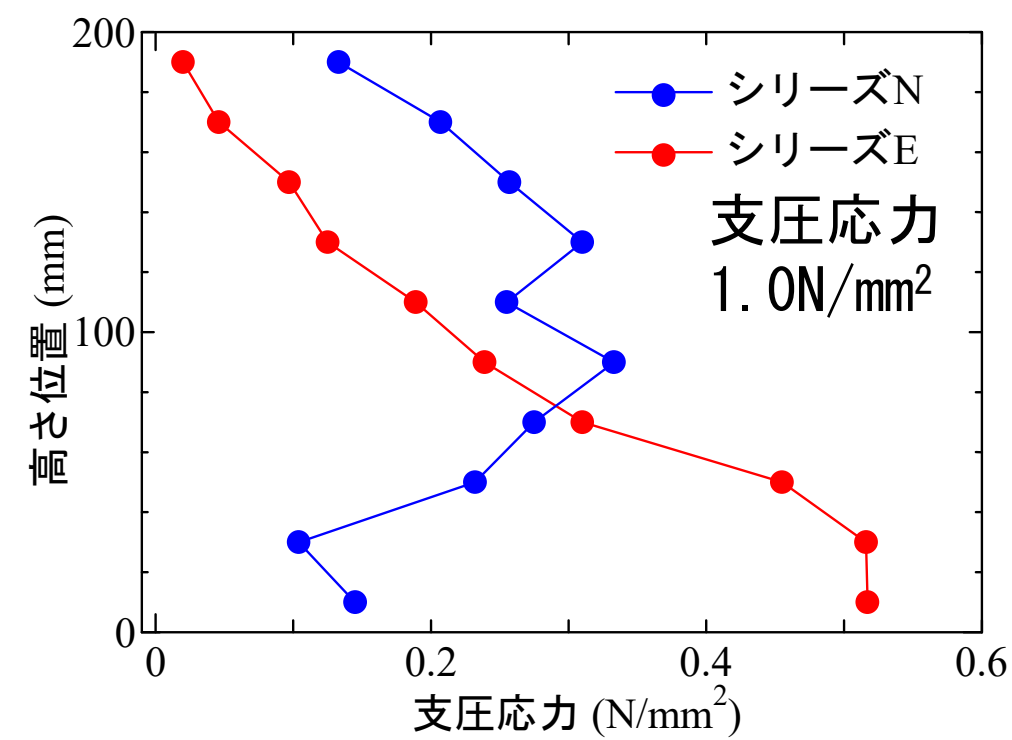
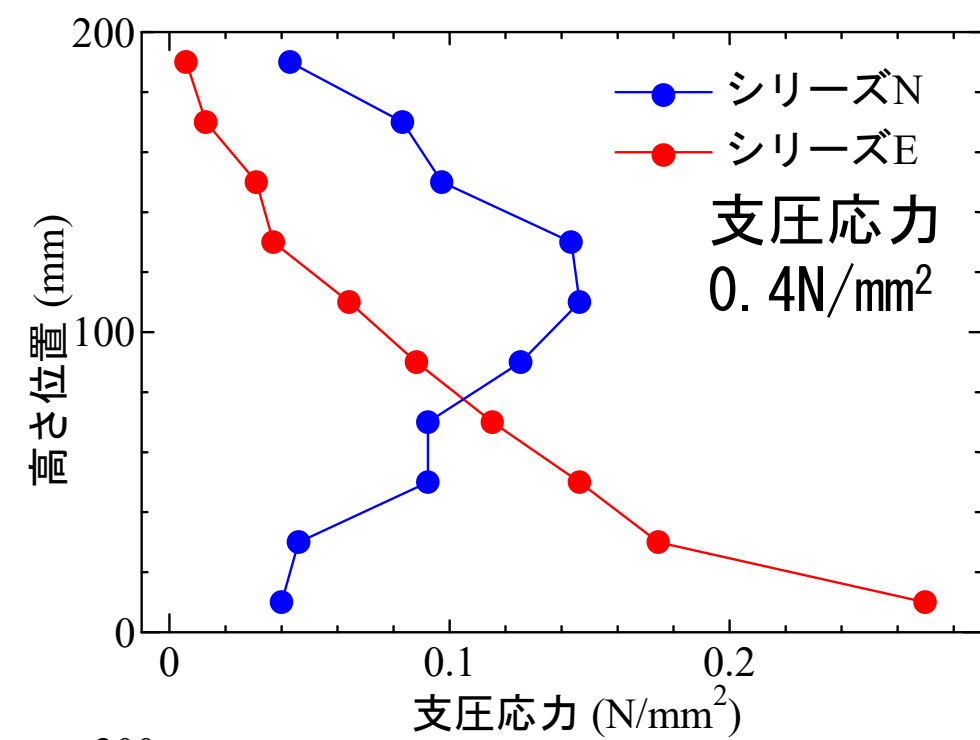
鋼板とコンクリートブロックを一度引剥し、感圧紙を挟んで支圧力を導入

支圧力分布試験結果



105

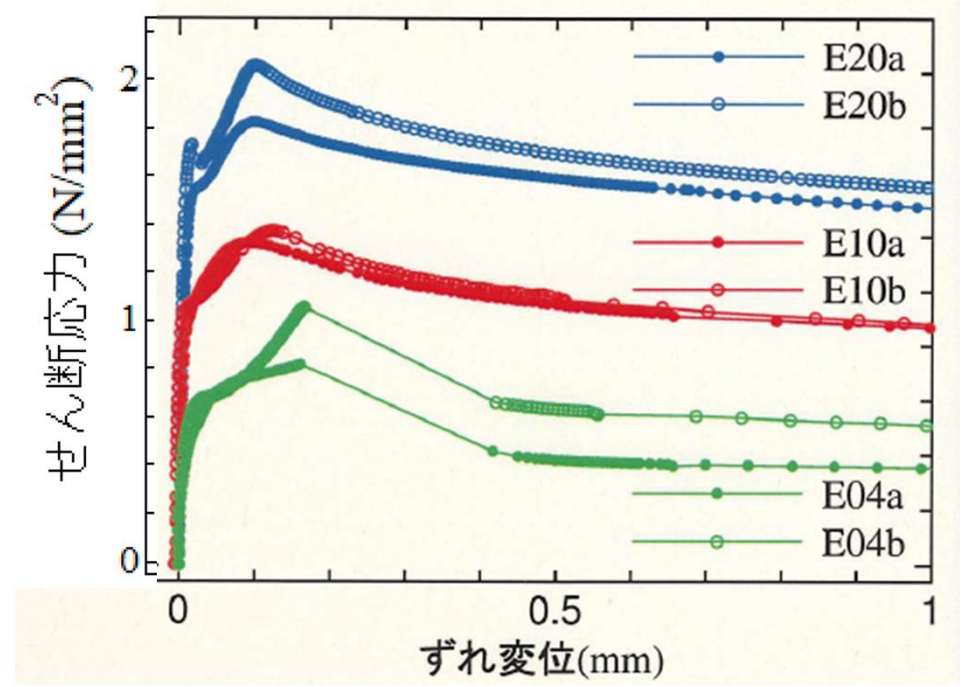
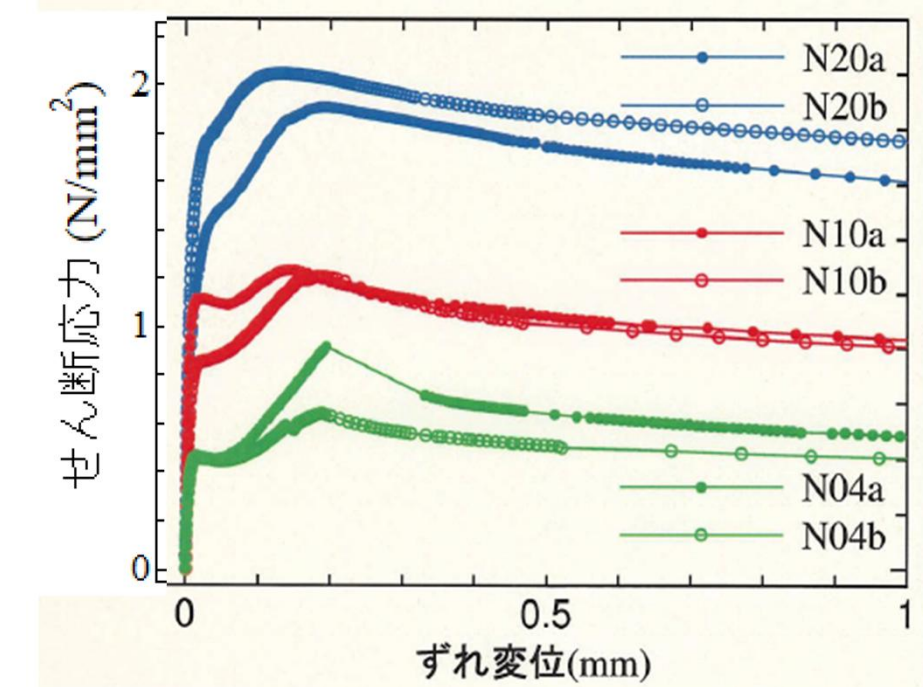
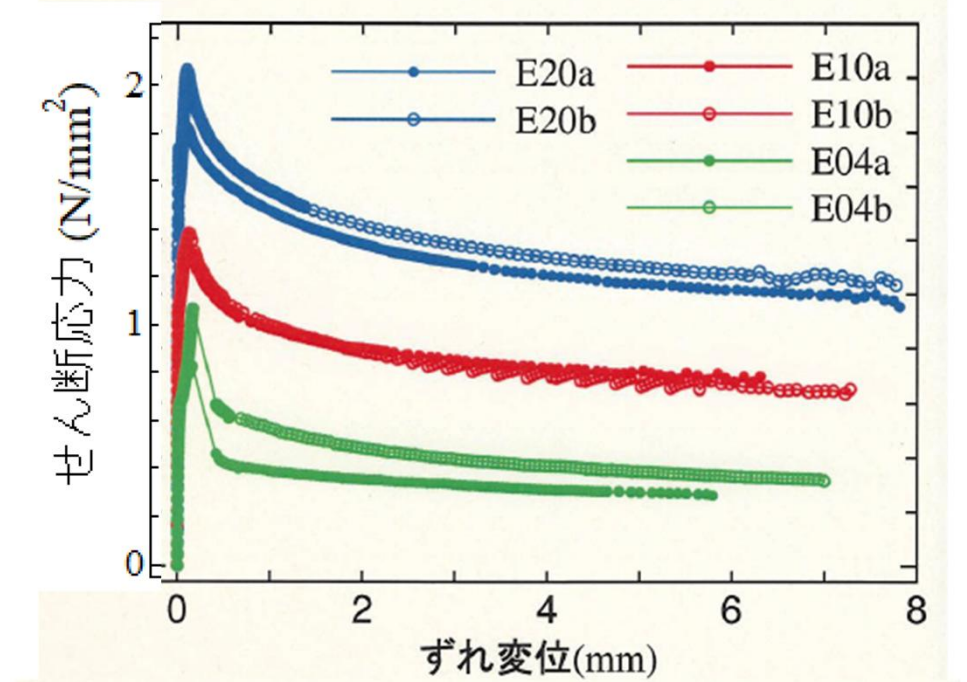
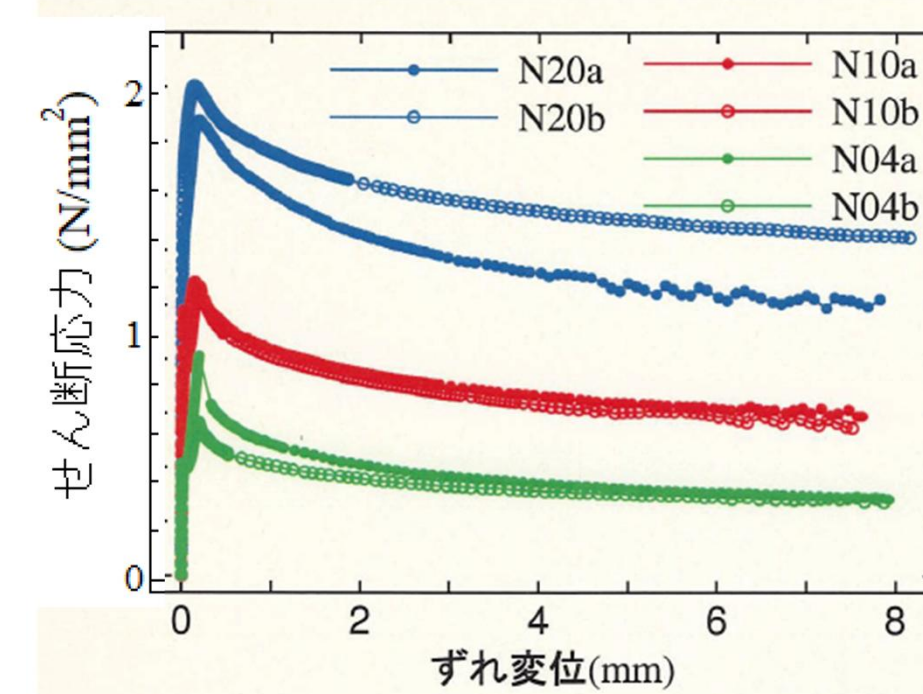
106



支圧応力分布試験結果

107

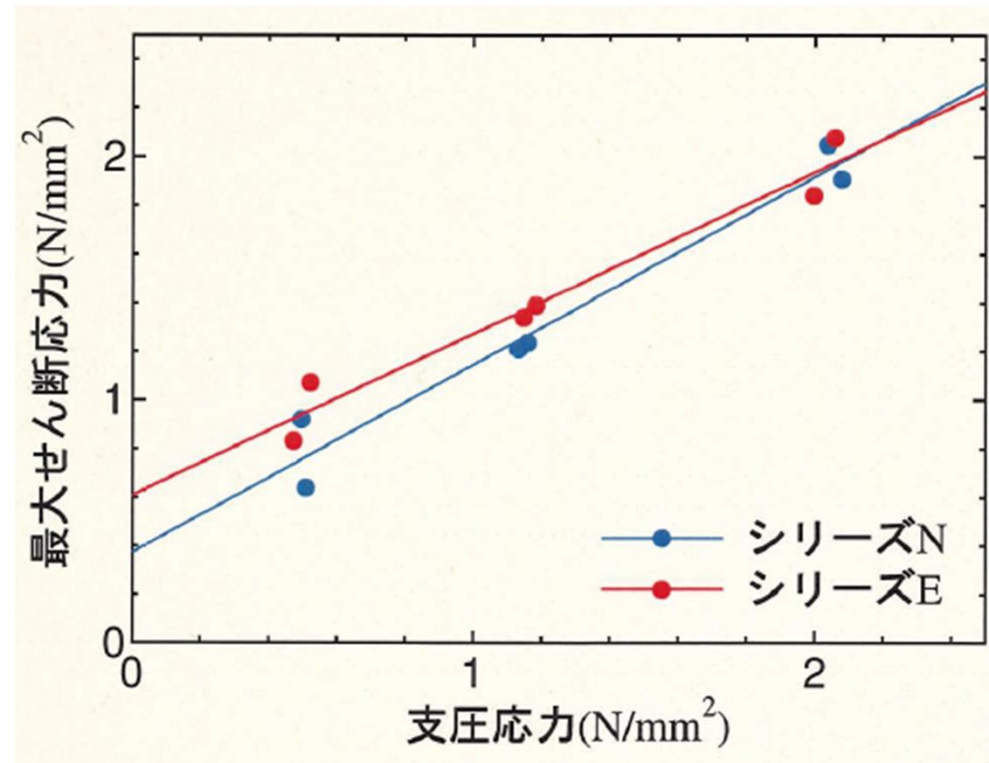
荷重とずれ変位関係



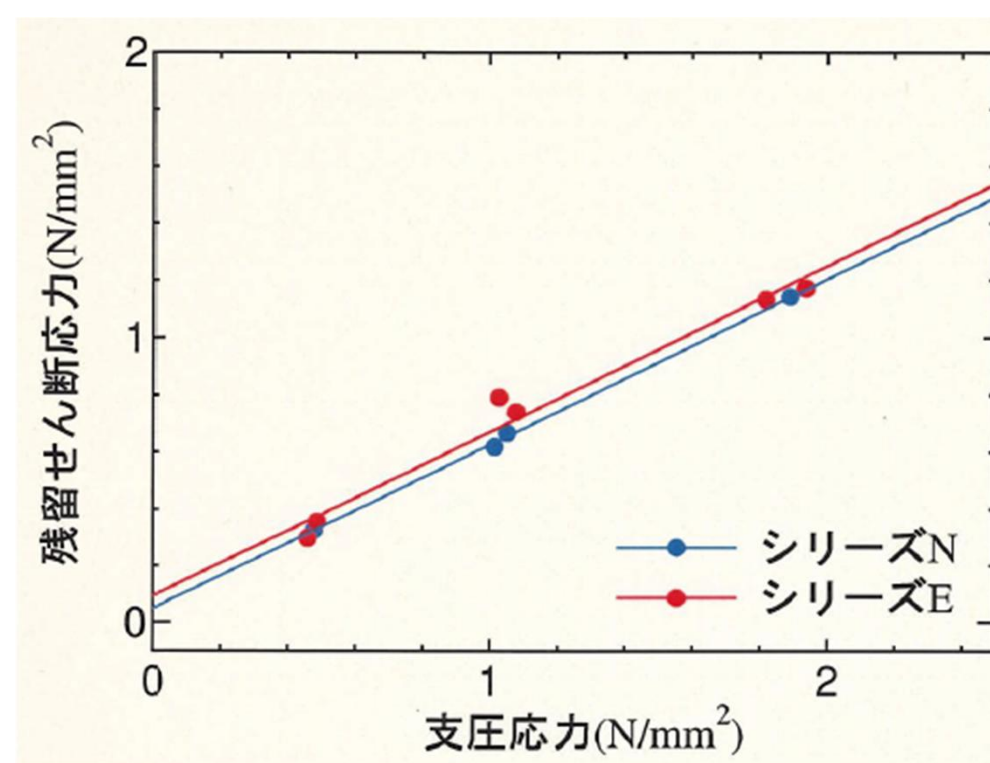
シリーズN

シリーズE

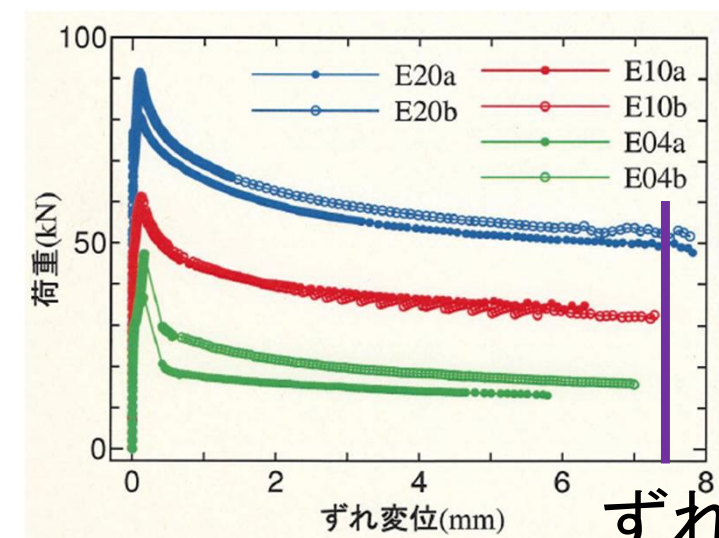
108



最大せん断応力と支圧応力の関係



残留せん断応力と支圧応力の関係

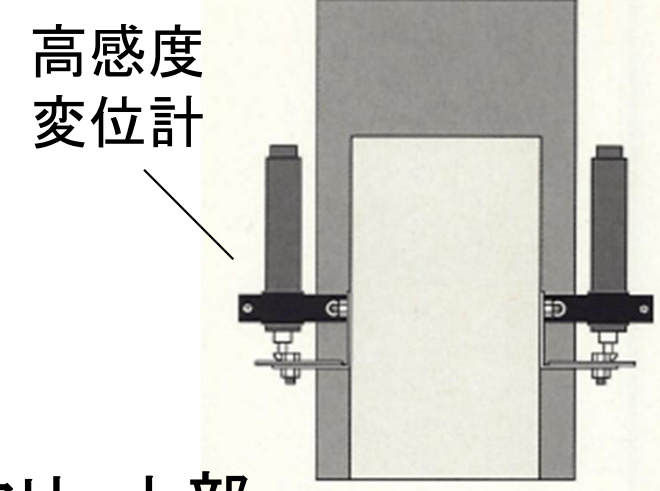
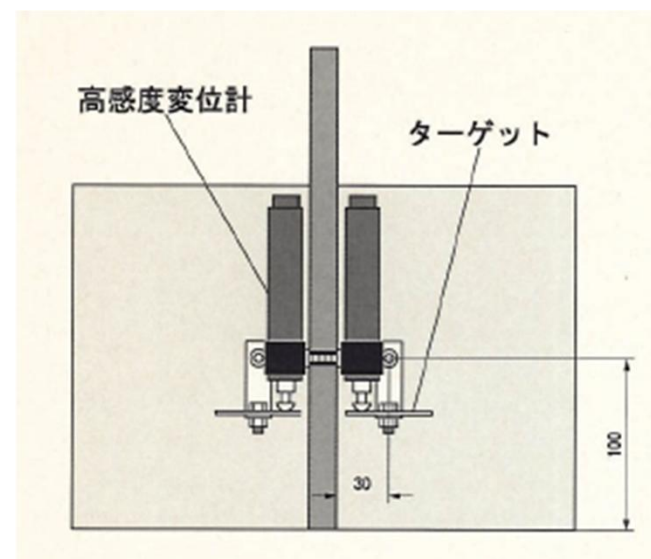
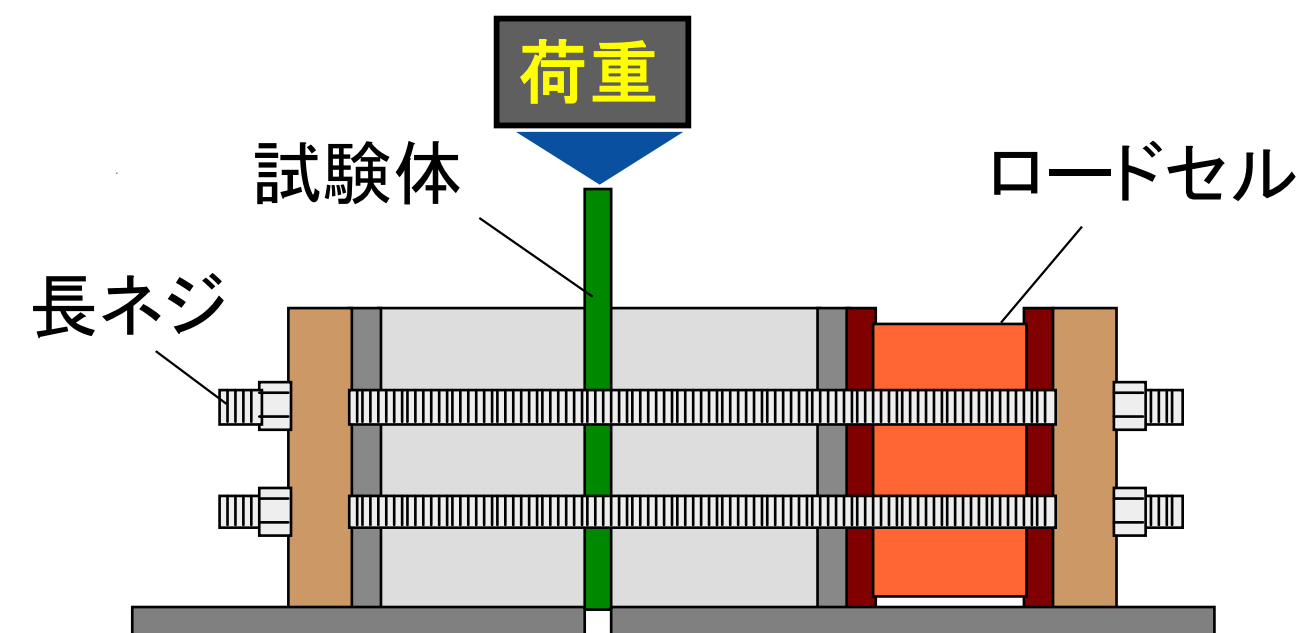


ずれ変位7.5mm時荷重

残留せん断応力
ずれ変位7.5mm時荷重を
接触面積で除した応力

109

支圧摩擦試験の载荷状況およびずれ変位計測状況

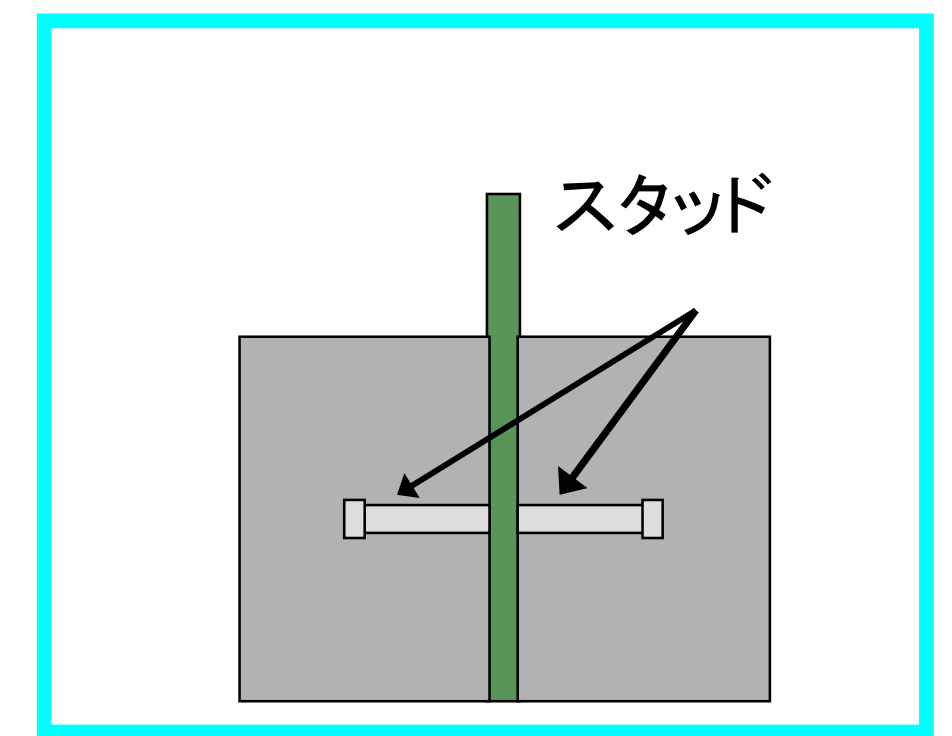
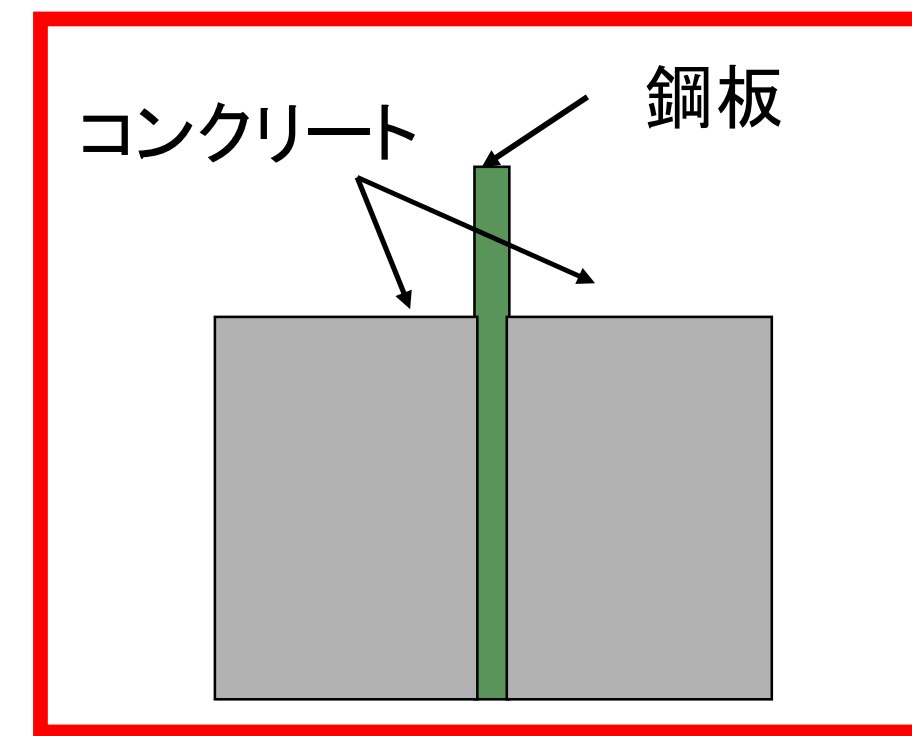


