

# 複合構造ずれ止めの研究と収束計算

宇都宮大学  
中島章典

## 大学での大学院生および教員としての約40年間の研究歴

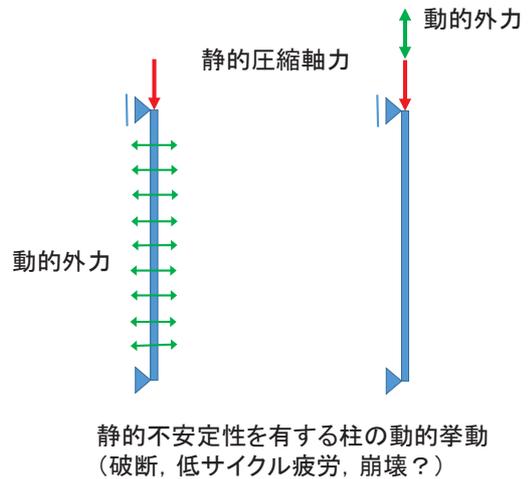
- 橋梁構造および部材の動的終局強度に関する解析的研究
- 鋼コンクリート合成構造に関する研究
- 剛体ばねモデル解析
- 合成桁・非合成桁の実験と解析
- ずれ止めの研究(スタッド・孔あき鋼板ジベル)
- 鋼コンクリート接触面に関する研究
- 車両走行問題
- 減衰に関する実験と解析

2

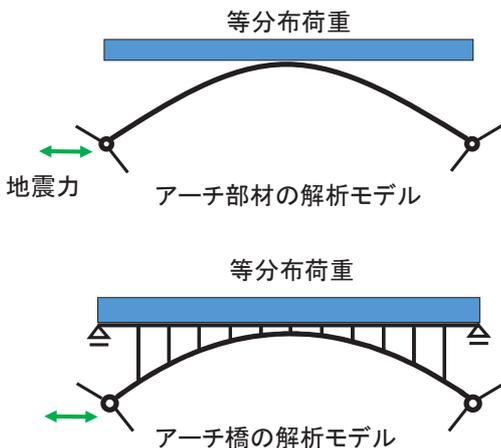
## 橋梁構造および部材の動的終局強度に関する基礎的研究(博士論文)(1983)

- 平面骨組構造を対象として、材料非線形性および幾何学的非線形性を考慮した動的解析により、鋼構造部材および鋼橋梁構造の動的強度を数値計算法を用いて検討した。
- 柱およびアーチ構造の動的耐荷力
  - つまり、骨組構造の耐震強度を確認する。
  - 動的倒壊現象が生じる。

3

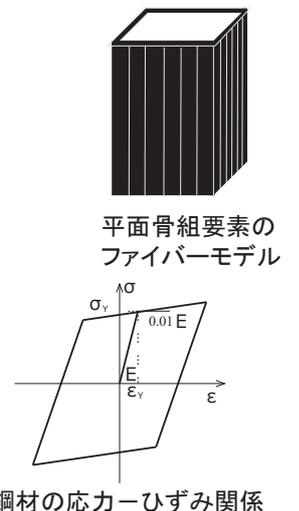
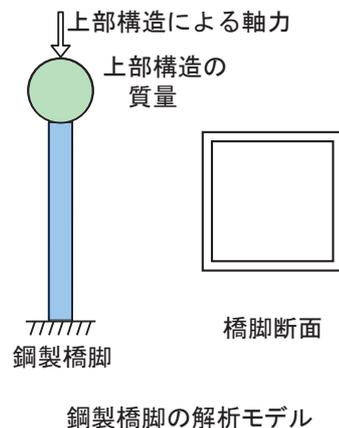


4

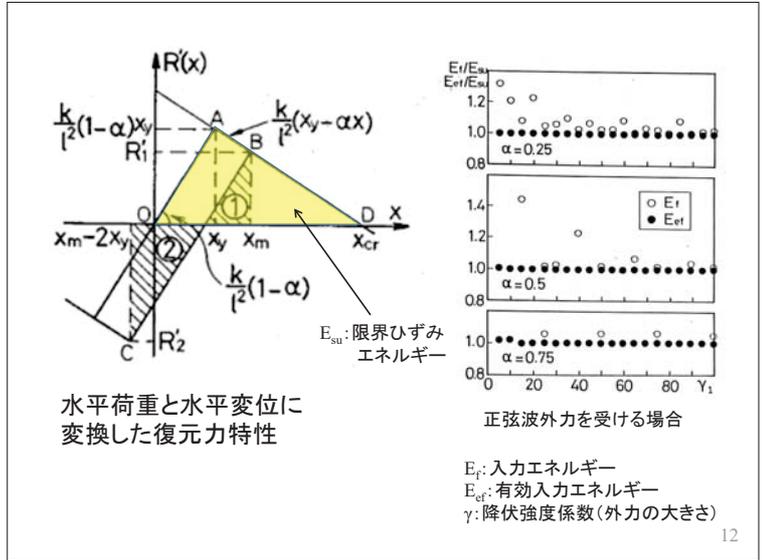
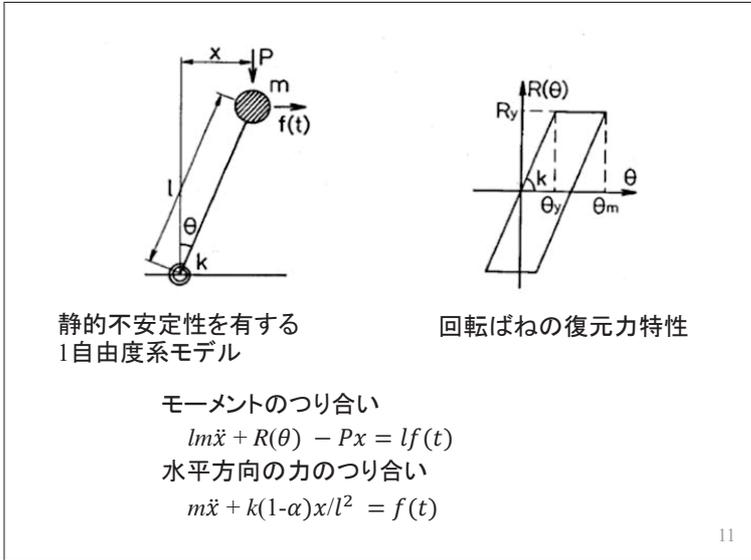
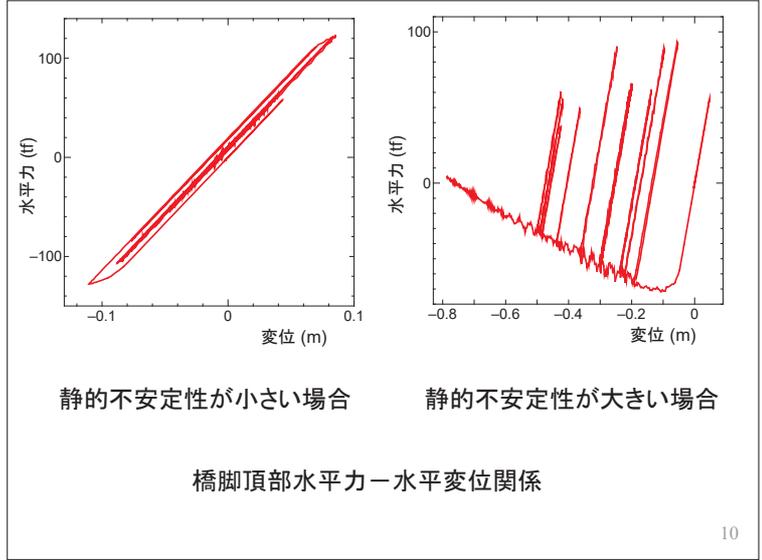
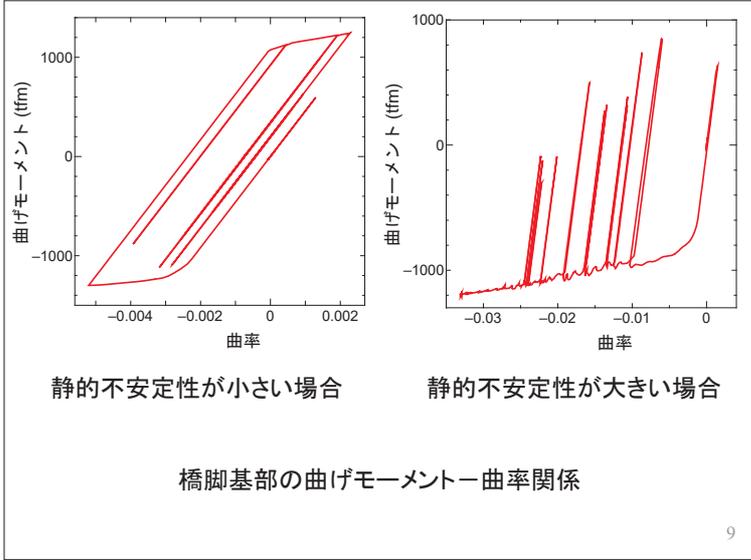
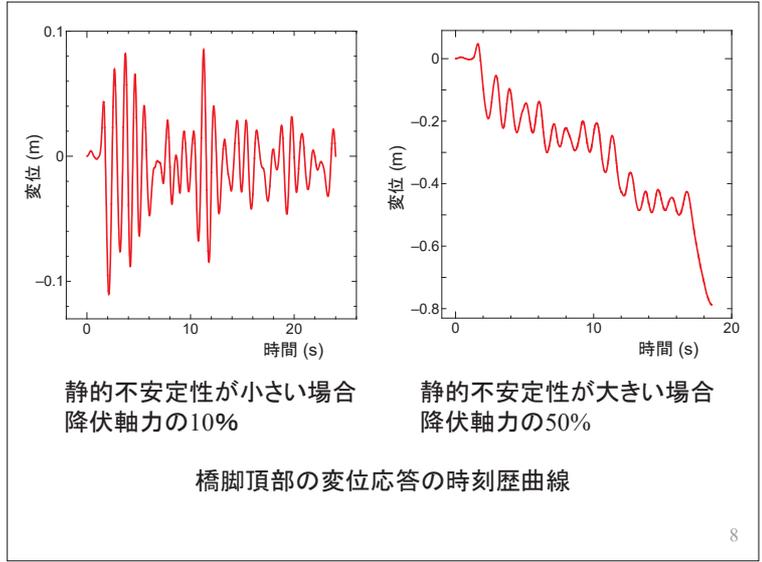
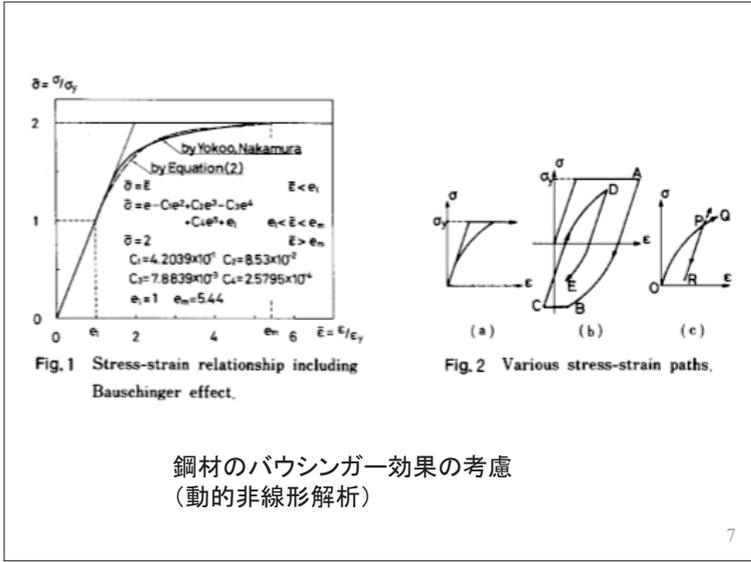


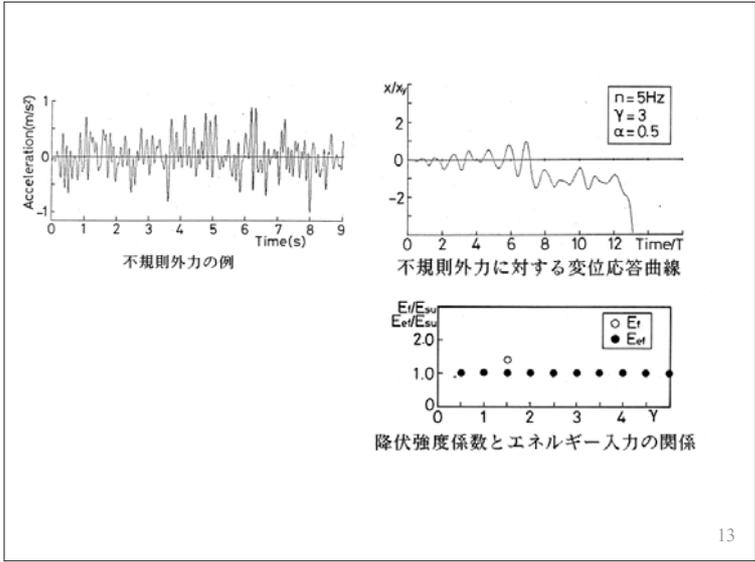
5

## 動的非線形解析



6



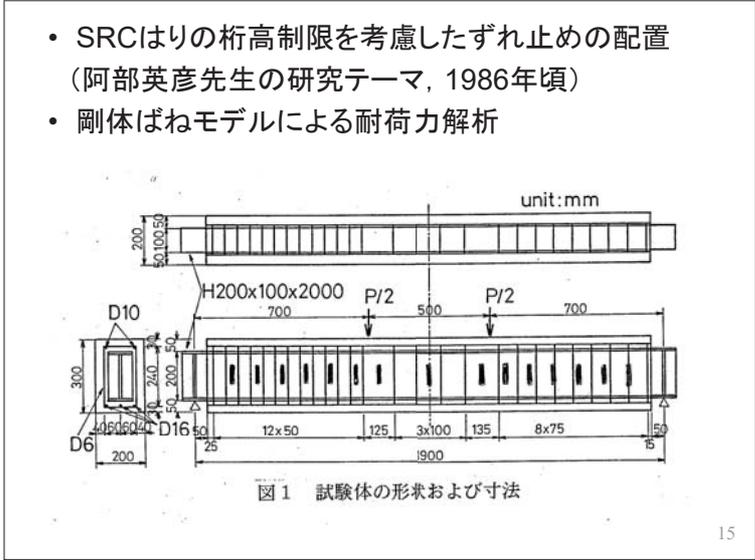


## まとめ

- 静的不安定性がもたらす動的倒壊現象
- 非線形動的解析の理解
  - 収束計算

### 参考文献

中島章典, 阿部英彦, 倉西茂, 白石正俊: 劣化型復元力特性を有する構造物の動的倒壊判定に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.655-662, 1990.3.  
 S.Kuranishi, A.Nakajima, Vibrational elasto-plastic collapse of compressed structures, Proceedings of ICSSAS'89, Beijing, pp.699-708, 1989.10.  
 A.Nakajima, S.Kuranishi, H.Abe, Dynamic failure of structures with structural instability, 土木学会論文集, No.386/I-8, pp.135-144, 1987.10.  
 S.Kuranishi, A.Nakajima, Strength characteristics of steel arch bridges subjected to longitudinal acceleration, 土木学会論文集, No.374/I-6, pp.119-127, 1986.10.  
 S.Kuranishi, A.Nakajima, Failure of elasto-plastic columns with initial crookedness in parametric resonance, 土木学会論文集, No.356/I-3, pp.207-216, 1985.4.  
 S.Kuranishi, A.Nakajima, Dynamic strength characteristics of axially loaded columns subjected to periodic lateral acceleration, 土木学会論文集, No.341, pp.41-49, 1984.1.



