

大成学術財団 研究助成報告

大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明 及び 損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

東北大学大学院 都市・建築学専攻

教授 木村祥裕

研究背景

2

2011年の東北地方太平洋沖地震

従来の巨大地震に比べて地震による建築物の構造被害は低減されたものの、ドアや窓、扉などのゆがみ、インフラの損傷により学校体育館などの施設に長期間避難を余儀なくされた方々が数万人となった。

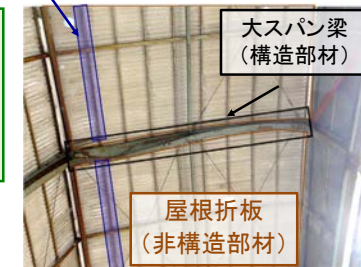


①建物の屋根被害

梁－非構造部材の
接合部での損傷
“剛性の低下”
▼
避難所として
機能しなかった事例

母屋
(非構造部材)

大スパン梁
(構造部材)



②建物の梁の被害

梁の座屈変形に
対する補剛材
(補強材)
“補剛効果”
▼
梁の変形を拘束
した事例

研究背景

3

2026年 熊本地震

東北地方太平洋沖地震と同様、地震による建築物の構造被害は低減されたものの、ドアや窓、扉などのゆがみ、インフラの損傷が顕著であった。



③建物の外装材の崩落



②屋根材の崩落

研究背景

4

巨大地震

非構造部材が**損傷**⇒専門的な**調査はなし**
⇒使用者が**生活に支障**をきたすことで**発見**

中地震

構造部材が無損傷 = 継続使用可能
非構造部材が**損傷** ⇒ **即時利用は難しい**

課題

非構造部材の損傷を可視化



①建物の屋根被害

梁－非構造部材の
接合部での損傷
“剛性の低下”
▼
避難所として
機能しなかった事例

研究目的
大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明
及び
損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

- 1) 縮小模型横座屈実験による並列梁の横座屈性状の把握
- 2) 屋根折板(非構造部材)の振り実験による回転補剛剛性の算出
- 3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

研究目的

5

大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明 及び
損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

並列梁の横座屈に伴い屋根折板に生じる
補剛モーメント及び回転補剛剛性

並列梁の横座屈耐力及び変形性能評価

対象) 屋根折板により拘束された**梁の変形性状の確認**

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛剛性の算出

梁-屋根折板接合部より屋根折板に生じる
振りモーメント

接合治具の異なる屋根折板の回転補剛剛性

対象) 梁と**屋根折板接合部の変形性状の確認**

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

PLAを用いた等分布圧力下の屋根部材の応力伝達機構
DICによる屋根部材の変形状態の可視化

対象) 屋根折板の**変形性状の確認**

研究目的

6

大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明 及び
損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

並列梁の横座屈に伴い屋根折板に生じる
補剛モーメント及び回転補剛剛性

並列梁の横座屈耐力及び変形性能評価

対象) 屋根折板により拘束された**梁の変形性状の確認**

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛剛性の算出

梁-屋根折板接合部より屋根折板に生じる
振りモーメント

接合治具の異なる屋根折板の回転補剛剛性

対象) 梁と**屋根折板接合部の変形性状の確認**

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

PLAを用いた等分布圧力下の屋根部材の応力伝達機構
DICによる屋根部材の変形状態の可視化

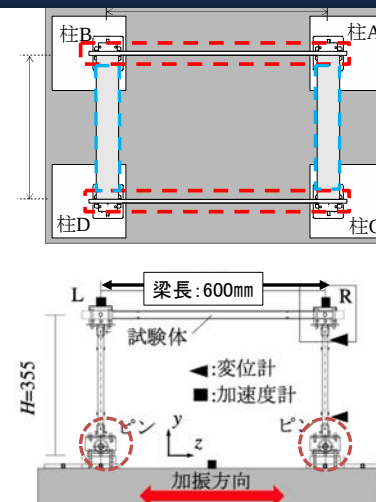
対象) 屋根折板の**変形性状の確認**

実験概要

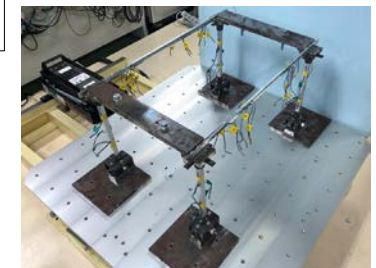
1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

実験概要(実験装置)

8

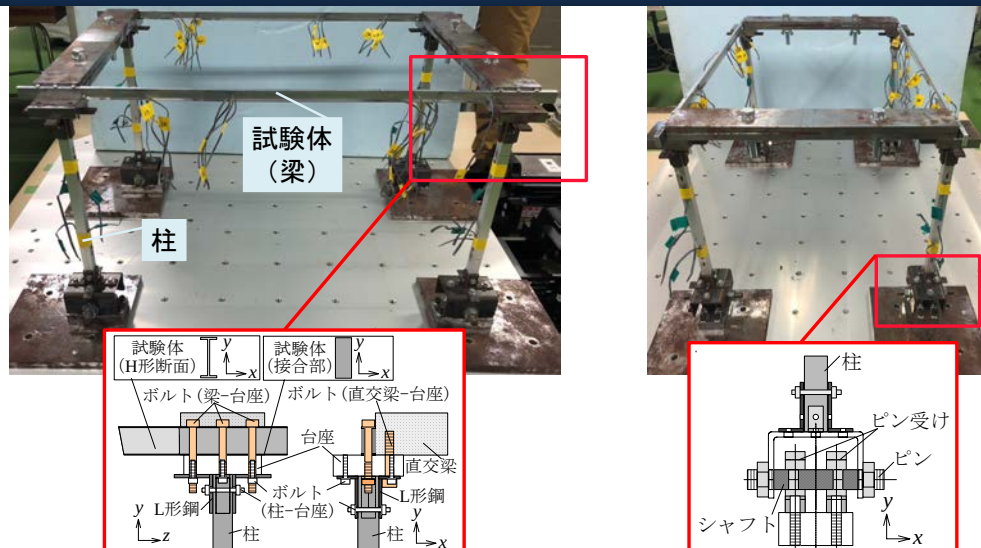


繰返し(振動)載
荷実験

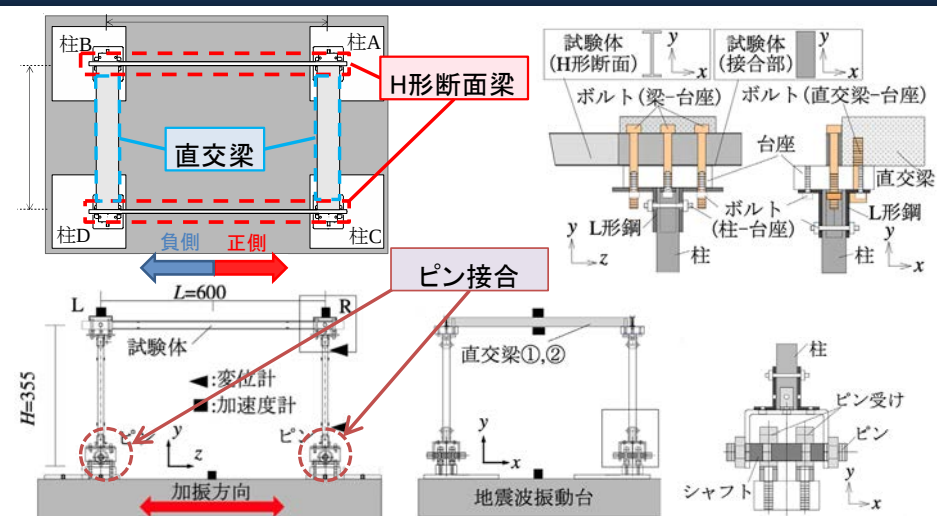


デジタル振動制御装置
(極大地震振動試験システム)
DSC40-SMART

実験概要(実験装置)

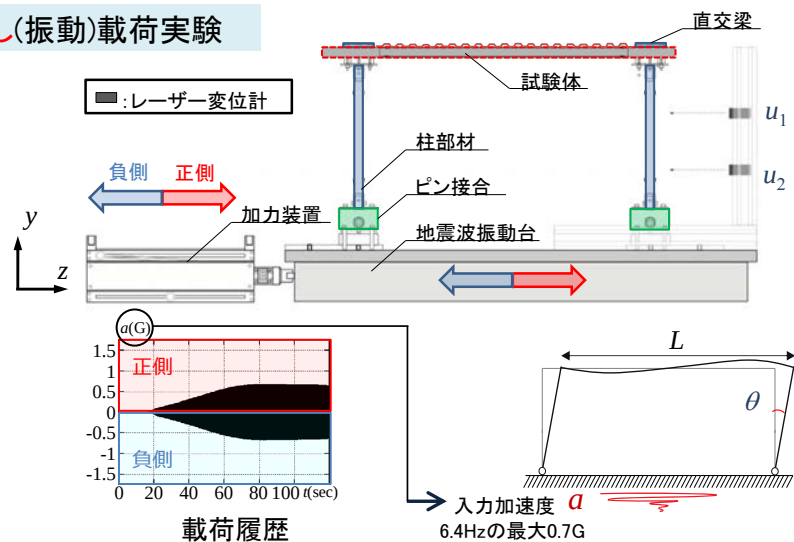


実験概要(装置詳細)



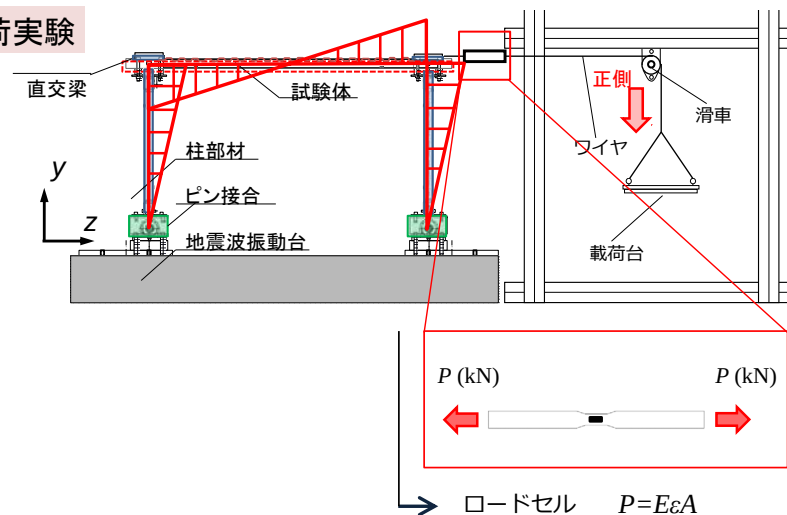
実験概要(載荷方法)