コンクリート部
200 × 110mm



111

摩擦および機械的作用の観点から付着性状を
試験により確認する。



支圧摩擦試験体

鋼板表面エッチングプライマー塗布

110

支圧摩擦試験

鋼とコンクリート接触面に
支圧力を与え、せん断力
を作用させる。

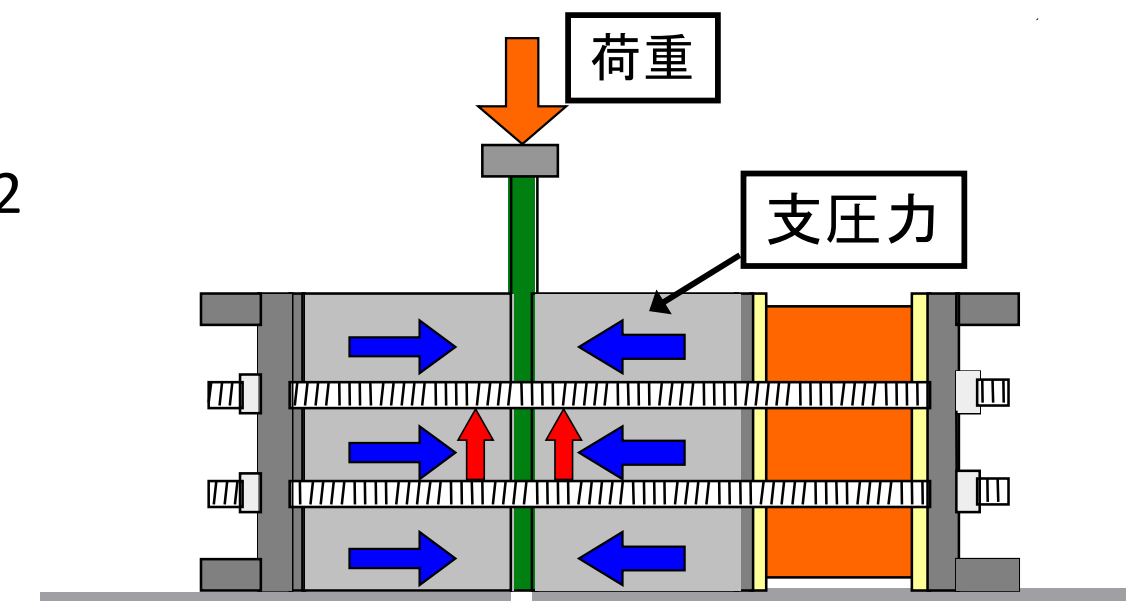
支圧応力

鋼板のみの試験体
スタッド付鋼板の試験体

0.4, 1.0, 2.0N/mm²

H鋼を用いた試験体

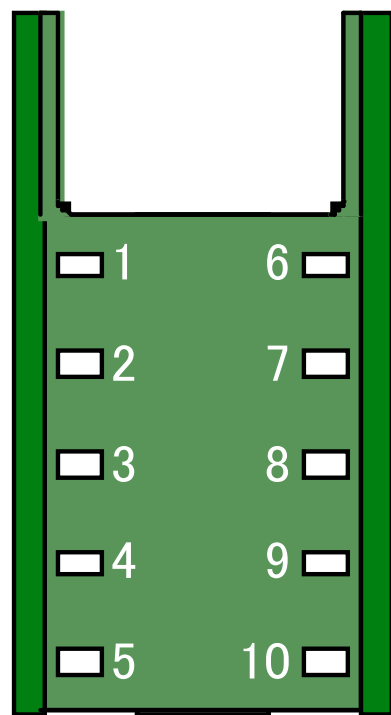
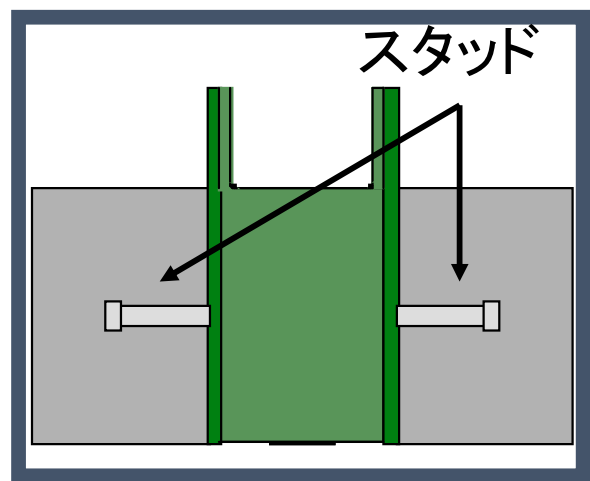
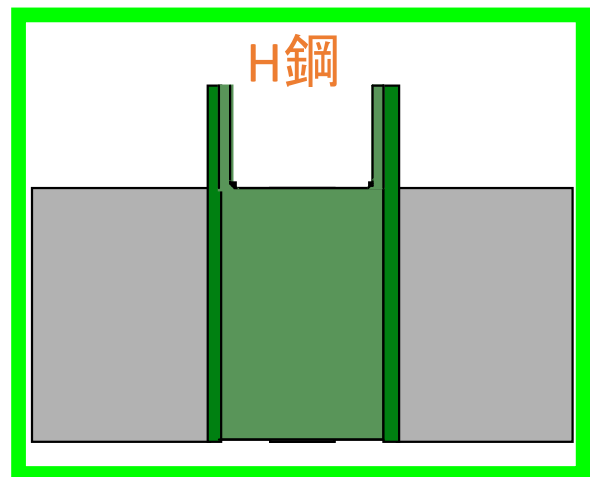
2.0N/mm²



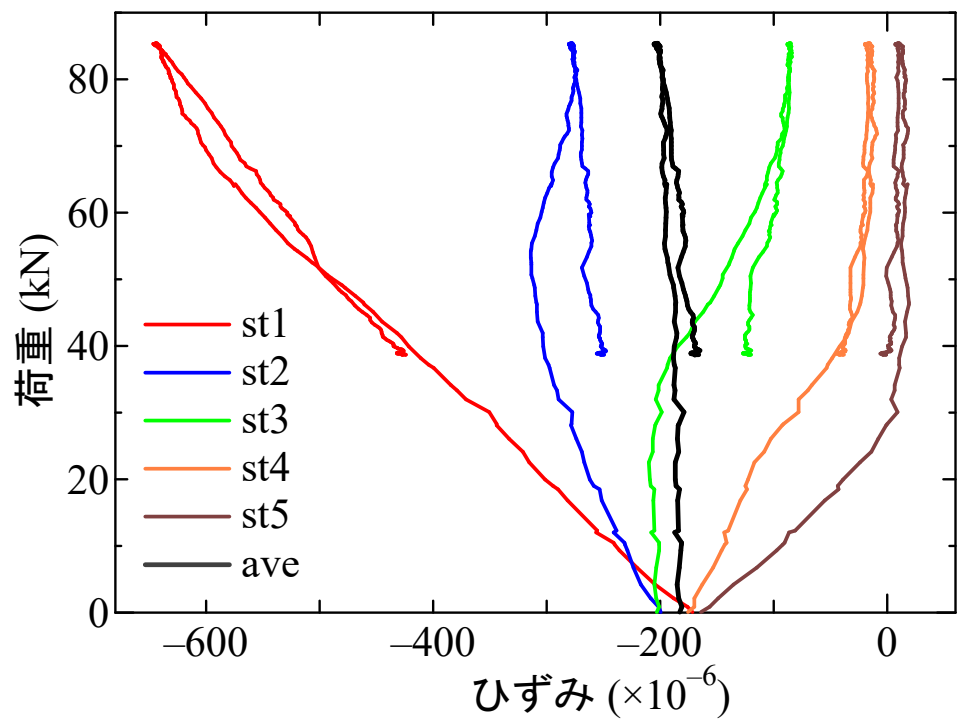
112

H鋼を用いた試験体

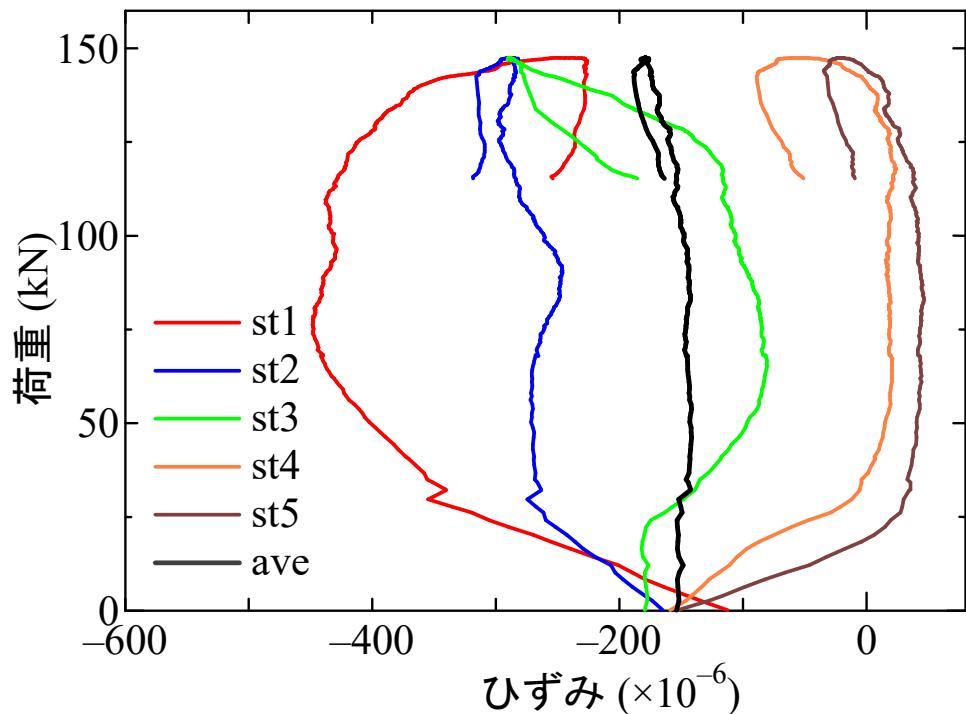
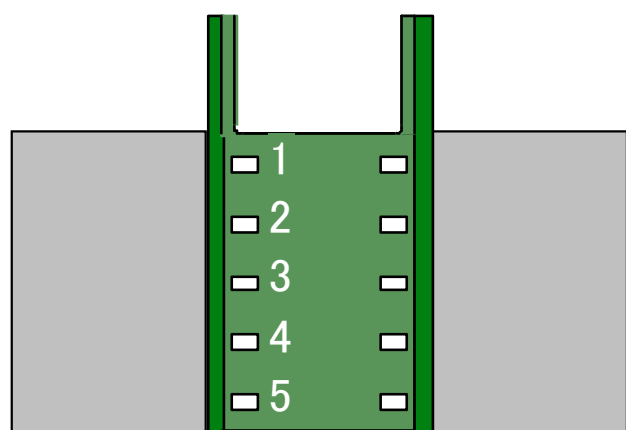
中央鋼板の代わりにウェブにひずみゲージを貼付したH鋼を用いた試験体により，せん断力载荷中に変化する支圧力分布を確認．



ひずみゲージ

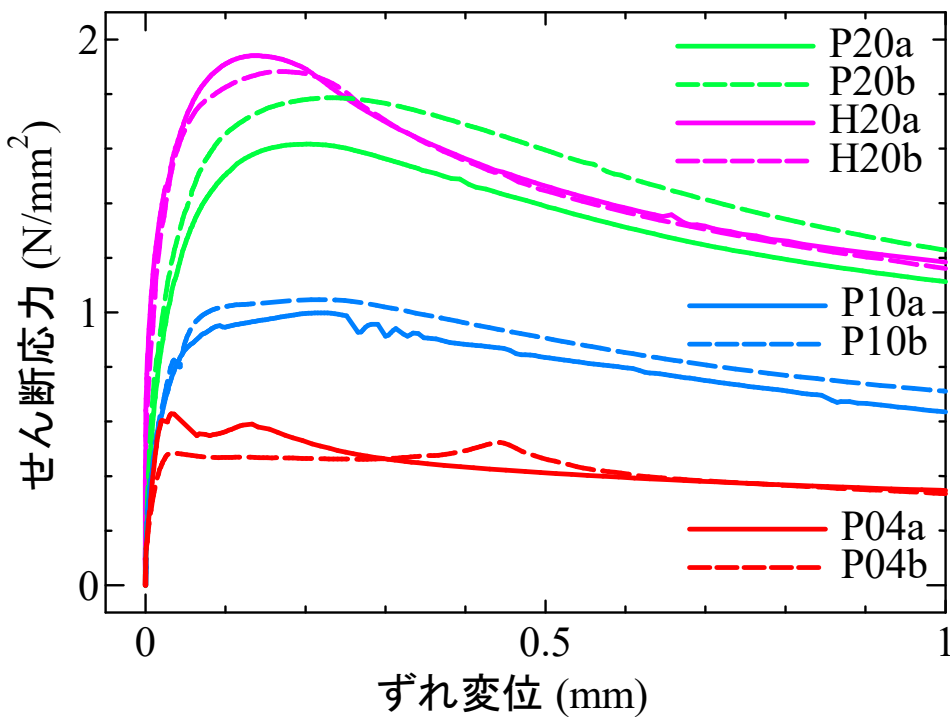
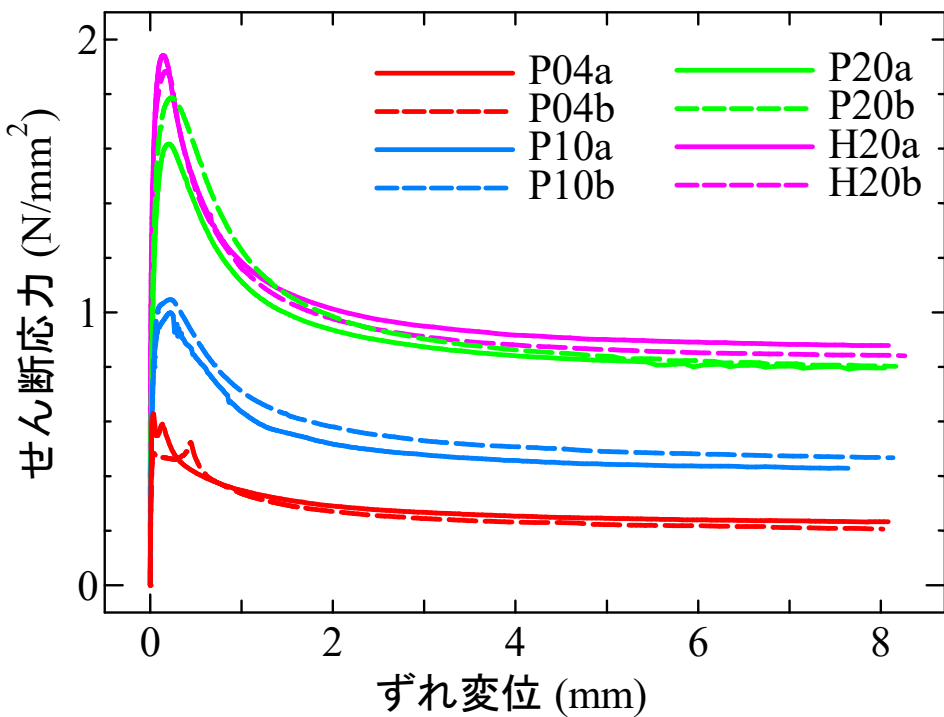


スタッドなし



スタッドあり

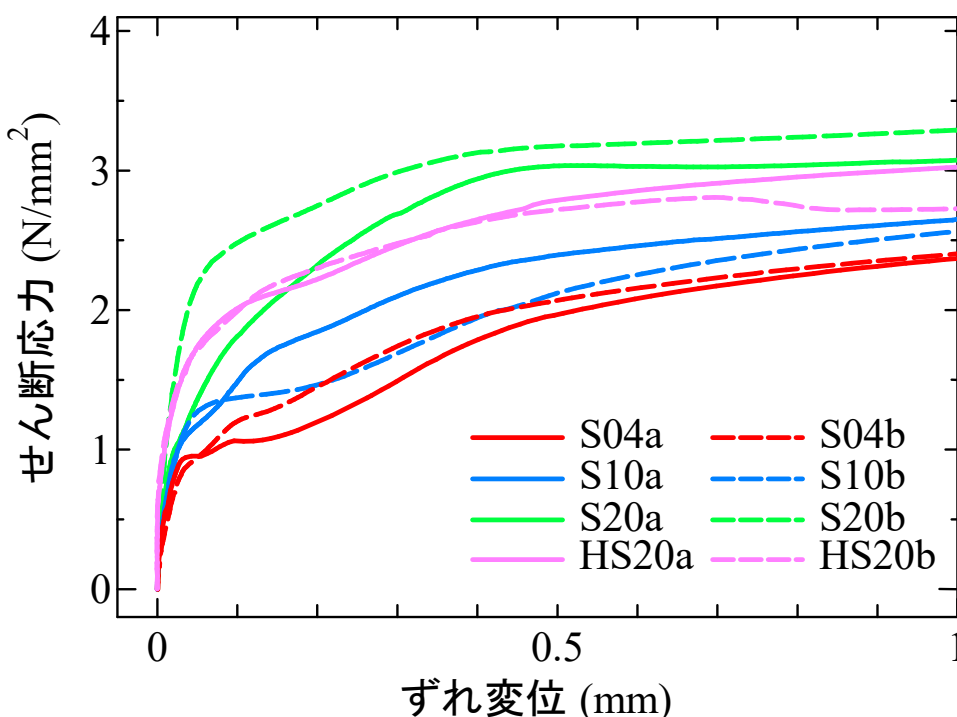
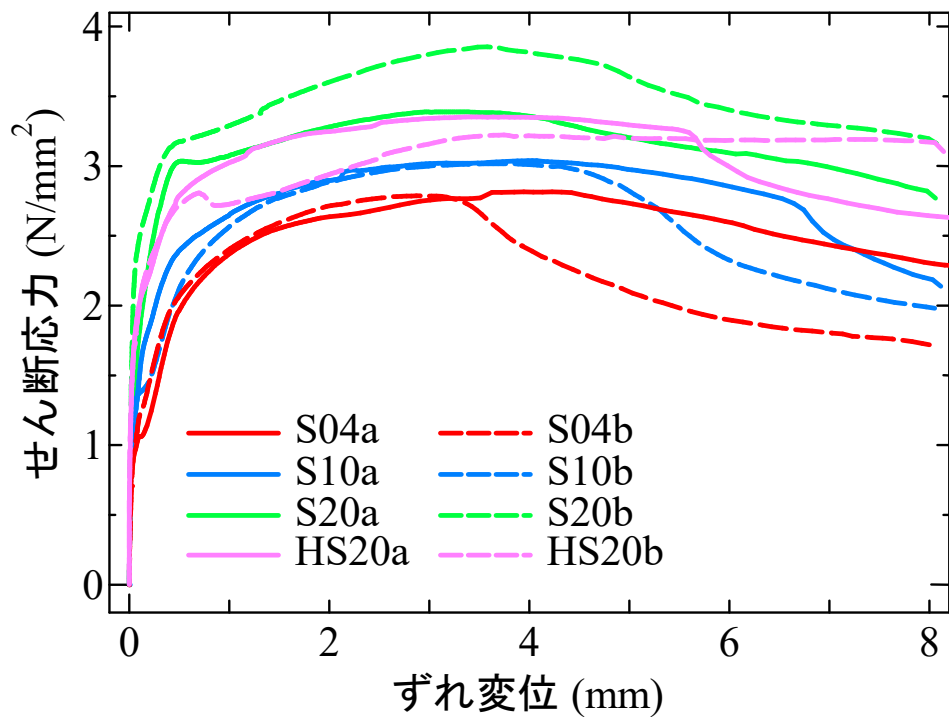
荷重とH鋼ウェブひずみの関係



初期拡大図

せん断応力とずれ変位関係(スタッドなし)

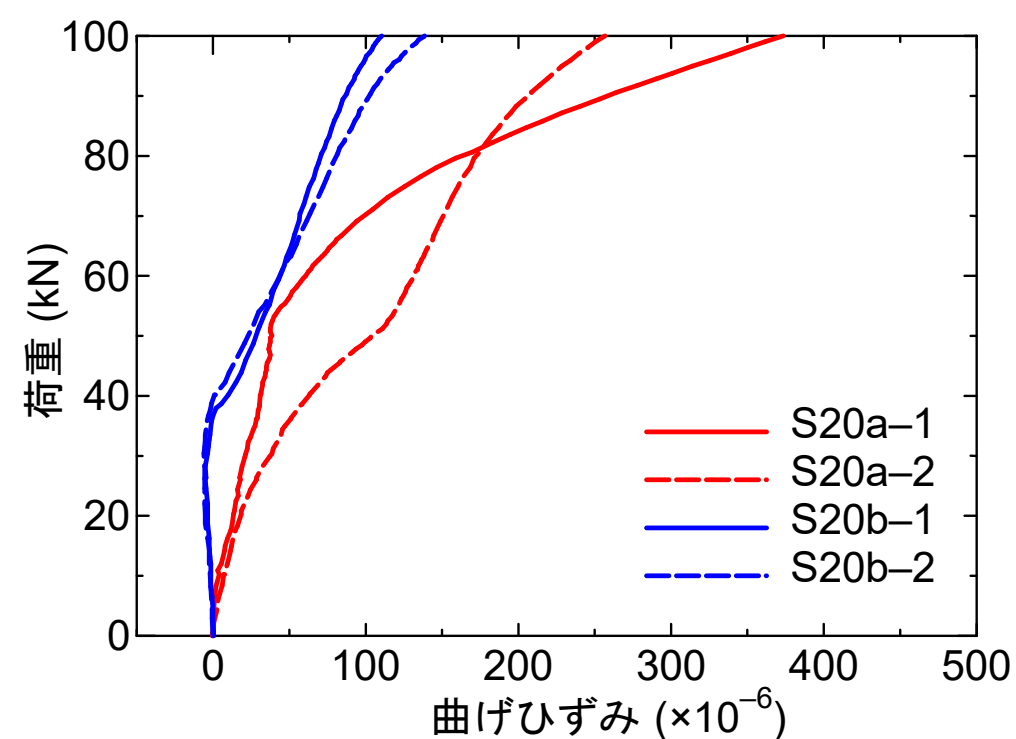
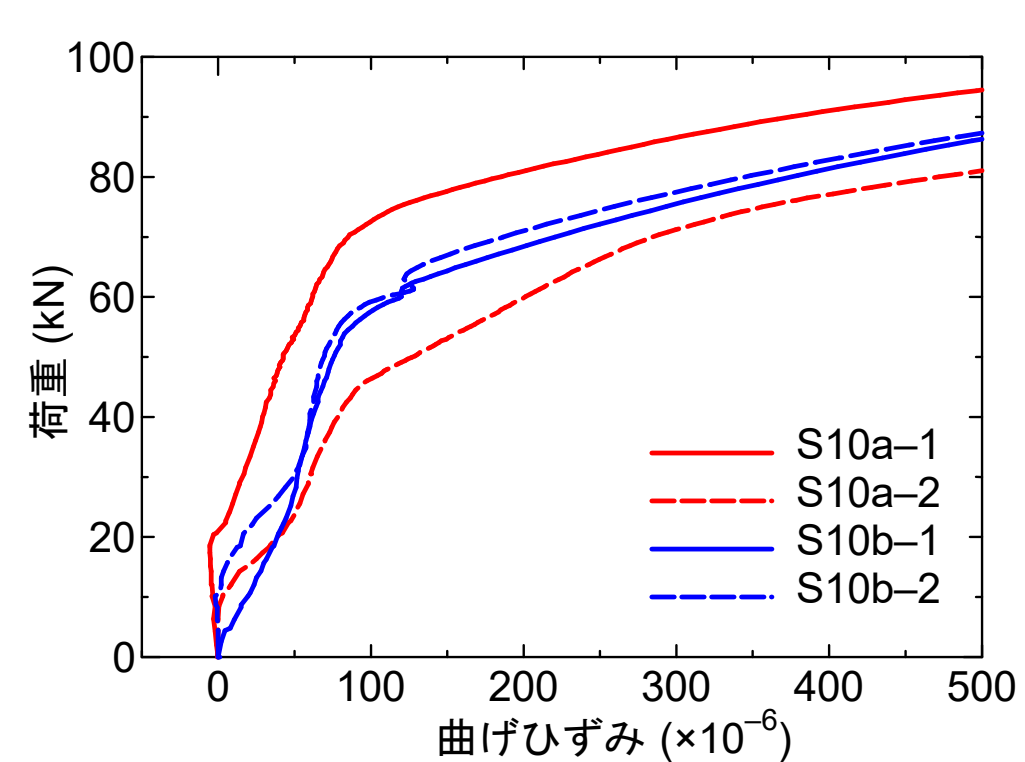
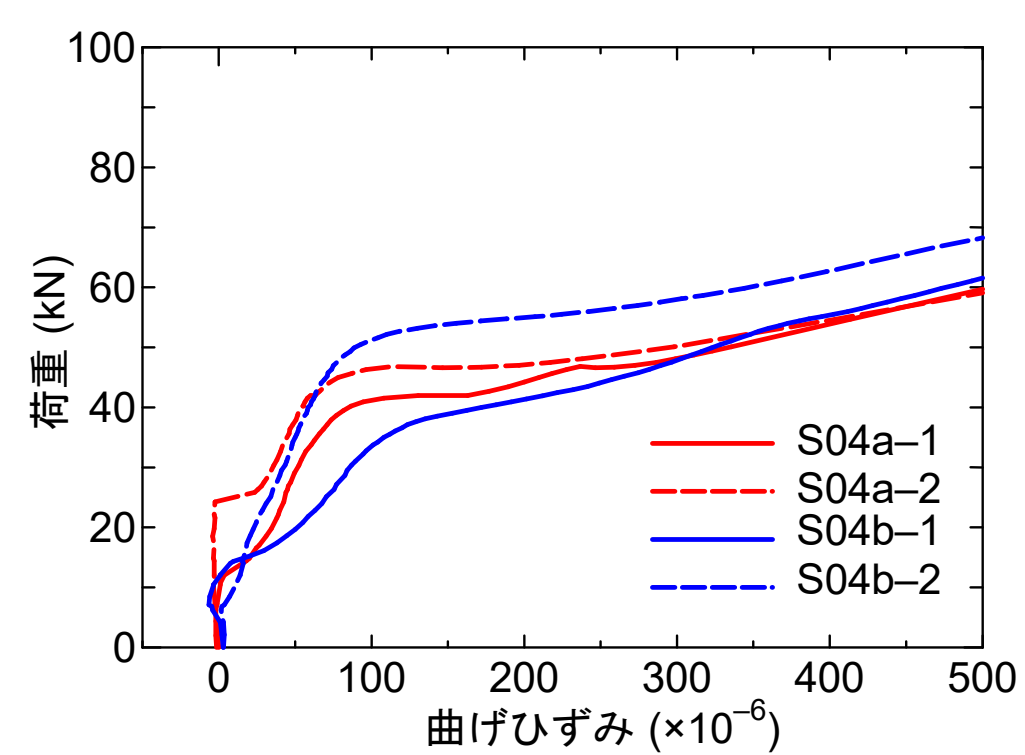
ずれ変位が0.2mm程度で荷重は最大に達し，その後減少して，ある一定の値に近づく．