### SRC梁の剛体ばねモデル解析

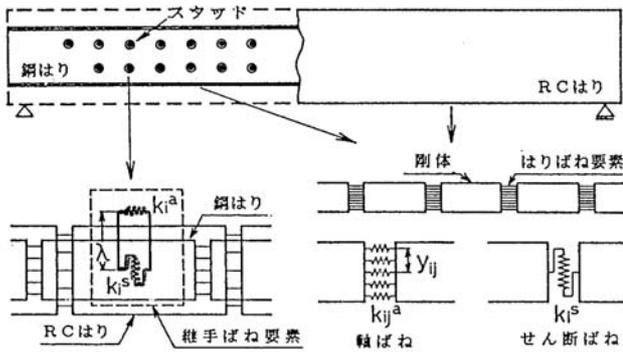
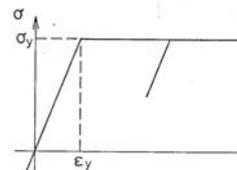


図3 剛体ばね要素モデル

(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, Vol.33, 1987)



H形鋼、鉄筋の応力ひずみ関係

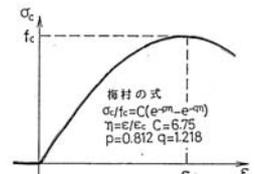


図4 コンクリートの応力-ひずみ関係

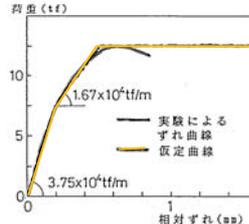
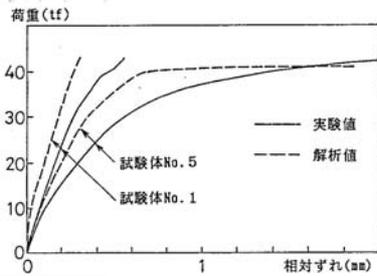


図5 ずれ止めの荷重-ずれ関係



図6 RC部のせん断抵抗のモデル化



SRC梁の荷重-ずれ曲線の比較

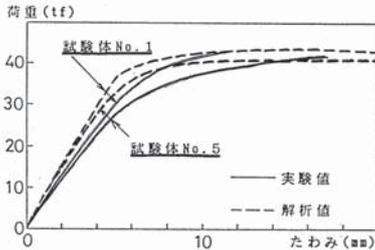


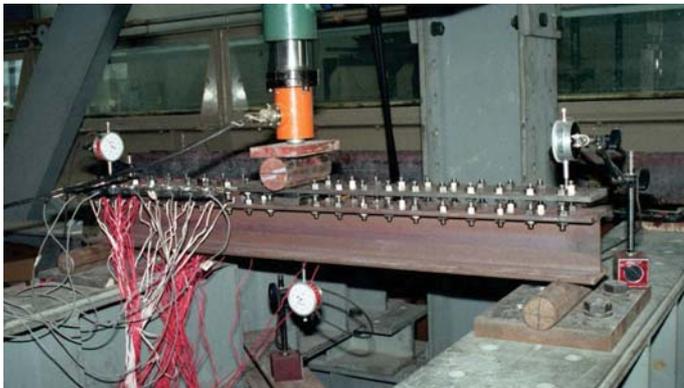
図7 荷重-たわみ曲線の比較

試験体No.1 スタッド60本  
試験体No.5 スタッド6本

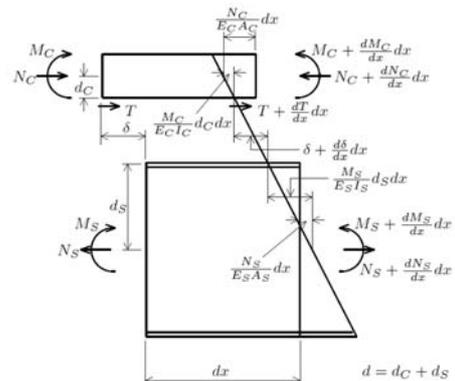
### 参考文献

阿部英彦, 中島章典: SRCはりのウェブ面のずれ止めの効果, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.307-314, 1988.3.  
阿部英彦, 中島章典: SRCはりの力学性状に及ぼすずれ止め位置の影響, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.307-316, 1987.3.

### 不完全合成梁理論の確認(1990)

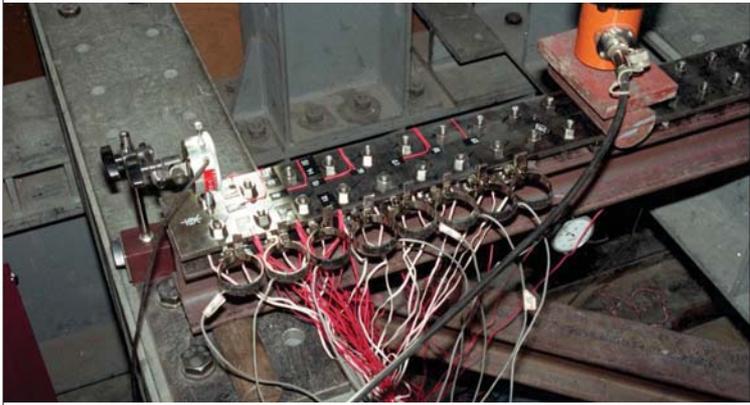


鋼材を用いた合成梁の模型試験体スパン1m, ボルト径9mm

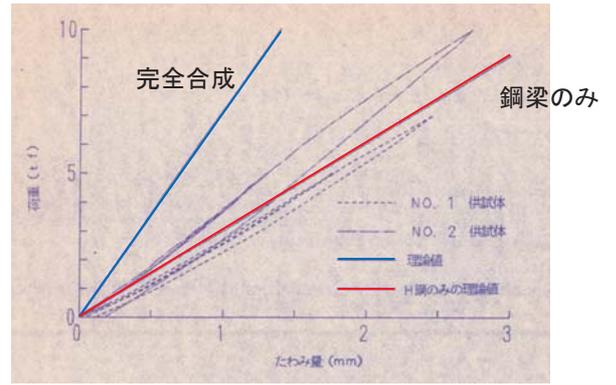


不完全合成梁の微小区間での変形とつり合い

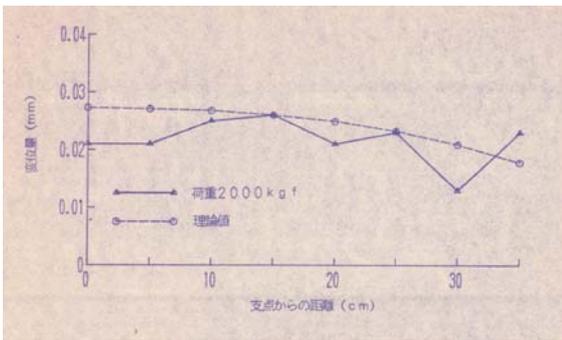
Newmark, N.M. et. Al. : Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction, 1951.



鋼材を用いた合成梁の模型試験体



荷重—スパン中央のたわみ関係  
(ボルトのずれが生じた。)

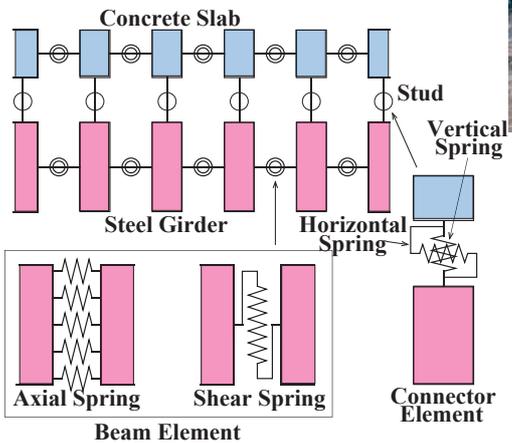
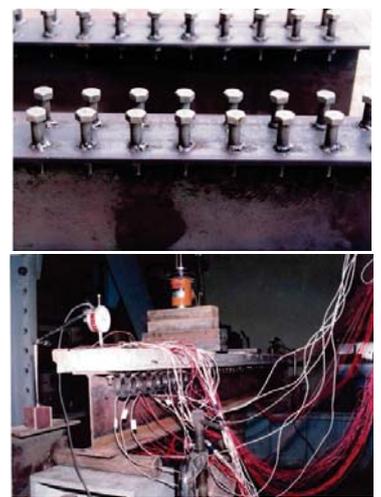


橋軸方向のずれ変位分布  
(Newmarkの理論値との比較)

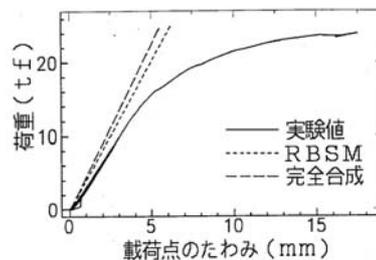
H形鋼とボルトを用いた合成梁試験体(スパン2m, ボルト径12mm, 1991)



フランジに孔あけ, ねじ切り, 溶接

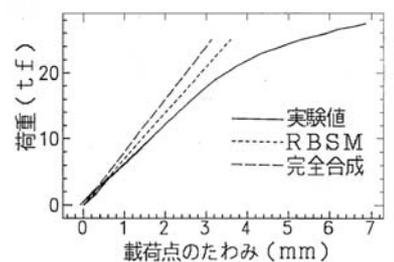


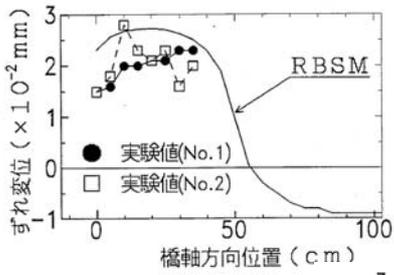
不完全合成桁の剛体ばねモデル



荷重と載荷点のたわみ  
(1/2点載荷)

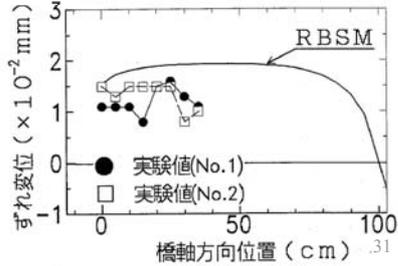
荷重と載荷点のたわみ  
(1/4点載荷)



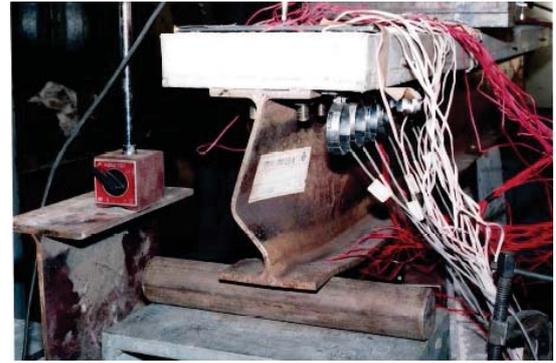


ずれ変位分布(1/2点荷重, 荷重10tf)

ずれ変位分布(1/4点荷重, 荷重10tf)



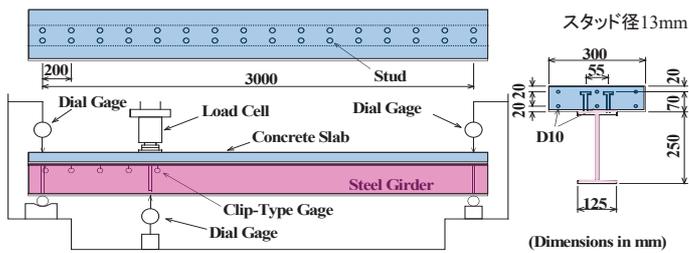
31



支点部のウェブの座屈

32

不完全合成梁試験体(スパン3m, スタッド径13mm, 1994)



不完全合成はり試験体の概要  
(スタッド配置間隔100, 200, 300mm)

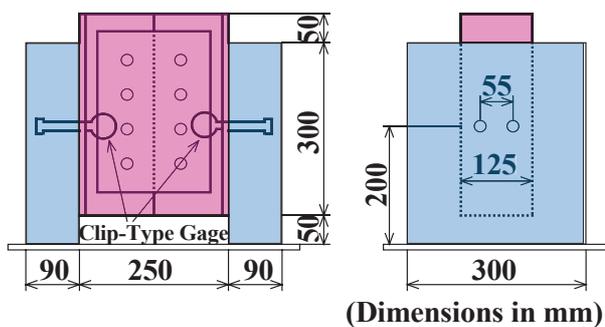
押抜き試験結果の利用

33



合成はりの試験状況

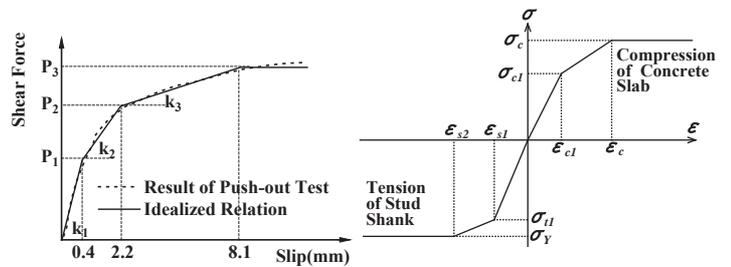
34



押抜き試験体の概要

日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドの  
関する研究の現状, 1996.

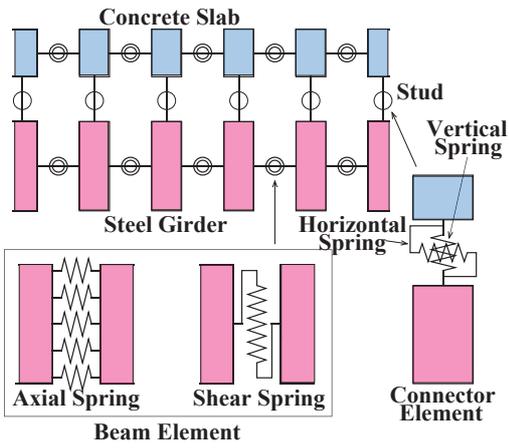
35



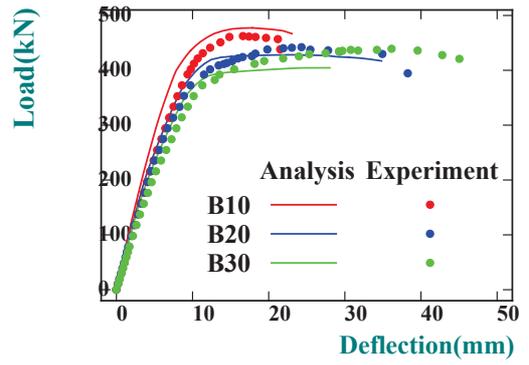
スタッドの水平ばね  
の材料特性

スタッドの軸ばね  
の材料特性

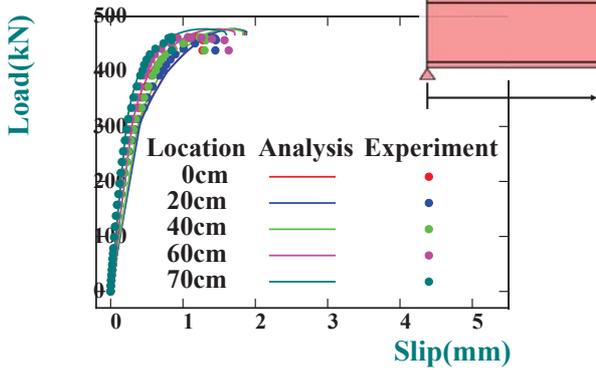
36



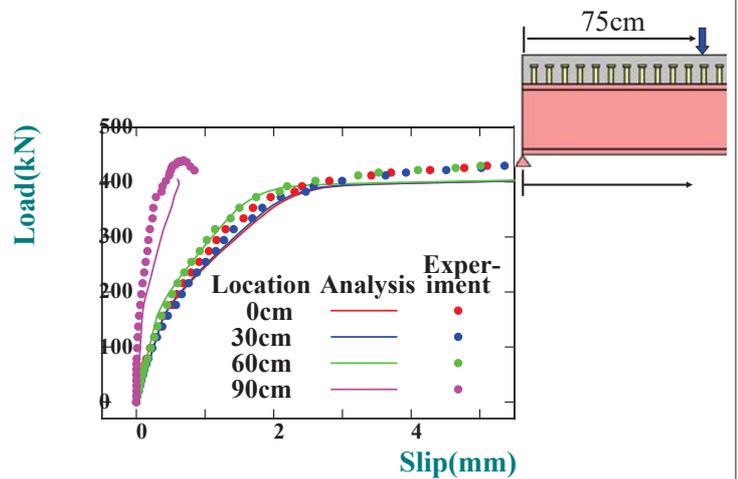
不完全合成桁の剛体ばねモデル



荷重載荷点における荷重－たわみ関係



荷重－ずれ変位関係 (B10試験体)

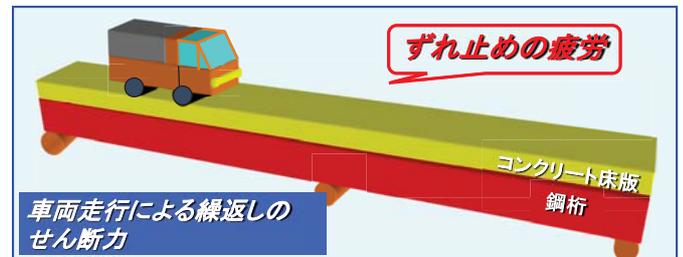


荷重－ずれ変位関係 (B30試験体)

## まとめ

- 不完全合成梁の実験と解析
  - 実験の挙動を剛体ばねモデル解析によってある程度追跡できた。

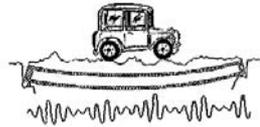
参考文献  
 中島章典, 池川真也, 山田俊行, 阿部英彦: ずれ止めの非線形挙動を考慮した不完全合成桁の弾塑性解析, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.97-106, 1996.4.