繰り返し(振動)载荷実験



実験概要(載荷方法)

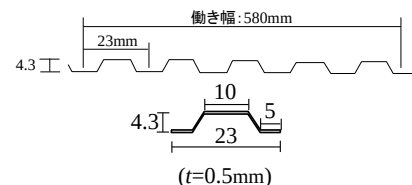
単調載荷実験



実験概要(補剛形式)

13

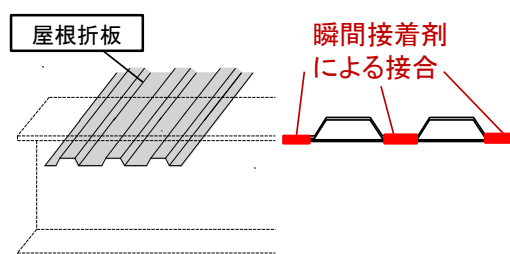
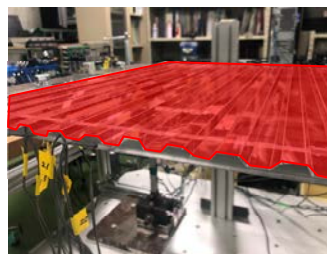
連続補剛材



- ・形状:角波サイディング
- ・材種:アルミニウムA1050

連続補剛材の材料特性

E_b	σ_y
kN/mm ²	N/mm ²
53.3	178



実験概要(試験体一覧)

14

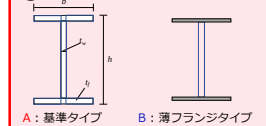
架構荷重実験(計18体)

A-CS-S70

① ② ③

試験体 名称	梁断面	横座屈細長比	修正一般化細長比	補剛条件	荷重条件
		λ_1	λ'_{hp}		
試験体A	H-17×6×0.8×1.23	344	0.95	無補剛	単調荷重
			0.68	連続補剛	繰返し荷重 (正弦波)
			0.95	無補剛	
			0.68	連続補剛	
試験体B	H-16×6×0.9×0.75	373	1.02	無補剛	単調荷重
			0.7	連続補剛	繰返し荷重 (正弦波)
			1.02	無補剛	
			0.7	連続補剛	

① 梁断面形状



② 補剛の有無

NS: 無補剛
CS: 連続補剛

③ 荷重プログラム

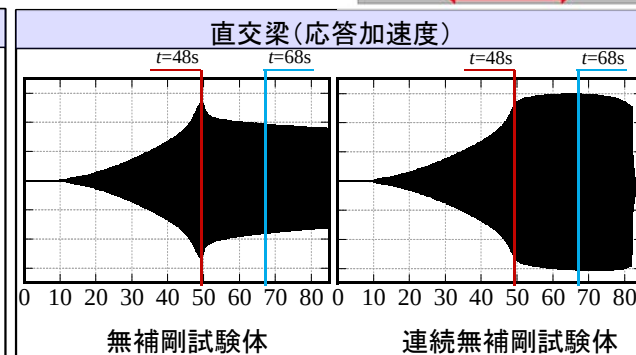
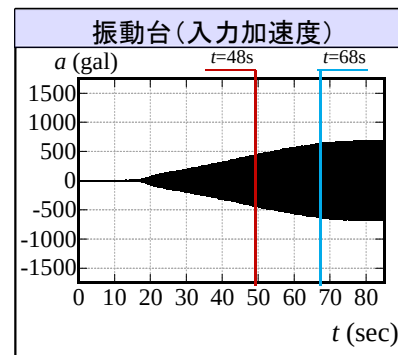
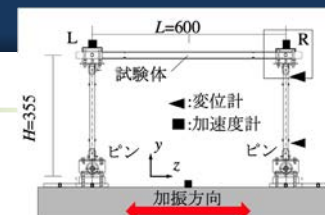
C : 繰返し荷重
M : 単調荷重

実験結果

1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

実験結果(時刻歴)

加速度—時刻歴関係

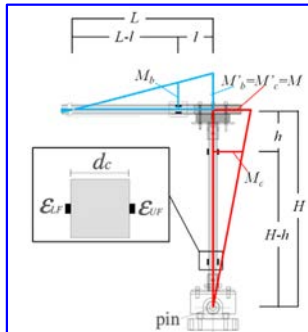
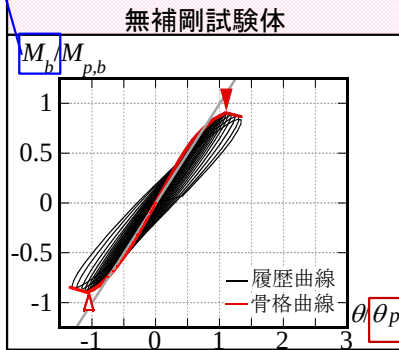


実験結果(履歴曲線)

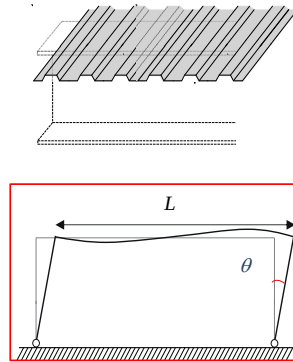
17

材端曲げモーメント一部材角関係(履歴曲線)

$$M_b = \frac{\varepsilon_{UF} - \varepsilon_{LF}}{d_c} E_c I_c \left(\frac{H}{H-h} \right) \left(\frac{L-l}{L} \right)$$



梁の材端M=柱の材端Mを確認



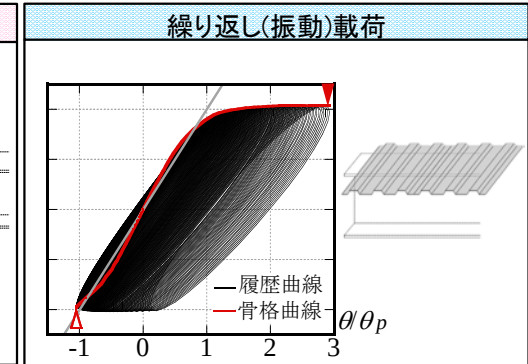
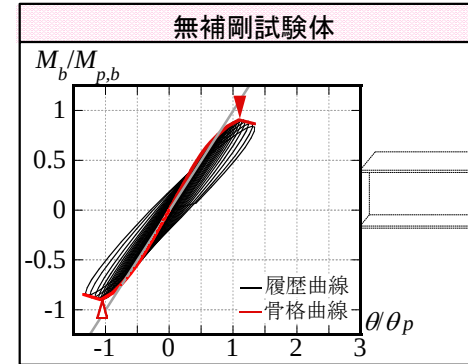
全塑性時の柱の部材角

$$\theta_p = \frac{M_{p,b} L}{6 E_b I_b} \left(1 + \frac{E_b I_b H}{2 E_c I_c L} \right)$$

実験結果(時刻歴)

18

材端曲げモーメント一部材角関係(履歴曲線)

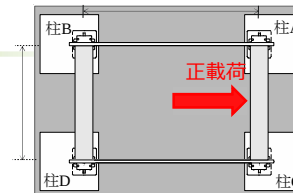
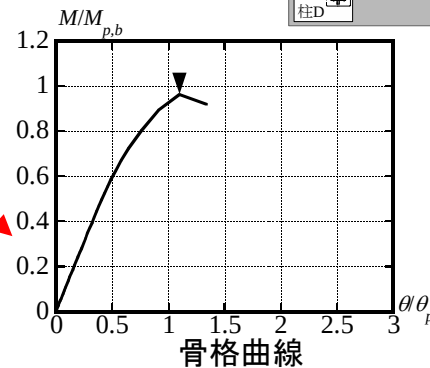
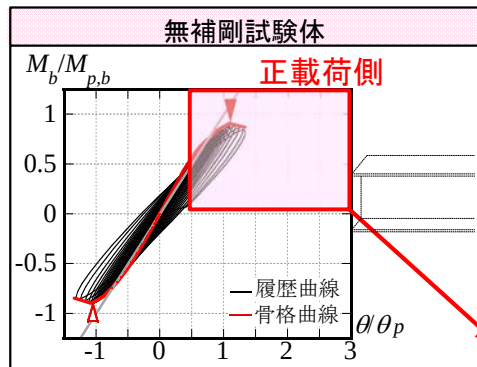


連続補剛の場合、最大荷重後も耐力を保持しながら部材角が正側に上昇 → 梁の横座屈変形が原因

実験結果(時刻歴)

19

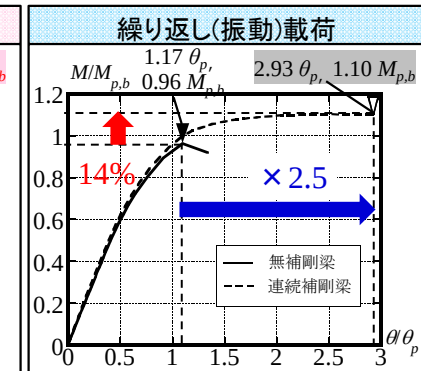
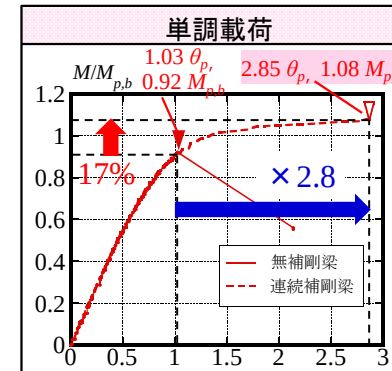
材端曲げモーメント一部材角関係(履歴曲線)



実験結果(骨格曲線)

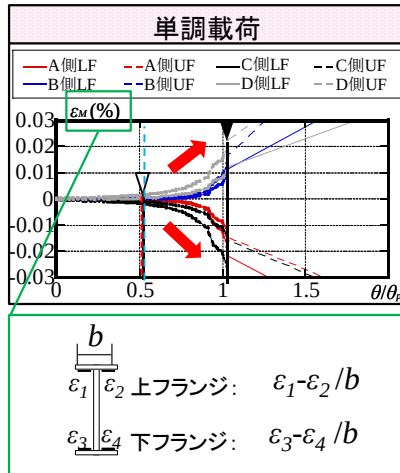
20

材端曲げモーメント一部材角関係(骨格曲線)