初期拡大図

せん断応力とずれ変位関係(スタッドあり)

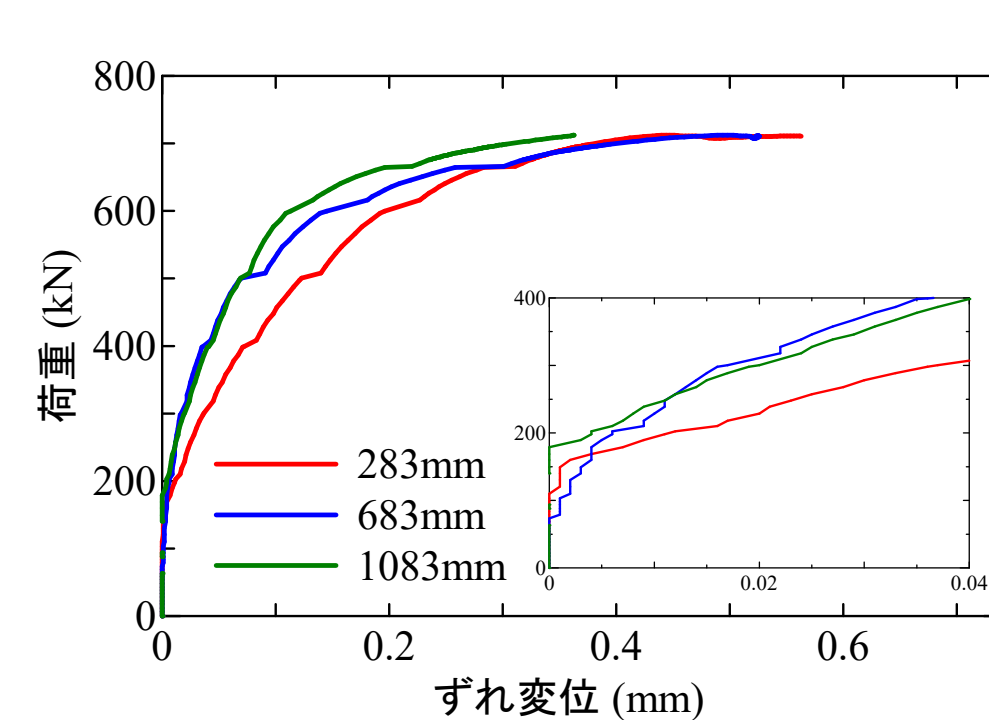
付着力が最大値に達して，付着によるせん断力が減少するのに伴ってスタッドにせん断力が作用し始める．



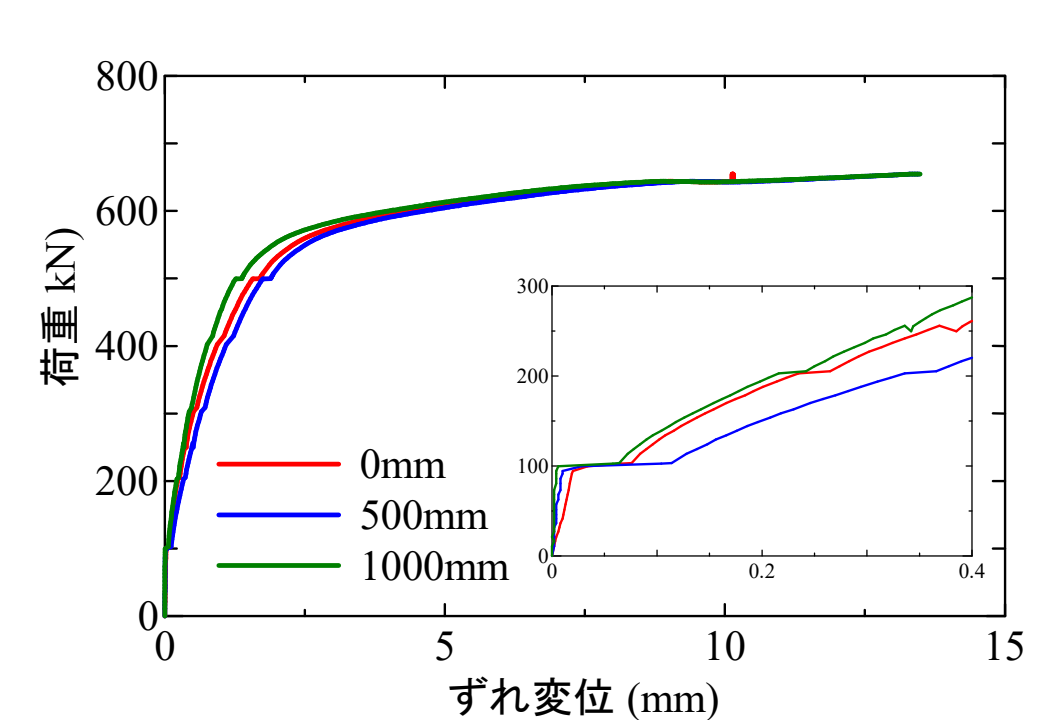
荷重とスタッドの曲げひずみの関係

支圧応力が大きいほど、スタッドの曲げひずみが増加する荷重は大きい。

117



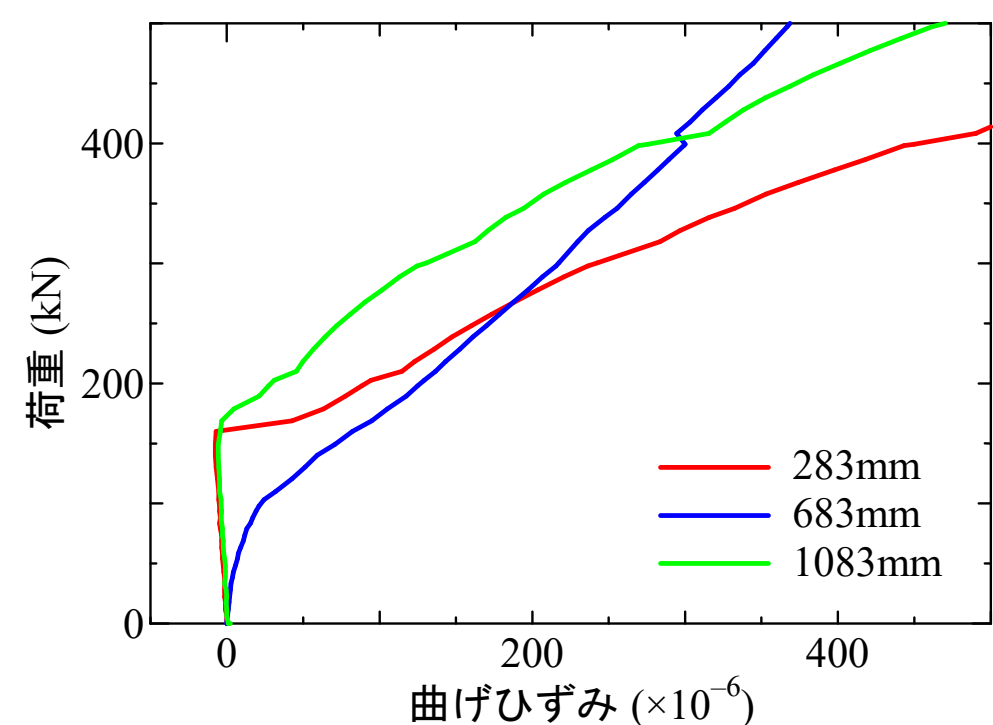
合成梁



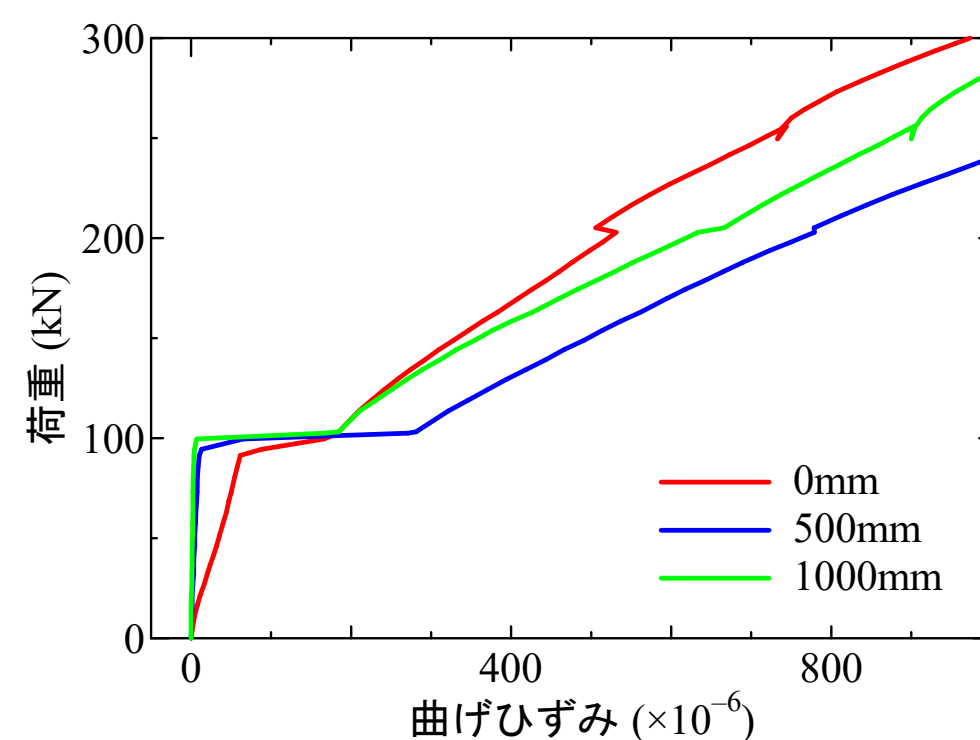
非合成梁

- 載荷荷重の増加につれて、RC床版下面と鋼桁上フランジ間に作用するせん断力がある大きさになると界面の付着が切れて有意なずれ変位が生じる。
- 鋼材表面は黒皮のまま、付着の低減処置なし。