- ・スタッド
- ・スラブ止め
- ・橋梁－車両系振動問題の解析

## 車両一橋梁系振動問題の運動方程式の解法

- 剛体ばねモデル解析によって不完全合成桁のずれ止めの挙動を確認する。
- 動的外力の項に橋梁の変位が含まれるので、一般に収束計算を用いた手法が適用される。



橋梁振動研究会  
金沢大学, 梶川先生作成図

## 車両一橋梁系振動問題のシミュレーション解法

- 橋梁の運動方程式

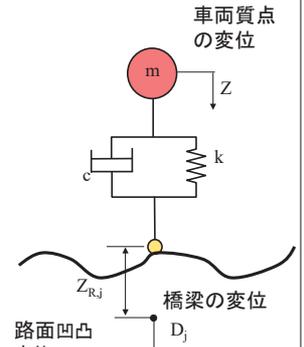
$$M\ddot{D}_t + C\dot{D}_t + KD_t = F_t$$

- 車両の運動方程式

$$m\ddot{Z}_t + c(\dot{Z}_t - \dot{D}_{jt} - \dot{Z}_{R,j}) + k(Z_t - D_{jt} - Z_{R,j}) = 0$$

- 橋梁に加えられる外力

$$F_{jt} = mg + c(\dot{Z}_t - \dot{D}_{jt} - \dot{Z}_{R,j}) + k(Z_t - D_{jt} - Z_{R,j})$$



車両走行によるスタッドのせん断力は疲労的にはあまり問題にならない。

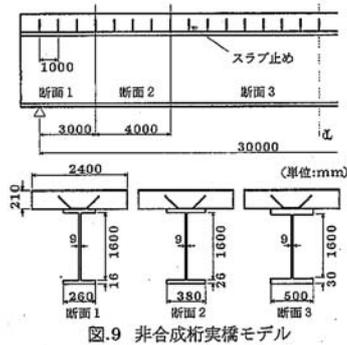


図.9 非合成桁実構モデル

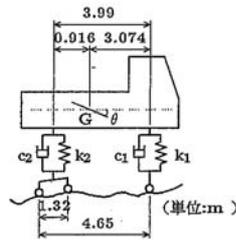
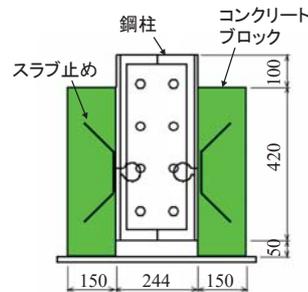


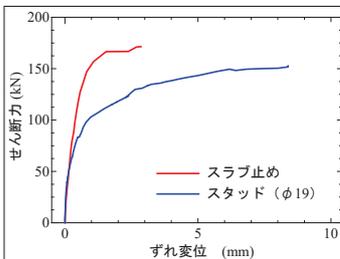
図.10 大型車両モデル

ずれ止めのせん断力を検討(1994)



実物大スラブ止めの  
押抜き試験体

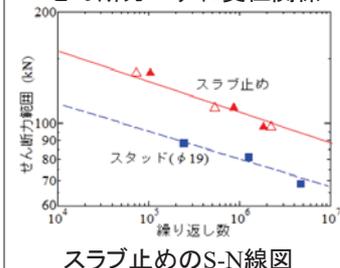
押抜き試験体の作製状況



せん断力-ずれ変位関係



スラブ止めの疲労試験  
(トピー工業)



スラブ止めのS-N線図

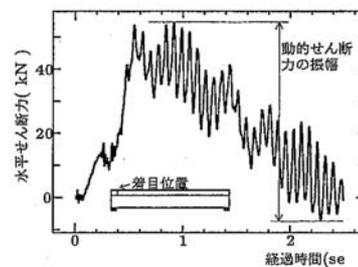


図.13 スラブ止め伝達せん断力の時刻歴

スパン30mの非合成桁  
(路面凹凸考慮)

大型車1台の走行により  
スラブ止めに生じるせん断力は60kN程度

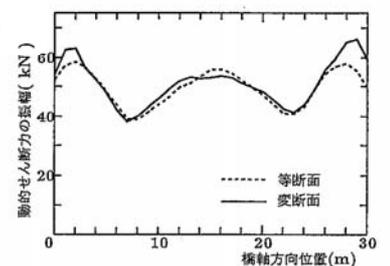


図.14 動的せん断力振幅の橋軸方向分布

# まとめ

- 通常の車両走行下では、合成桁のスタッドおよび非合成桁のスラブ止めの疲労はあまり問題にならない。

参考文献  
 中島章典, 池川真也, 土橋健治, 阿部英彦: 非合成桁橋スラブ止めの動的水平せん断伝達性状と疲労強度, 鋼構造年次論文報告集, 第2巻, pp.683-690, 1994.11.

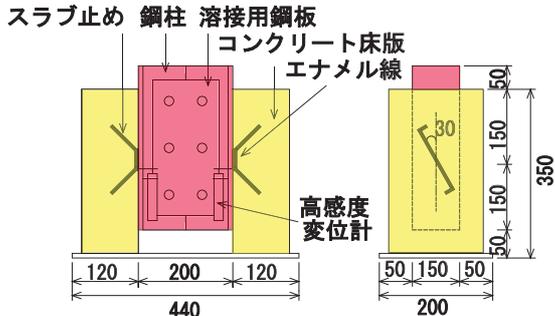
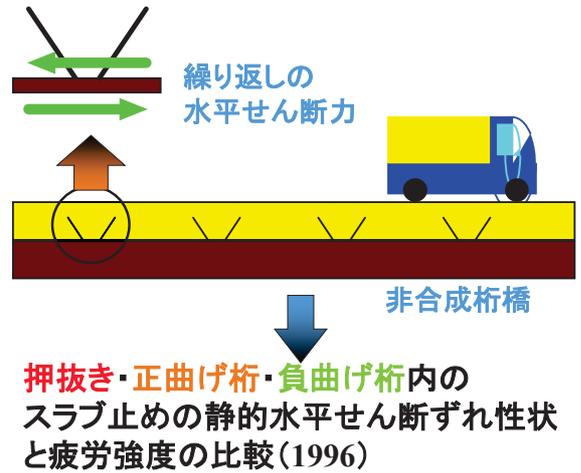


図1. 押抜き試験体

スラブ止めΦ10mm, 長さ30cmの丸鋼



押抜き試験体の載荷状況

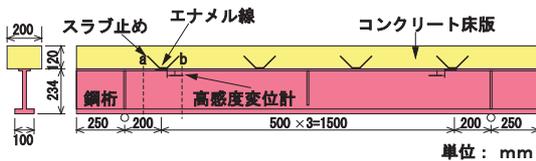


図2. 正曲げ桁試験体

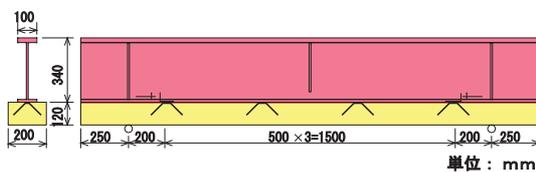
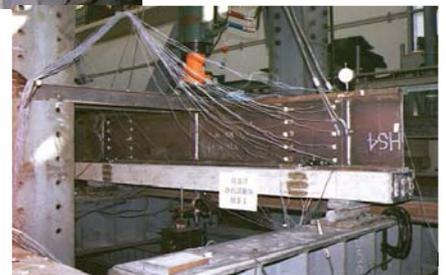


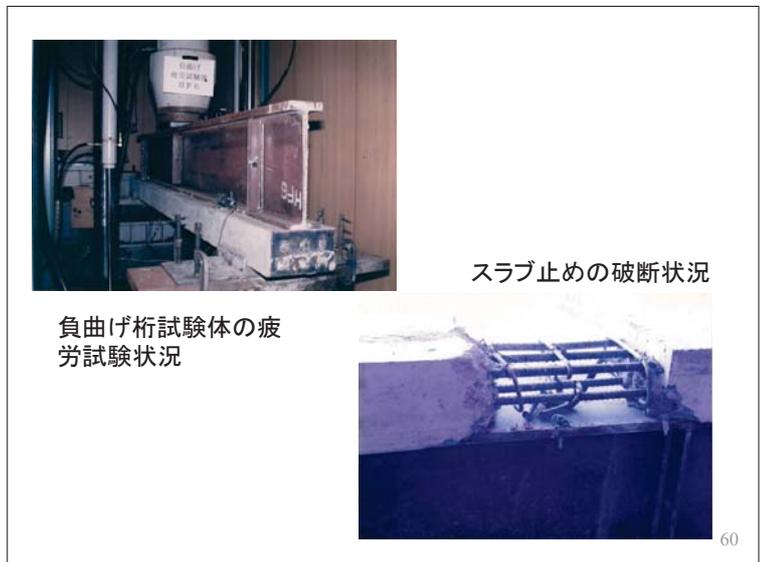
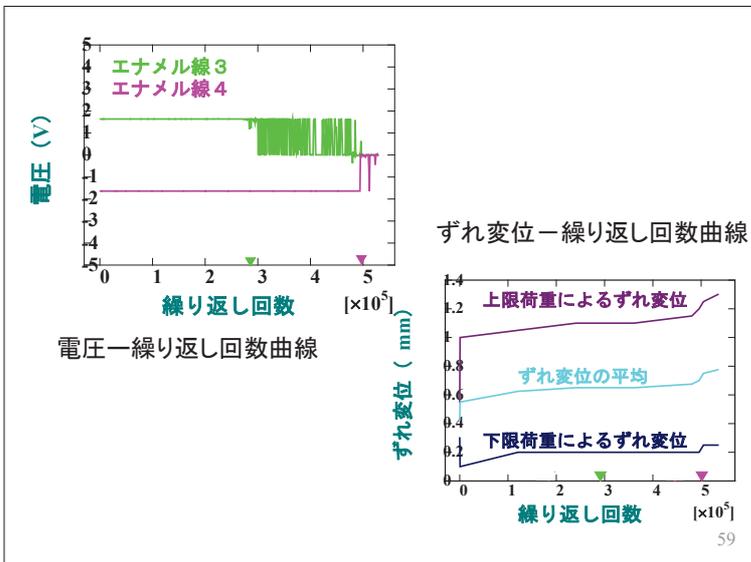
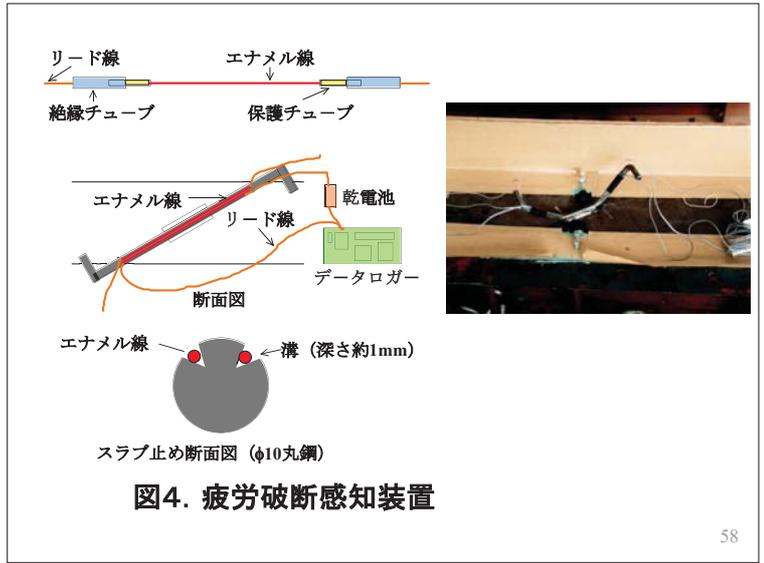
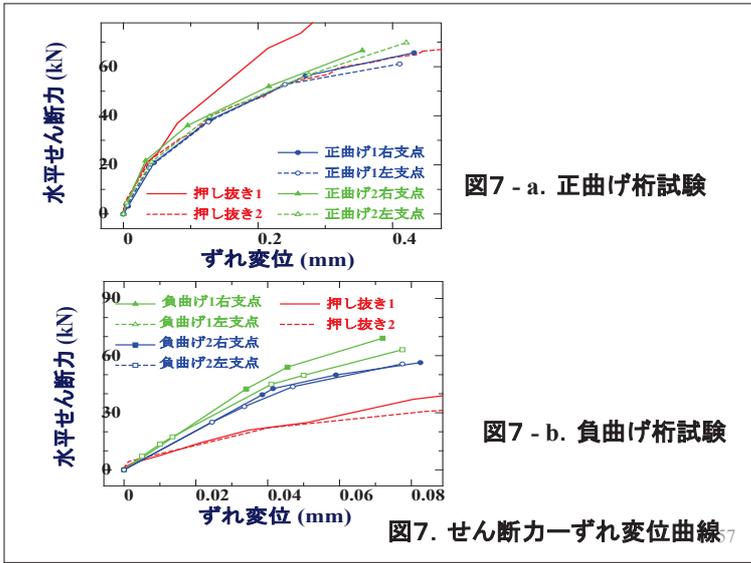
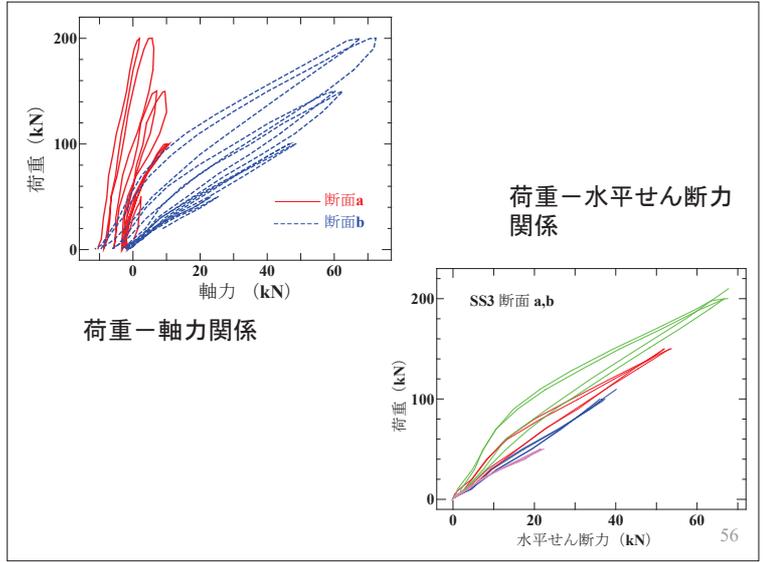
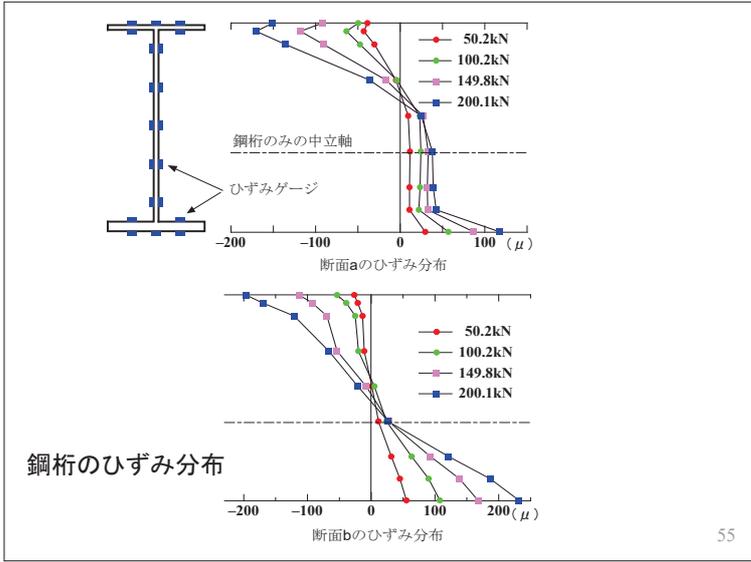
図3. 負曲げ桁試験体