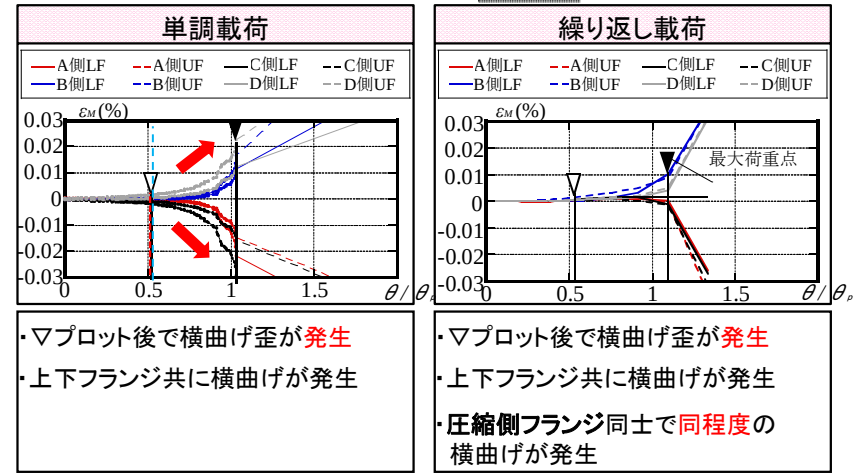


無補剛梁より連続補剛梁の最大荷重は14~17%程度向上
また、変形性能は2.5~2.8倍程度向上

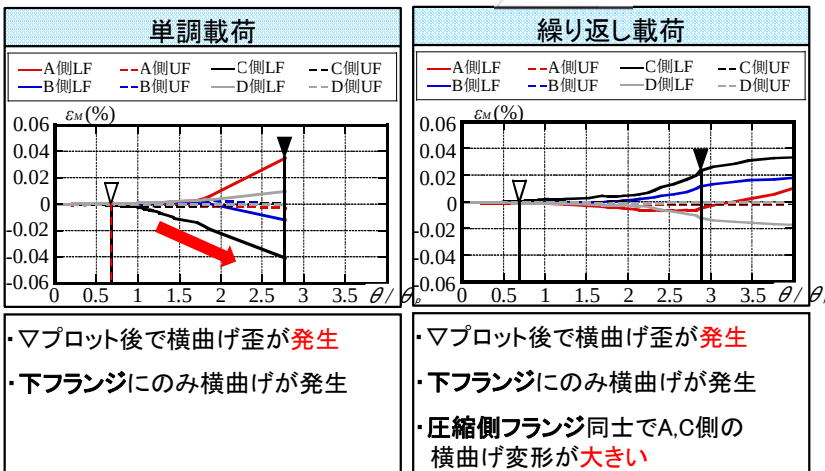
横曲げ歪一時刻歴関係(無補剛)



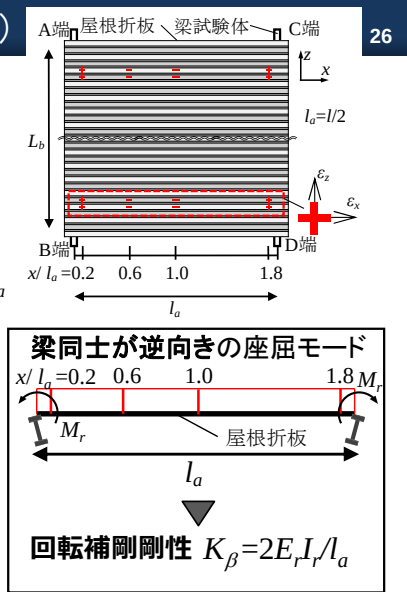
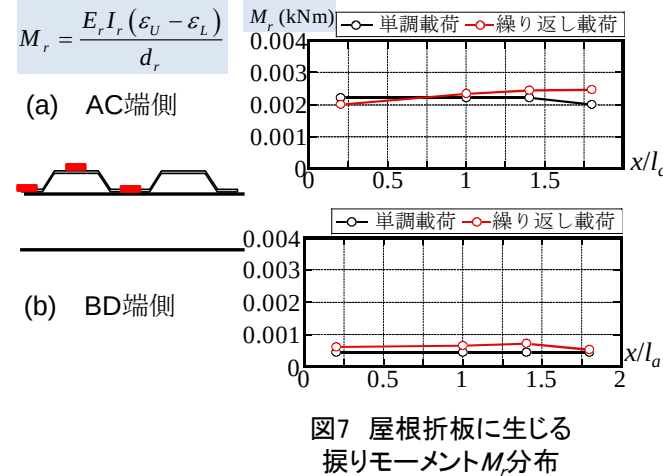
横曲げ歪一時刻歴関係(無補剛)



横曲げ歪一時刻歴関係(連続補剛)



屋根折板に生じたモーメント分布



横座屈性能評価

横座屈耐力評価

32

限界状態設計指針により評価

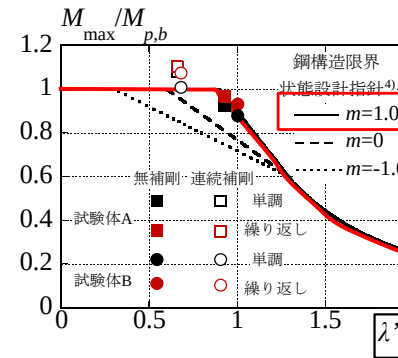
限界状態設計指針

連続補剛, 梁端拘束度による
座屈拘束効果を考慮していない

一般化細長比

$$\lambda_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_c}} \cdots \text{梁の全塑性モーメント}$$

$$\lambda_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_c}} \cdots \text{弾性横座屈モーメント}$$



修正一般化細長比

$$\lambda'_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_{cr}}} \cdots \text{弾性横座屈モーメント}$$

文献1) (12)式

回転補剛性
 $K_\beta = 2E_r I_r / l_a$

箱型柱による
完全拘束(固定支持)

連続補剛, 梁端拘束度による
座屈拘束効果を考慮した

1) 木村祥裕, 佐藤唯, 鈴木敦訓: 勾配曲げモーメントを受ける連続補剛H形鋼梁の弾塑性横座屈挙動に及ぼす柱の握り抵抗による拘束効果, 日本建築学会構造系論文集, 第87巻, 第793号, pp.316-327, 2022.3

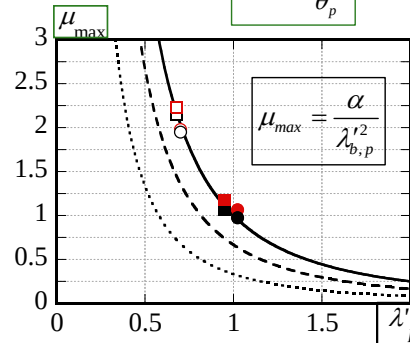
(2.5)式の修正一般化細長比を用いることで, 弾塑性耐力を座屈曲線で概ね評価できる

塑性変形倍率評価

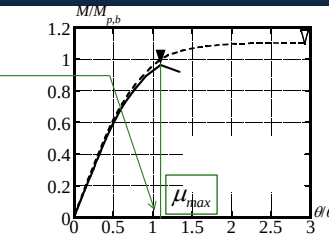
33

限界状態設計指針により評価

$$\mu_{max} = \frac{\theta_{max}}{\theta_p}$$



..... 等曲げモーメント: $\alpha = \frac{1}{3}$
 --- 一端モーメント: $\alpha = \frac{2}{3}$
 — 逆対称曲げモーメント: $\alpha = 1$



回転補剛性 $K_\beta = 2E_r I_r / l_a$ 箱型柱による完全拘束(固定支持)
 連続補剛, 梁端拘束度による座屈拘束効果を考慮した

修正一般化細長比

$$\lambda'_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_{cr}}} \cdots \text{弾性横座屈モーメント}$$

文献1) (12)式

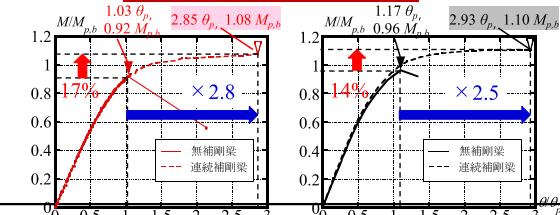
1) 木村祥裕, 佐藤唯, 鈴木敦訓: 勾配曲げモーメントを受ける連続補剛H形鋼梁の弾塑性横座屈挙動に及ぼす柱の握り抵抗による拘束効果, 日本建築学会構造系論文集, 第87巻, 第793号, pp.316-327, 2022.3

最大荷重時の梁端回転角と定義した各試験体の塑性変形倍率は $\alpha=1.0$ を代入した(2.6)式により評価できる

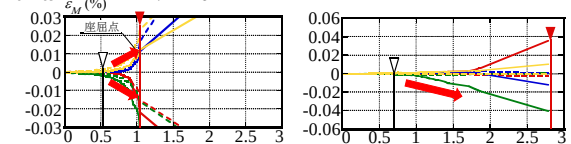
まとめ

38

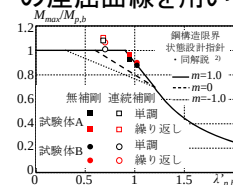
[1] 無補剛梁より連続補剛梁の最大荷重: 14~17%程度向上
 変形性能: 2.5~2.8倍程度向上



[2] 屋根折板によって梁の横座屈変形が拘束され, 骨組の耐力や変形性能が向上する。



[3] 各試験体の最大荷重は、(2.5)式の修正一般化細長比により設計指針⁶⁾の座屈曲線を用いて評価できる。

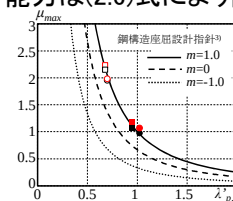


修正一般化細長比(梗概(5)式)

$$\lambda'_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_{cr}}} \dots \text{梁の全塑性モーメント}$$

$$\lambda'_{p,b} = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{M_{cr}}} \dots \text{弾性横座屈モーメント}$$

[4] 最大荷重時の梁端回転角と定義した各試験体の塑性変形能力は(2.6)式により評価できる。



逆対称曲げモーメントを受ける
梁の変形倍率評価式(梗概(6)式)

$$\frac{\theta_{max}}{\theta_y} = \frac{\alpha}{\lambda'^2_{p,b}} \dots \text{修正一般化細長比}$$

実験概要

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛性の算出

大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明 及び
損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発