118

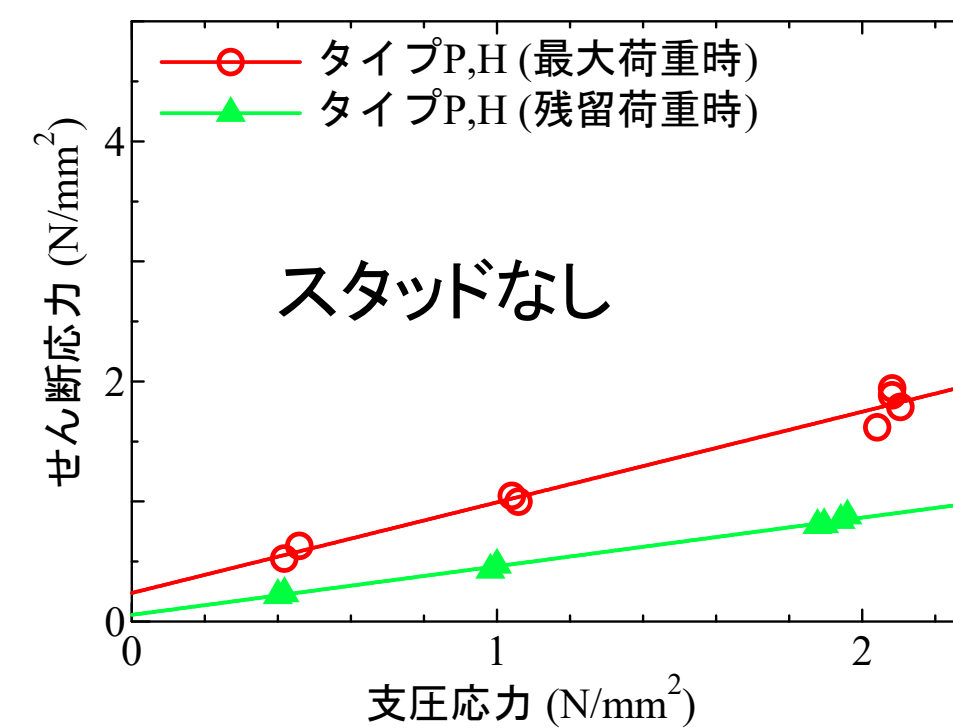


合成梁

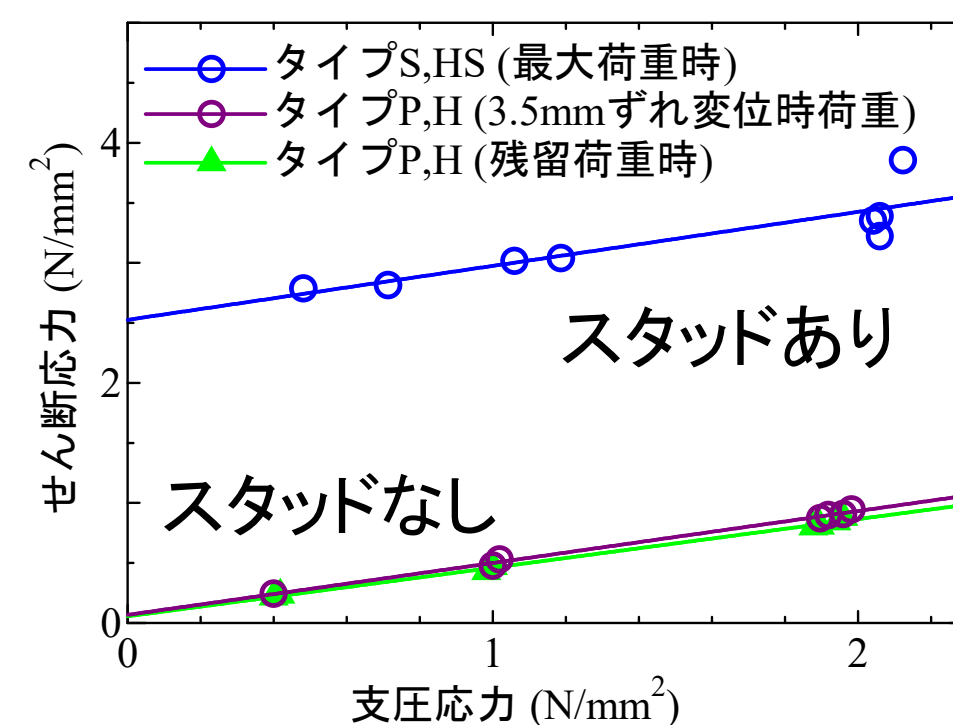


非合成梁

ずれ変位が生じ始めると、スタッドにせん断力が作用し始めて、スタッドの曲げひずみも増加する。



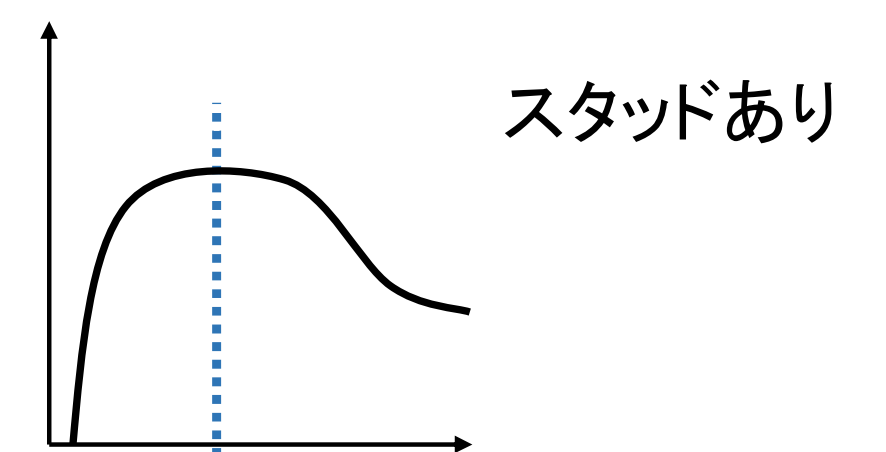
スタッドなし



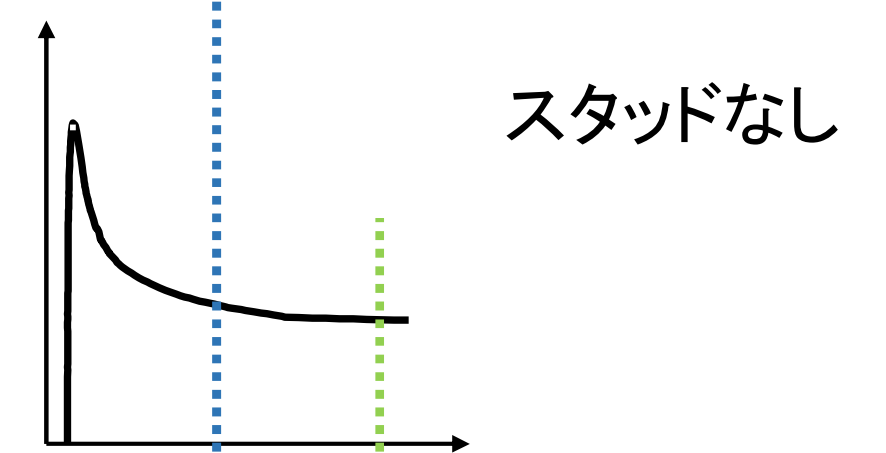
スタッドあり

スタッドなし

せん断応力と支圧応力の関係



スタッドあり

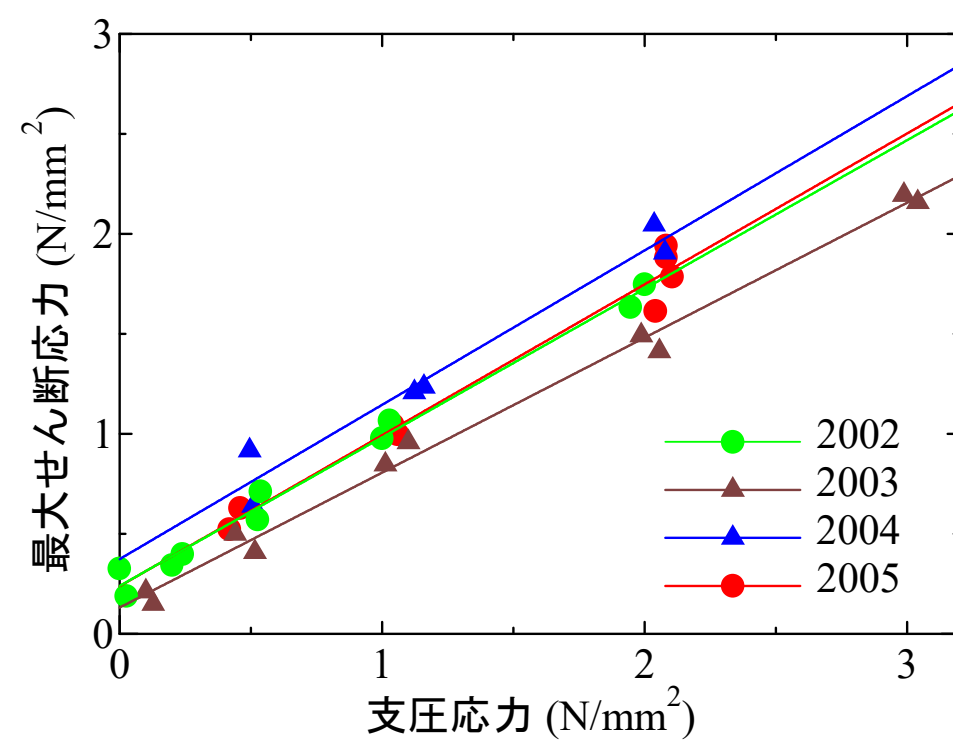


スタッドなし

3.5mm 残留荷重時

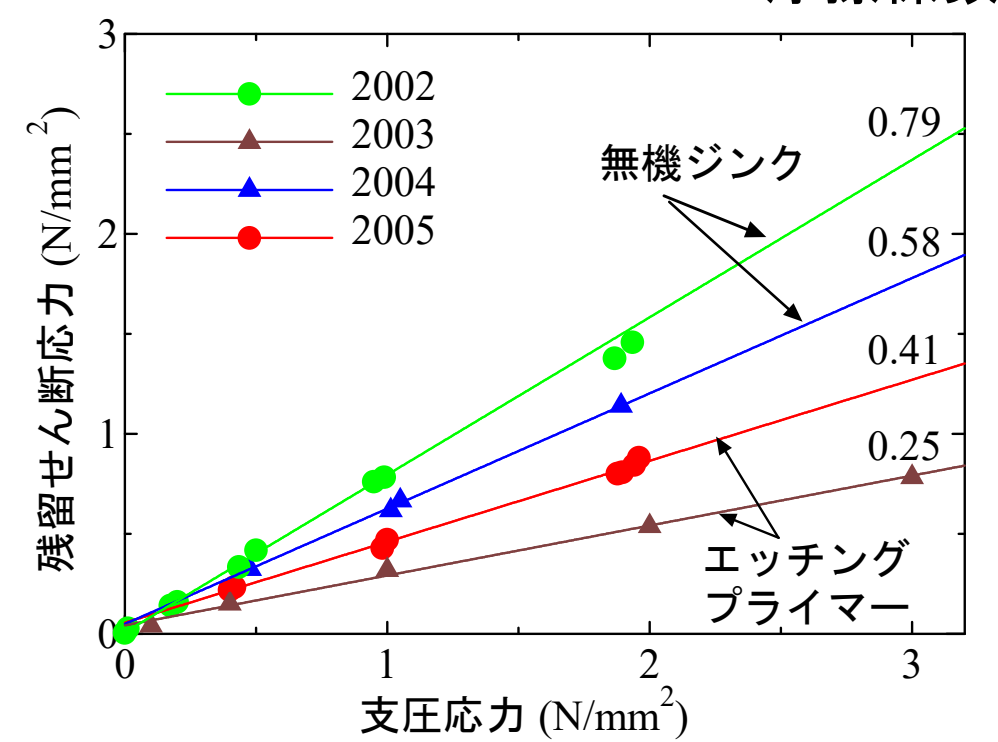
119

120



最大せん断応力と支圧応力の関係

高さ1mのコンクリートによる下面の支圧応力
0.023N/mm²



残留せん断応力と支圧応力の関係

せん断応力 1N/mm²
200×200mm面積当たりのせん断力 40kN
スタッド1本のせん断耐力 100kN 程度

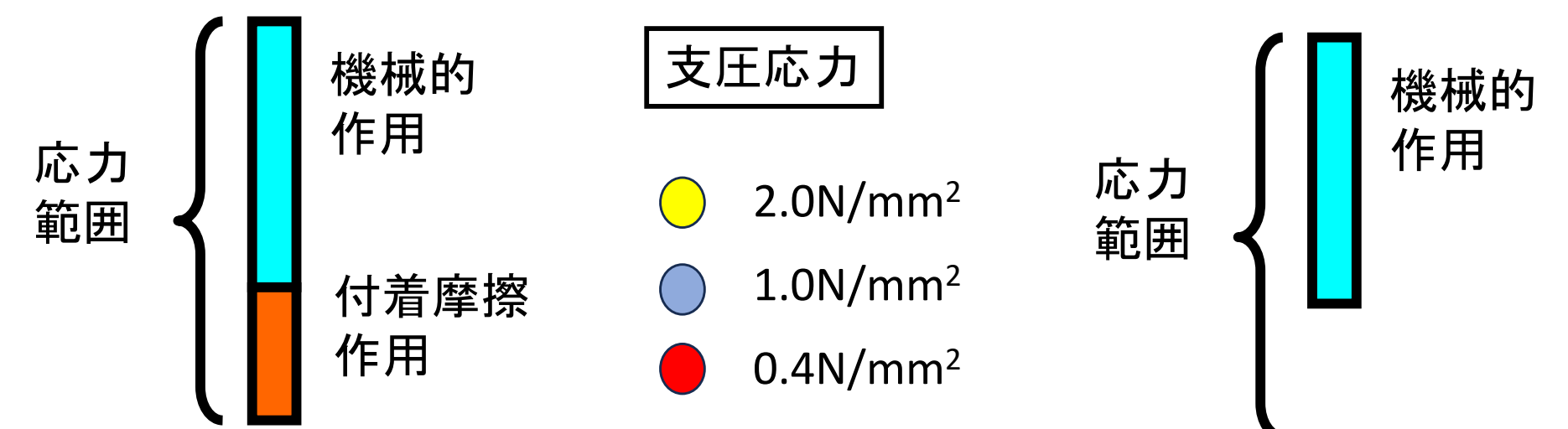
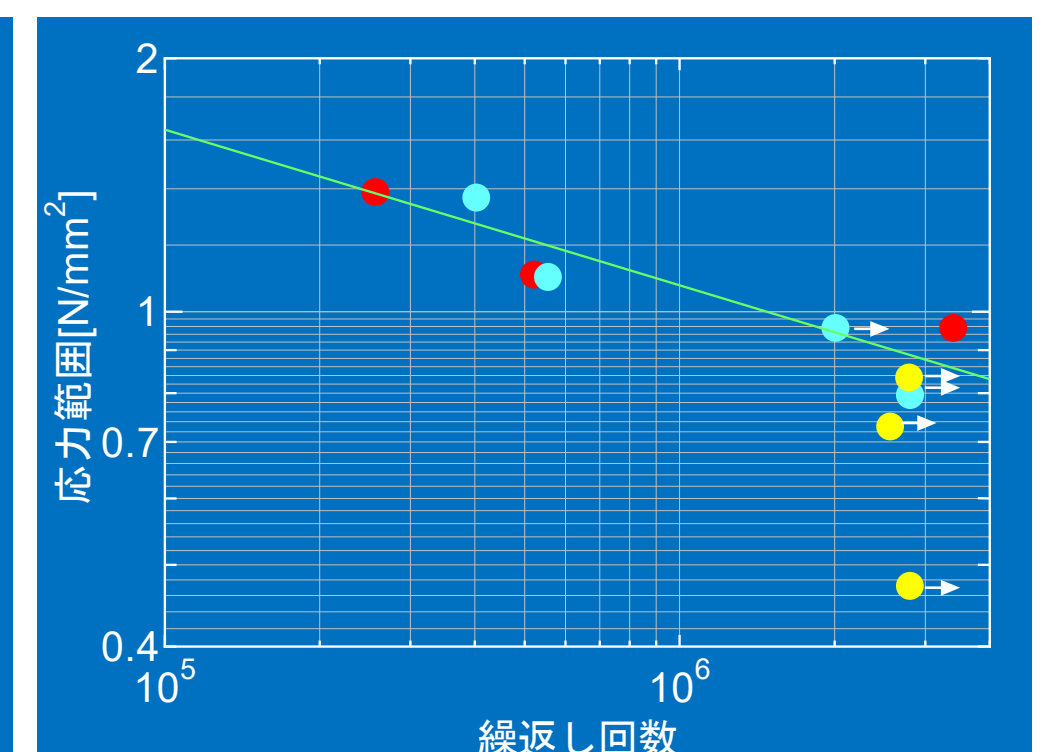
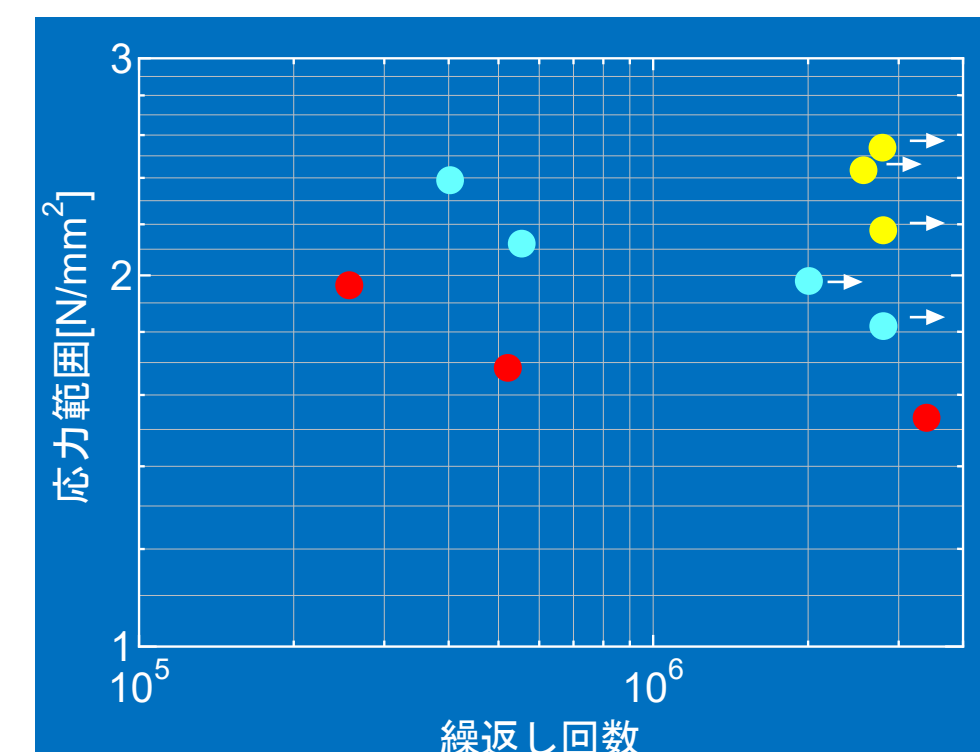
まとめ

- 平均支圧応力と最大せん断応力あるいは残留せん断応力にはほぼ線形関係が成り立つ。
- 摩擦作用及び機械的作用を有する試験体の最大せん断応力は、摩擦作用のみを有する試験体のせん断応力と機械的作用のみの最大せん断応力の和で表すことができる。
- 支圧力は摩擦作用にのみ影響し、機械的作用には影響しない。

鋼コンクリート接触面の疲労性状に関する実験

疲労試験の応力範囲

試験体	下限応力	上限応力	応力範囲	最大せん断応力を差引いた応力範囲	最大せん断応力	破壊の有無
F04a	0.28	1.811	1.531	0.955	0.576	有
F04b	0.28	1.961	1.681	1.104	0.577	有
F04c	0.28	2.241	1.961	1.384	0.577	有
F10a	0.303	2.12	1.817	0.795	1.022	無
F10b	0.303	2.28	1.977	0.955	1.022	無
F10c	0.303	2.422	2.12	1.097	1.023	有
F10d	0.303	2.689	2.386	1.364	1.022	有
F20a	0.362	2.535	2.173	0.471	1.702	無
F20b	0.362	2.793	2.431	0.729	1.702	無
F20c	0.362	2.898	2.535	0.833	1.702	無



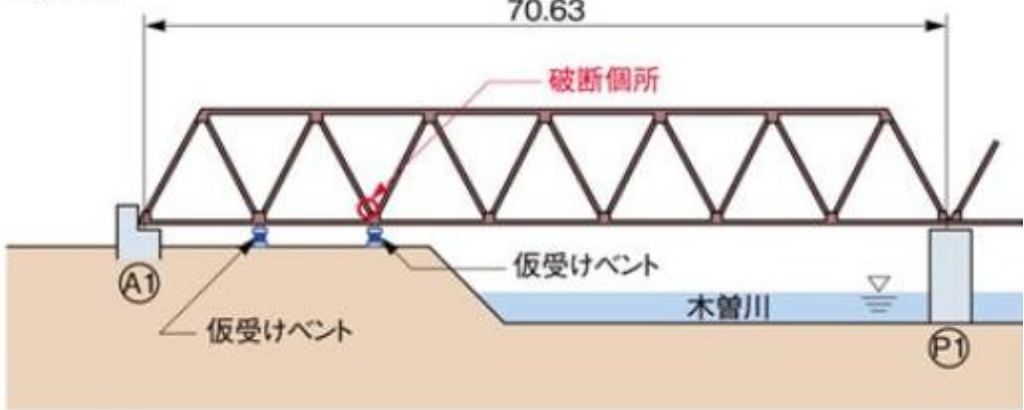
疲労試験結果の考察

- 鋼コンクリート接触面に繰返しせん断力を与えた場合、支圧応力が大きいほど疲労破壊までの繰返し回数は多い。
- 機械的作用がある場合、付着、摩擦作用による最大せん断応力を差し引いたせん断応力に着目すると、そのせん断応力振幅が減少するにつれて、疲労破壊までの繰返し回数は増大する。

鋼とコンクリート接触面の腐食について

木曽川大橋のトラス橋 斜材の破断

●木曽川大橋(上り線)の破断個所の概要
[側面図]



加藤光男：木曽川大橋が破断した理由(維持管理時代への備え方)：日経コンストラクション，2007. 7.

- コンクリートと接する鋼材は腐食しにくい？
- コンクリートに埋め込まれた鋼材は防錆塗装をしていない？
- 接触面には雨水や酸素などが容易に侵入する隙間があり、腐食環境にあり、激しく腐食してついには破断した。

貝沼ら，鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動に関する研究，土木学会論文集，No.780/I-70，2005年1月

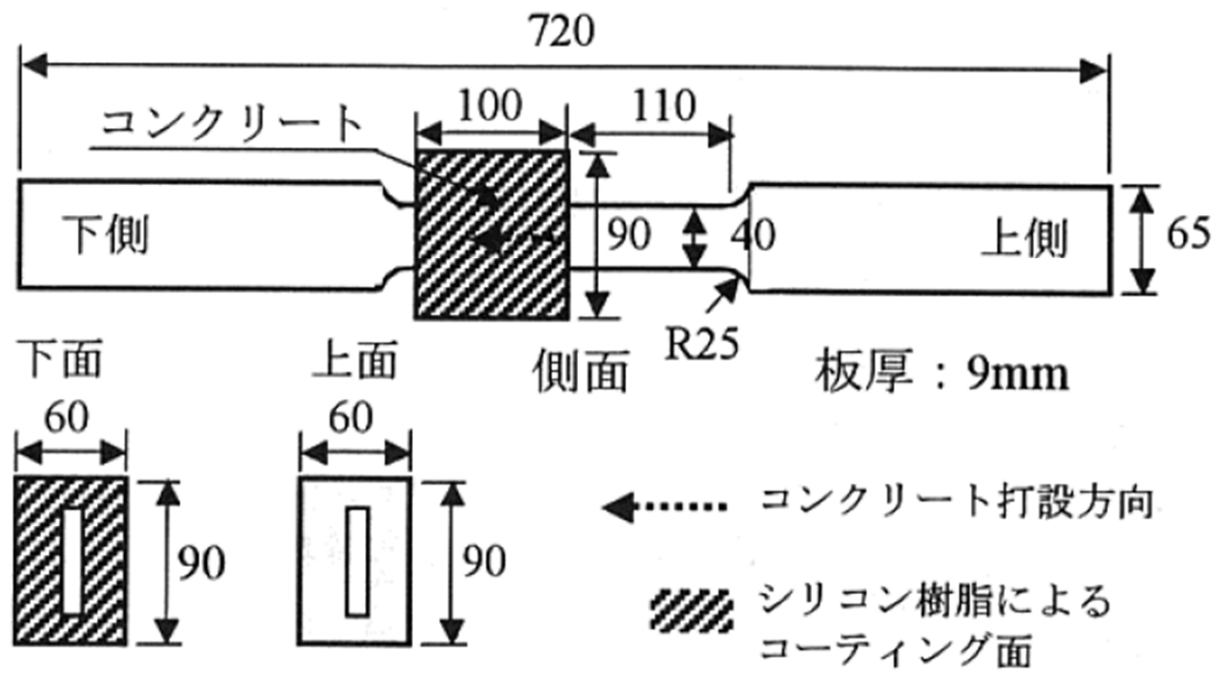


図-1 供試体の形状および寸法 (単位：mm)

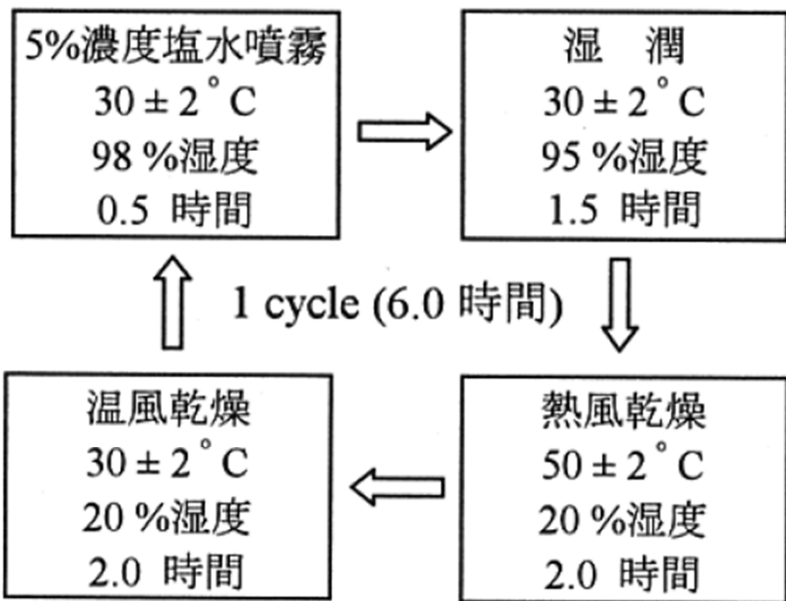


図-2 腐食促進実験の腐食サイクル



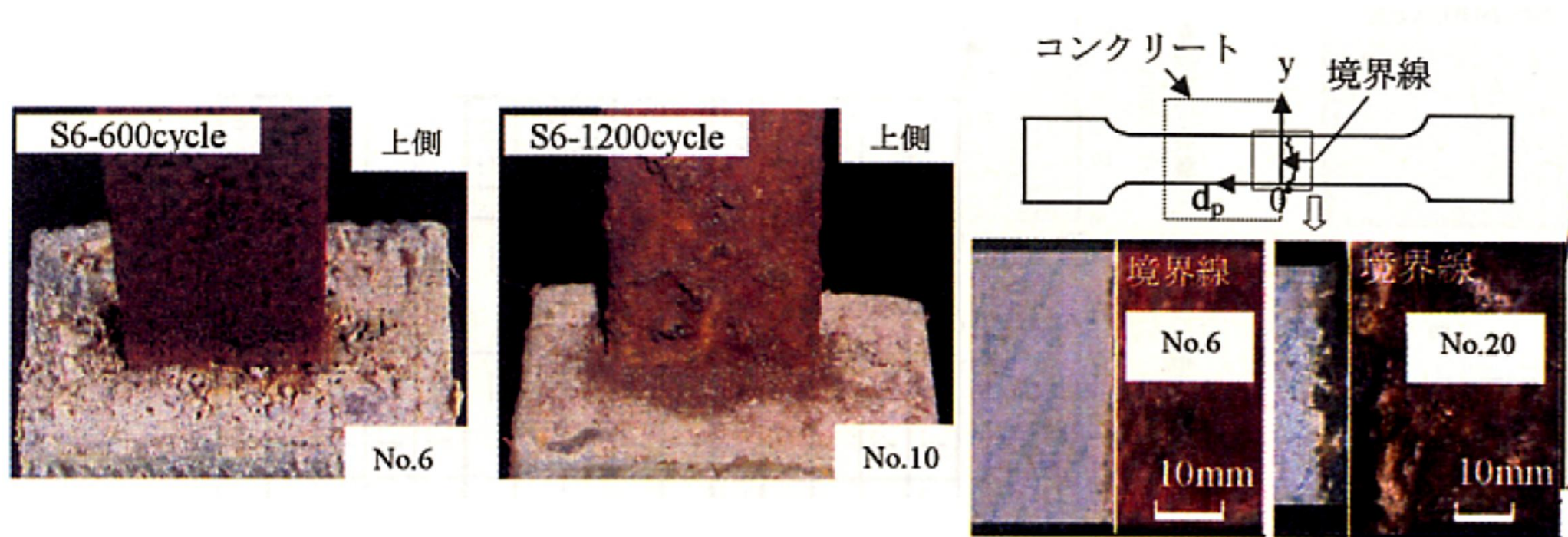
東京駅中央線を支持する鋼製橋脚



那覇市内橋脚基部の腐食状況



鋼製橋脚柱埋込み部の腐食事例



「境界部近傍の一部の領域に通気差系マクロセル腐食が生じている. その他の領域については, ミクロセルによる全面腐食が生じている. 」

129

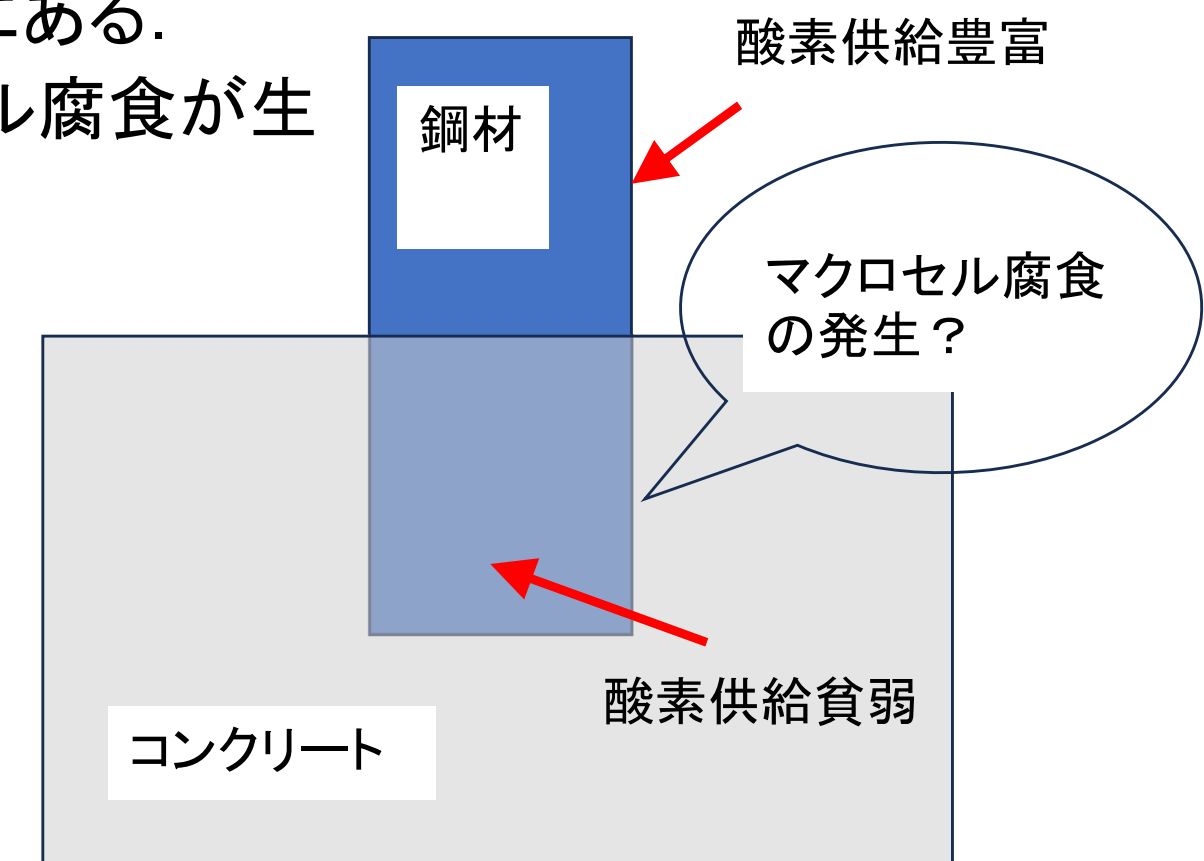
異なる設置環境における暴露試験

- 鋼とコンクリートの付着が良好な要素試験体を作製し, これを3種類の異なる環境に一定期間設置し, 接触面の錆の発生や進展の状況を確認した.

131

鋼とコンクリートの接触面の腐食

- コンクリートと接する鋼材は腐食しにくい.
- コンクリート中の鋼材には防食が不要
- 接触面には雨水や酸素などが侵入する隙間があり, 腐食環境にある.
- 酸素濃淡のためマクロセル腐食が生じる.

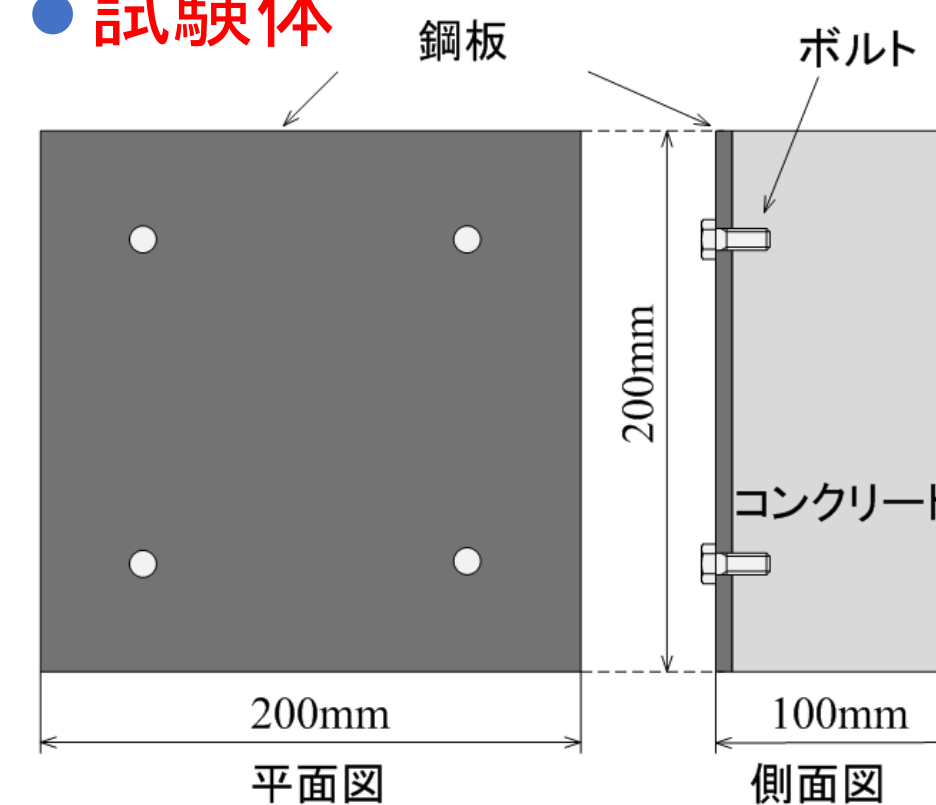


130

異なる設置環境における暴露試験

- 鋼板の上からコンクリートを打設することで作製.
- 鋼板のコンクリートに接する面の防錆塗装などを除去.
- 鋼板がコンクリートから容易に外れないようにするためにボルトを取り付ける.