正曲げ桁試験体の載荷状況

負曲げ桁試験体の載荷状況





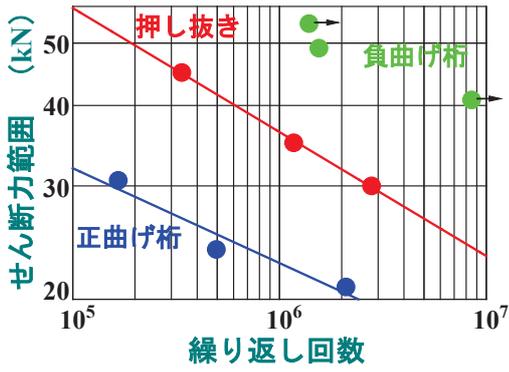


図9. S-N線図

桁試験ではずれ変位に基づいてせん断力を算出

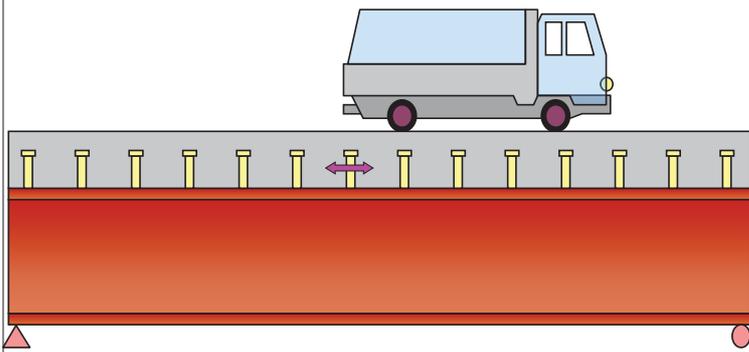
## まとめ

- 正曲げ、負曲げ、押し抜き試験体のスラブ止めの挙動は異なる。

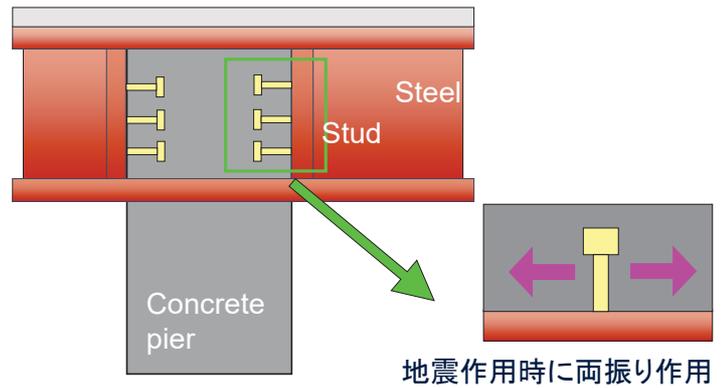
参考文献

中島章典, 溝江慶久, 廣田篤, 吉原知佳, 西園広之, 大江浩一: 押し抜きおよび桁試験によるスラブ止めの水平せん断ずれ性状と疲労強度の検討, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1505-1514, 1998.3.

## 両振り作用を受ける頭付きスタッドの挙動 (1997~2001)

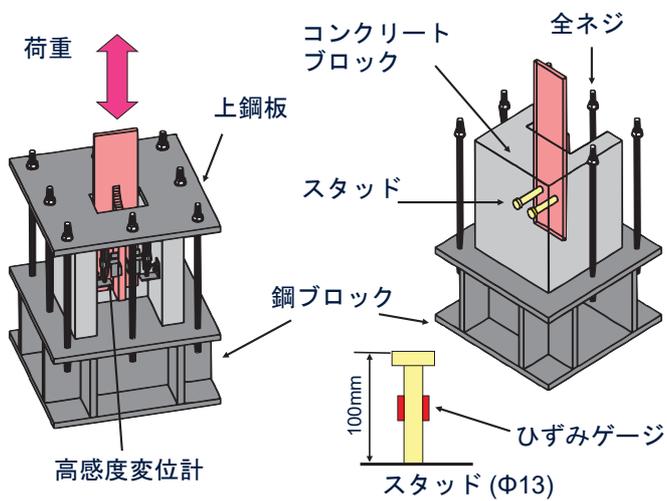


合成桁のスタッドは車両走行により両振りせん断力を受ける。

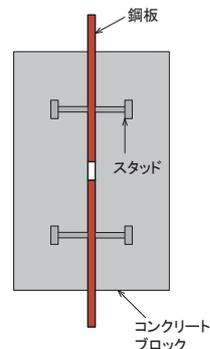


地震作用時に両振り作用

## 鋼コンクリート複合ラーメン橋剛結部



両振り試験体の概要



スタッドの両振り試験体



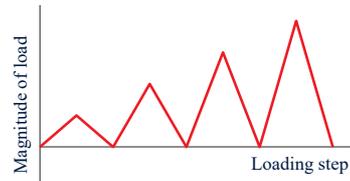
スタッドの両振り試験体の疲労試験状況



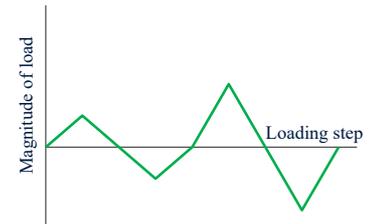
試験体の設置状況

## 静的載荷試験

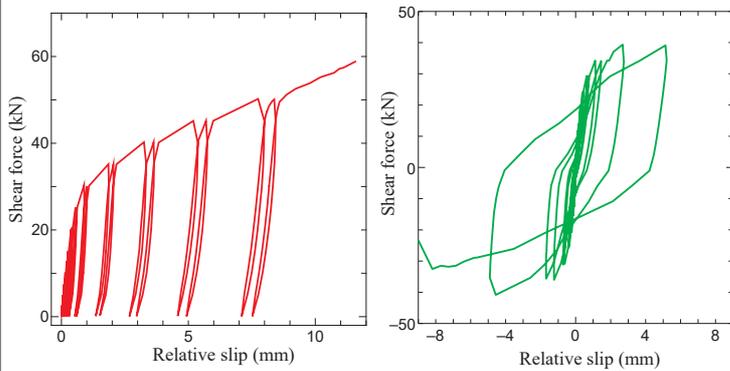
材料特性が異なる3シリーズの片振り, 両振り載荷試験



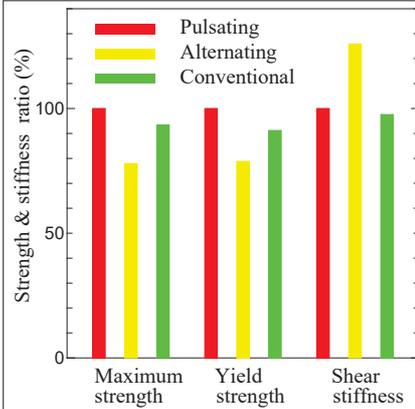
片側で漸増繰返し載荷



両振りで漸増繰返し載荷



片振りおよび両振り時のせん断力-ずれ変位関係 (異なった関係)



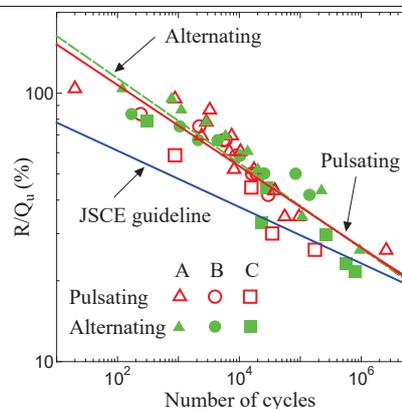
片振り時の最大せん断力, 降伏せん断力は両振り時より30%程度大きい.

(片側振幅の採用時)

最大せん断力, 降伏せん断力, ずれ剛性の比較

## 疲労試験

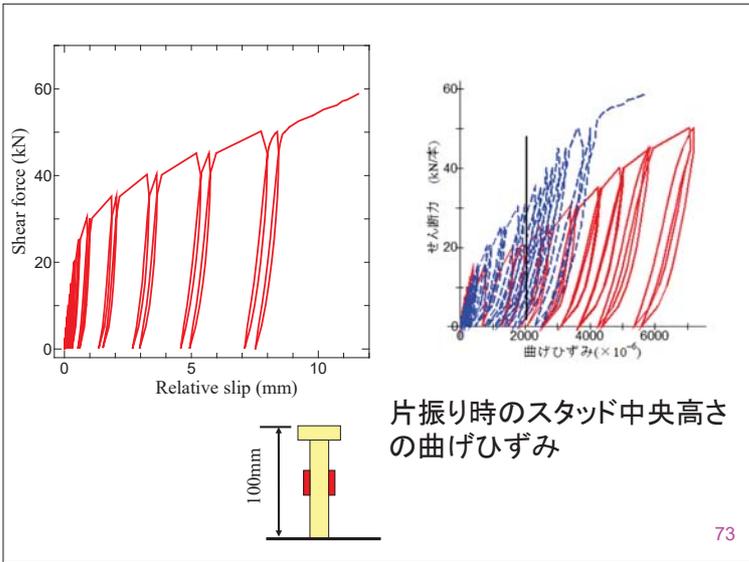
- 静的試験に対応して3シリーズの試験体を使用
- せん断力振幅 15 ~ 60kN, 載荷振動数0.1, 3Hz.
- 片振り載荷
  - 最小荷重 2.5kN として載荷
- 両振り載荷
  - 等しい振幅の最大, 最小荷重を載荷



Qu : せん断耐力  
R : せん断力振幅

R/Qu と繰返し回数の関係

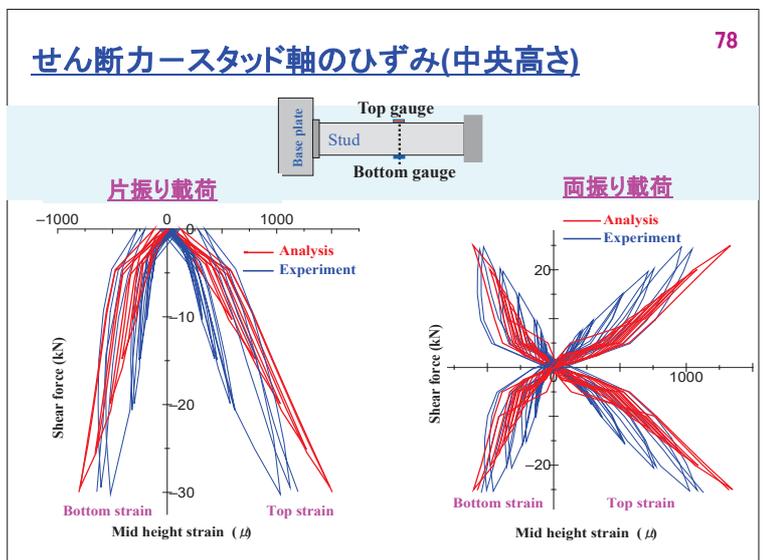
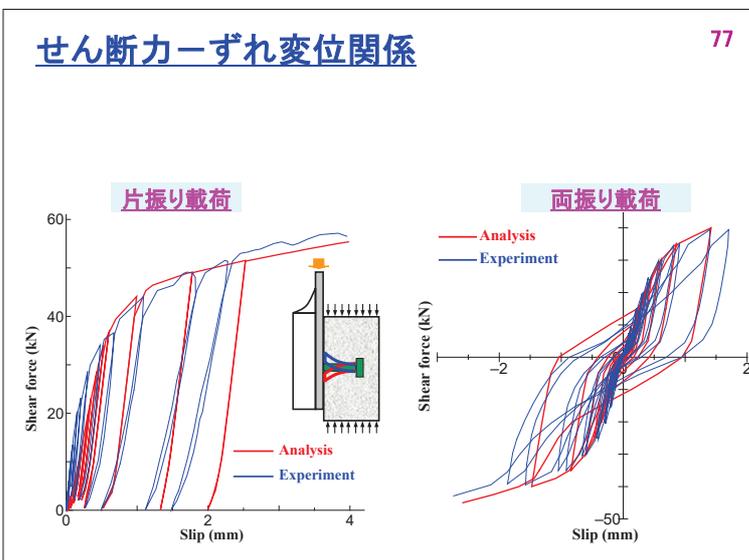
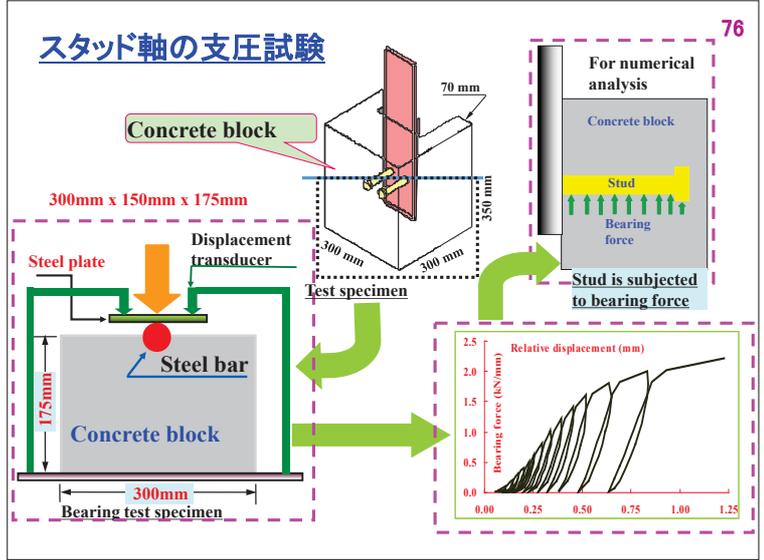
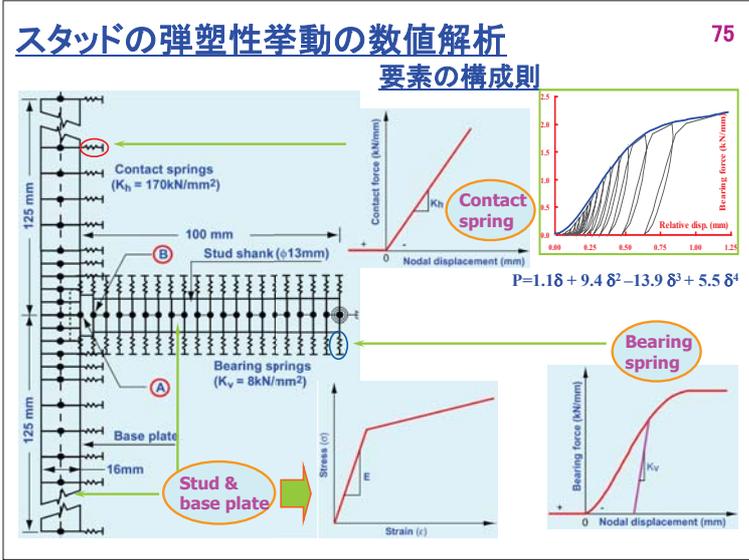
片振りおよび両振り載荷時の疲労寿命は同程度



## まとめ

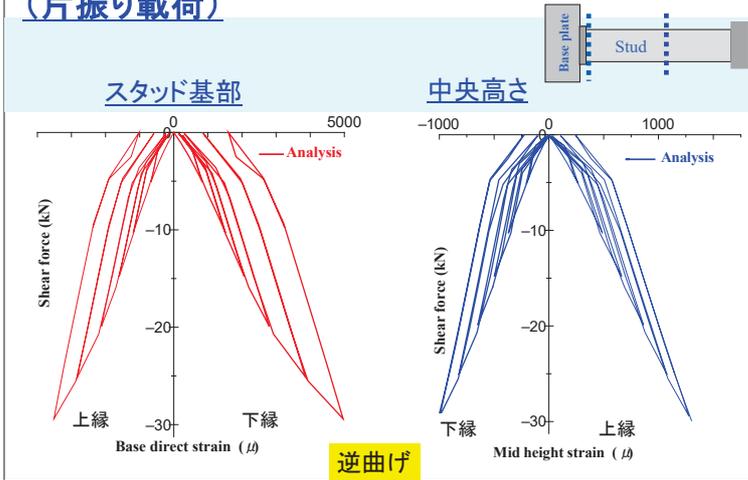
- スタッドの片振り、両振り試験体の静的せん断耐力は、片振り振幅に着目すれば、片振りのほうが大きい。
- スタッドの片振り、両振り試験体の疲労強度は同程度であった。
- スタッド中央高さのひずみ挙動ではスタッドの弾塑性挙動がよくわからない。

参考文献  
 中島章典, 木下幸治, 齊木功, Miah, M.K., 大江浩一, 酒井吉永: 両振り載荷によるスタッドの静的および疲労強度, 鋼構造論文集, Vol.10, pp.31-41, 2003.3.