1) 縮小模型振動実験による並列梁の横座屈性状の把握

並列梁の横座屈に伴い屋根折板に生じる
補剛モーメント及び回転補剛性

並列梁の横座屈耐力及び変形性能評価

対象) 屋根折板により拘束された梁の変形状の確認

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛性の算出

梁-屋根折板接合部より屋根折板に生じる
振りモーメント

接合治具の異なる屋根折板の回転補剛性

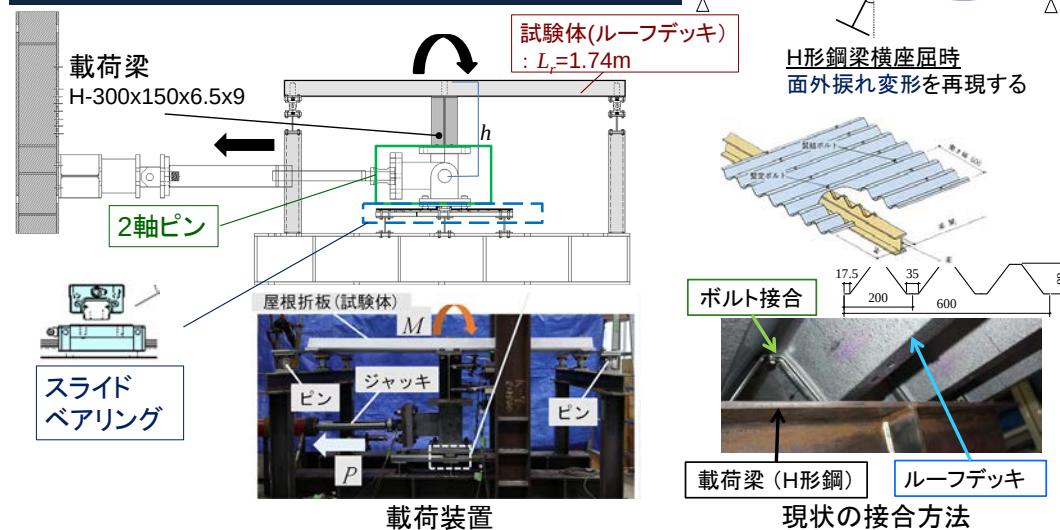
対象) 梁と屋根折板接合部の変形状の確認

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

PLAを用いた等分布圧力下の屋根部材の応力伝達機構
DICによる屋根部材の変形状態の可視化

対象) 屋根折板の変形状の確認

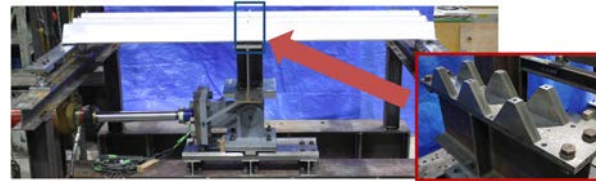
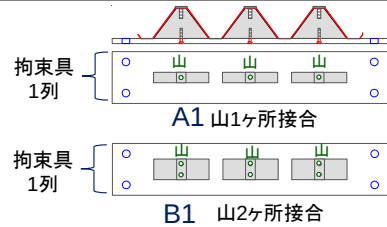
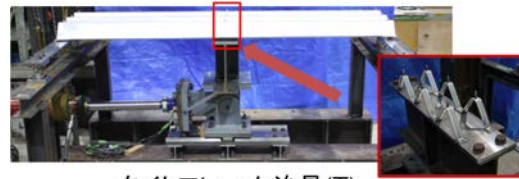
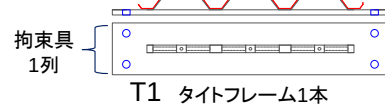
実験装置概要



実験装置概要

43

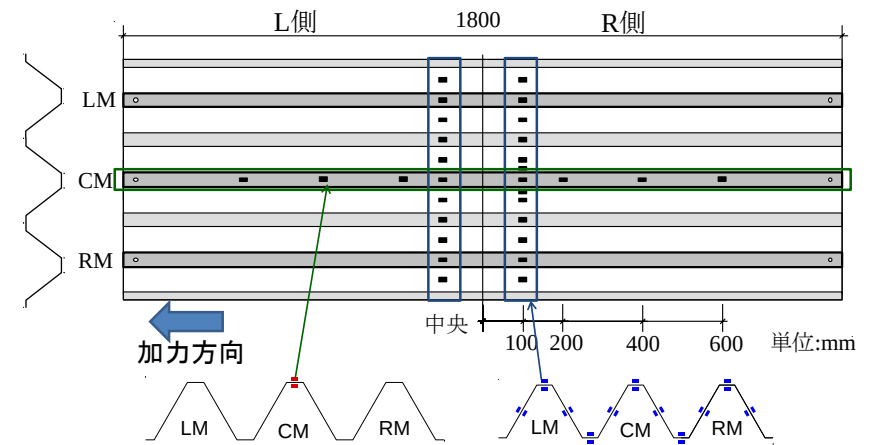
現状の接合方法



接合部の剛性を向上するため一拘束具治具(A,B)

実験装置概要

44



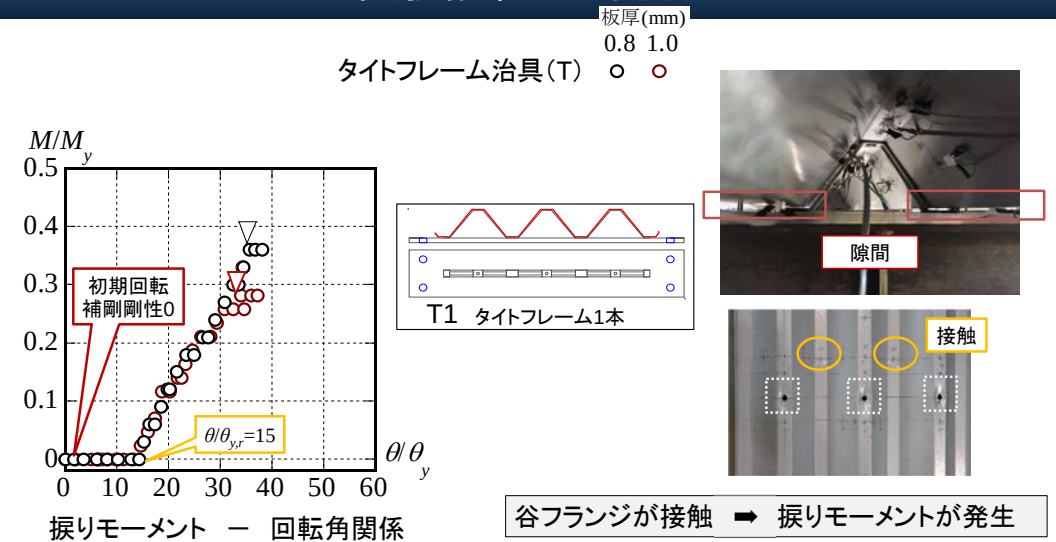
載荷点近傍の断面歪分布: 中央から左右100mmの全断面に貼付
材長方向の歪分布: 中央から左右100, 200, 400, 600mmのCMIに貼付

実験結果

2) 屋根折板の振り実験による回転補剛性の算出

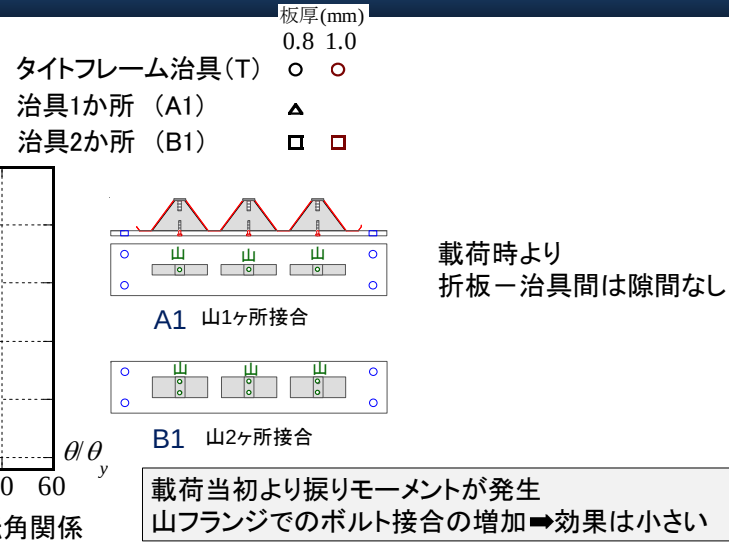
実験結果 (M-θ関係)

46



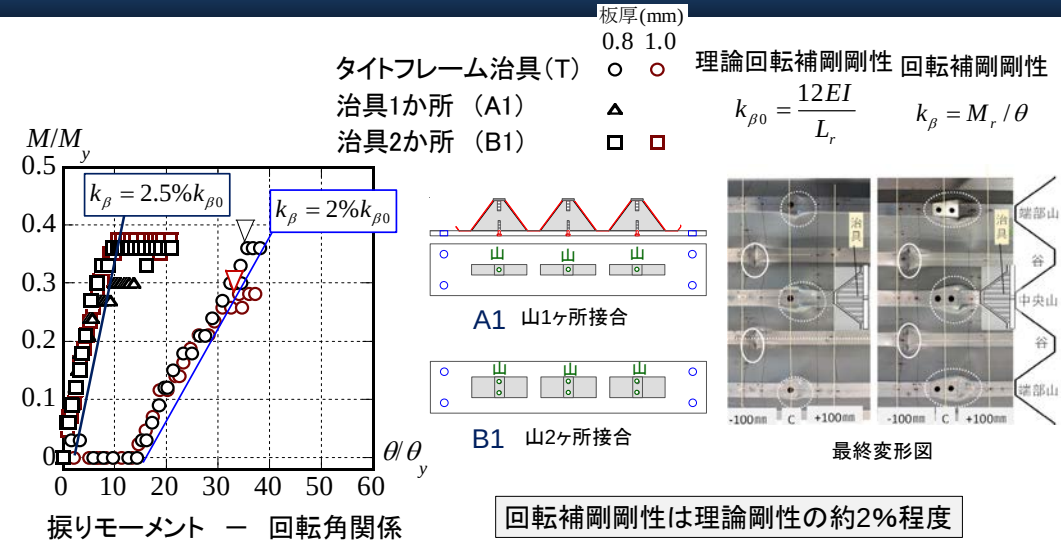
実験結果 (M-θ関係)

47



実験結果 (M-θ関係)

