

合成桁の限界状態設計法 に関する研究紹介

2024/01/26

埼玉大学 奥井義昭

鋼橋の限界状態設計 (Limit State Design, LSD)

道路橋示方書…限界状態設計法？

限界状態 1 : 弾性限界

限界状態 2 : 耐震, 鉛直荷重に対する限界状態としては定義？

限界状態 3 : 座屈による終局限界

許容応力度設計法(ASD)

許容応力度 = $\text{Min}[\text{降伏強度}, \text{座屈強度}] / \text{安全率}$

現行道示

限界状態設計法(LSD)ではなくて荷重抵抗係数法を用いた弾性設計基準

許容応力度設計法の実質的な違いは安全率のみ

海外の限界状態設計法 (AASHTO, Eurocode)

限界状態

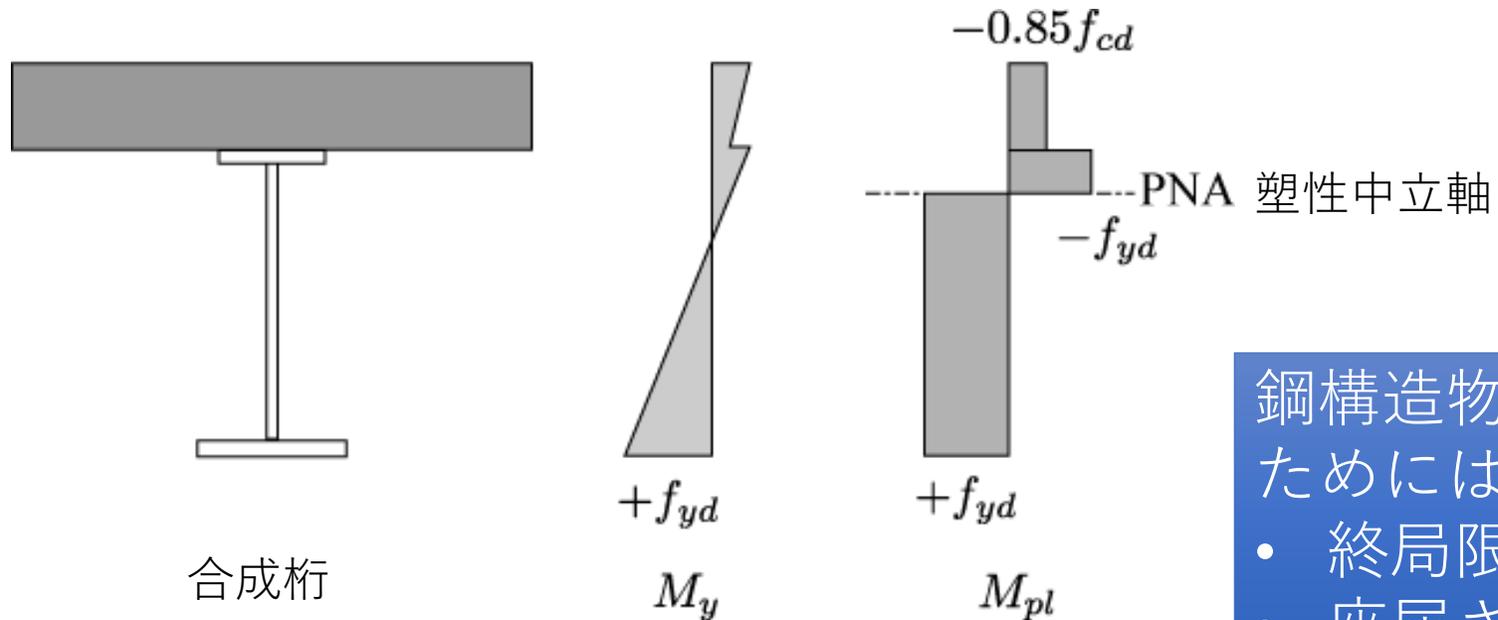
- 終局限界：最大耐力で照査
- 使用限界：降伏で照査（鋼橋の場合）

多段階設計法

	限界状態	荷重係数		限界値
		死荷重	活荷重	
AASHTO	終局	1.25	1.75	最大耐力
	使用	1.00	1.30	降伏
Eurocode	終局	1.35	1.35	最大耐力
	使用	1.00	1.00	降伏