試験体

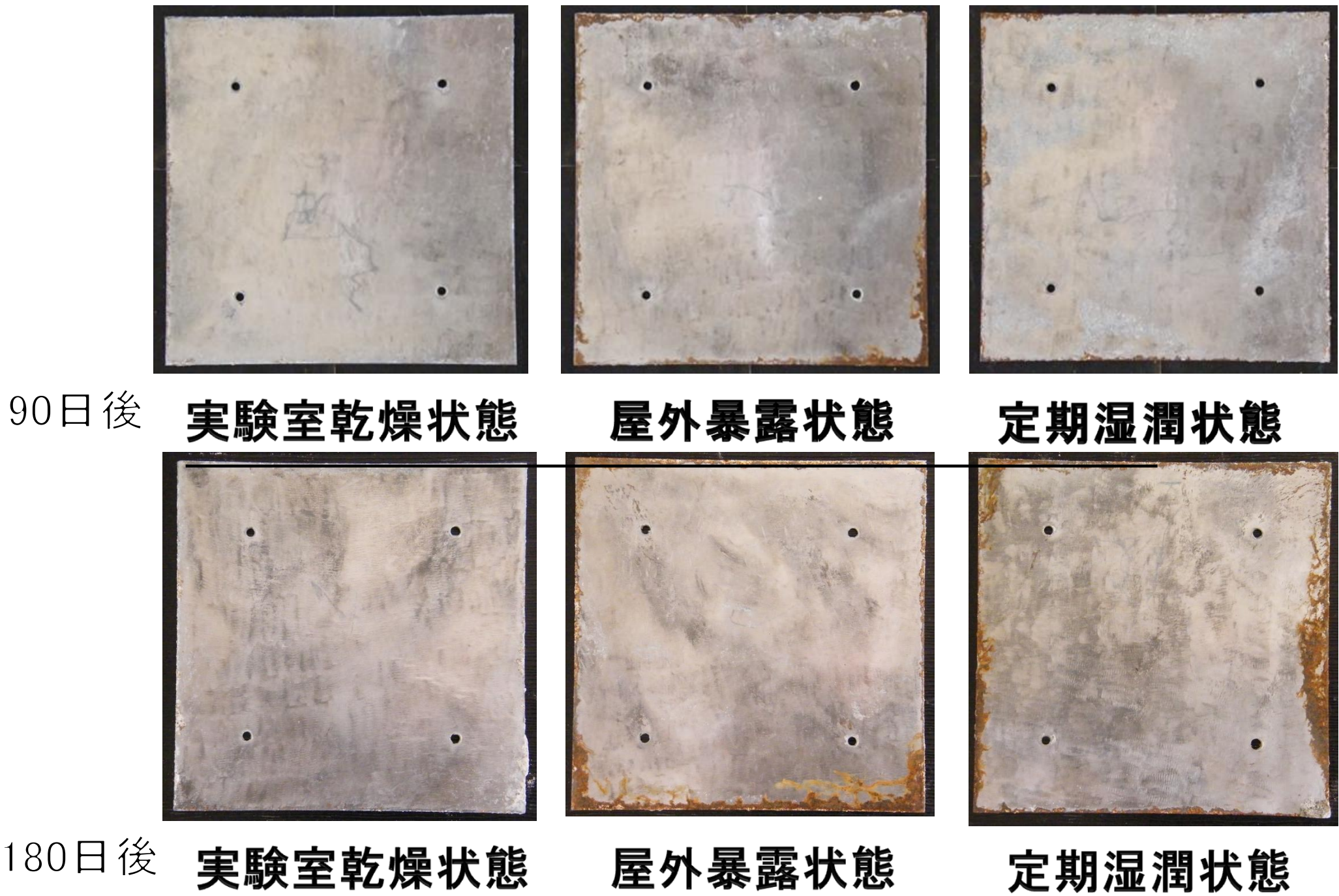


132

異なる設置環境における暴露試験

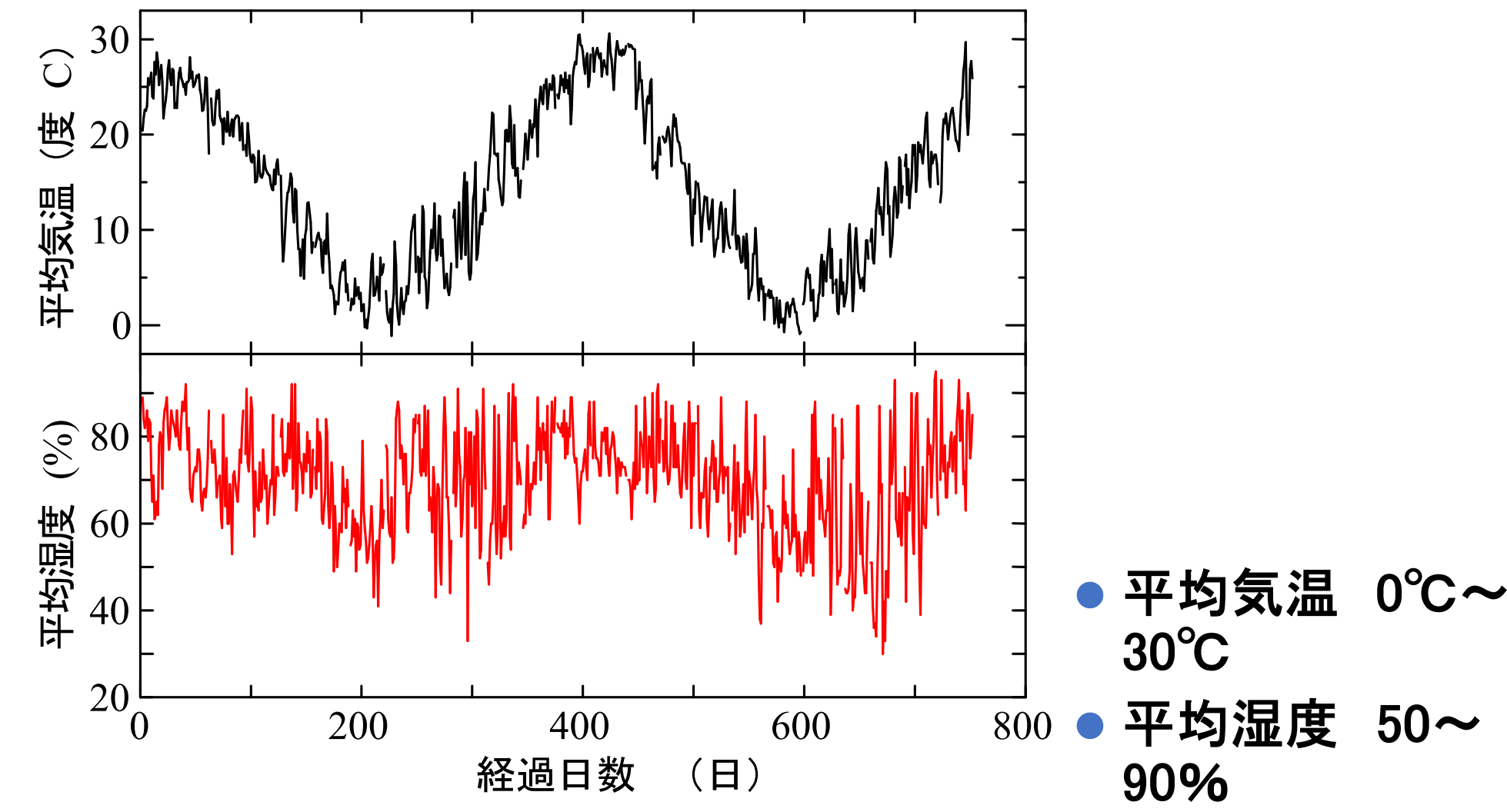


- 3種類の設置環境ごとに試験体を12体作製。
- 打設から、90日、180日、1年、2年後にそれぞれの設置環境で3体ずつ鋼板を取り外し、腐食の状況を確認する。

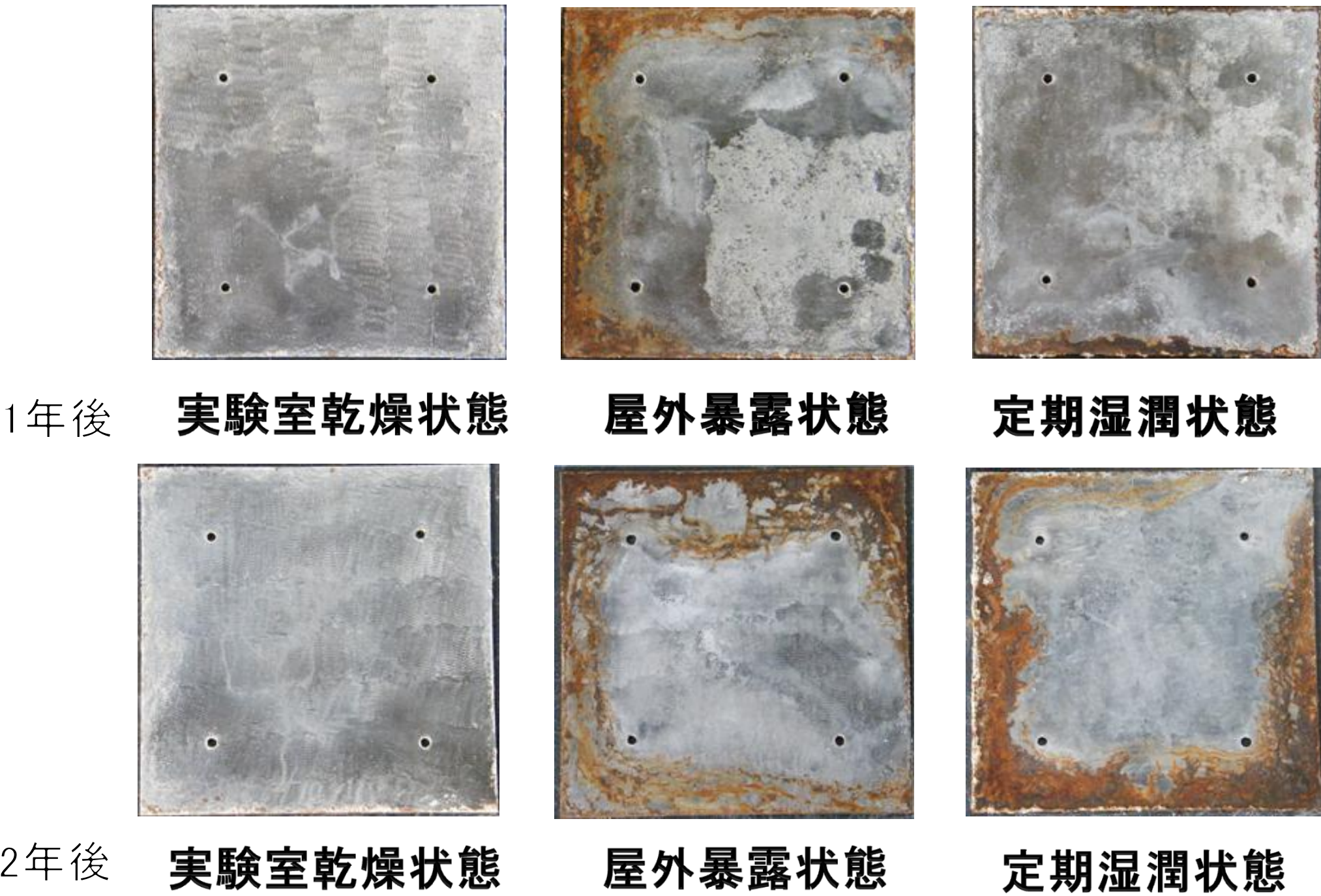


設置環境および暴露期間ごとの鋼板の腐食状況

異なる設置環境における暴露試験

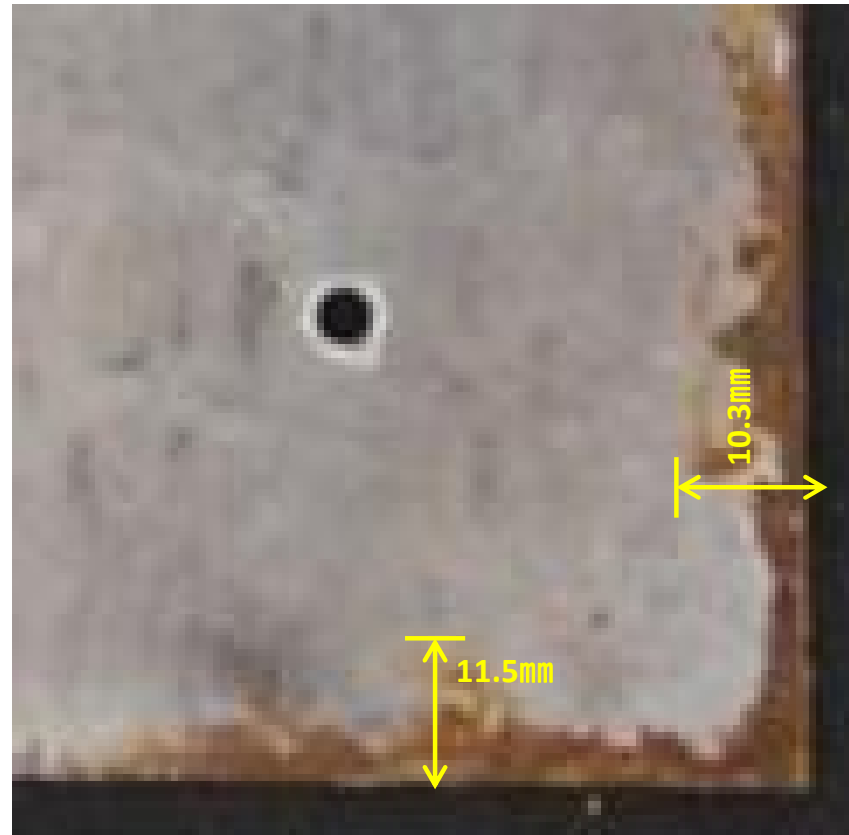


暴露期間の宇都宮市における平均気温と平均湿度の状況



設置環境および暴露期間ごとの鋼板の腐食状況

腐食進展の評価

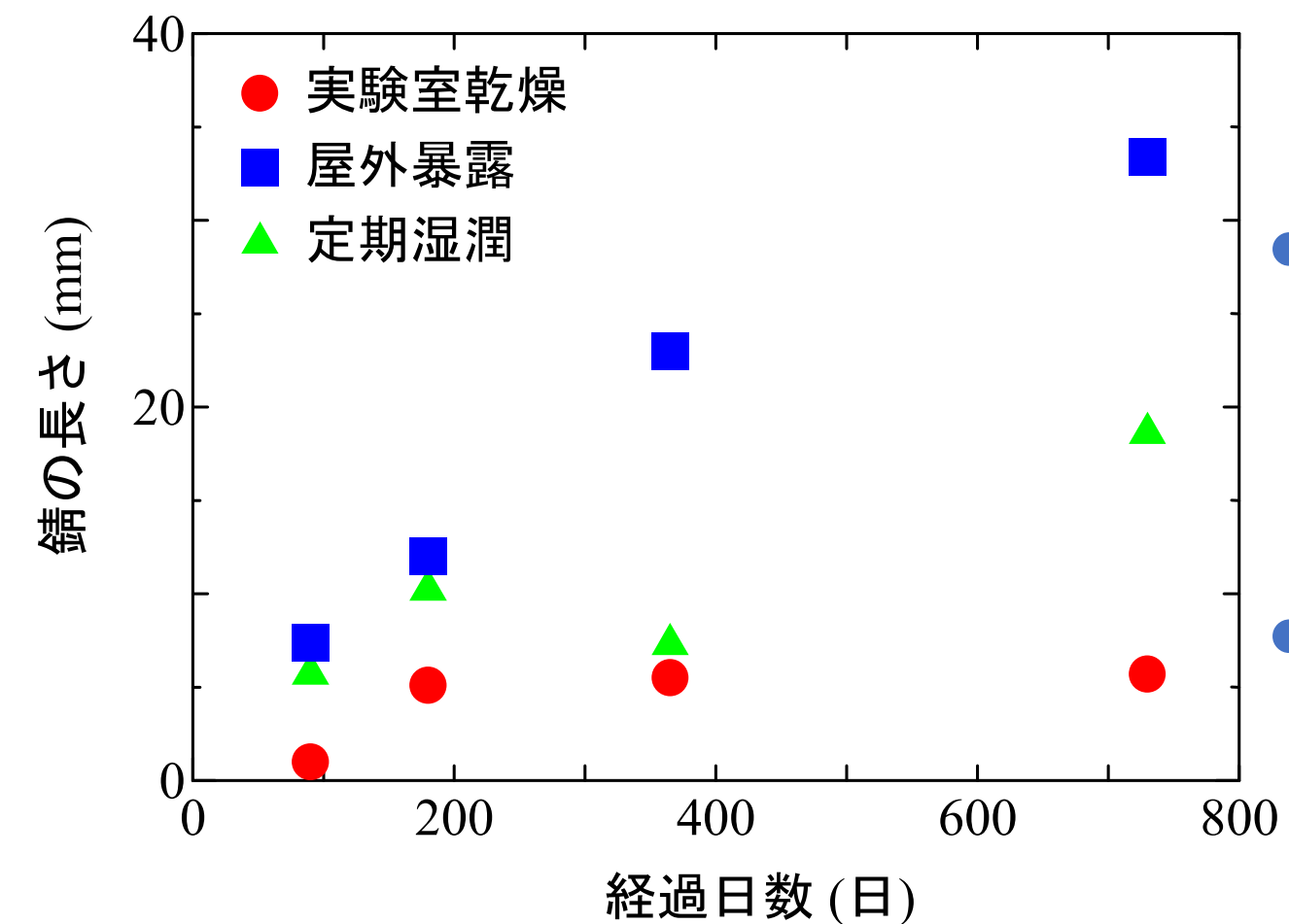


鋼板の錆は縁から発生し、時間の経過とともに中央部分に腐食範囲が広がっている。

1辺における腐食範囲および中性化範囲が縁から中央に向かって最も進行している箇所の長さを計測した。

137

異なる設置環境における暴露試験



- 鋼板とコンクリートの付着が良好であっても、設置環境に腐食因子が存在すれば、接触面に腐食が発生・進展する。
- 接触面の隙間は0.03mm以下

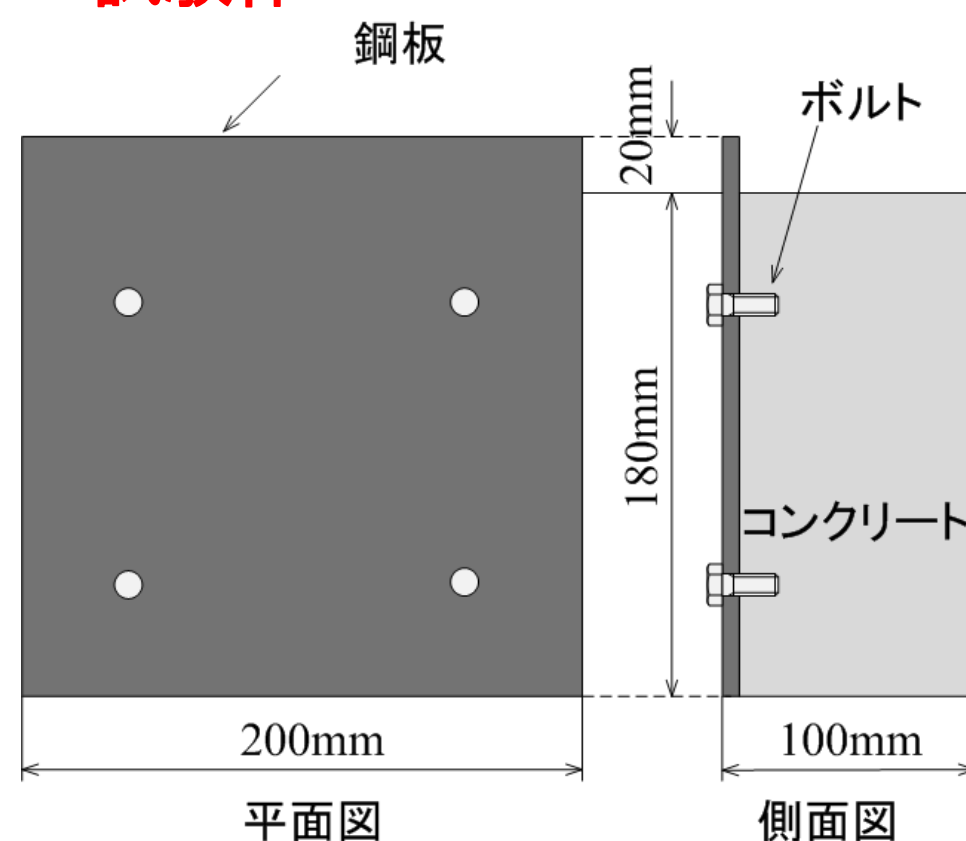
錆の長さと経過日数の関係

138

接触面の付着の有無に着目した暴露試験

- 接触面の付着の程度が、**鋼板の腐食**に及ぼす影響を確認。
- 接触面の**コンクリートの中性化**の進展状況を確認。

試験体



- コンクリートブロックの1辺を鋼板から20mm小さく作製。
- 試験体の半分は、打設後1か月で鋼板を取り外し、再度コンクリートと接触させる。
- 接触面の付着の有無に着目。