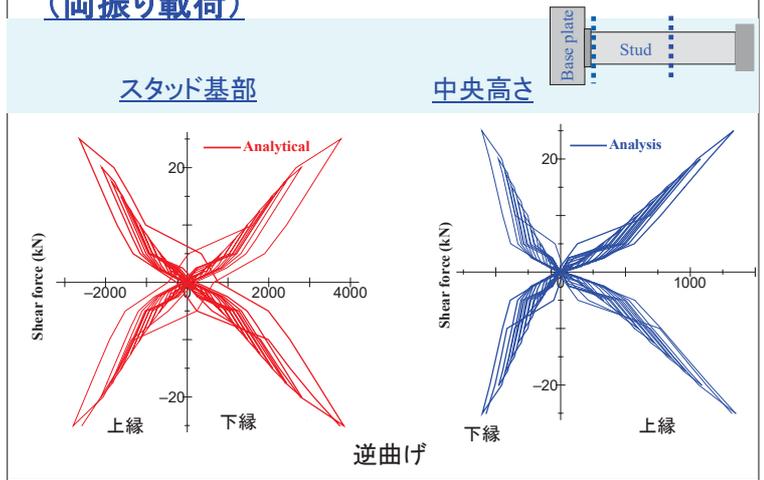
## せん断カースタッド軸のひずみ関係 (片振り载荷)

79



## せん断カースタッドの軸ひずみ関係 (両振り载荷)

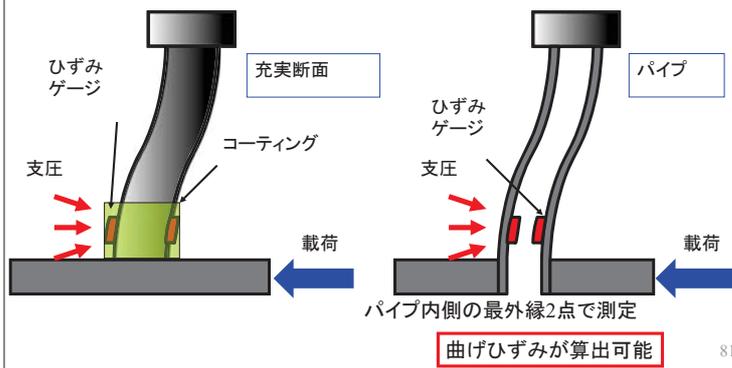
80



スタッド基部のひずみを知りたい。  
コンクリートとスタッド間の支圧状態が通常と異なる。

パイプの内側にひずみゲージを貼付することにより、外側の支圧状態を変化させない。

(2002)

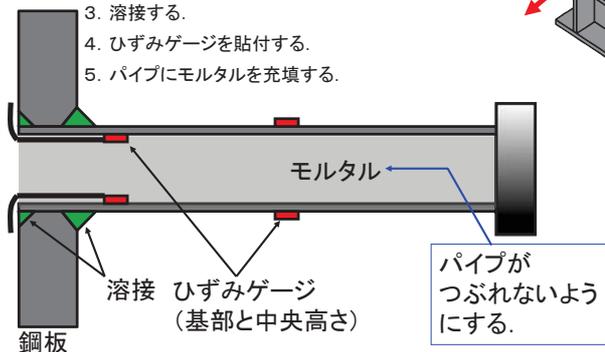


81

## 試験体概要

鋼板とスタッド

1. 鋼板に切り欠きを入れる。
2. パイプスタッドを差し込む。
3. 溶接する。
4. ひずみゲージを貼付する。
5. パイプにモルタルを充填する。

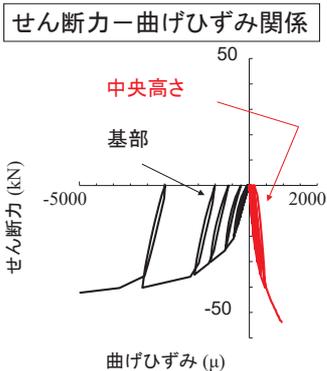


82

## スタッド基部と中央高さの違い

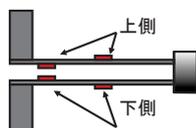
片振り载荷試験

$$\text{曲げひずみ} = \frac{(\text{上側ひずみ} - \text{下側ひずみ})}{2}$$



基部の方がひずみが大きく、基部と中央高さで正負が逆である。

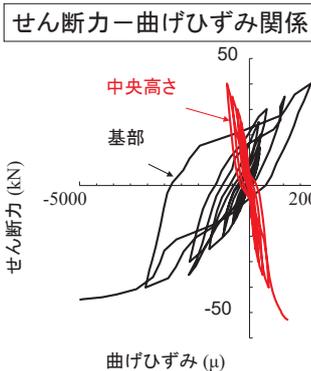
スタッドの基部と中央高さで逆曲げが生じている。



83

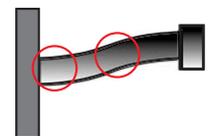
## スタッド基部と中央高さの違い

両振り载荷試験



基部の方がひずみが大きく、基部と中央高さで正負が逆である。

スタッドの基部と中央高さで逆曲げが生じている。



84

# まとめ

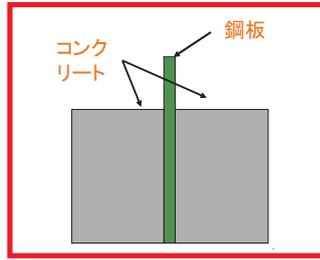
- スタッド中央高さと基部のひずみは逆曲げになっており、基部のひずみは中央高さの5倍程度である。

参考文献

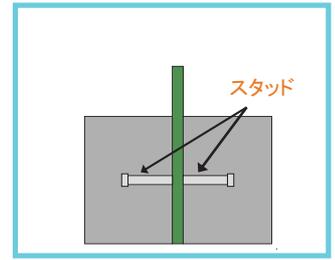
Miah, M.K., Saiki, I. and Nakajima, A.: Numerical evaluation of static behavior of stud connectors, 応用力学論文集, Vol.7, pp.571-578, 2004.8.  
 Nakajima, A., Miah, M.K., Saiki, I. Kadogaki, T., and Ooe, H. : Strain behavior of pipe stud shear connectors under various load conditions, Proceedings of 6th International Conference on Steel and Aluminium Structures(ICSAS'07), pp. 539-546, Oxford, UK, 2007.7.

# 鋼コンクリート接触面の摩擦・機械的作用 (2005~2007)

鋼とコンクリートの接触面の付着性状に及ぼす機械的作用の影響を考慮し、以下の2種類の試験体を用いた。



摩擦作用



機械的作用  
摩擦作用

# 支圧摩擦試験方法

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。



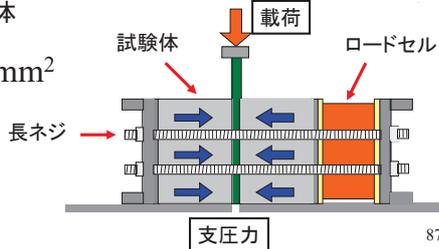
支圧応力

- 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/mm<sup>2</sup>

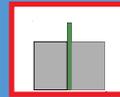
H鋼を用いた試験体

2.0N/mm<sup>2</sup>

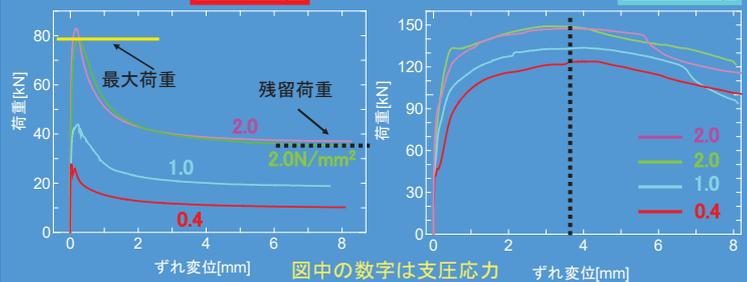
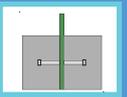


# 荷重-ずれ変位関係

鋼板のみ

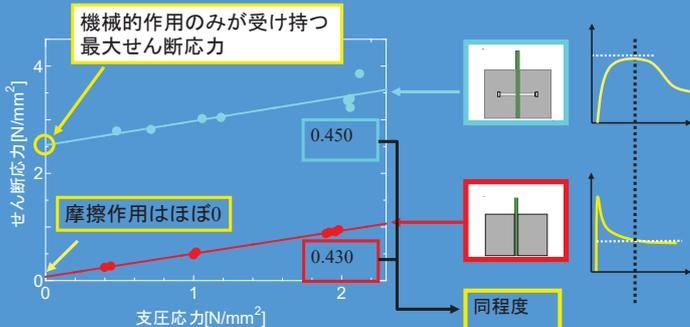


スタッド付鋼板



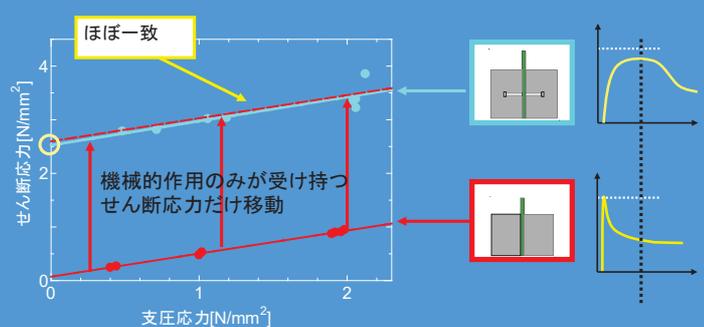
- スタッドを有する場合、最大荷重時ずれ変位が大きい。
- スタッドの有無に関らず、支圧応力が大きいほど最大荷重は大きくなる。

# せん断応力-支圧応力関係



- 傾きが同程度であることから、支圧力は摩擦作用にのみ影響を与え、機械的作用に影響を与えない。
- 支圧力が作用しない時、摩擦が作用しないので、スタッド付鋼板の切片は機械的作用が受け持つせん断応力と考えられる。

# せん断応力-支圧応力関係



摩擦作用 残留せん断応力 + 機械的作用 最大せん断応力 = 両作用 最大せん断応力

# まとめ

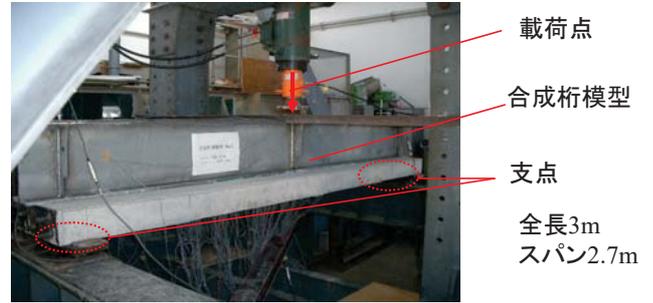
- 摩擦作用は支圧力に比例する。
- 摩擦作用は、スタッドによる機械的作用に影響しない。

参考文献  
 中島章典, 猪股勇希, 齋川幾美, 大江浩一: 付着, 機械的作用を有する鋼・コンクリート接触面の静的・疲労性状に関する実験的検討, 土木学会論文集A, Vol.63, No.4, pp.758-767, 2007.11.

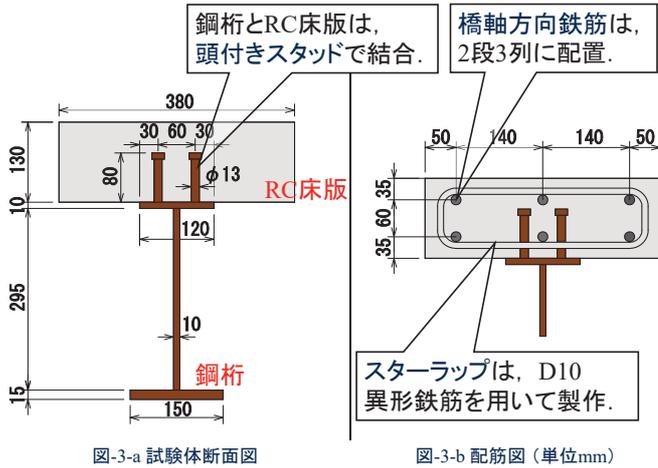
合成桁の負曲げ挙動を把握するためには、ひび割れを生じたRC床版の鉄筋ひずみ挙動を詳細に把握する必要がある。  
 (2006~2007)



そこで、合成桁模型の負曲げ載荷試験を実施し、ひび割れの進展に伴う鉄筋のひずみを詳細に測定した。



## 試験体(シリーズ1)



## ひずみゲージの貼付け方法

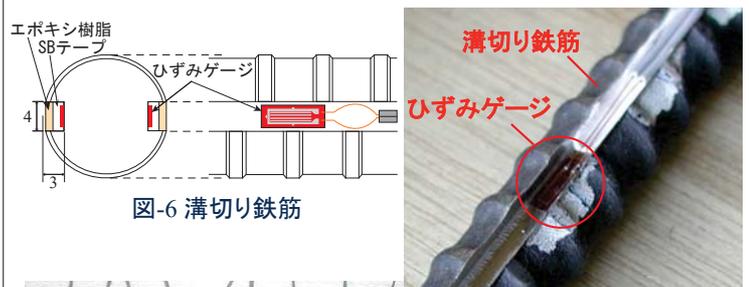


図-6 溝切り鉄筋

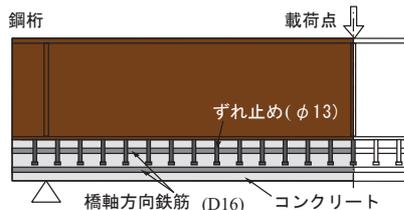


- ✓ 橋軸方向鉄筋に、D16異形鉄筋を溝切り加工したものを使用
- ✓ 溝にひずみゲージを貼付け、コーティングを施す

## 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)

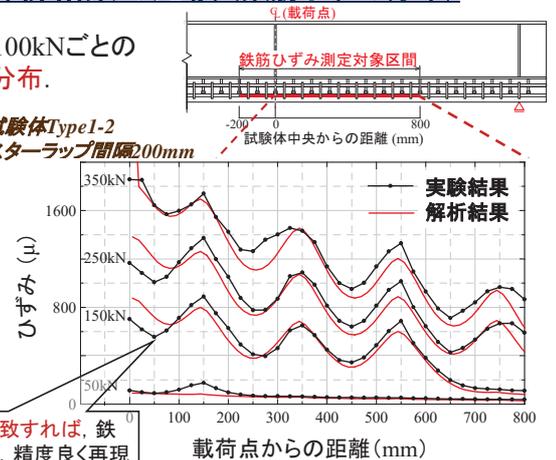
ばね要素(接触面特性)



## 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。

### 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。

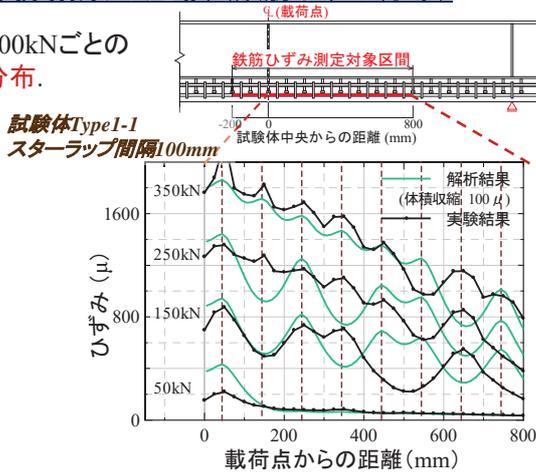
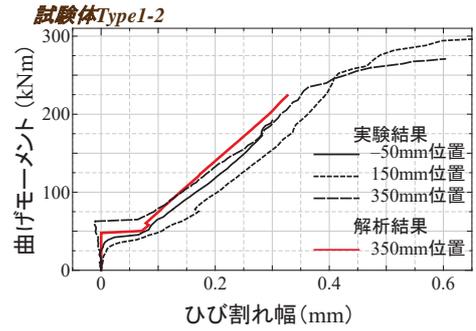