48



まとめ

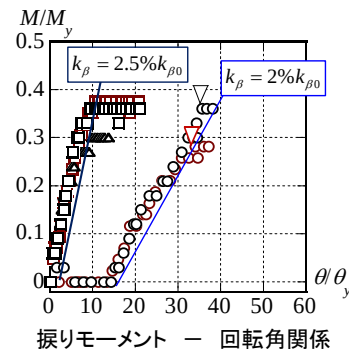
52

実構造物に使用されているタイトフレーム接合
H形鋼梁と屋根折板の**接触に伴い**振りモーメントが発生

剛な治具接合

載荷と**同時に**振りモーメントが発生

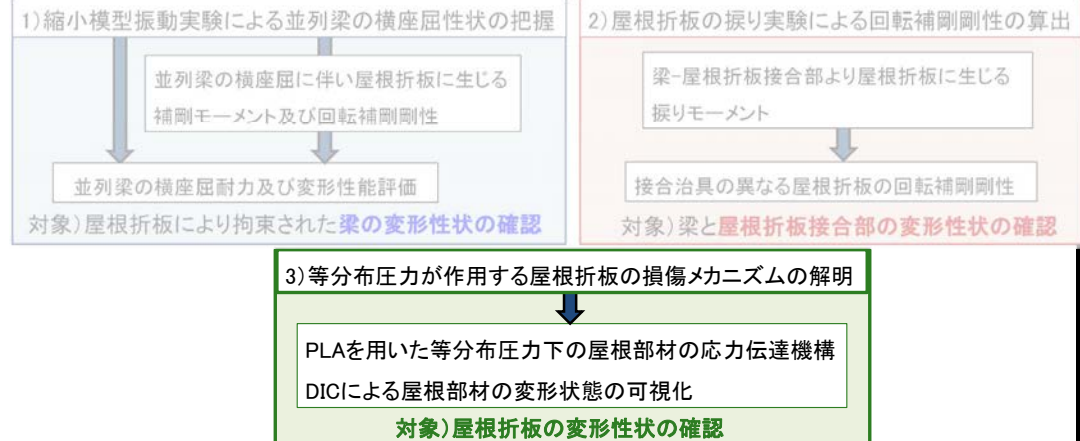
屋根折板の回転剛性は**理論値の2%程度**となっている。



研究目的

53

大地震時の非構造部材の応力伝達機構解明 及び
損傷可視化に基づく地震後継続システムの開発



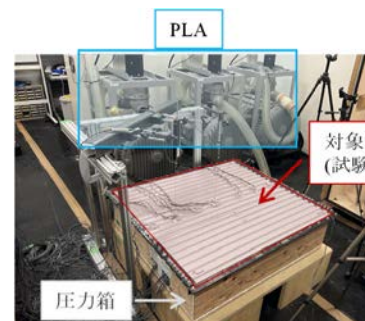
実験概要

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

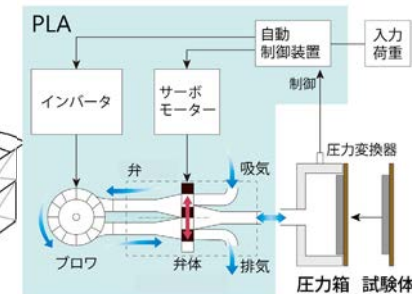
実験概要

55

PLA (Pressure Loading Actuator)



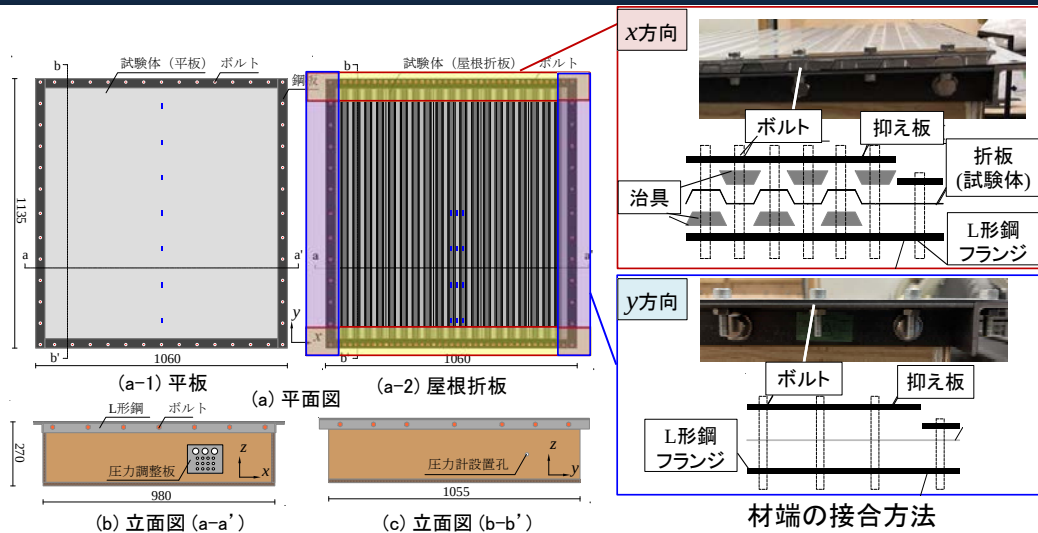
PLA装置及び試験体



PLAの制御方法

実験概要

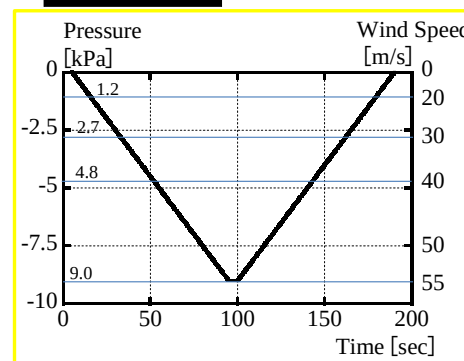
56



実験概要

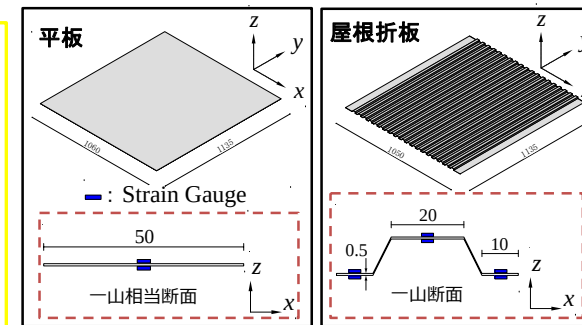
57

実験概要



載荷圧力

ひずみ計測位置



	板厚 d (mm)	断面二次モーメント I (mm ⁴)
平板	0.5	0.5
屋根折板	0.3	512.4
		323.9

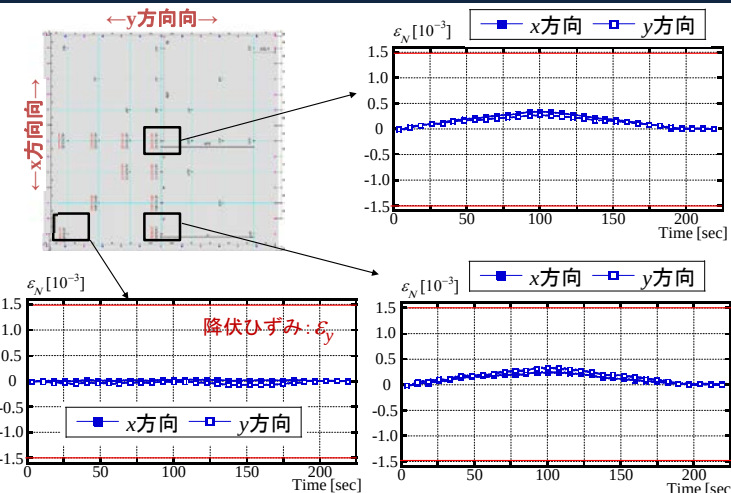
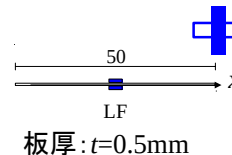
実験結果

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

実験結果(軸歪)

59

軸歪(平板)



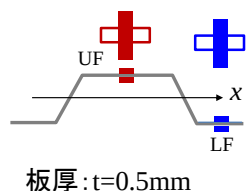
x方向)とy方向)の差は
小さい。
引張歪のみ発生

軸歪-時刻歴

実験結果(軸歪)

60

軸歪(屋根折板)

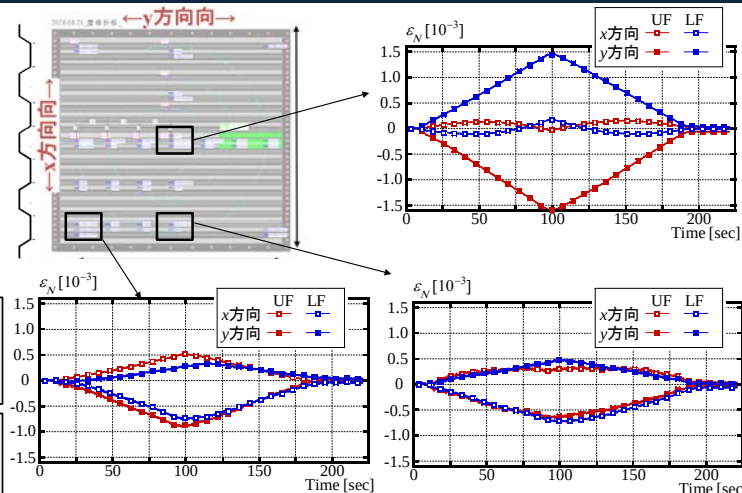


x方向)ウェブが伸縮する

軸歪は小さい

y方向)強軸の曲げ

軸歪は大きい



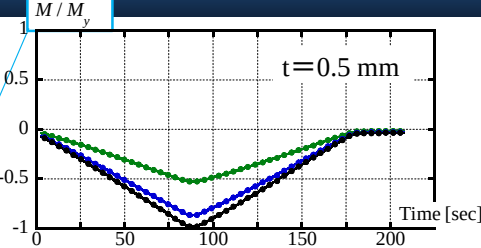
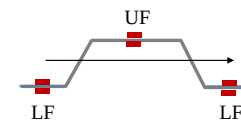
軸歪-時刻歴

実験結果(曲げモーメント)

61

曲げモーメント

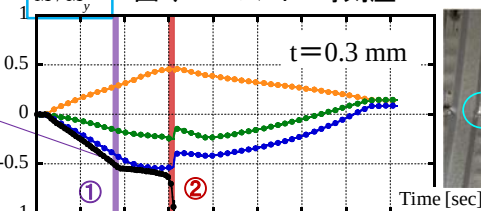
$$M=2EI(\varepsilon_{CF}-\varepsilon_{LF})/d$$



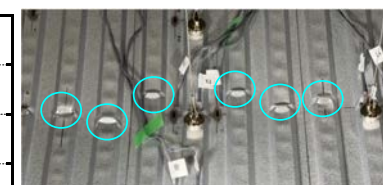
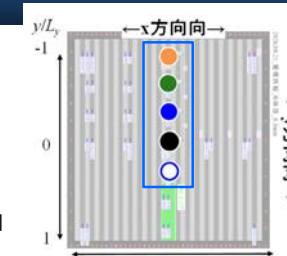
曲げモーメント-時刻歴

中央の山
 $M/M_y=0.5$
(4.2kPa付近)