限界状態設計法(LSD)の優位性を出すためには

- 引張部材: 降伏強度=終局強度 → ASDと同じ
- 座屈で決まる圧縮部材: 座屈強度=終局強度 → ASDと同じ
- 曲げ: 降伏モーメント < 終局モーメント → LSDにメリット



降伏モーメント M_y
全塑性モーメント M_{pl}

鋼構造物でLSDのメリットを出すためには

- 終局限界=最大耐力が必須
- 座屈させない

道示次改定の方向性と発表の目的

次期道示改定

塑性設計，多段階設計法の導入

→塑性化も考慮した終局耐力算定必須

→たわみ制限以外の使用限界の明確化必須

この発表の目的

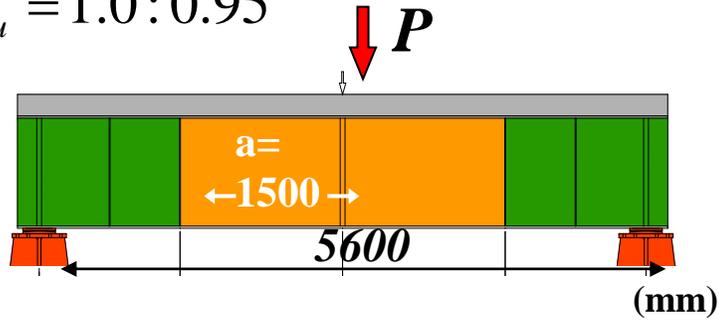
世界標準の意味での限界状態設計法のための研究の紹介

UFC合成桁も将来的には同じような研究開発が必要

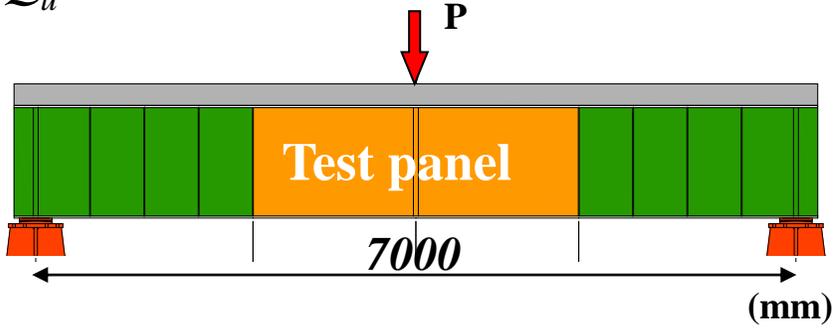
合成桁の曲げ耐力

曲げ耐力実験

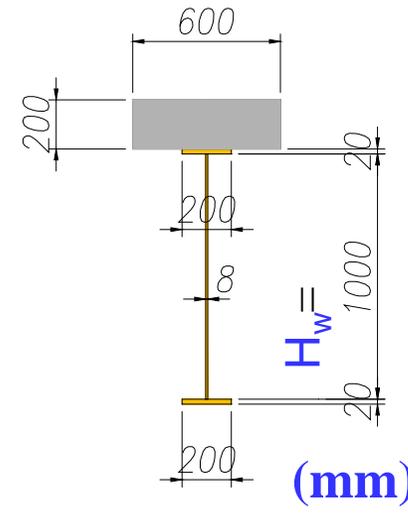
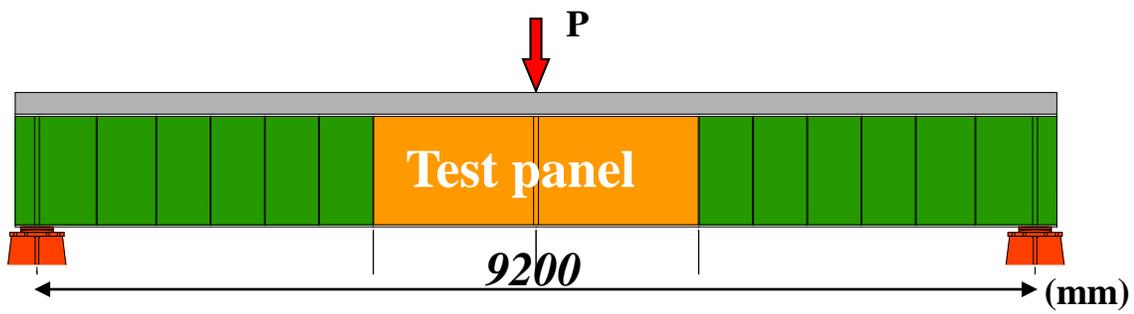
$$M/M_p : Q/Q_u = 1.0 : 0.95$$