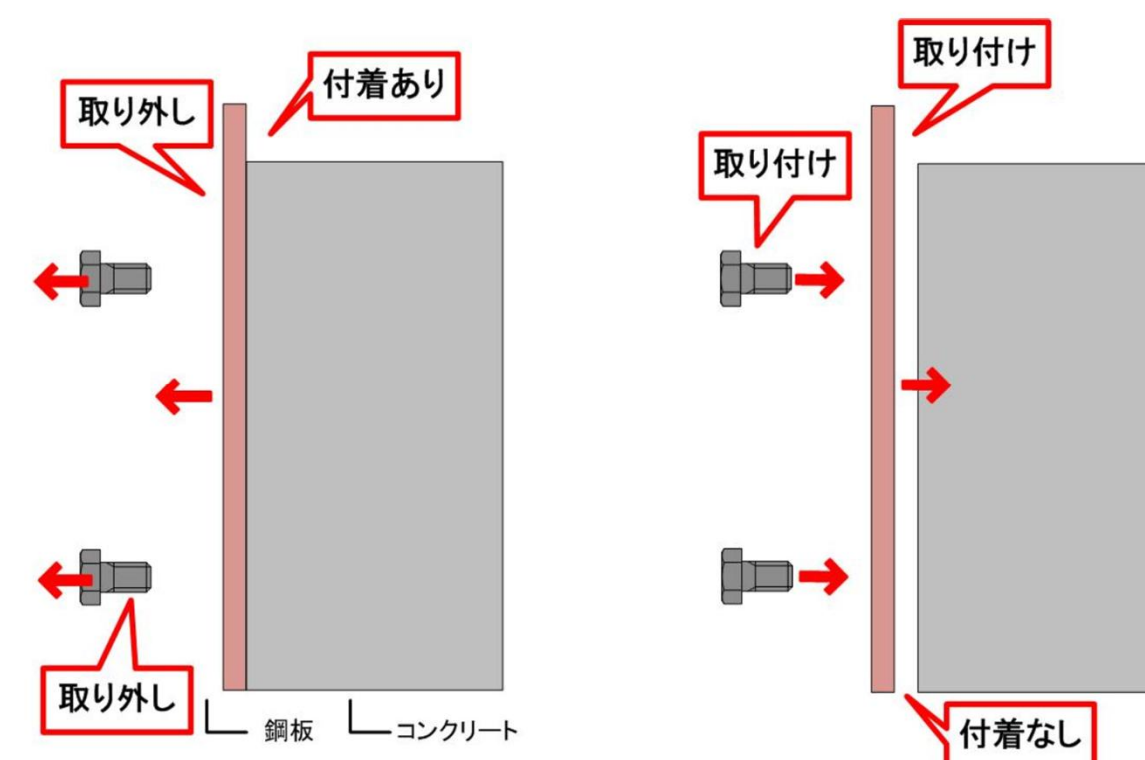
界面に付着のない試験体
接触面の隙間0.3~0.5mm程度

139

接触面の付着の有無に着目した暴露試験

設置環境

- 実験室乾燥状態
- 屋外暴露状態

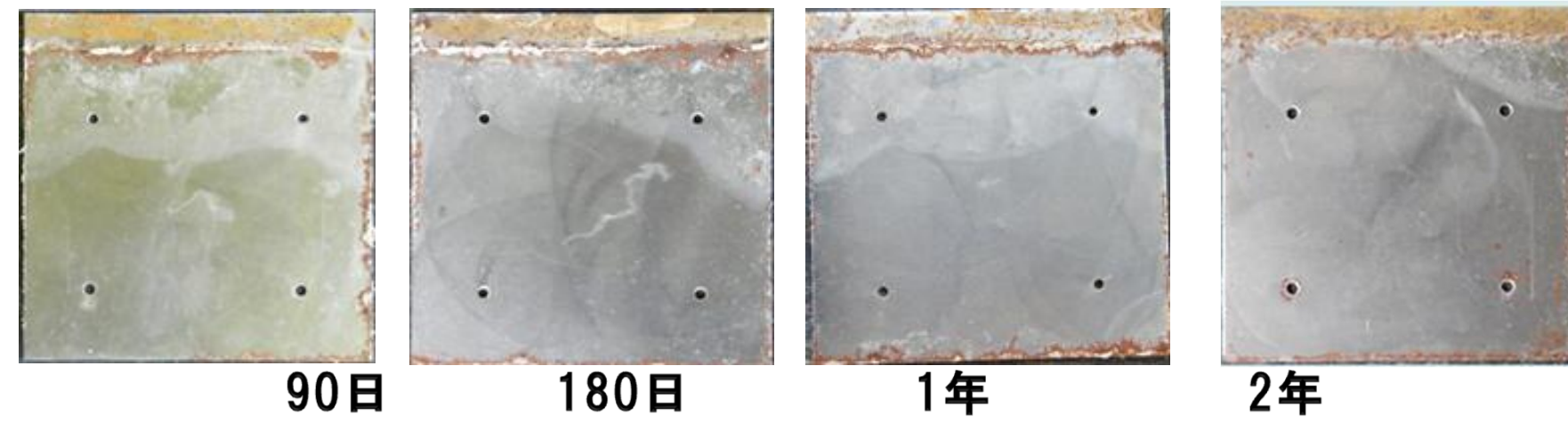


付着のない試験体

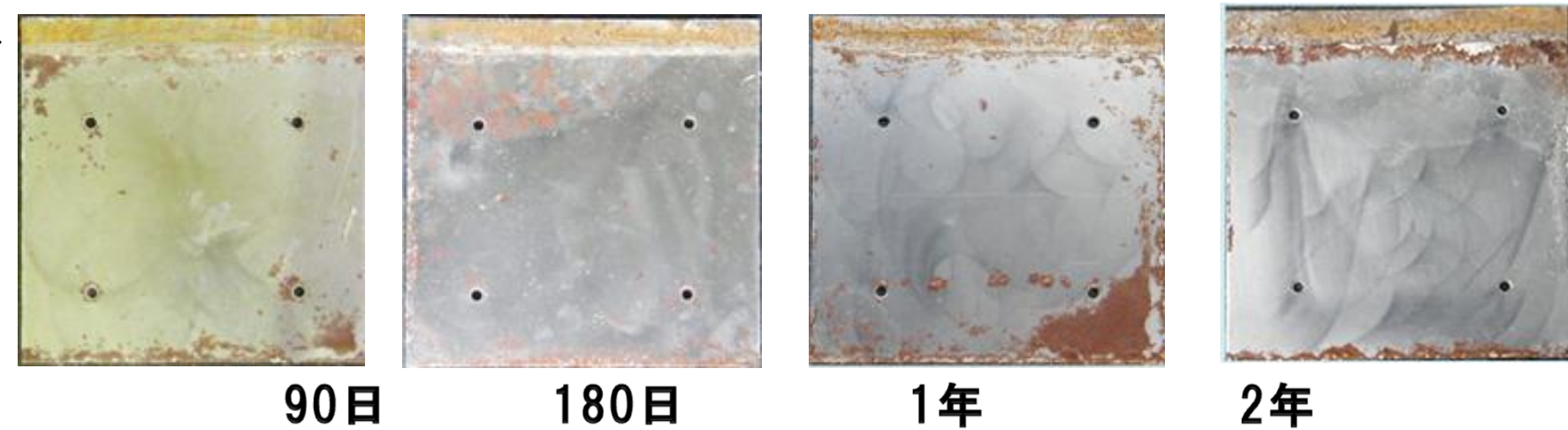
140

実験室乾燥状態

付着あり



付着なし

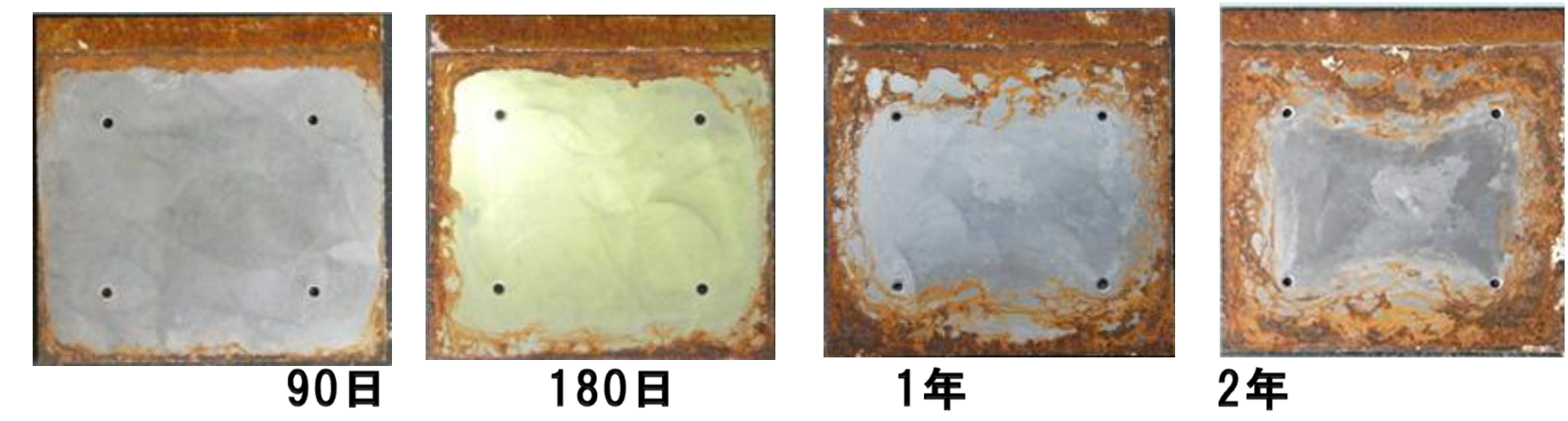


暴露期間ごとの鋼板の腐食状況

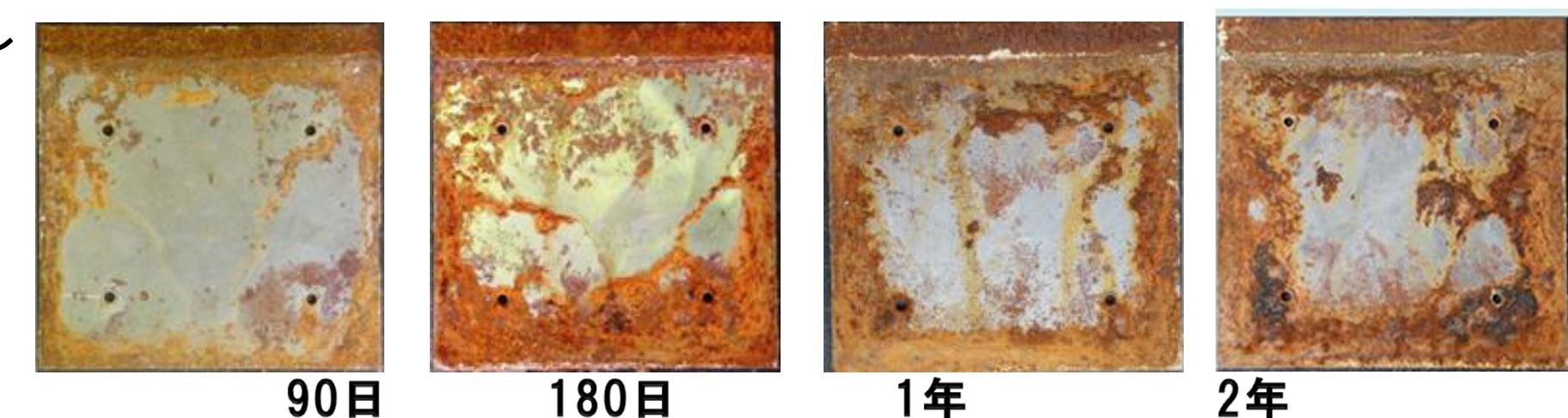
141

屋外暴露状態

付着あり



付着なし

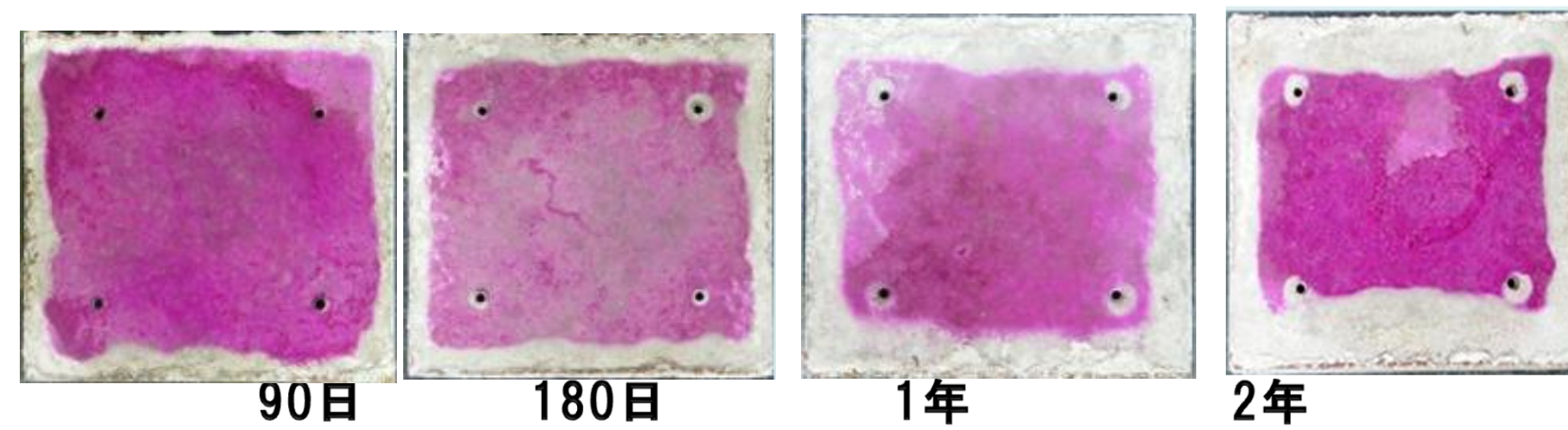


暴露期間ごとの鋼板の腐食状況

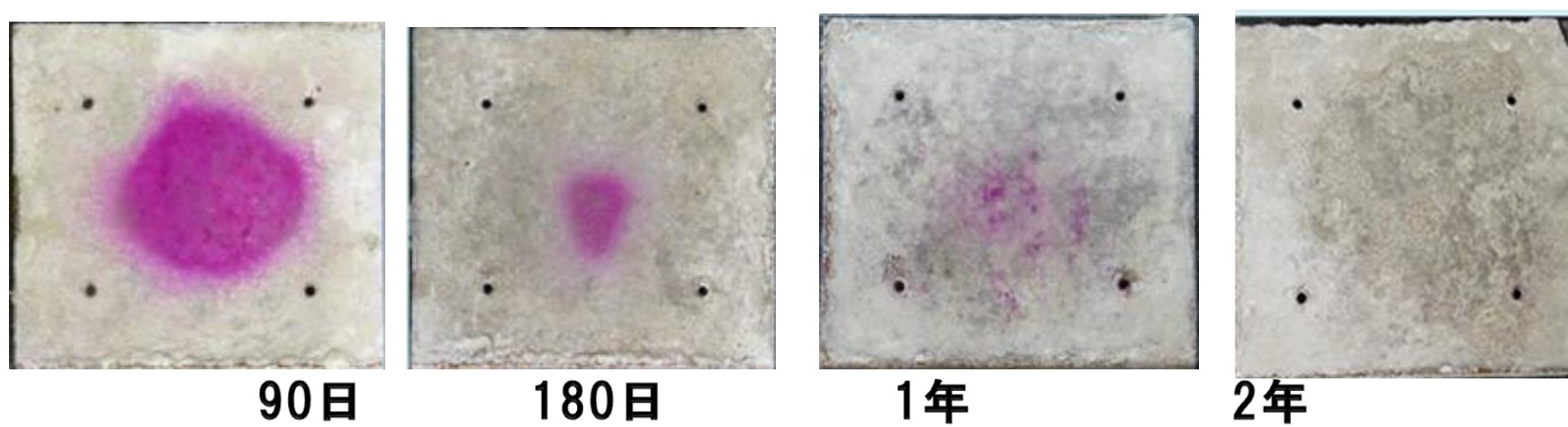
142

実験室乾燥状態

付着あり



付着なし

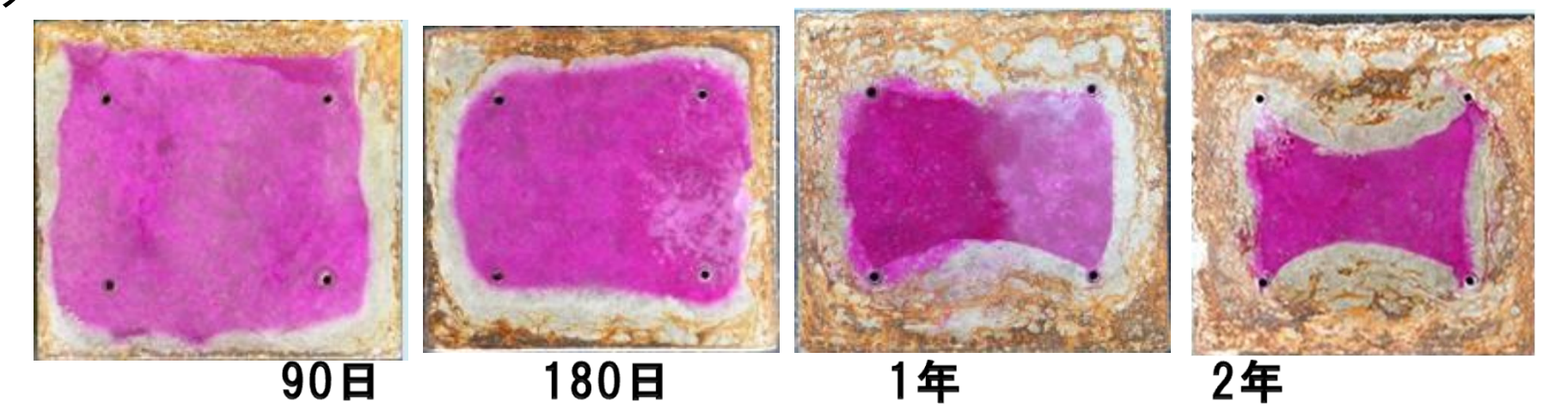


暴露期間ごとのコンクリート接触面の中性化進展状況

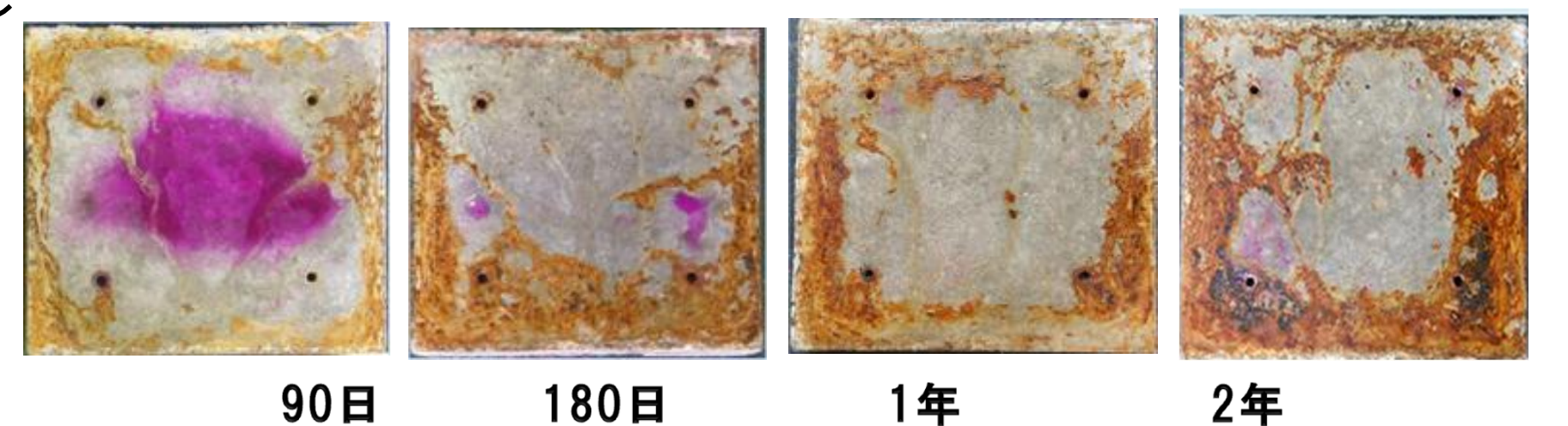
143

屋外暴露状態

付着あり



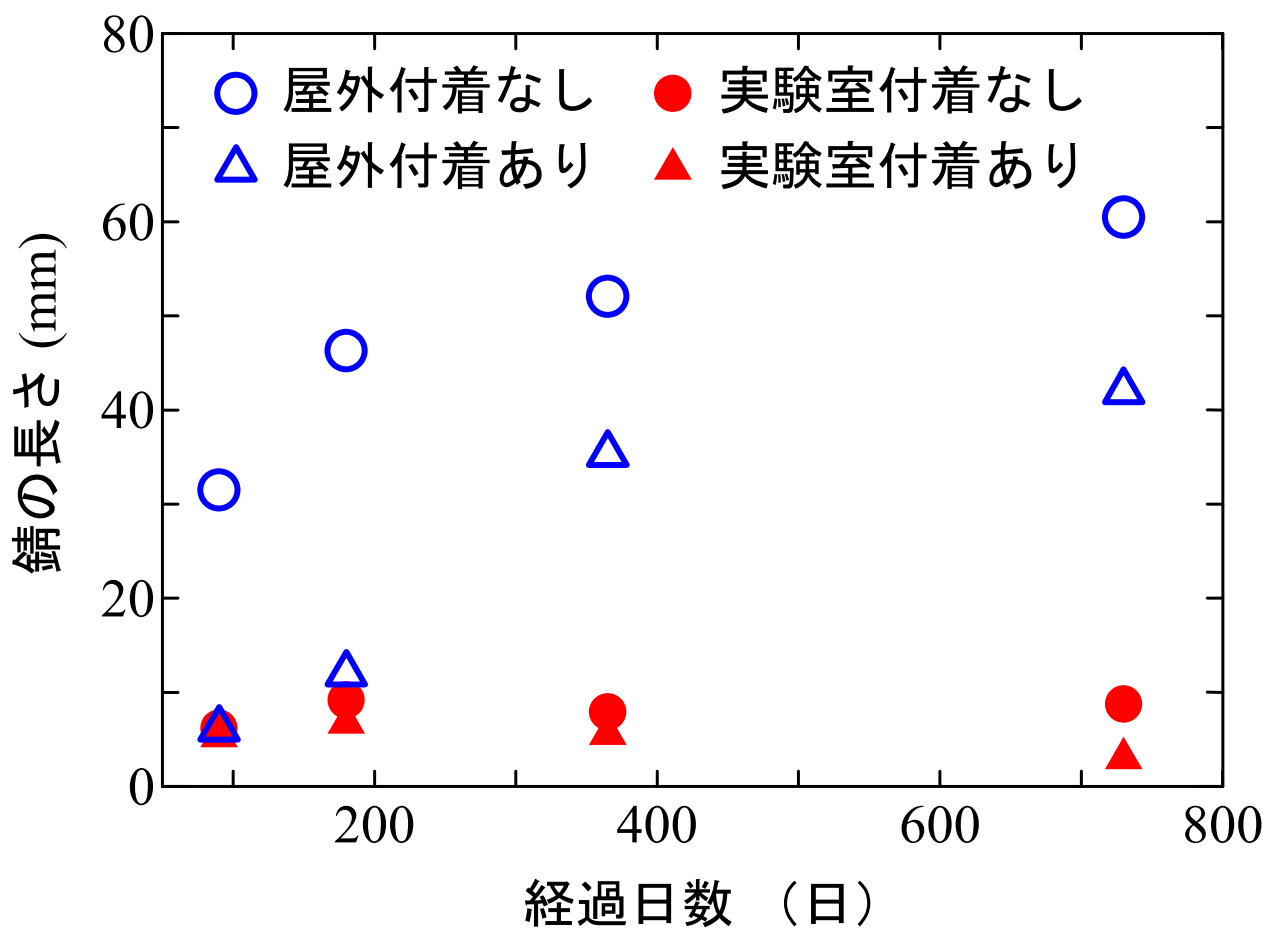
付着なし



暴露期間ごとのコンクリート接触面の中性化進展状況

144

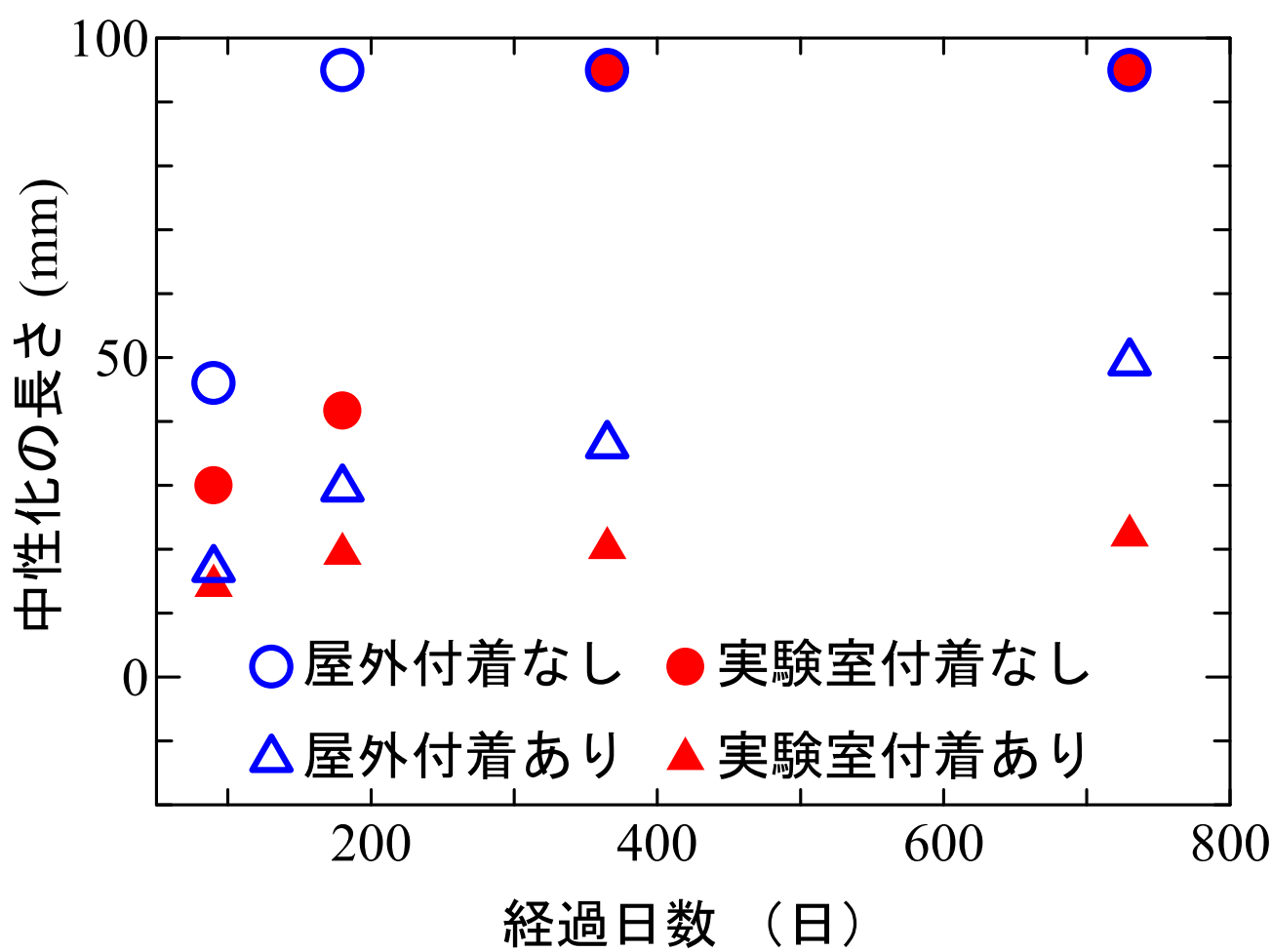
接触面の付着の有無に着目した暴露試験



鍍の長さと経過日数の関係

- 接触面の腐食の発生・進展は、鋼とコンクリートの付着の有無よりも設置環境の影響を受ける。

接触面の付着の有無に着目した暴露試験



コンクリートの中性化の長さと経過日数の関係

- 接触面のコンクリートの中性化の進展には付着の影響が大きい。

接触面の付着の有無に着目した暴露試験

- 腐食状況



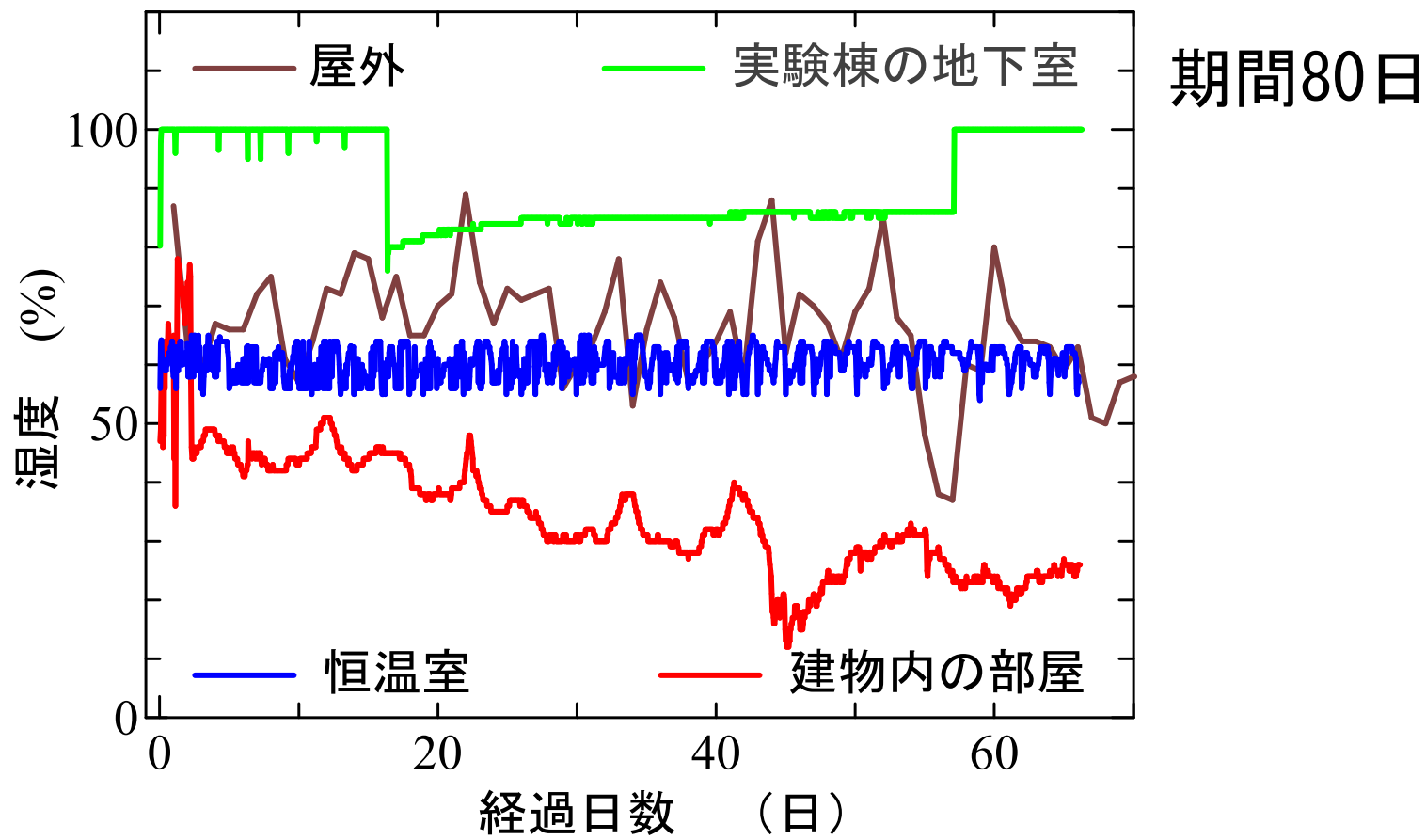
↑
コンクリートに
接していない部分
↓
コンクリートに
接する部分

屋外暴露状態（1年後）付着あり

- コンクリートに接していない部分と接する部分の腐食状態に大きな差がない。
- 境界部よりも内部がより激しく腐食するマクロセル腐食の状況は観察されていない。

設置環境の湿度の差異に着目した試験

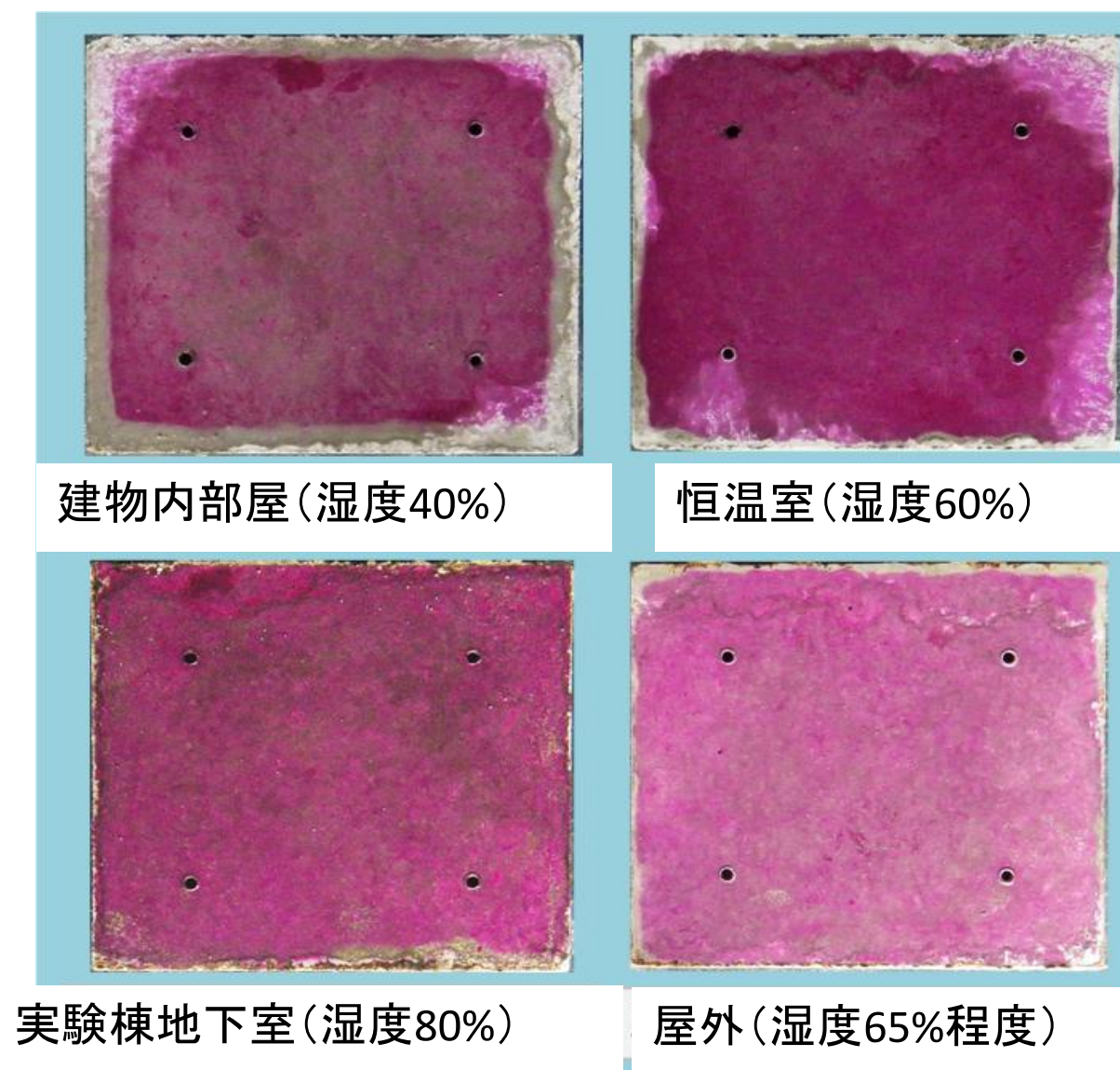
- 湿度が接触面のコンクリートの中性化に及ぼす影響を確認。
- 設置環境の湿度は、40%、60%、80%および屋外とする。