モーメントが停留



曲げモーメント-時刻歴



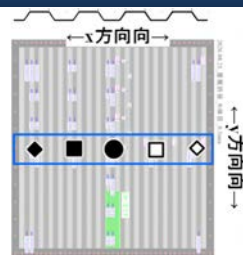
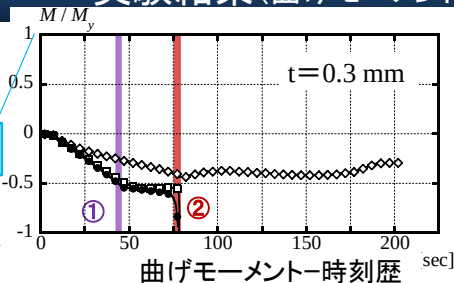
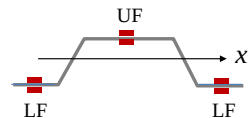
② y方向/Ly=0付近に局部座屈

実験結果(曲げモーメント)

62

曲げモーメント

$$M=2EI(\varepsilon_{CF}-\varepsilon_{LF})/d$$

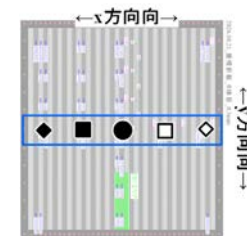
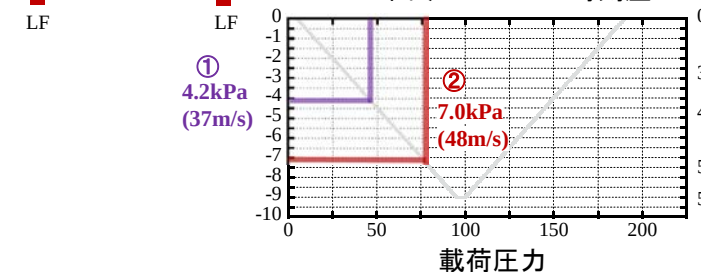
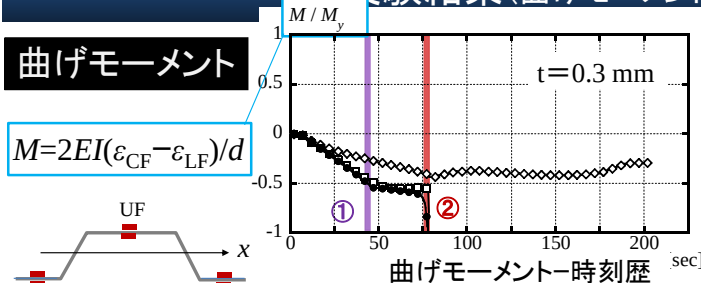
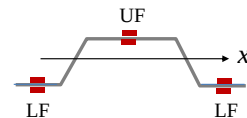


実験結果(曲げモーメント)

63

曲げモーメント

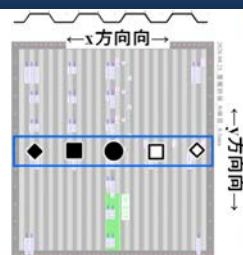
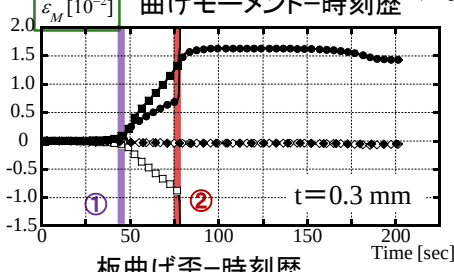
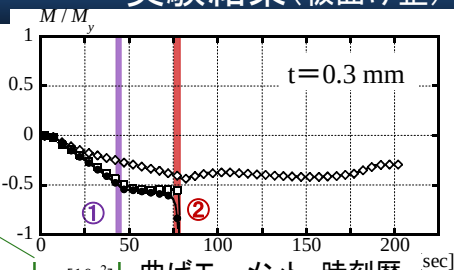
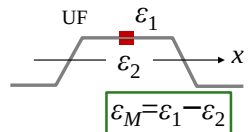
$$M=2EI(\varepsilon_{CF}-\varepsilon_{LF})/d$$



実験結果(板曲げ歪)

64

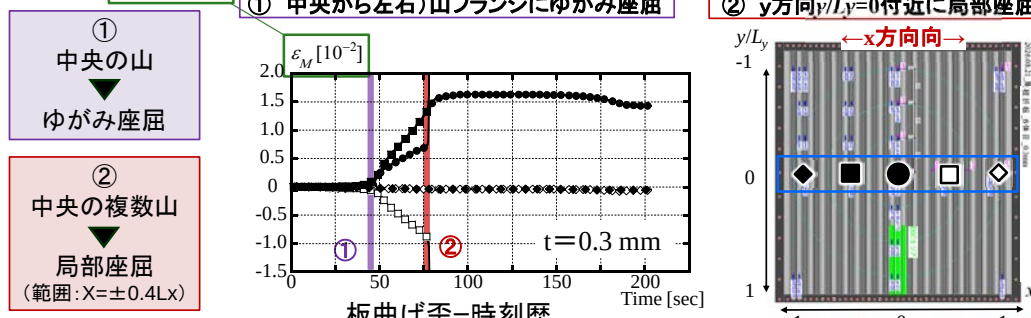
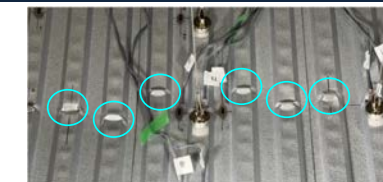
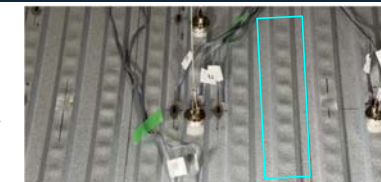
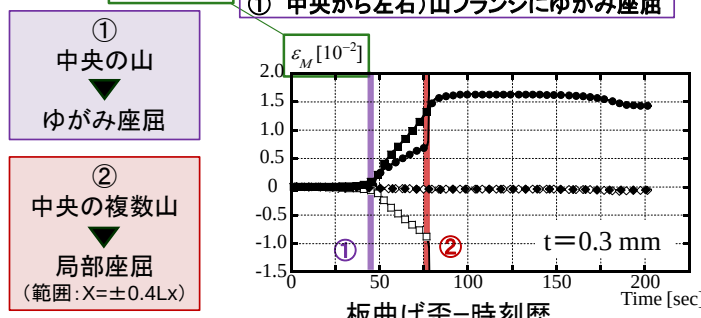
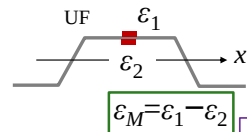
板曲げ歪



実験結果(変形性状)

65

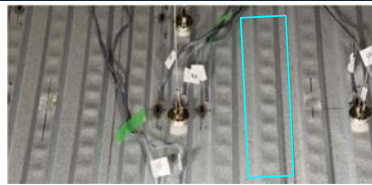
板曲げ歪



実験結果(変形性状)

66

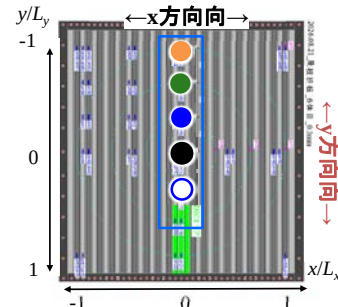
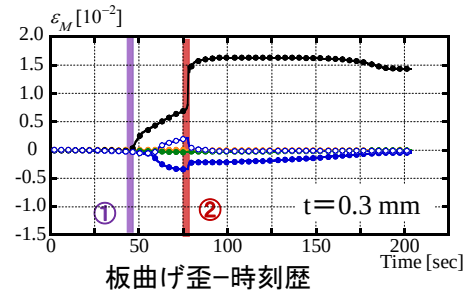
板曲げ歪



① 中央から左右)山フランジにゆがみ座屈

①
中央の山
ゆがみ座屈

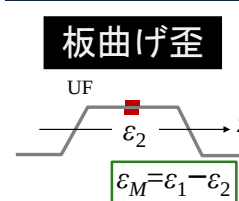
②
中央の複数山
局所座屈
(範囲: $y = \pm 0.3L_y$)



実験結果(変形性状)

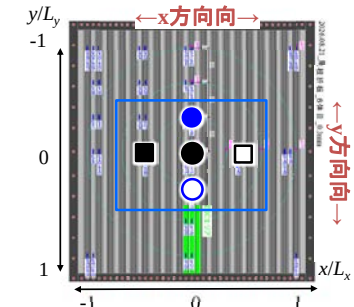
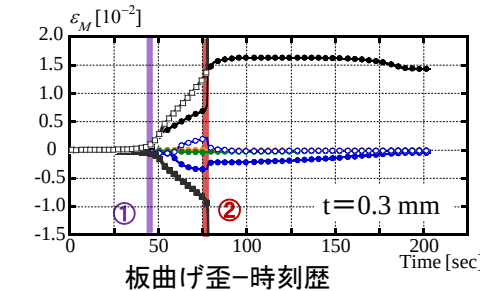
67

板曲げ歪



① 中央から左右)山フランジにゆがみ座屈

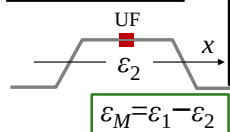
山フランジ
中央より $(x, y) = \pm 0.35L$ の範囲
4kPa付近
ゆがみ座屈



実験結果(変形性状)

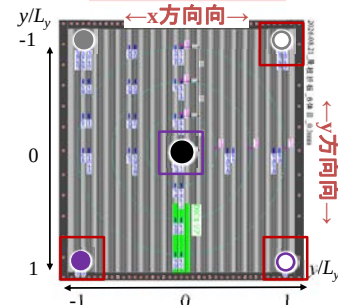
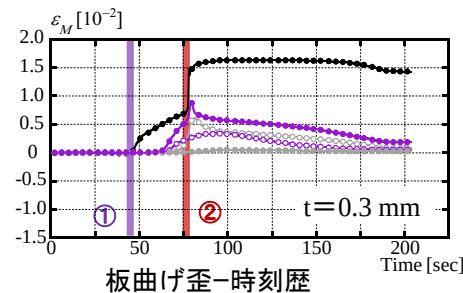
68