$$M/M_p : Q/Q_u = 1.0 : 0.75$$



$$M/M_p : Q/Q_u = 1.0 : 0.58$$



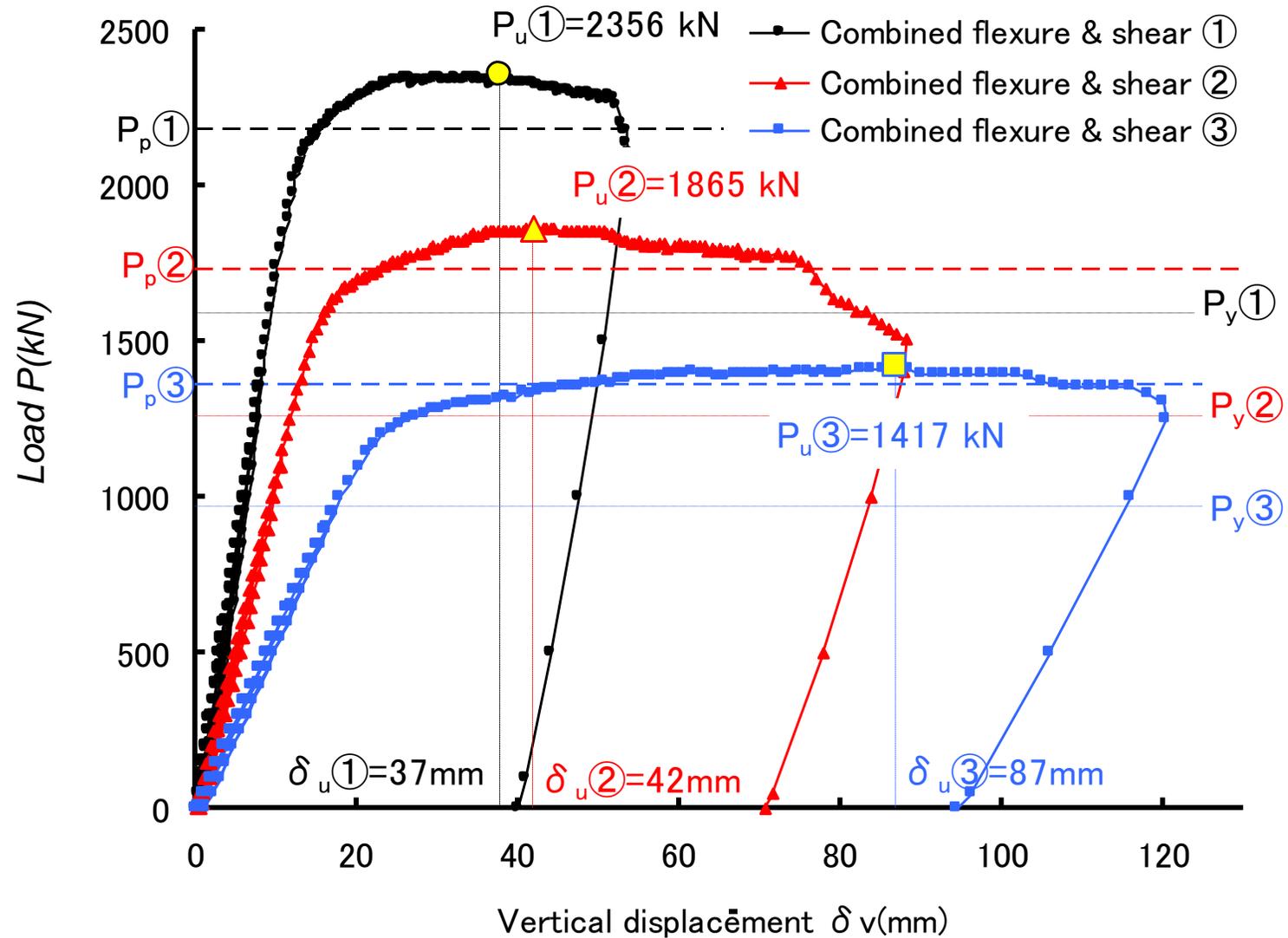
Aspect ratio :