設置環境ごとに湿度と経過日数の関係

接触面の中性化と湿度の関係

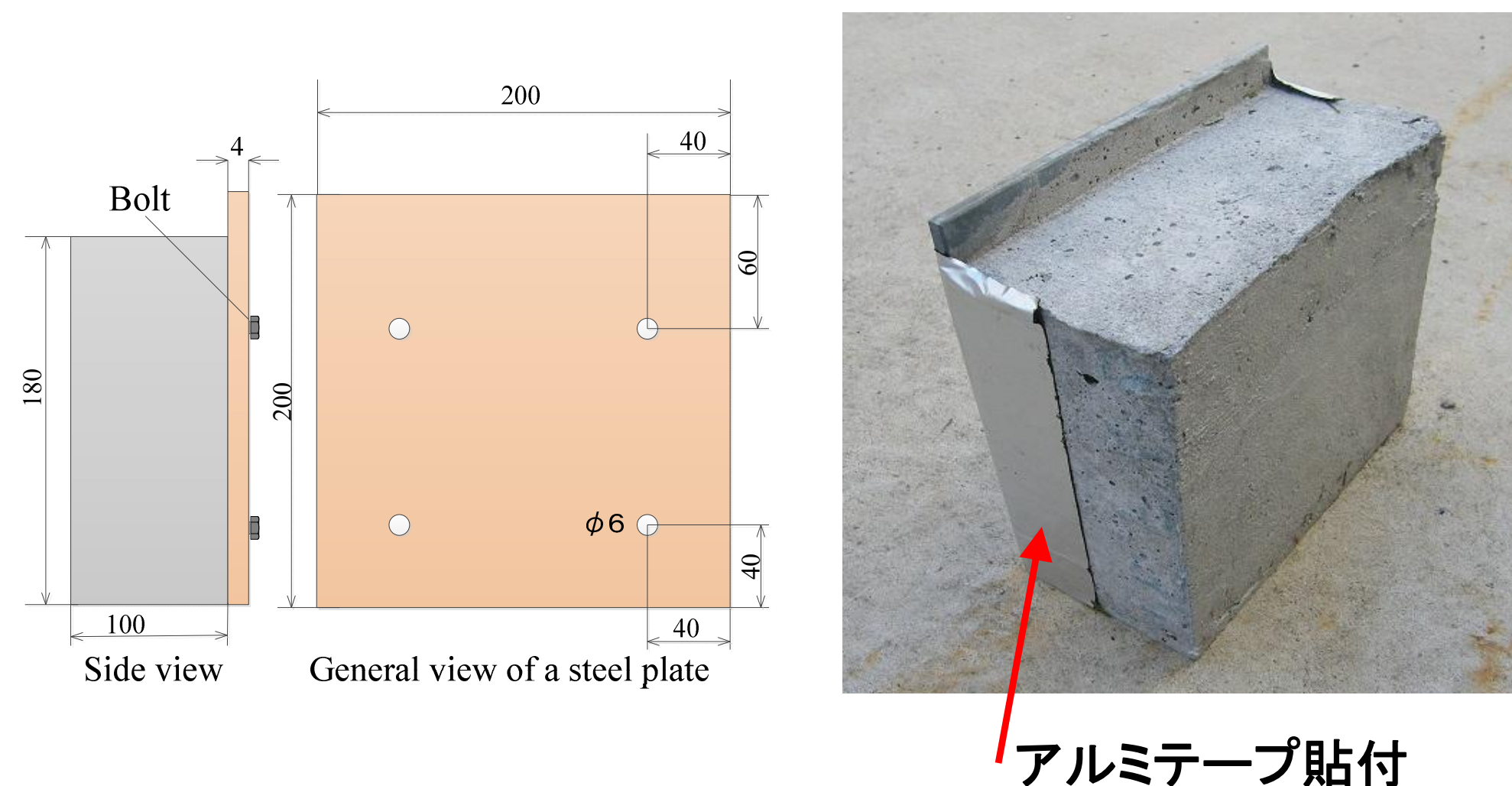
- 湿度40～80%で80日間の暴露試験
- 湿度が低い環境に置いた試験体ほど接触面コンクリートの中性化範囲が大きい。



149

防錆塗装の有無に着目した試験

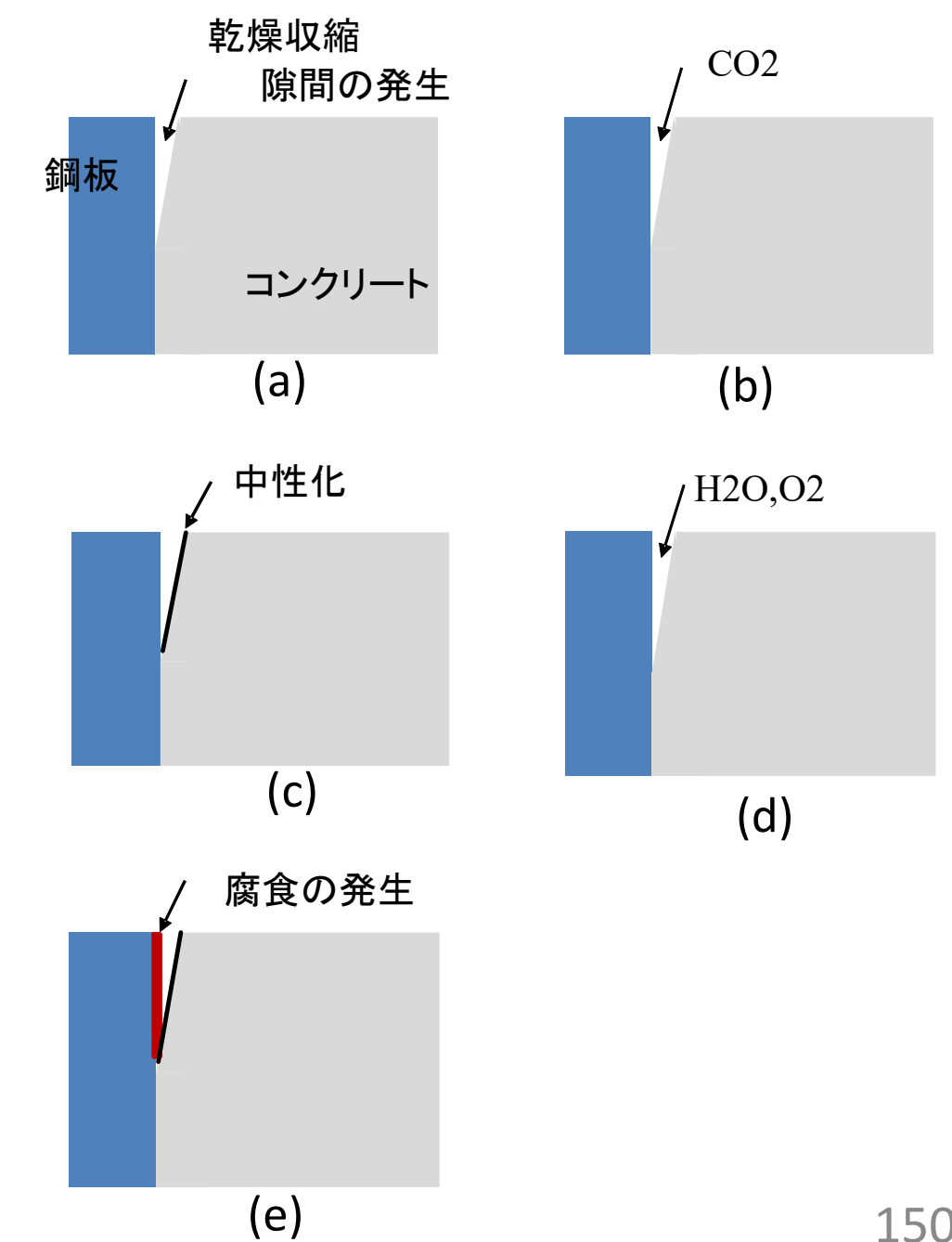
- 鋼板の防錆塗装の有無が腐食に及ぼす影響の確認
- 鋼板の表面に無機ジンクリッチペイントを塗布



151

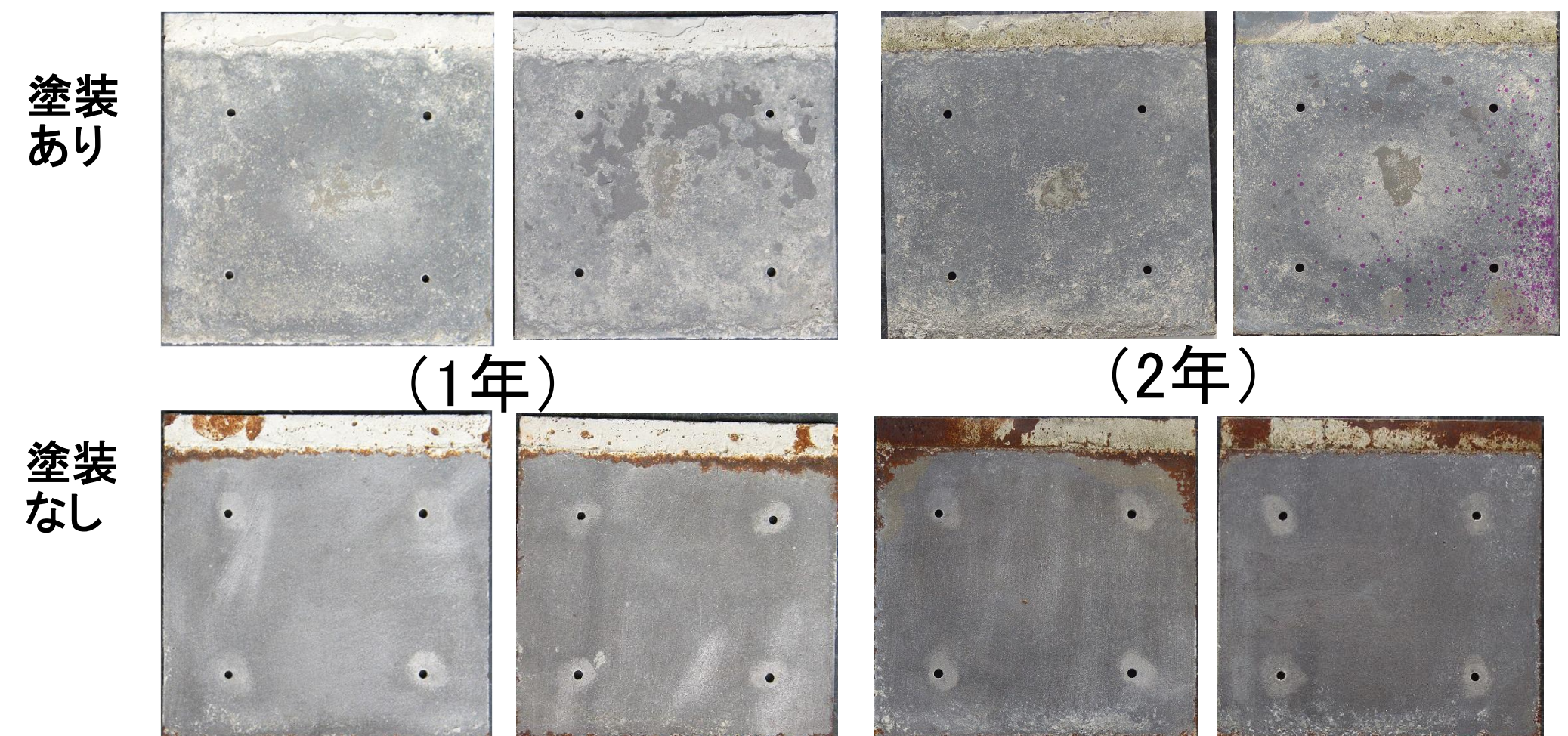
鋼コンクリート接触面の腐食メカニズム

- コンクリートの乾燥収縮による隙間の発生
- 二酸化炭素の侵入
- 接触面コンクリートの中性化
- 腐食因子の侵入
- 腐食の発生



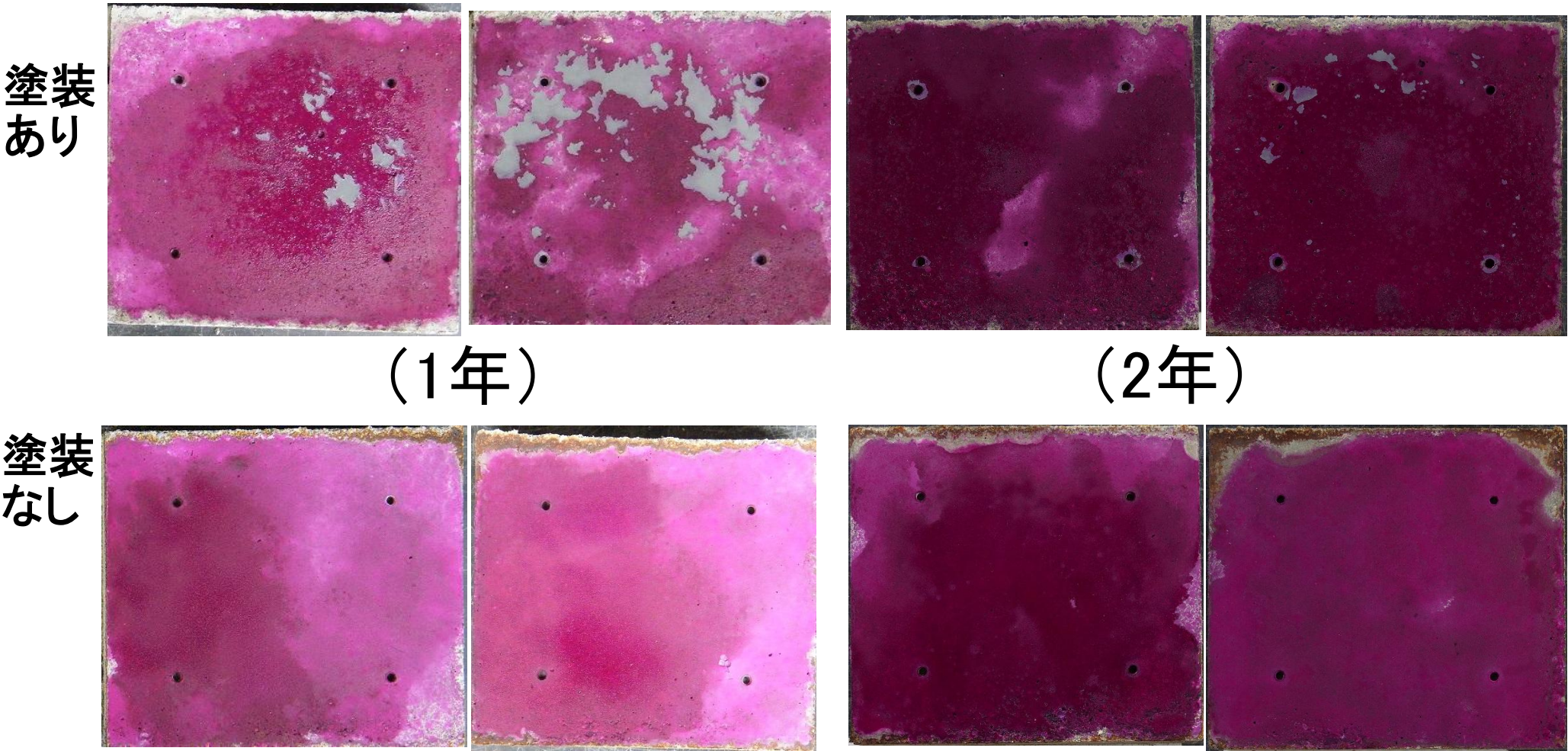
150

鋼板の腐食状況



152

接触面コンクリートの中性化状況



鋼コンクリート接触面の垂直方向の付着強度に関する実験



鋼製柱基部

隙間の形成，塗膜の剥離

まとめ

- 1. 防錆塗装のない鋼板とコンクリート接触面に良好な付着があっても暴露期間が長くなると接触面は腐食する. その場合の鋼コンクリート接触面鋼板の腐食の発生・進展過程を推定した.
- 2. 付着を有する鋼コンクリート接触面において, 設置環境の湿度が低いほど中性化範囲は広くなる.
- 3. 防錆塗装を有する場合, 暴露期間2年の範囲では, 鋼コンクリート接触面の鋼板に腐食は見られない.
- 4. 付着を有する鋼コンクリート接触面が剥がれた場合, 鋼板の防錆塗装の剥がれが確認された.

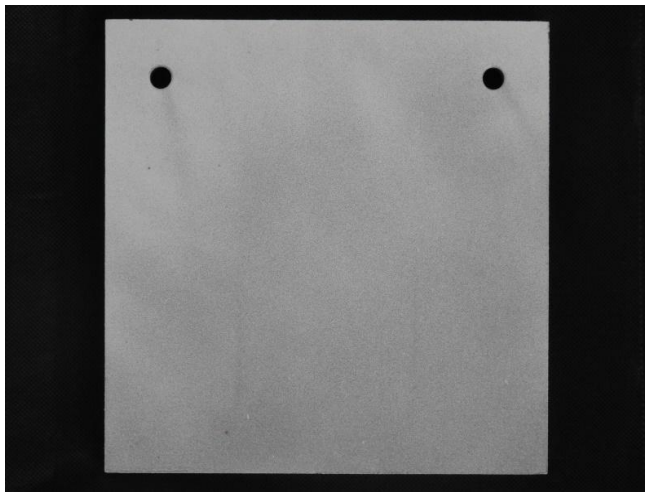
コンクリートの自然付着によって コンクリートと鋼材が付着している試験体を用いて, 塗装鋼材からコンクリートが剥がれるときの付着強度及び鋼材表面状態の確認した.



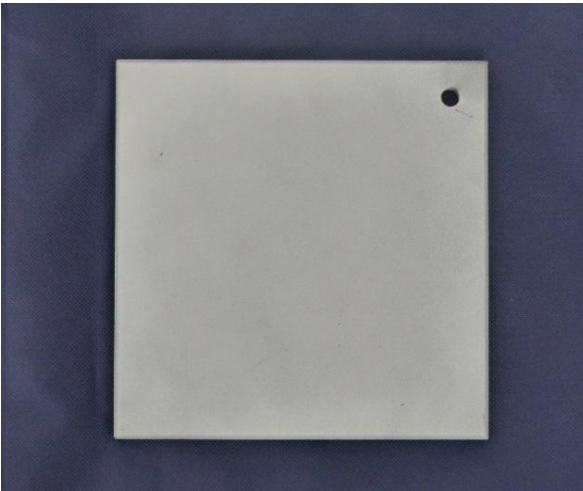
鋼板の塗装状態



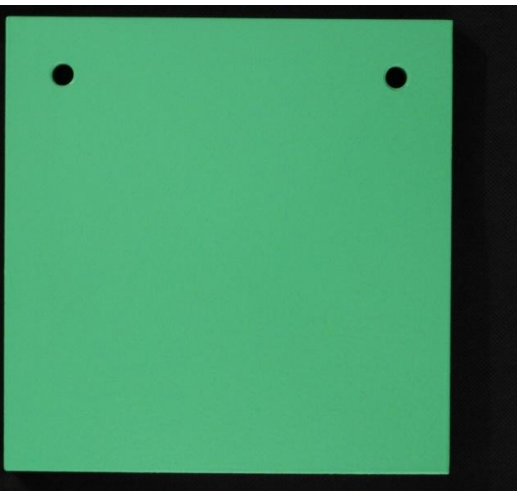
無機ジンク鋼板



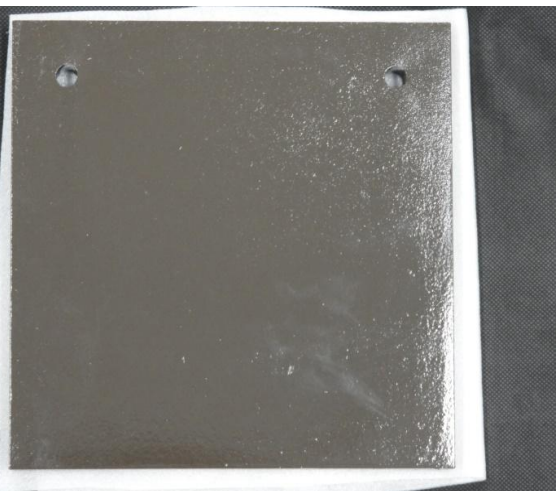
ミストコート鋼板



2016年



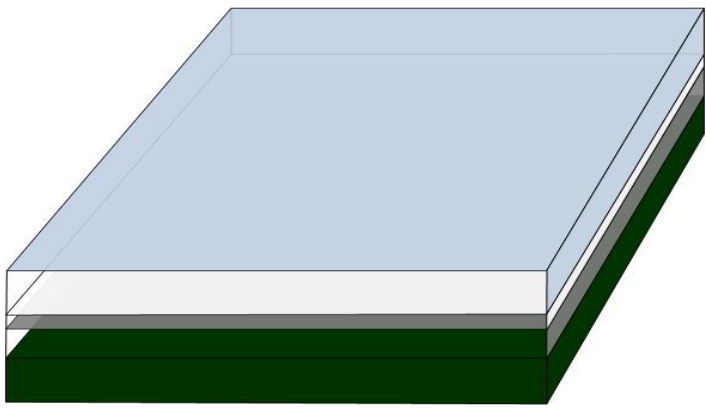
2017年
フッ素樹脂鋼板



2018年

塗装鋼板の仕様

大きさ
縦200(mm)横200(mm)
厚さ12 or 16(mm)
材質 SS400

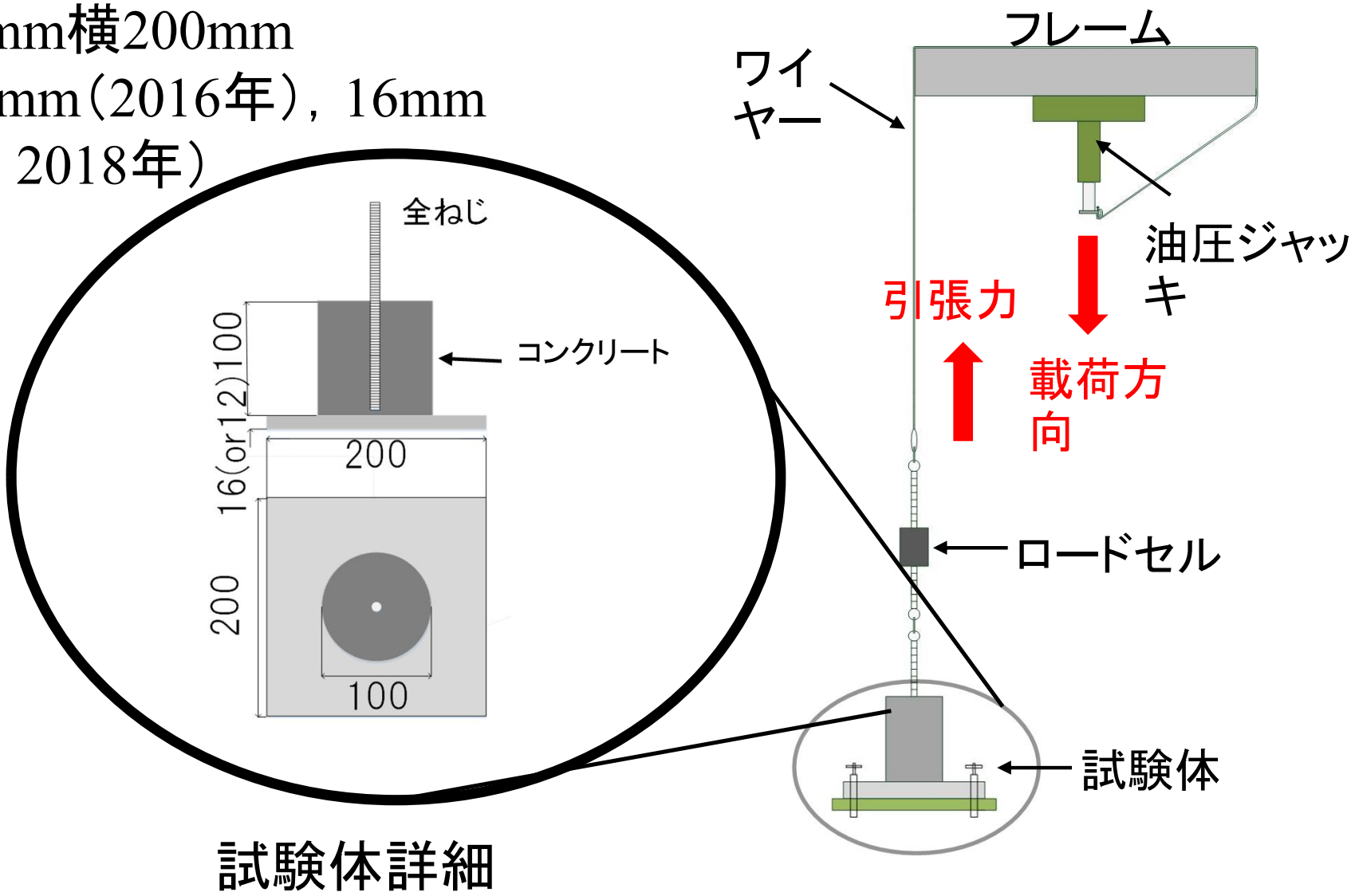


ブラスト鋼板 ISO Sa2 1/2

鋼板の種類	層目（鋼板から）	塗装の種類	目標塗膜厚（μ）
無機ジンク鋼板	1	無機ジンクリッチペイント	75
ミストコート鋼板	1	無機ジンクリッチペイント	75
	2	エポキシ樹脂塗料下塗	--
フッ素樹脂鋼板	1	無機ジンクリッチペイント	75
	2	エポキシ樹脂塗料下塗	--
	3	エポキシ樹脂塗料下塗	120
	4	フッ素樹脂塗料中塗	30
	5	フッ素樹脂塗料上塗	25

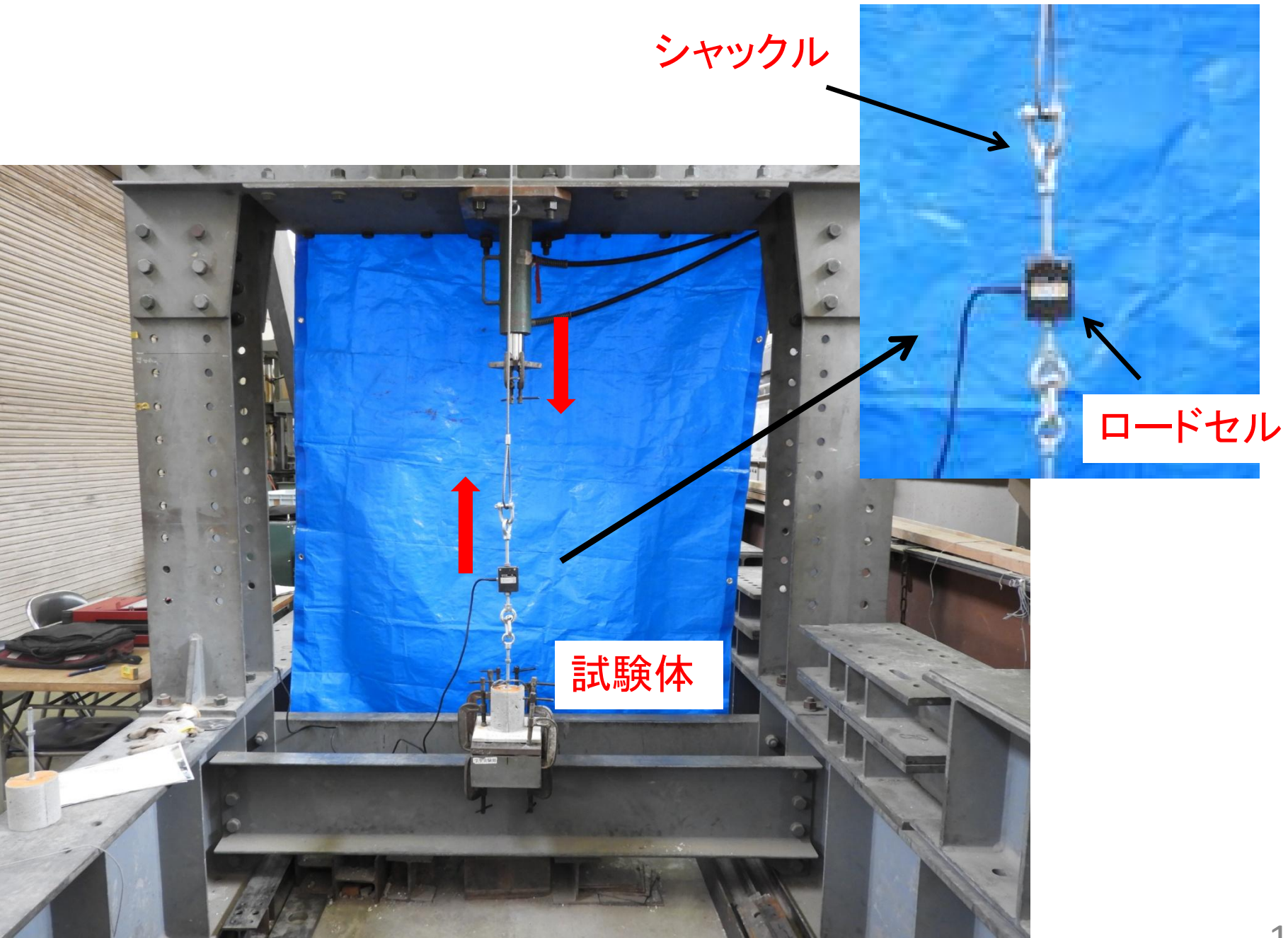
鋼コンクリートの付着試験

- 縦200mm横200mm
- 厚さ12mm(2016年), 16mm(2017, 2018年)