図-13 橋軸方向鉄筋のひずみ分布 97

### 実験結果と解析結果の比較 (ひび割れ幅)

試験体Type1-2の曲げモーメント-ひび割れ幅関係。

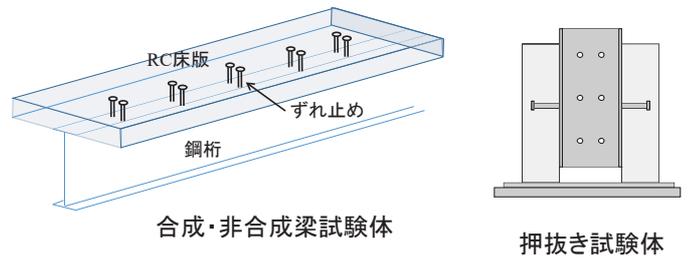


### まとめ

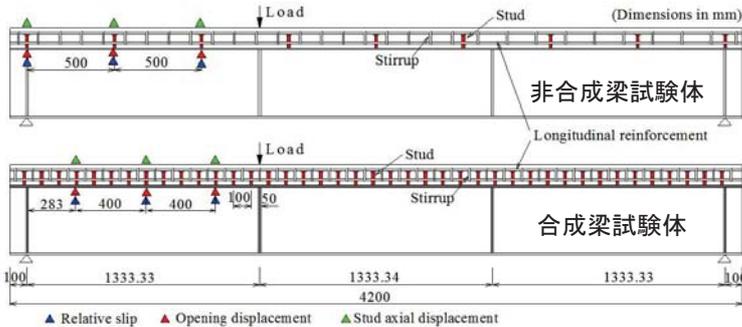
- 引張軸力が作用する合成桁RC床版の鉄筋ひずみやコンクリートのひび割れ挙動を追跡するために、鋼桁とRC床版の不完全な合成効果、鉄筋とコンクリートの付着の影響をも考慮して、合成桁の負曲げ挙動を再現する剛体ばねモデルを用いた数値解析手法を構築した。
- 合成桁の模型試験体を用いた負曲げ載荷試験との比較を通して、負曲げを受ける合成桁RC床版内の鉄筋ひずみやコンクリートひび割れ挙動を定量的に追跡できることを確認した。

参考文献  
坂口淳一, 中島章典, 鈴木康夫: 負曲げを受ける合成桁RC床版のひび割れ及び鉄筋ひずみ挙動の数値解析, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.136-150, 2012.3.

- ずれ止めにスタッドを用いた合成梁および非合成梁試験体の静的載荷試験を行い、両者の挙動を詳細に比較する。(2016~2018)
- 合成梁および非合成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を確認する。

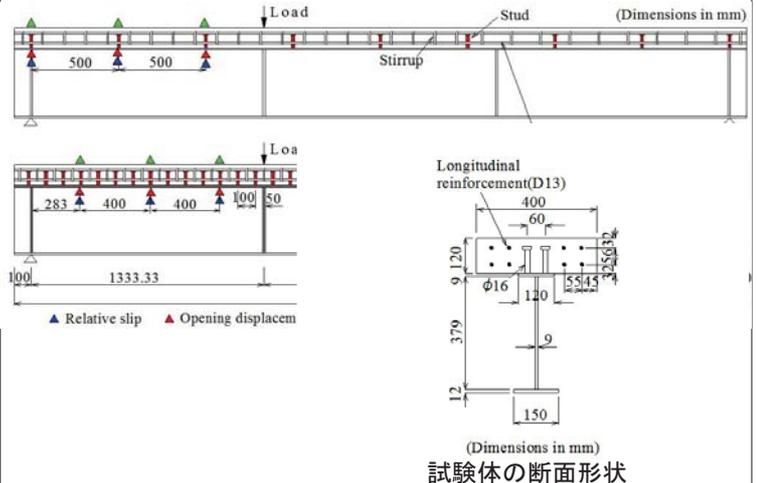


### 非合成・合成梁試験体

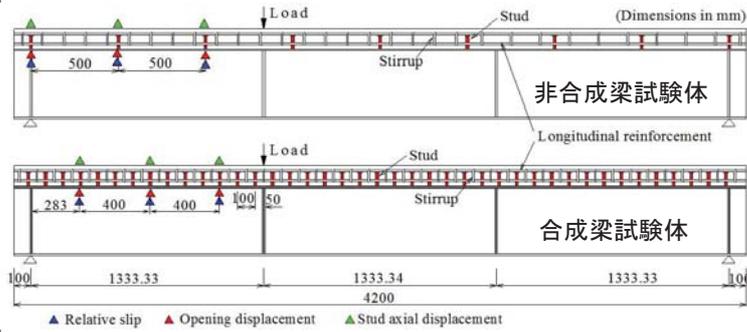


- スパン4000mmの非合成・合成梁試験体
- スタッド軸径16mm, 高さ90mmを2列で, 非合成梁では500mm, 合成梁では100mm間隔で配置
- スパン1/3点に集中載荷
- 全塑性モーメントに至るまで鋼フランジおよびウェブが座屈しない。
- 曲げ耐力時のスタッドのせん断耐力および梁試験体の不完全度を参考にスタッドの配置本数を決定した。

### 非合成・合成梁試験体



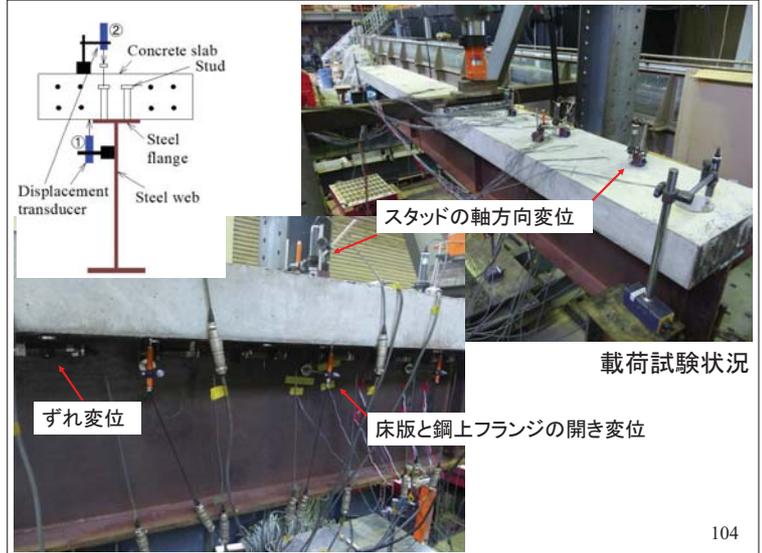
## 非合成・合成梁試験体の計測項目



### 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

103



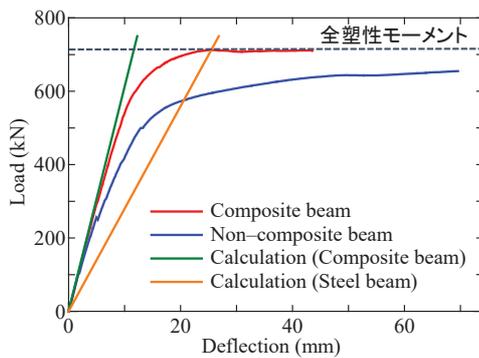
載荷試験状況

ずれ変位

床版と鋼上フランジの開き変位

104

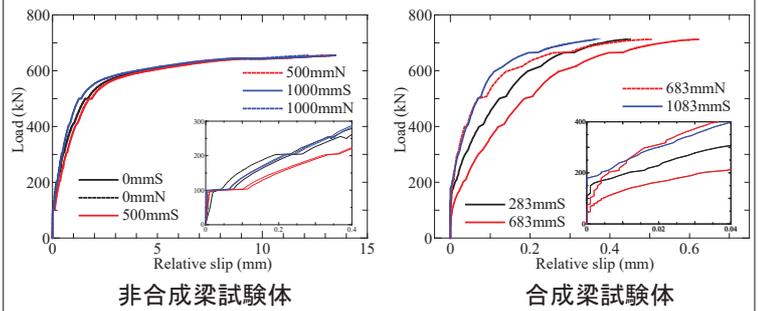
## 荷重－たわみ関係



- 非合成・合成梁とも初期剛性は完全合成の理論値とほぼ一致
- 付着が切れ始めると非合成梁の剛性低下
- 合成梁の最大荷重は全塑性モーメントに対応する荷重にほぼ一致

105

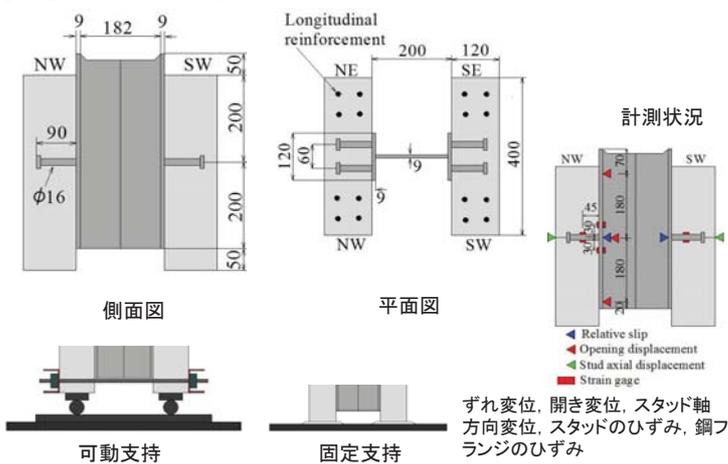
## 荷重－ずれ変位関係



- 100～200kNで付着が切れ、ずれ変位が生じ始めている。
- 合成梁では最大荷重時でもずれ変位は1mm以下
- 非合成梁では、最大荷重時のずれ変位は10mmを超えている。

106

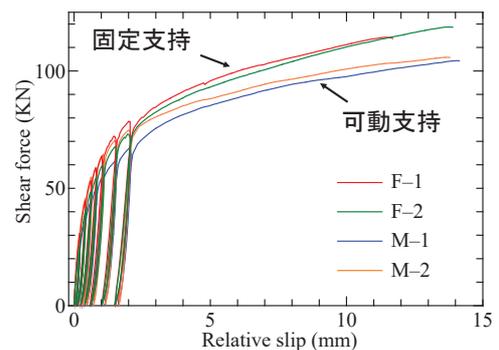
## 押抜き試験体



ずれ変位、開き変位、スタッド軸方向変位、スタッドのひずみ、鋼フランジのひずみ

107

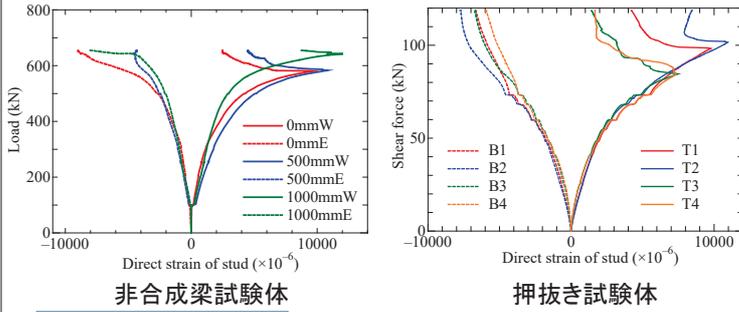
## 押抜き試験体のせん断力－ずれ変位関係



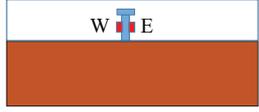
- 固定支持よりも可動支持の場合のほうがせん断耐力は小さい。

108

## スタッドのひずみ挙動

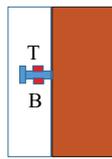


非合成梁試験体

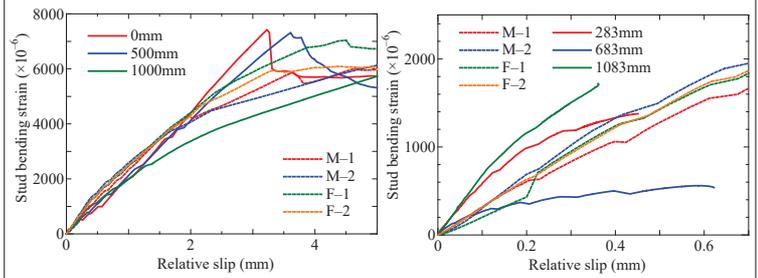


- スタッドに曲げひずみが生じている。
- 引張側のひずみの増分方向が急変

押抜き試験体



## ずれ変位—スタッド曲げひずみ関係

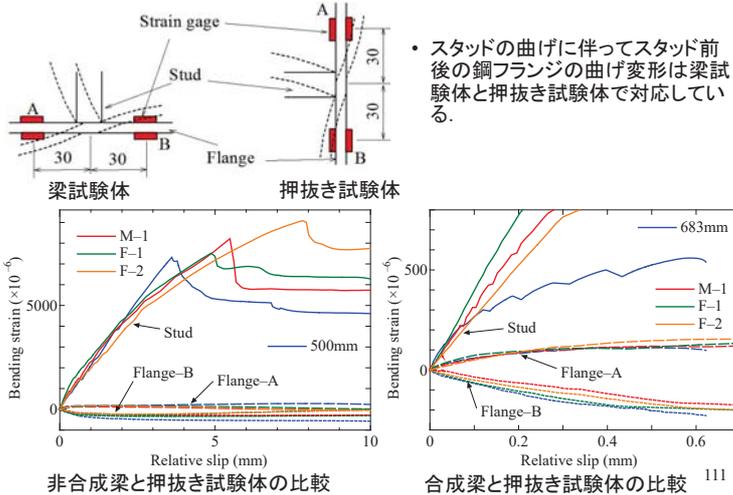


非合成梁と押抜き試験体の比較

合成梁と押抜き試験体の比較

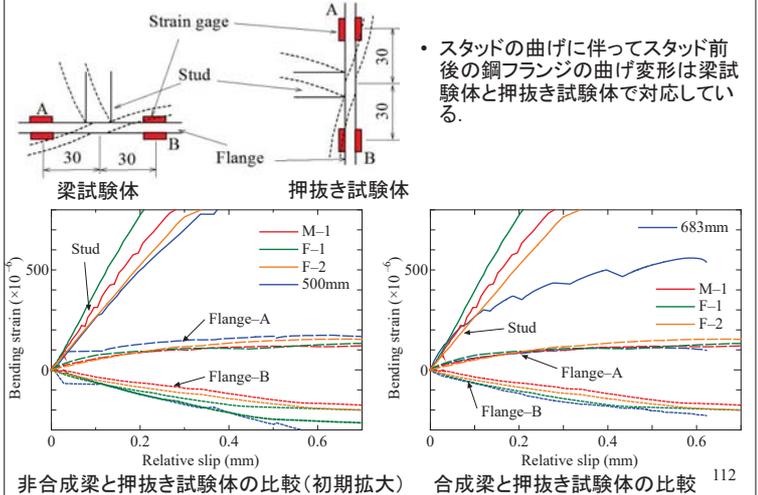
- 非合成梁試験体と押抜き試験体はよく対応している。
- 合成梁試験体では、スタッドのひずみにばらつきがあるが、平均的には対応している。

## 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。

## 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(初期拡大)

合成梁と押抜き試験体の比較

## まとめ

- 本研究で比較した梁試験および押抜き試験で得られた種々の応答値の比較結果から、簡易な要素試験である押抜き試験を実施することによって、梁試験体中のスタッドの挙動をある程度推定できていると考えられる。

参考文献  
 中島章典, 桑原伸太郎, 菅原健太郎, Nguyen Minh Hai, 藤倉修一, 溝江慶久: 非合成梁および合成梁試験体中のスタッドの詳細挙動と押抜き試験体中のそれとの対応関係, 構造工学論文集 Vol.64A, pp.747-760, 2018.3.