板曲げ歪



① 中央山フランジにゆがみ座屈発生時

② 隅角部に局所座屈

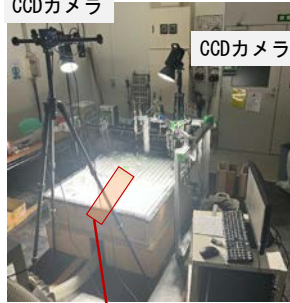


DICによる変位の可視化

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

CCDカメラ

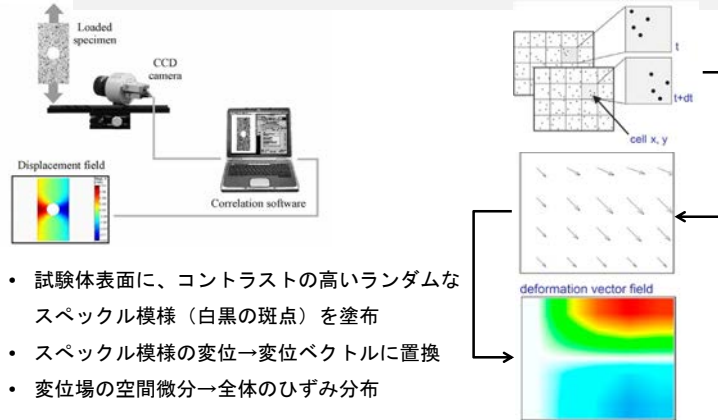
CCDカメラ



DIC (Digital Image Correlation)

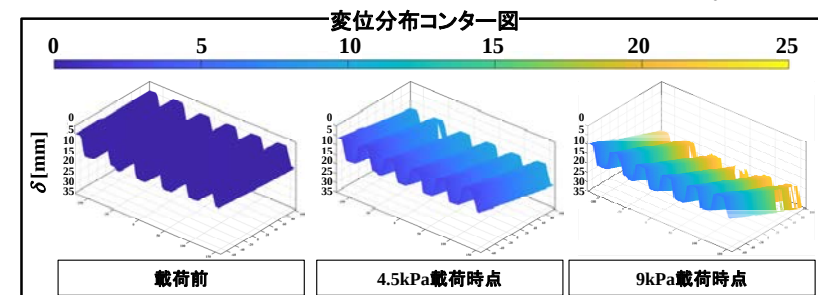
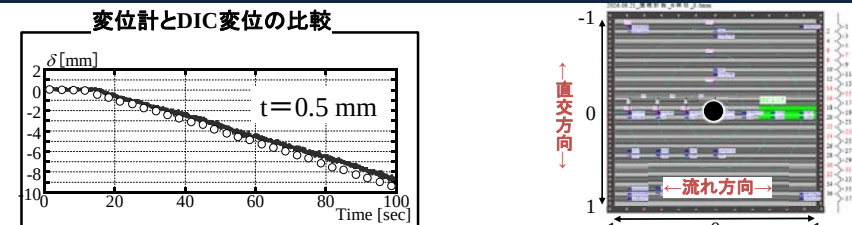
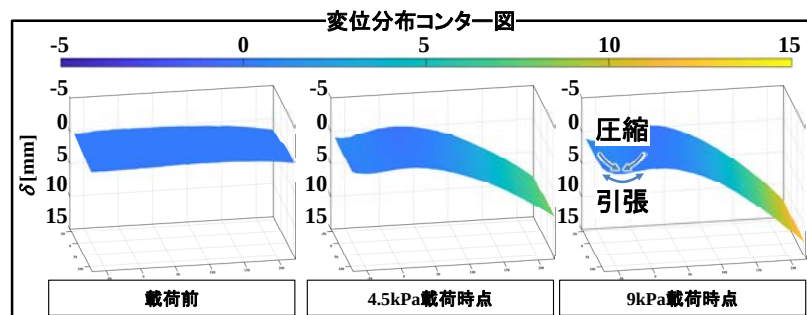
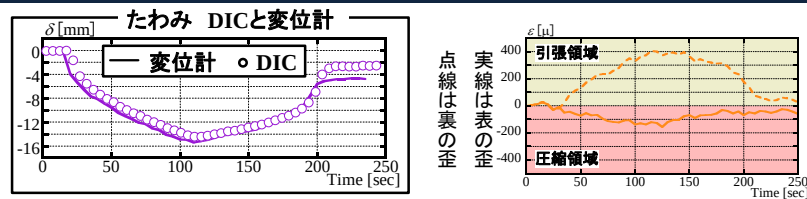
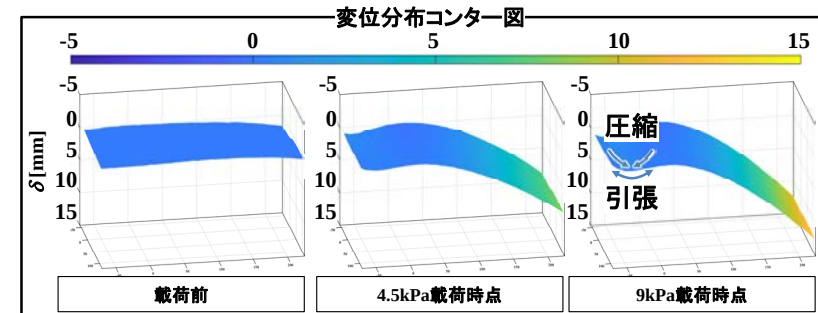
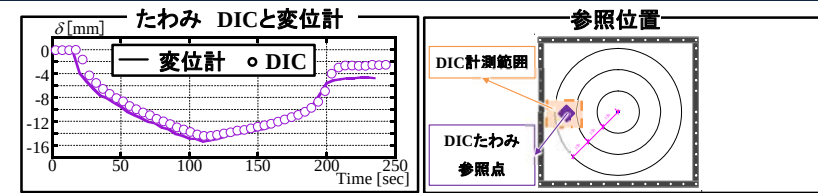
非接触型の光学測定技術

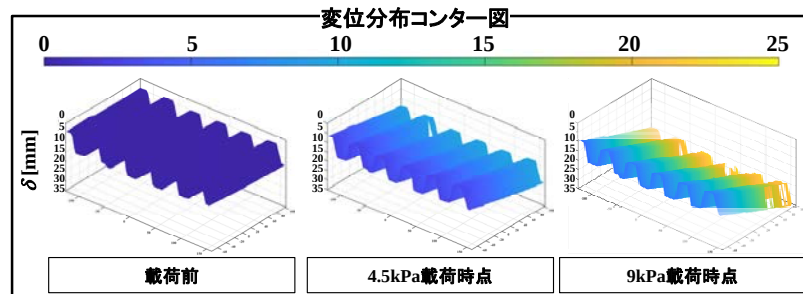
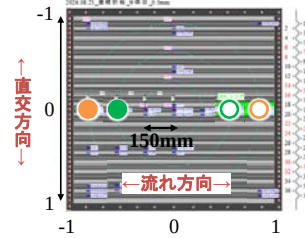
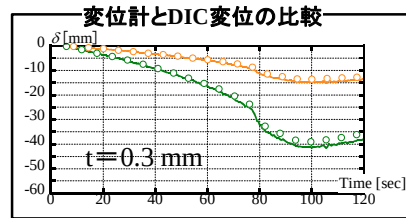
材料や構造物が荷重を受けた際の全体の変位やひずみ分布を測定



- 試験体表面に、コントラストの高いランダムなスペックル模様（白黒の斑点）を塗布
- スペックル模様の変位→変位ベクトルに置換
- 変位場の空間微分→全体のひずみ分布