$$\alpha = a/H_w = 1.5$$

- yield stress of steel & concrete strength (N/mm²) -

	U.Flг	Web	L.Flг	σ_{ck}
①	307	314	307	40.7
②	307	314	305	39.0
③	307	329	307	40.9

実験結果：荷重－変位曲線

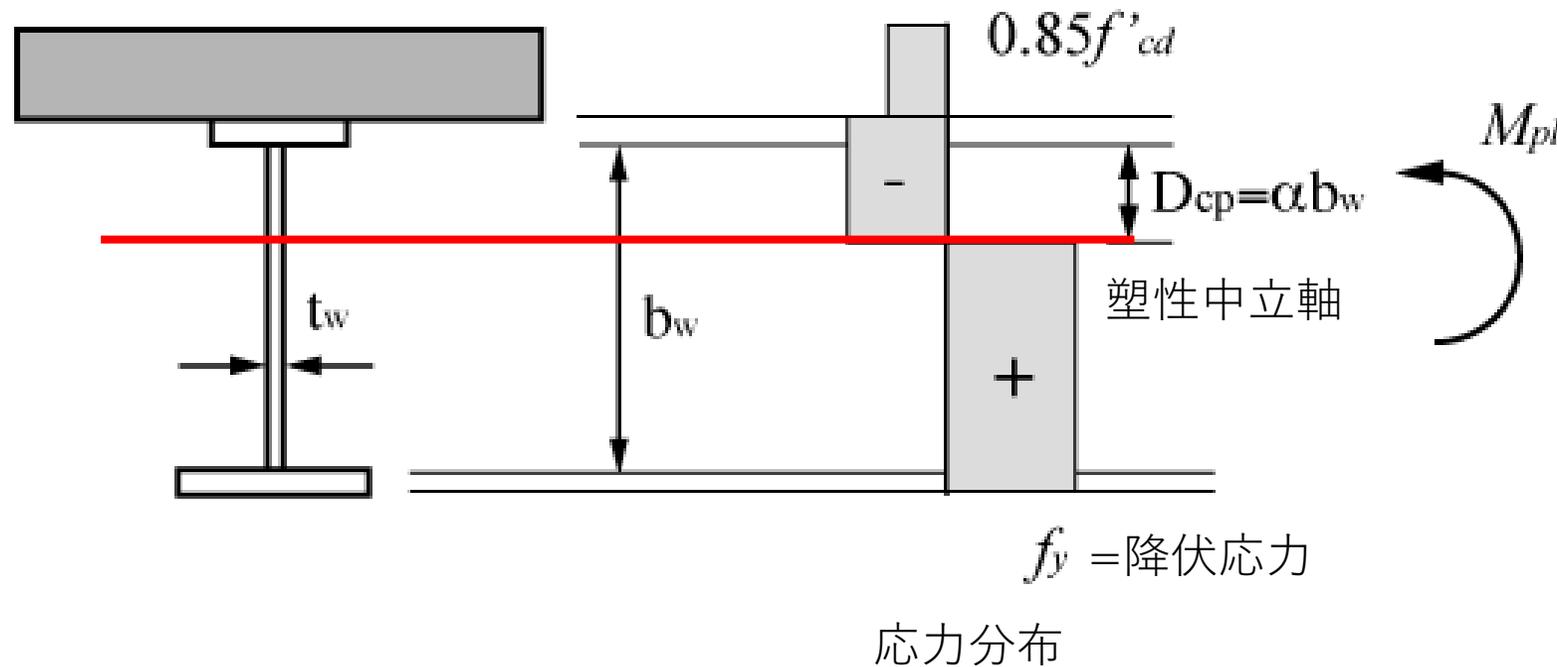


合成断面断面クラス: 正曲げ時の断面判定

断面クラス (AASHTO LRFD)

- Compact $M_{max} > M_{pl}$ …座屈しない
- Noncompact $M_{pl} > M_{max} > M_y$ …弾塑性座屈
- Slender $M_y > M_{max}$ …弾性座屈