# 孔あき鋼板ジベル

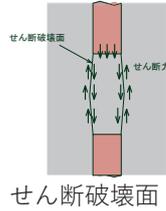
- 孔あき鋼板ジベルはLeonhardtらによって発案された。
- 孔あき鋼板ジベルは、ジベル孔内のコンクリートのせん断抵抗によってせん断力を伝達。
- ジベル孔部分のコンクリートが破壊する場合の孔あき鋼板ジベルの耐力は、ジベル孔内のコンクリートのせん断強度とジベル孔面積に依存。

・レオンハルトらの耐力評価式

$$V_u = 1.70d^2 f'_c$$

$f'_c$ : コンクリートの圧縮強度  
 $d$ : ジベル孔径

オリジナルの耐力評価式は、コンクリートの立方体強度を用いているため、上式は円柱強度に換算。



・土木学会複合構造標準示方書の耐力評価式

貫通鉄筋を有する場合 (2009,2014)

$$V_u = (1.85A - 26.1 \times 10^3) / \gamma_b$$

$$A = \frac{\pi(d^2 - \phi^2)}{4} f'_{cd} + \frac{\pi\phi^2}{4} f_{ud}$$

$$40.1 \times 10^3 \leq A \leq 383.3 \times 10^3$$

貫通鉄筋が無い場合 (2009)

$$V_u = (4.31A - 39.0 \times 10^3) / \gamma_b$$

$$A = \frac{\pi t^2}{4} \left(\frac{t}{d}\right)^{1/2} f'_{cd}$$

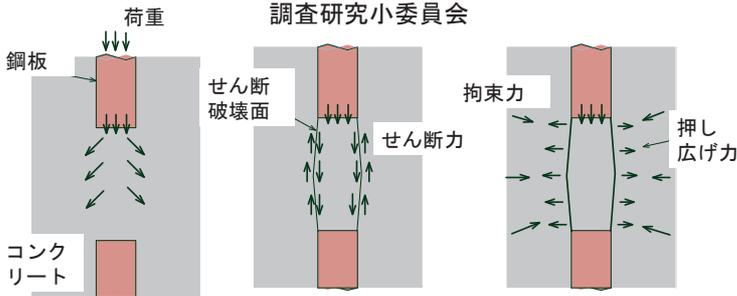
$$17.3 \times 10^3 \leq A \leq 152.4 \times 10^3$$

$$V_u = 1.6d^2 f'_{cd} / \gamma_b \quad (2014)$$

$d$ : ジベル孔径  
 $f'_{cd}$ : コンクリートの設計圧縮強度  
 $\phi$ : 貫通鉄筋径  
 $f_{ud}$ : 貫通鉄筋の設計引張強度  
 $t$ : 鋼板の板厚  
 $\gamma_b$ : 部材係数

## せん断抵抗メカニズム (貫通鉄筋無し)

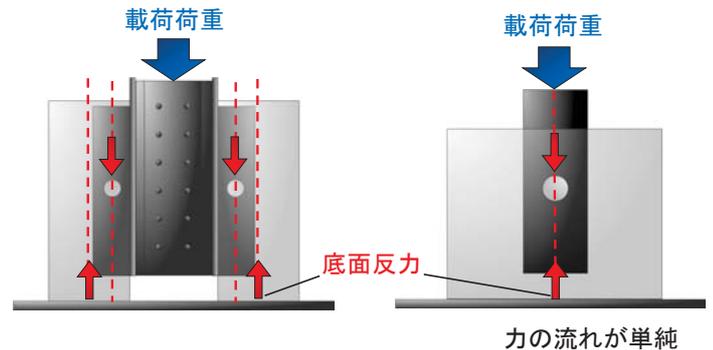
複合構造ずれ止めの性能評価法に関する調査研究小委員会



- ジベル鋼板から孔内コンクリートに力が伝達
- ジベル孔部分のコンクリートの2面せん断破壊
- せん断破壊面のずれ変位によって押し広げ力が生じる。

## 押抜き試験体

押抜き試験において、ジベル孔に伝わる力と底面反力ベクトルが同一直線上にない場合、コンクリートブロックが回転挙動を示す可能性がある。

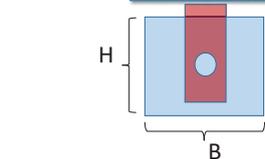


## 単純な押抜き試験に基づく実験 (貫通鉄筋無し)



パラメータ: コンクリートの強度, 孔径, コンクリートブロックの寸法, 鋼板厚など

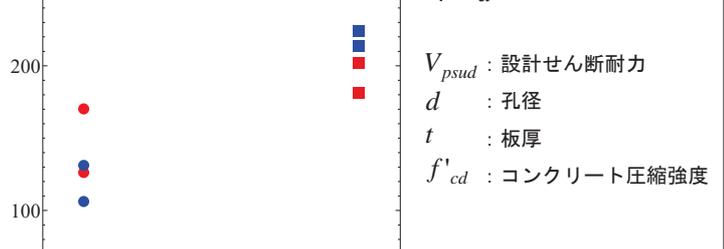
## 実験結果 せん断耐力と試験体寸法の関係



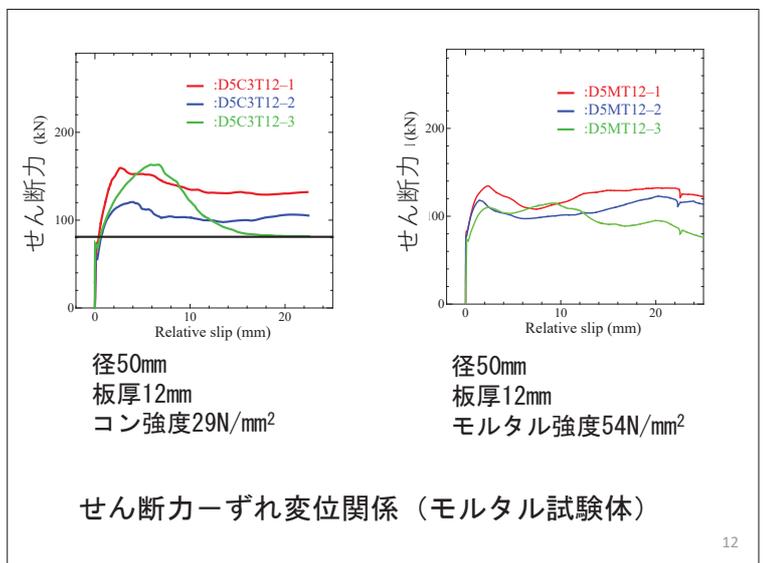
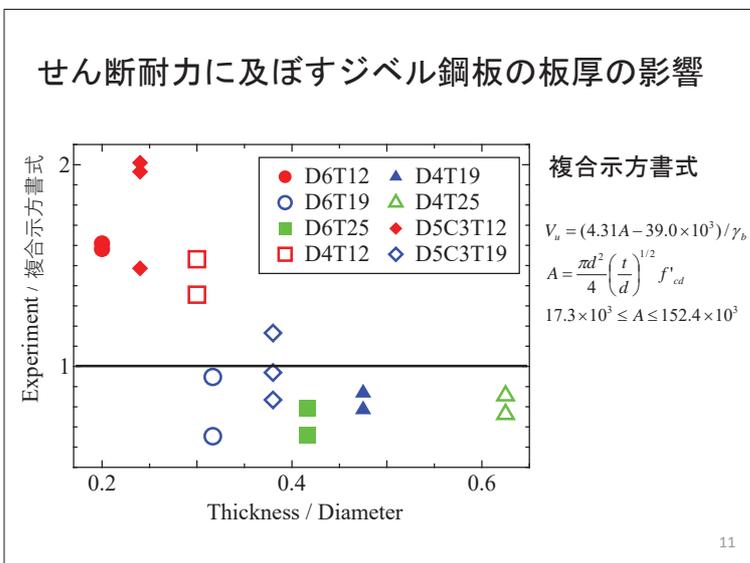
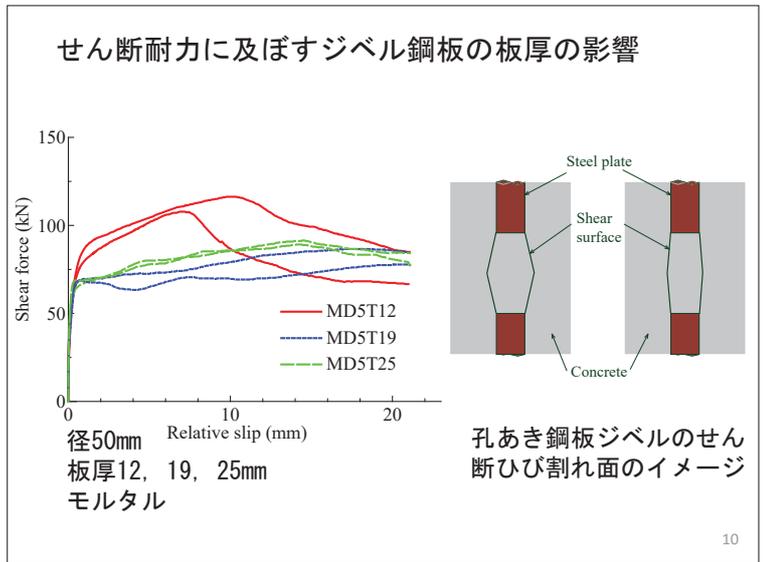
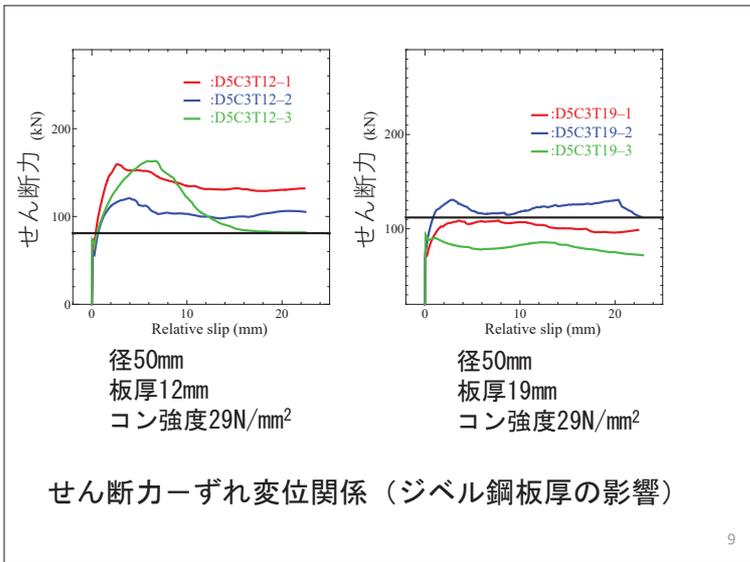
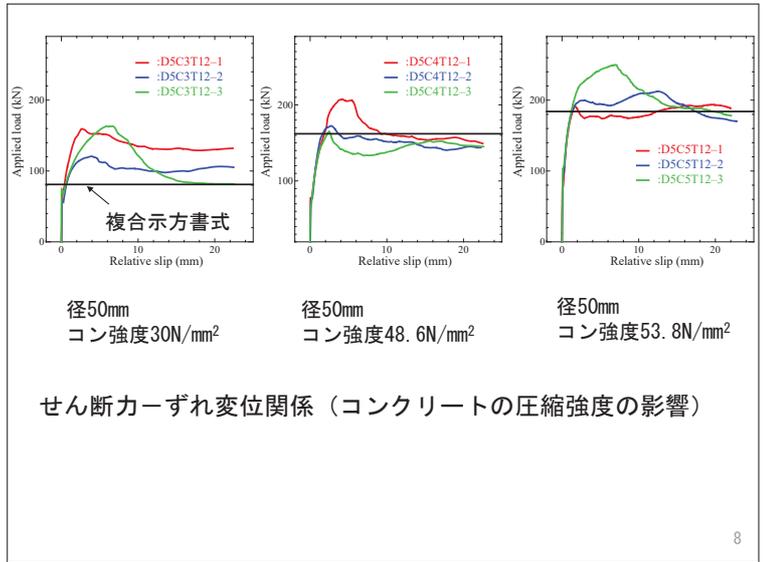
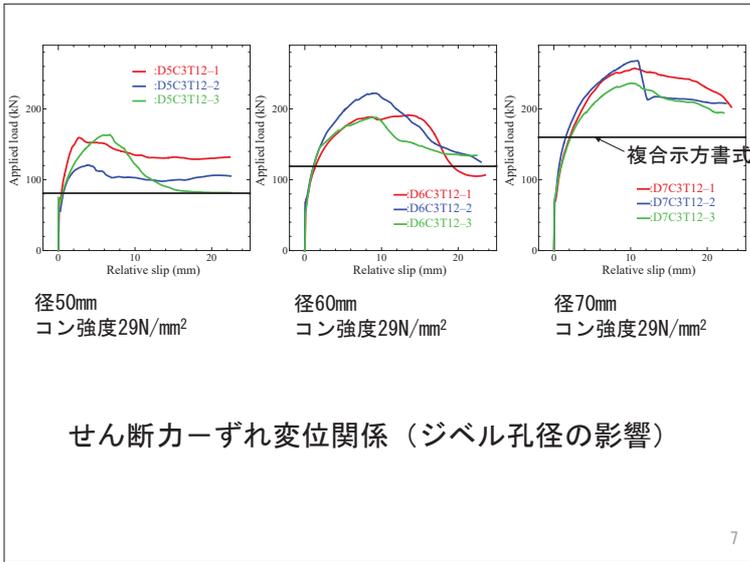
複合示方書 (2009)

$$V_{psud} = (4.31A - 39.0 \times 10^3) / \gamma_b$$

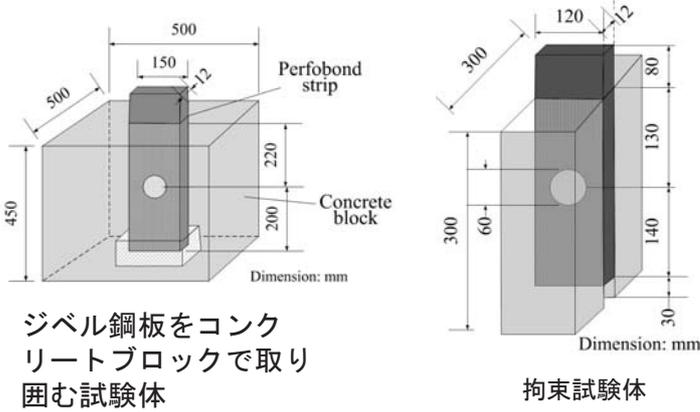
$$A = \frac{\pi t^2}{4} \left(\frac{t}{d}\right)^{1/2} f'_{cd}$$