スペックル模様

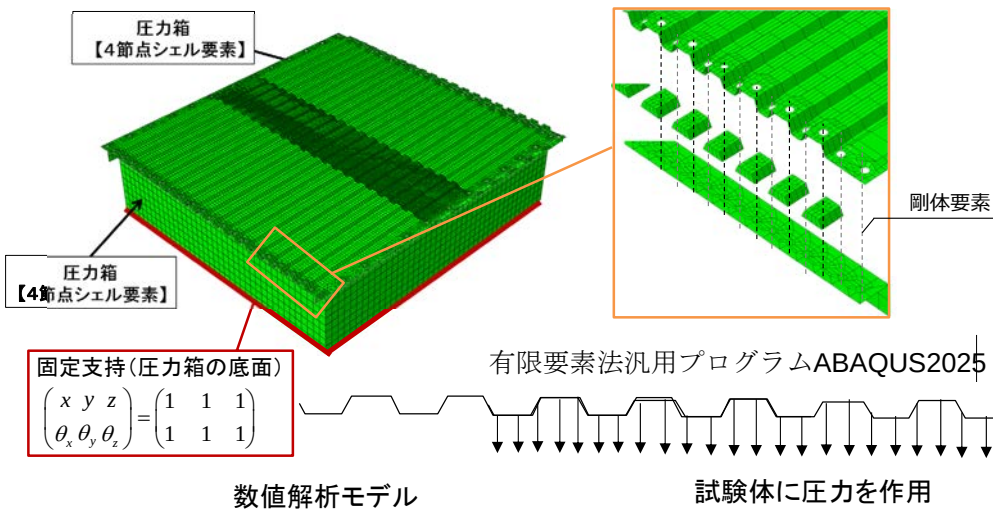




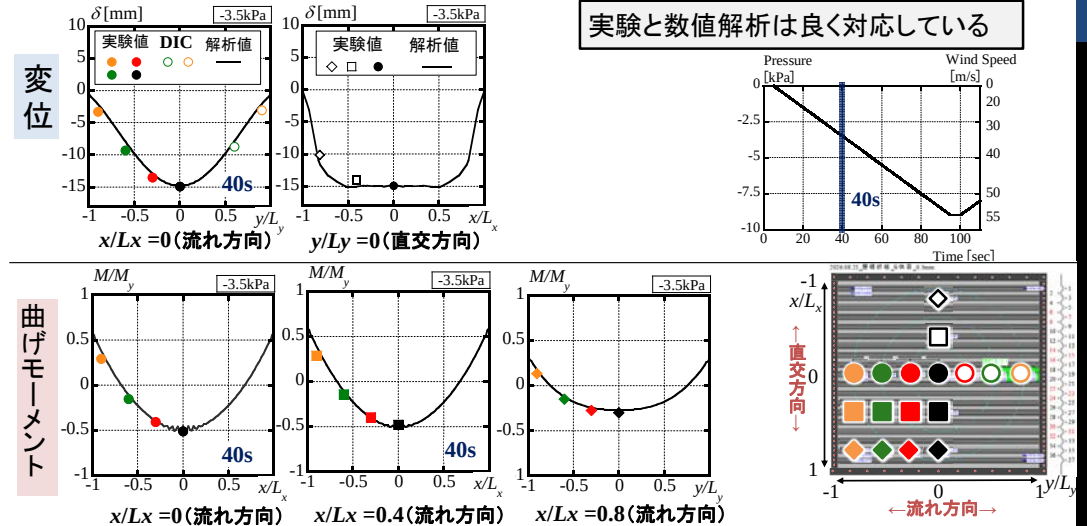
数値解析

3) 等分布圧力が作用する屋根折板の損傷メカニズムの解明

数値解析モデル



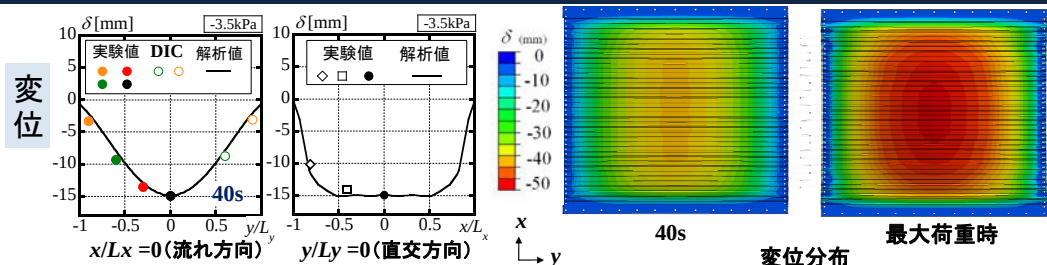
数値解析による変位及び応力分布の把握



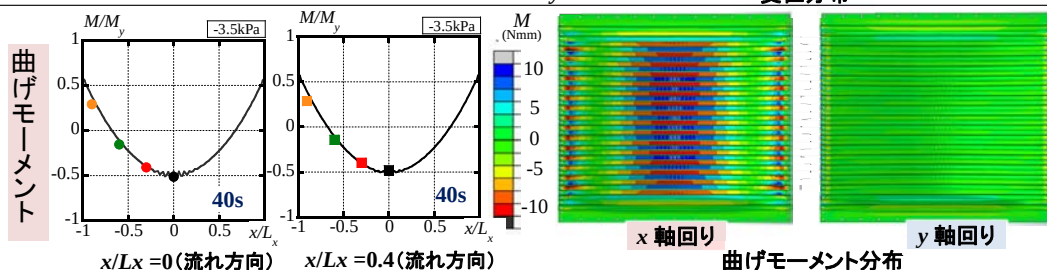
数値解析による変位及び応力分布の把握

80

変位



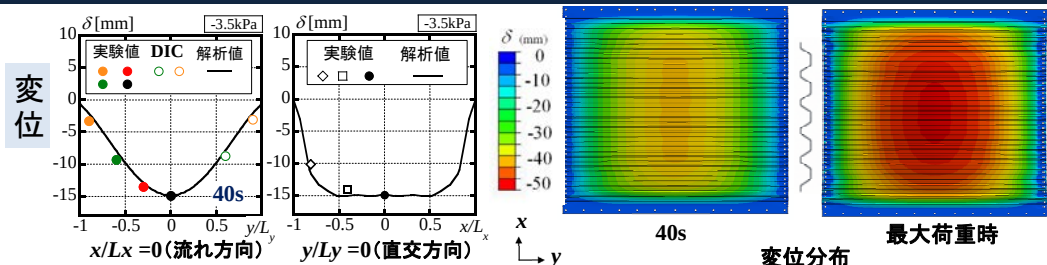
曲げモーメント



数値解析による変位及び応力分布の把握

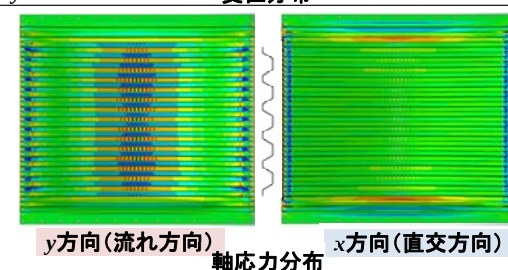
81

変位



コンタ図

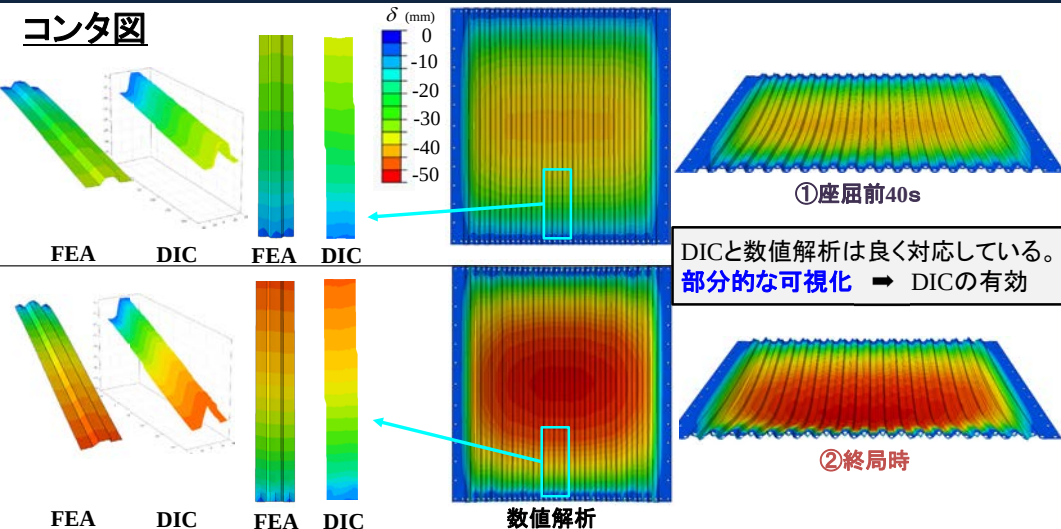
y方向
端部と試験体中央に応力(反対向き)が発生
x方向
端部で圧縮と引張が反転している。
→折板のたわみに伴い、x方向に伸縮する。



DICと数近解析の比較

82

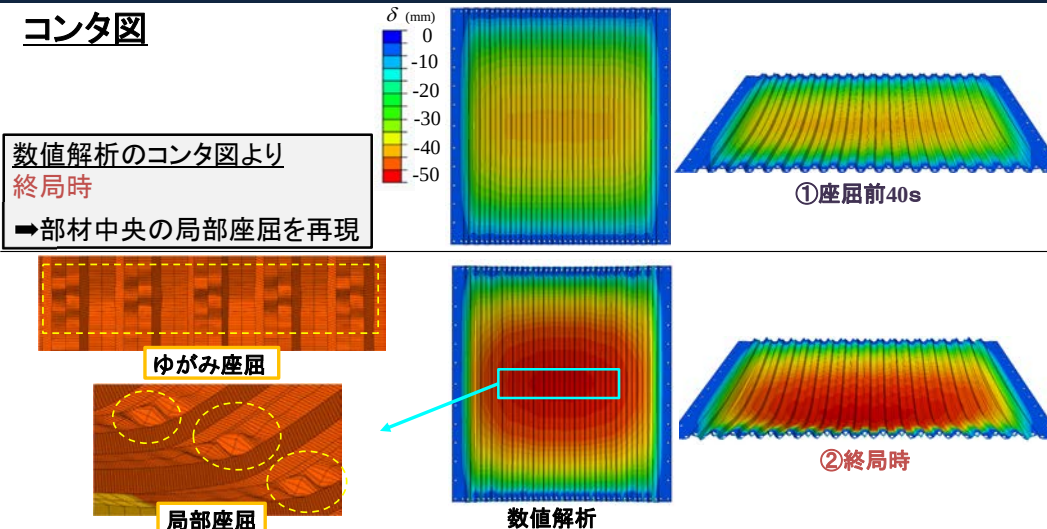
コンタ図



DICと数近解析の比較

83

コンタ図

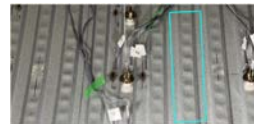
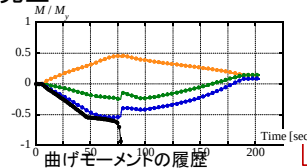


PLAによる屋根折板の応力伝達機構の解明

t=0.3mmの試験体の場合

0.5M/Mp程度で部材中央の山フランジに圧縮応力

- ⇒ 山フランジ(y方向)の**ゆがみ座屈**が発生
- ⇒ 中央山フランジの**局部座屈**が発生



① 山フランジにゆがみ座屈

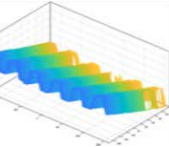
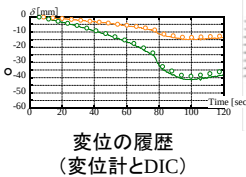


② y方向y/Ly=0付近に局部座屈

DICによる変形の可視化

DICと変位計による計測結果は精度良く計測できる。

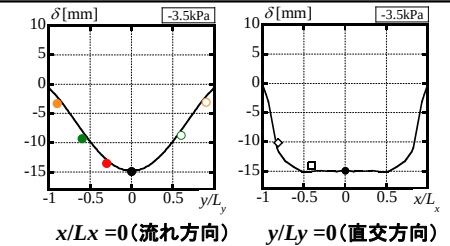
これにより、非構造部材の損傷を非接触かつ面的に可視化できる可能性が示された。



数値解析の有効性について

- ・計測点における応力・変位

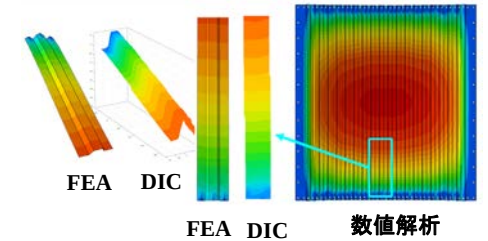
数値解析と実験におけるは概ね対応した。



- ・変形状態

数値解析とDICによる変位のコンタ図は対応している。

- ⇒ 数値解析モデルの有効性が示された。



DICによる変形の可視化

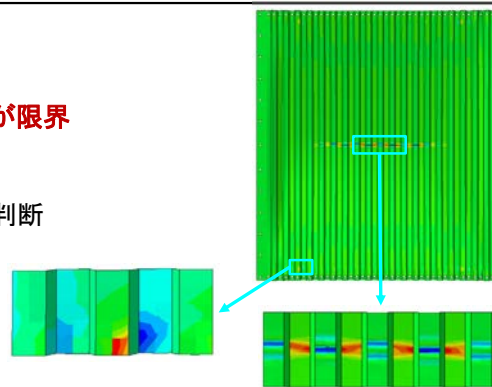
- ・実際の体育館への適用には

歪ゲージやDICによる計測 ⇒ **局所的な計測が限界**

- ・構造図面などの活用

- ⇒ 事前に想定外力と想定される損傷部位を判断

- ⇒ **数値解析による検証**



今後の課題

数値解析によるパラメトリックスタディによる損傷箇所の把握

- ⇒ 損傷の箇所の検知を予め実施 ⇒ マッピング化する。