試験体詳細

付着試験方法



付着試験体作製状況

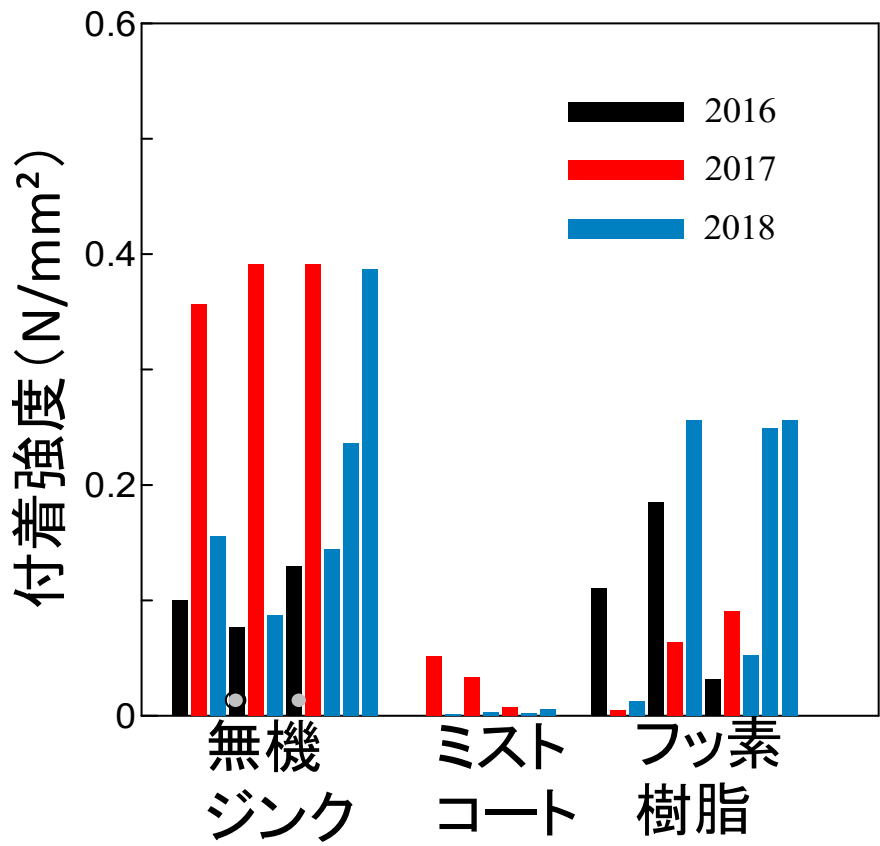


付着試験体

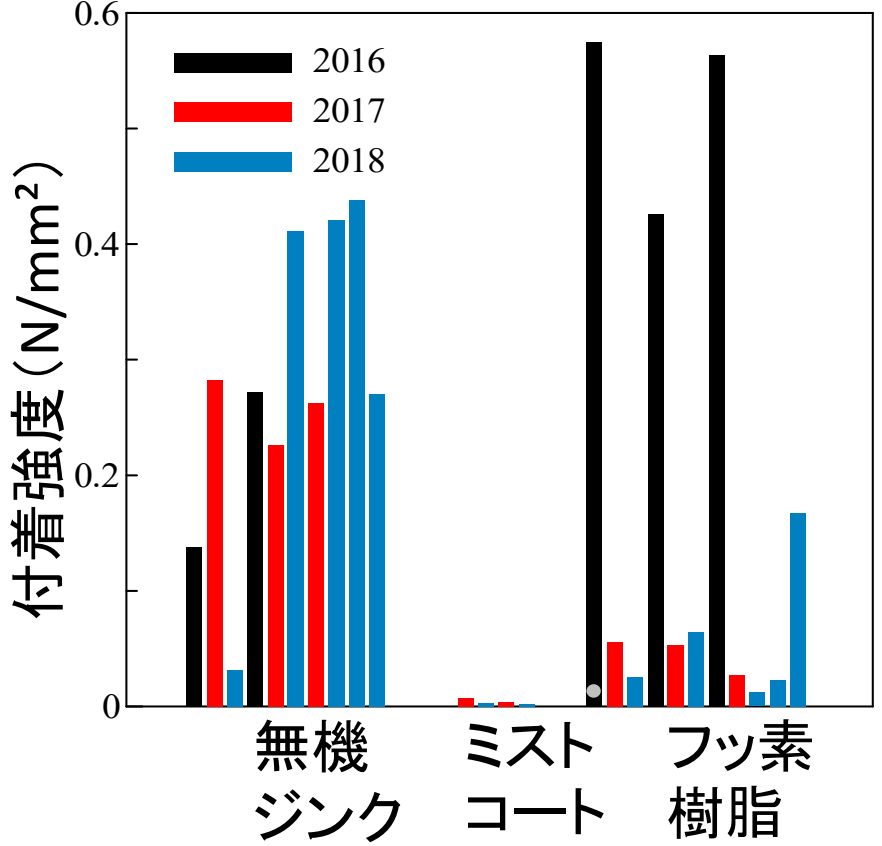


付着試験結果

・付着試験(材齢2週)



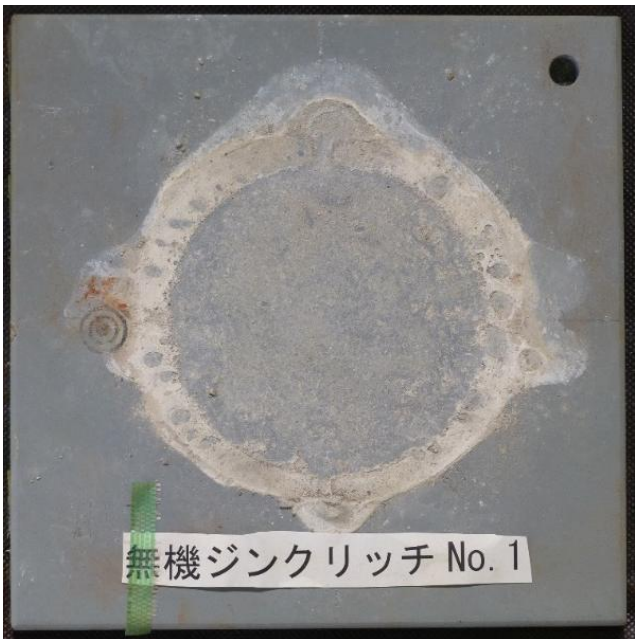
・付着試験(材齢3か月)



	圧縮強度(材齢2週)	圧縮強度(材齢3カ月)
2016年	25.0 (N/mm ²)	32.7 (N/mm ²)
2017年	29.6 (N/mm ²)	36.4 (N/mm ²)
2018年	22.7 (N/mm ²)	29.3 (N/mm ²)

試験後鋼板表面

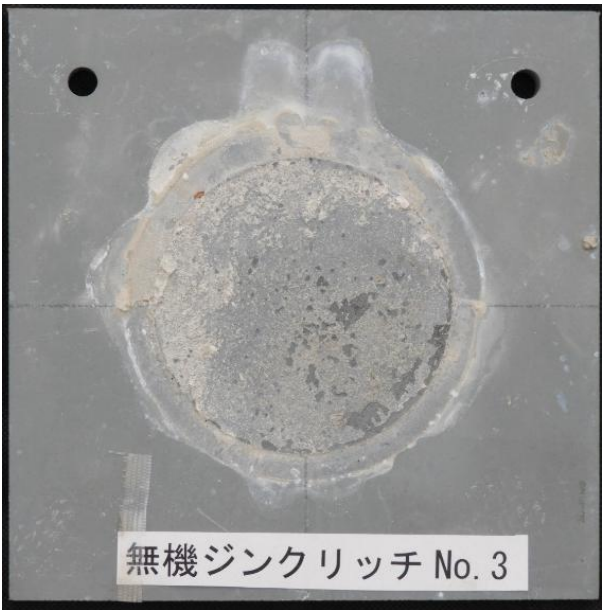
無機ジンク鋼板



2016年材齢2週



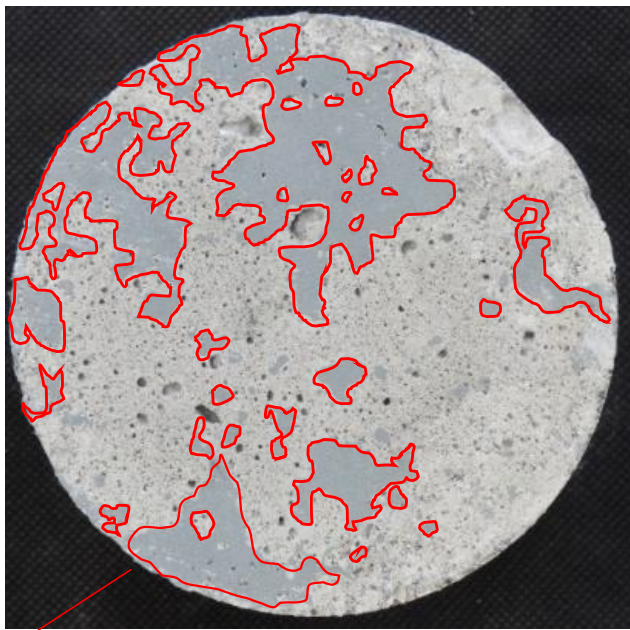
2017年材齢2週



2018年材齢2週

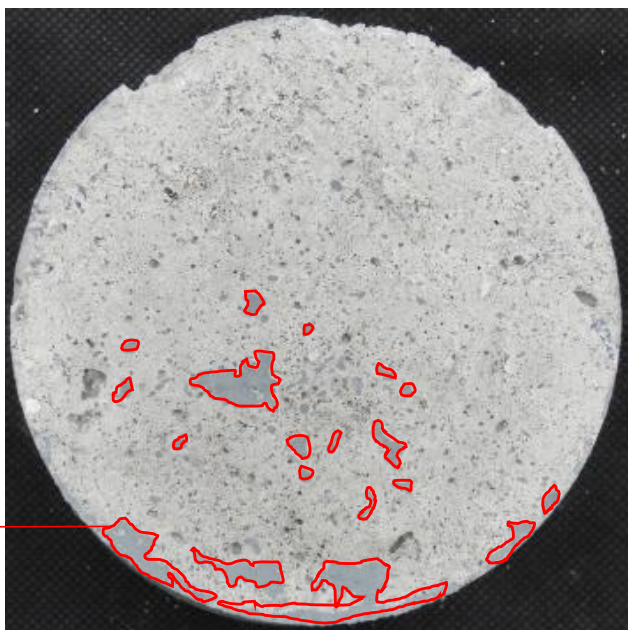
試験後コンクリート表面

無機ジンク鋼板



2017年材齢2週

塗膜の剥がれあり



2018年材齢2週

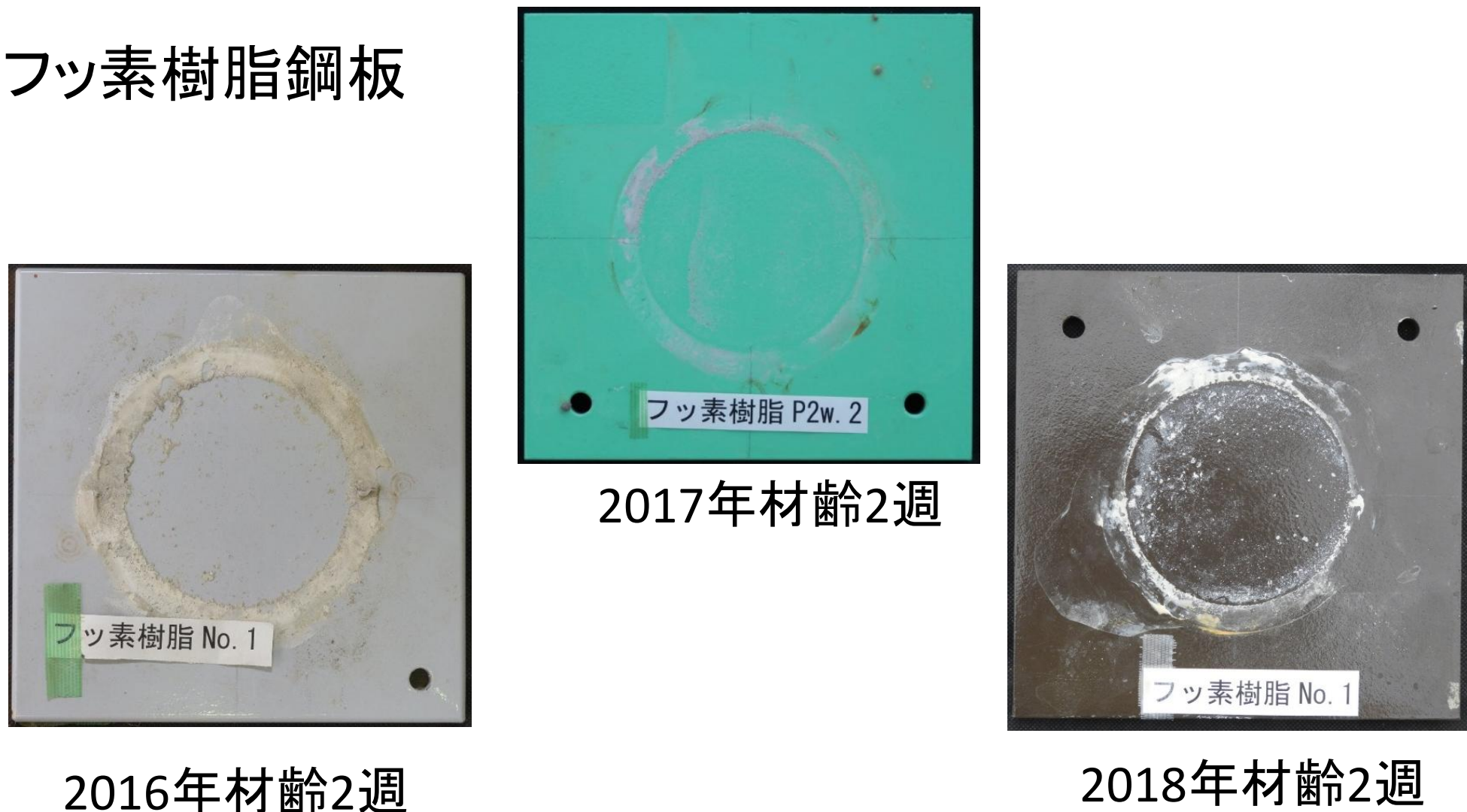
試験後鋼板表面

ミストコート鋼板

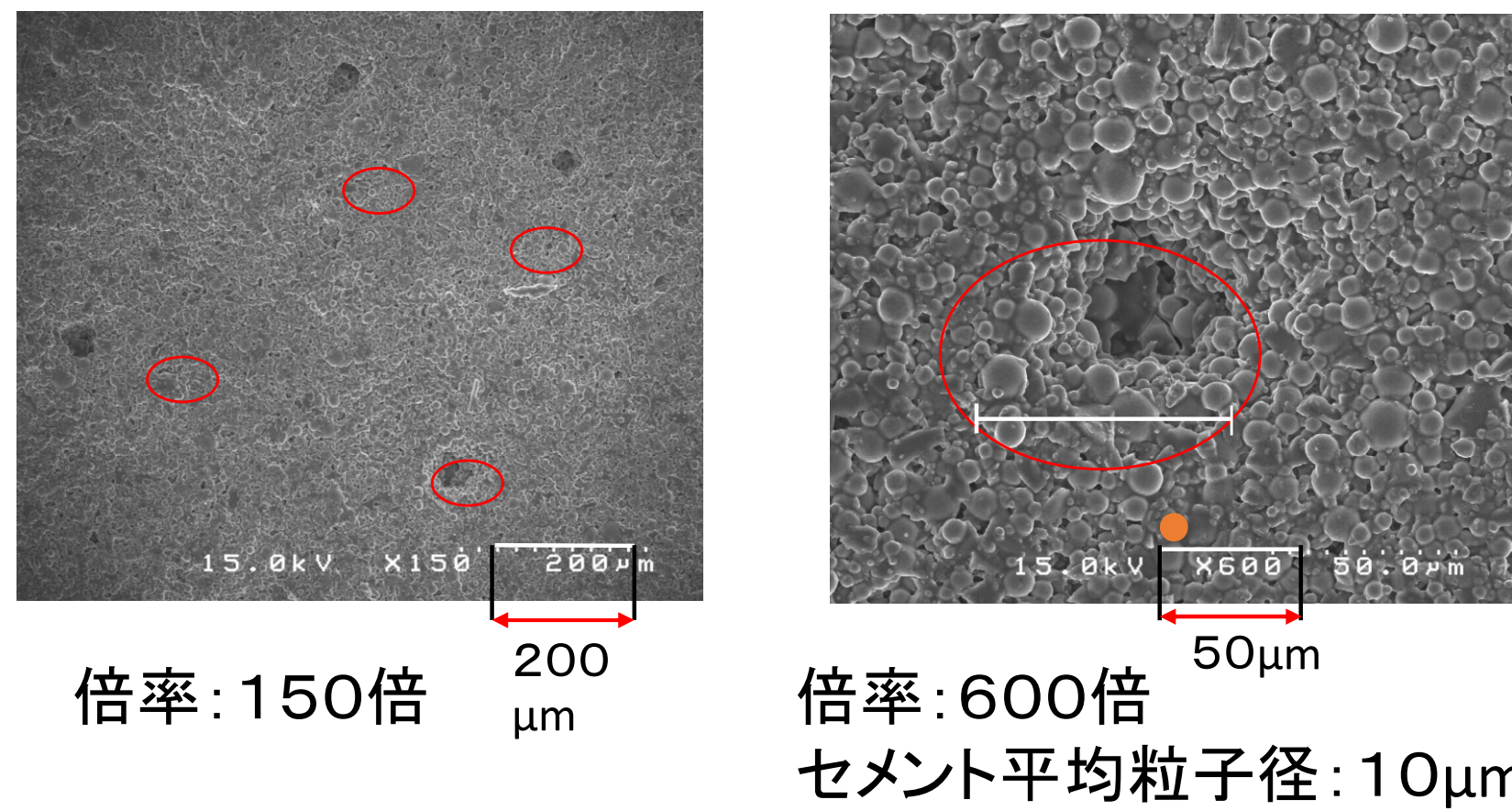


試験後鋼板表面

フッ素樹脂鋼板

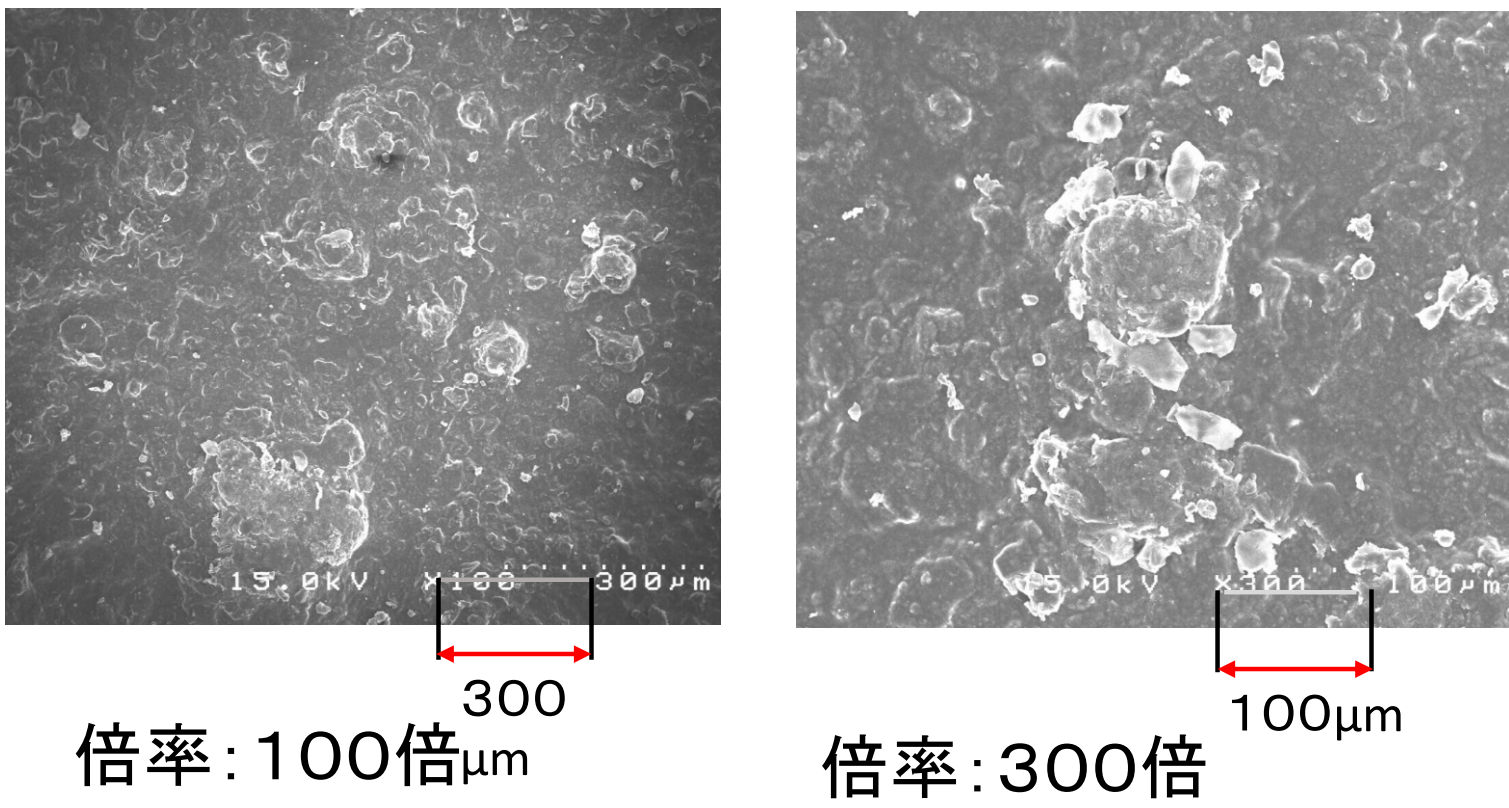


塗装表面の顕微鏡観察(無機ジンク鋼板)



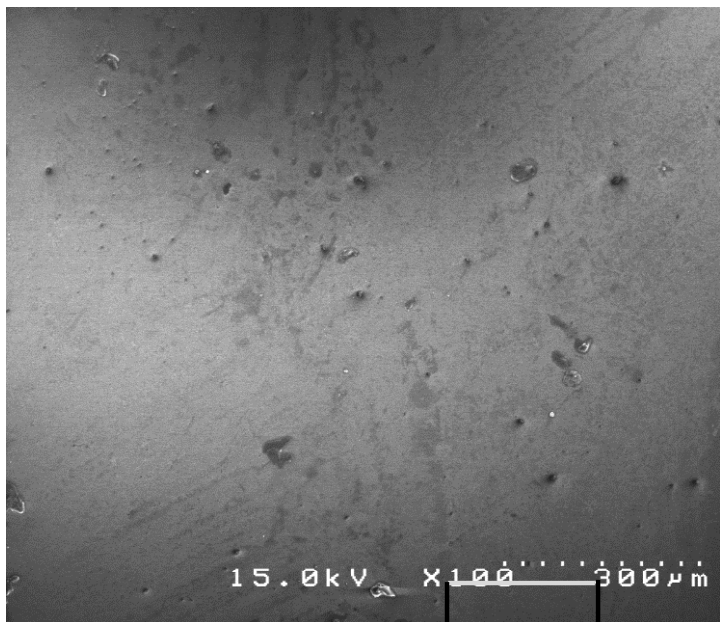
無機ジンク鋼板表面には空隙が点在していることが確認できる.

塗装表面の顕微鏡観察(ミストコート鋼板)

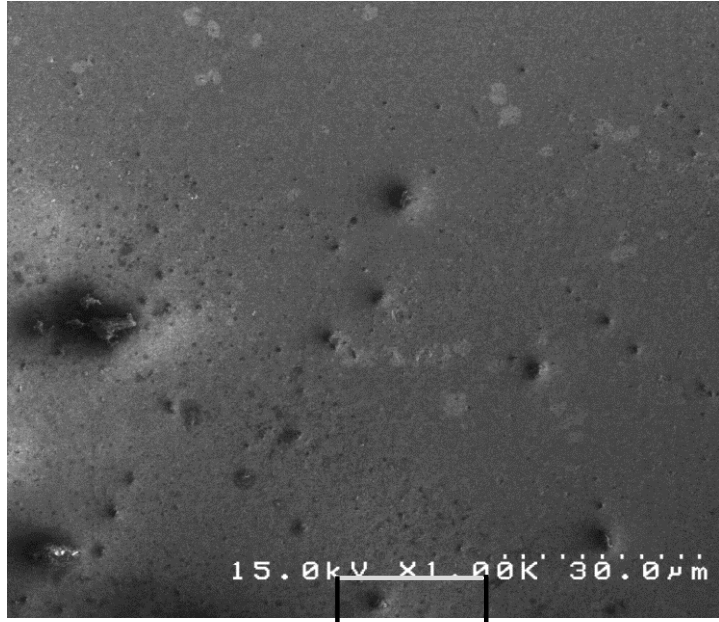


突起が鋼板表面に広く分布していることが確認できる.

塗装表面の顕微鏡観察(フッ素樹脂鋼板)



倍率: 100倍



倍率: 1000倍

鋼板表面はほぼ平滑であるが、多少の凹凸は確認できる。

まとめ

- 1. 無機ジンクリッチペイントを塗布した鋼板の付着強度は比較的高いが、付着が切れる際に、塗装が剥がれる状況が見られた。
- 2. ミストコートを塗布した鋼板の付着強度は非常に小さい。
- 3. フッ素樹脂塗料を塗布した鋼板では、塗装の剥がれは見られなかった。