$V_{psud}$ : 設計せん断耐力  
 $d$ : 孔径  
 $t$ : 板厚  
 $f'_{cd}$ : コンクリート圧縮強度

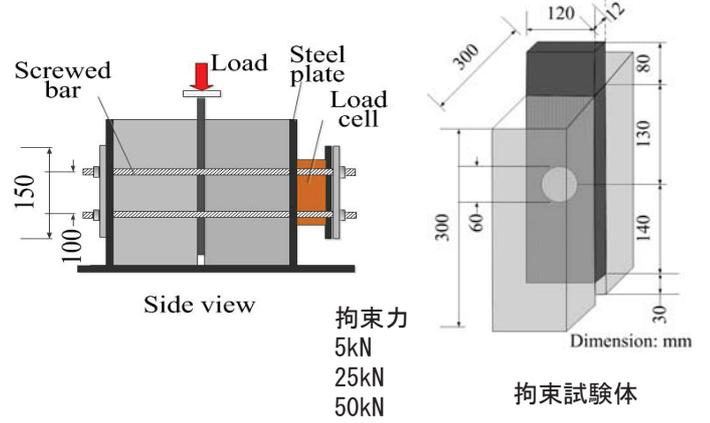


## せん断抵抗機構確認のための基礎実験

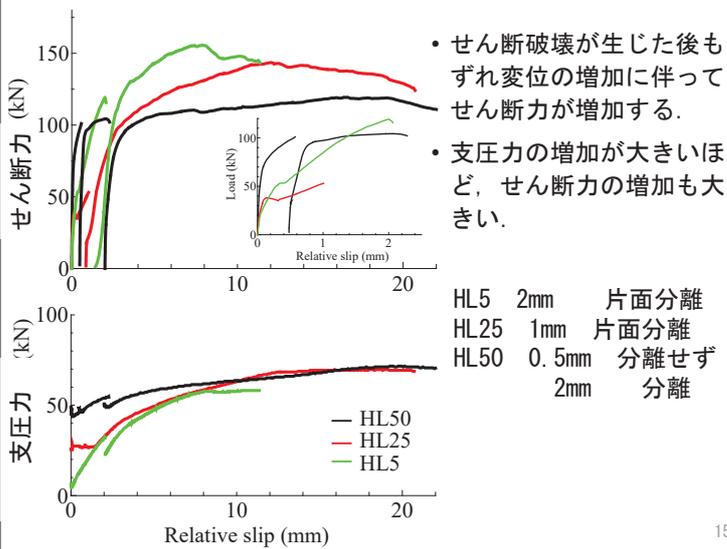


13

## 実験概要

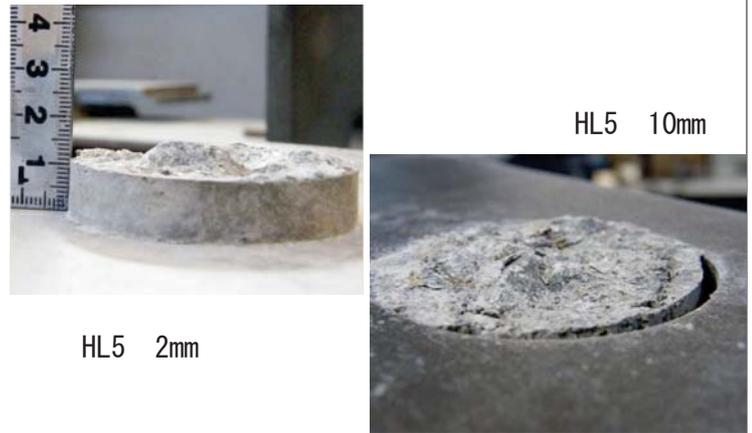


14



15

## せん断破壊面の状況



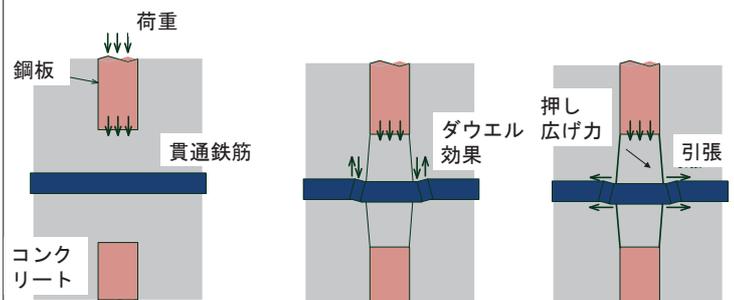
16

## せん断破壊面の状況



17

## せん断抵抗メカニズム（貫通鉄筋有り）



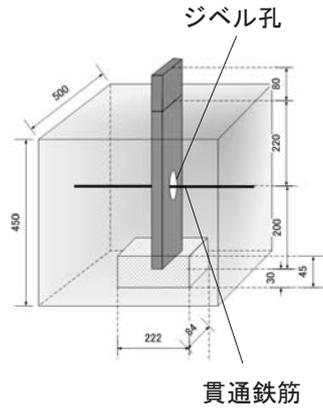
- ジベル鋼板から孔内コンクリートに力が伝達
- ジベル孔部分のせん断破壊に伴って貫通鉄筋が曲げて抵抗（ダウエル効果）
- 押し広げ力に伴って貫通鉄筋に引張が作用

18

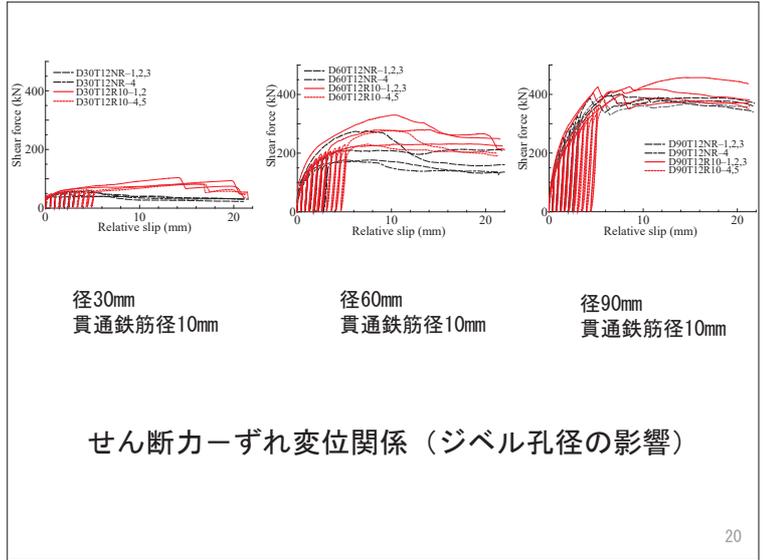
## 貫通鉄筋有りの実験

パラメータ

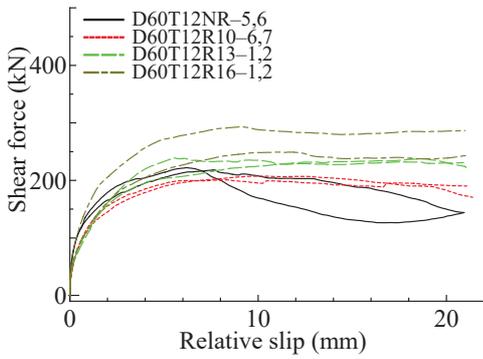
- ・ ジベル孔径
- ・ 貫通鉄筋径
- ・ 鋼板厚



19



20

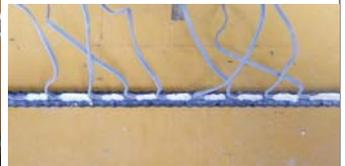
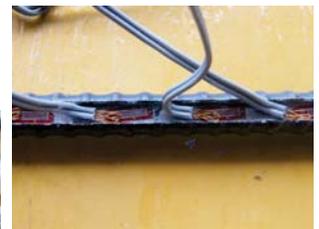
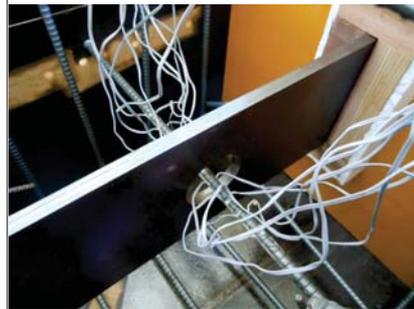


せん断カーズれ変位関係 (貫通鉄筋径の影響)

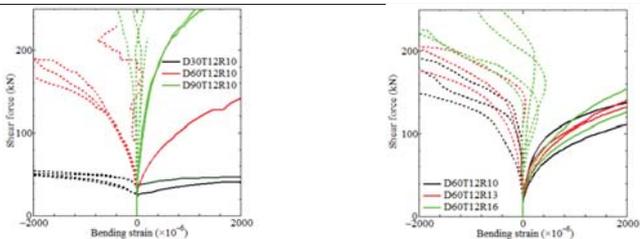
- ・ 貫通鉄筋がせん断耐力に及ぼす影響は不明

21

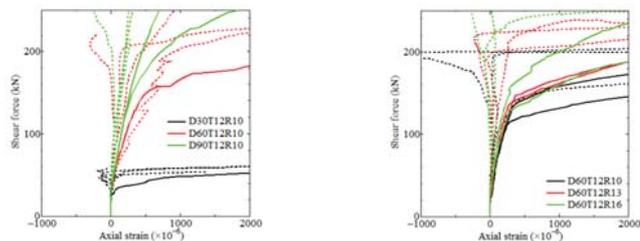
## 貫通鉄筋のひずみ計測



22

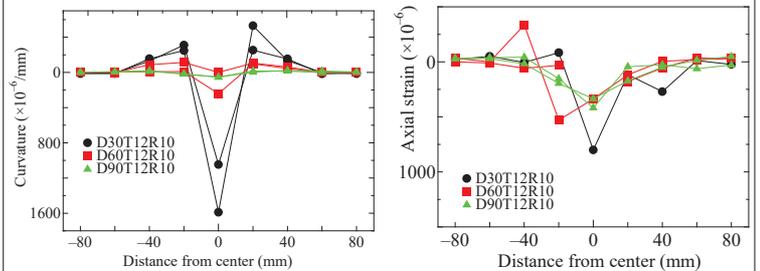


曲げひずみ-せん断力関係



軸ひずみ-せん断力関係

23



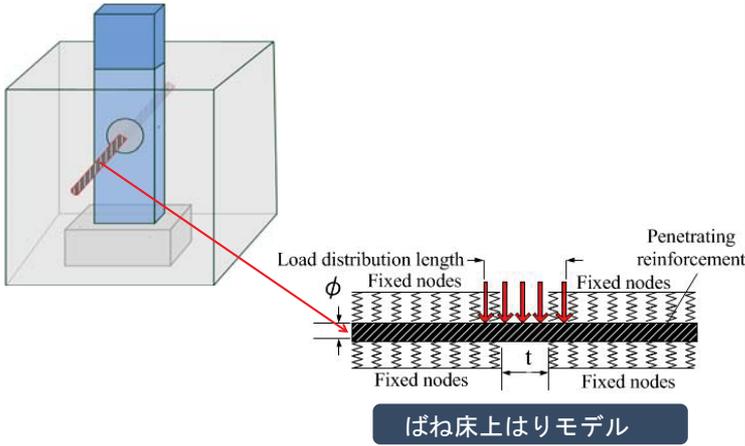
曲率分布

軸ひずみ分布

ずれ変位1mm時の曲率および軸ひずみ分布 (ジベル孔径の影響)

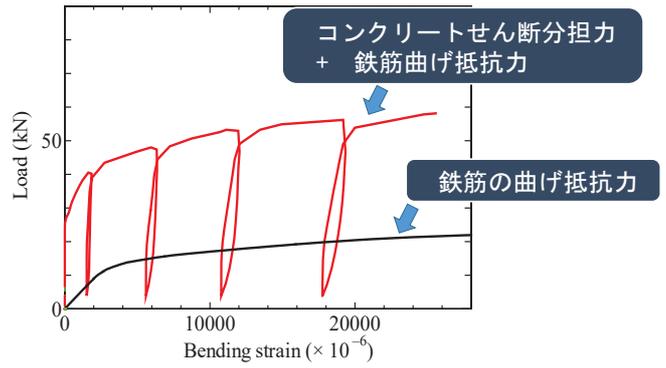
24

### 貫通鉄筋の曲げ変形に関する数値解析



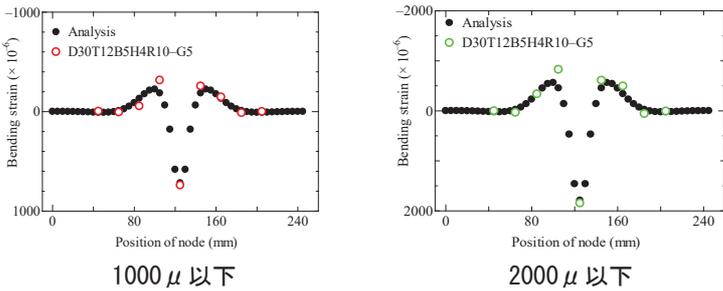
### 解析結果

例：ジベル孔径30mm, 貫通鉄筋径10mm, 板厚12mm



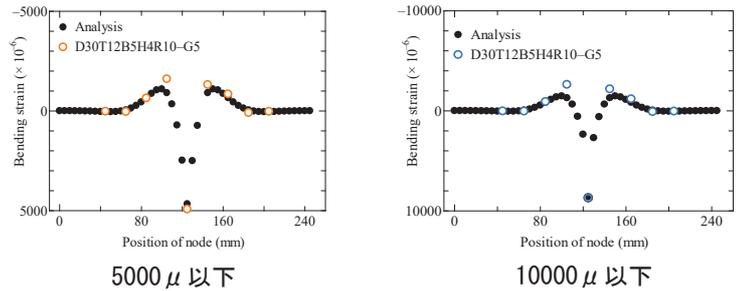
### 貫通鉄筋の曲げひずみ分布

例：ジベル孔径30mm, 貫通鉄筋径10mm, 板厚12mm



### 貫通鉄筋の曲げひずみ分布

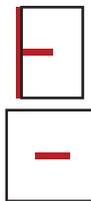
例：ジベル孔径30mm, 貫通鉄筋径10mm, 板厚12mm



この解析は貫通鉄筋の曲げ変形を定性的・定量的に表せた。

・ 貫通鉄筋のない場合の耐力評価式

$$Q_u = 0.15\kappa A_s^{0.43} f_c^{0.65} AT^{-0.5}$$

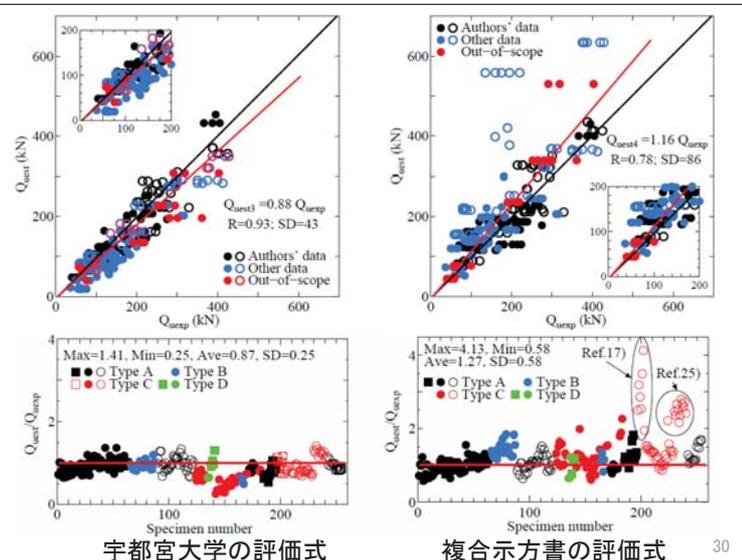


・ 貫通鉄筋のある場合の耐力評価式

$$Q_u = 0.15\alpha\kappa(A - A_{st})f_c^{0.65} A_s^{0.43} T^{-0.5} + 0.84\phi f_{yd} D^{0.1} T^{0.8}$$

$$\alpha = 6.9\phi^{0.4} D^{-0.7}$$

$Q_u$ : ジベル孔1つ当たりのせん断耐力 (N);  $D$ : ジベル孔径 (mm);  $T$ : ジベル鋼板厚 (mm);  
 $f_c$ : コンクリート圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>);  $\phi$ : 貫通鉄筋径 (mm);  $f_{yd}$ : 貫通鉄筋の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_{st}$ : 貫通鉄筋の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>);  $A$ : ジベル孔面積 (mm<sup>2</sup>);  $A_{st}$ : 貫通鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>);  
 $A_s$ : ジベル鋼板を取り囲むコンクリートの側面積 (mm<sup>2</sup>);  $\kappa$ : 試験体形状によるジベル孔周辺の拘束度を表す係数;  $\alpha$ : 貫通鉄筋によるジベル孔部分のコンクリートのせん断抵抗への影響係数



## 反省

- ずれ止めの挙動を確認する要素試験では、限界があると思われるので、実構造物の中のずれ止めの挙動をも再現できる解析手法の開発が必要と思われる。

### 参考文献

土木学会複合構造委員会：複合構造ずれ止めの抵抗機構の解明への挑戦，複合構造レポート10，pp.59-70, 172-183, 2014.8.

Nguyen Minh Hai, 中島章典, 藤倉修一：既往の押抜き試験データに基づく孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価式の適用性に関する研究，構造工学論文集，Vol.65A, pp.712-724, 2019.3.

Nguyen Minh Hai, 中島章典, 高橋直紀, 水取未流, 大野将季, 藤倉修一：押抜き試験体形状の影響を考慮した孔あき鋼板ジベルのせん断耐力の再評価，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.74, No.1, pp.22-27, 2018.1.

中島章典, NGUYEN MINH HAI：孔あき鋼板ジベルの貫通鉄筋のひずみ挙動とせん断耐力評価，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.71, No.1, pp.99-112, 2015.3.

中島章典, 橋本昌利, NGUYEN MINH HAI, 鈴木康夫, 貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構とせん断耐力評価，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.70, No.5, pp.II\_20-II\_30, 2014.5.

中島章典, 小関聡一郎, 橋本昌利, 鈴木康夫, グエンミンハイ：単純な押抜き試験に基づく孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.68, No.2, pp.495-508, 2012.8.