M_y = 降伏モーメント
 M_{pl} = 全塑性モーメント



AASHTO
コンパクト断面判定式

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E_s}{f_y}}$$

断面判定式の提案

問題点：

AASHTO式は2軸対称の鋼桁の判定式を合成桁に適用
前死荷重の影響が考慮されていない

研究方法：

非線形FEMによるパラメトリック解析

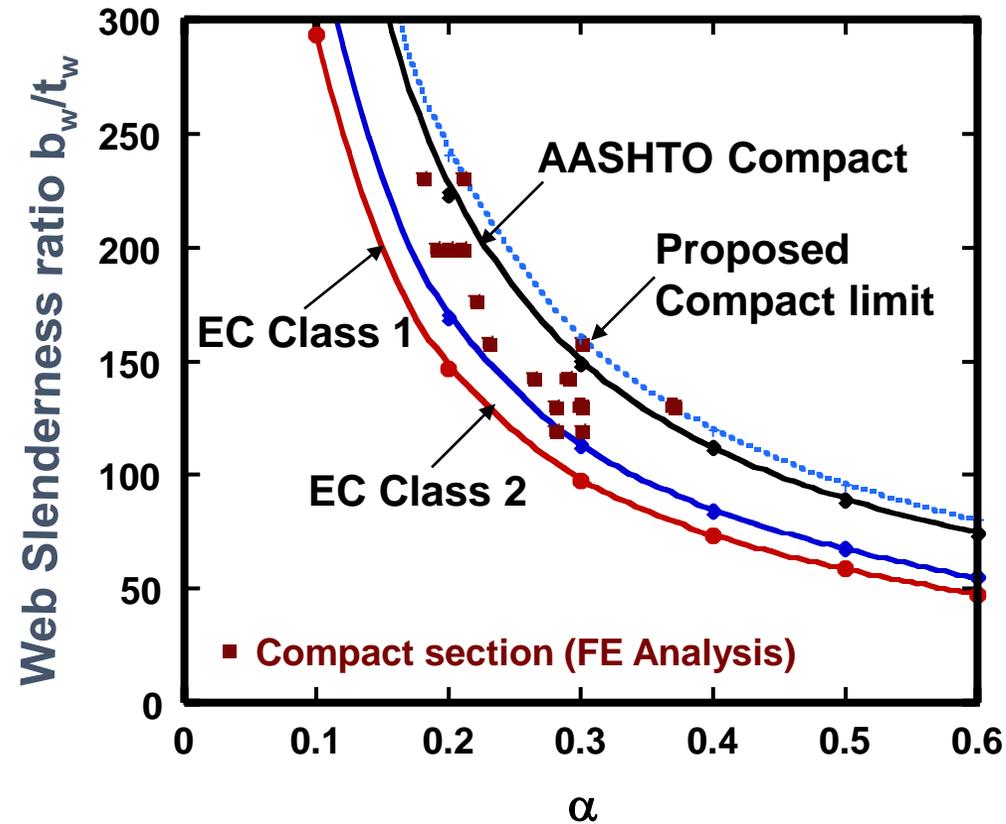
鋼桁：Mises降伏条件，関連流れ則，ひずみ硬化，残留応力

コンクリート：分布ひび割れモデル，固定ひび割れ，

鉄筋埋め込み要素

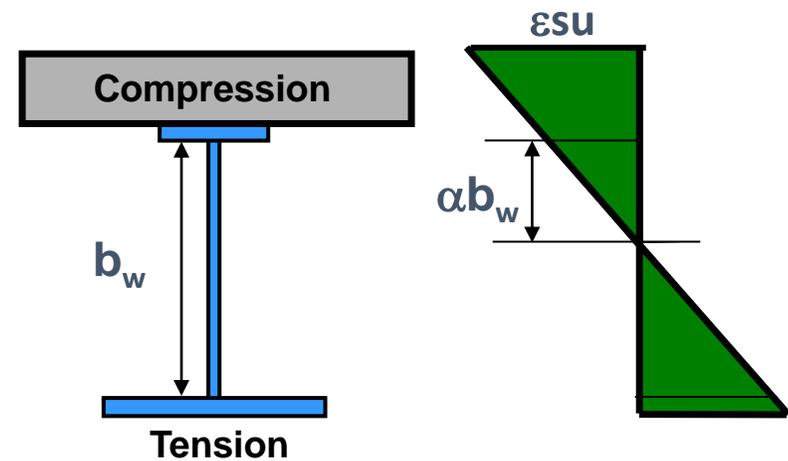
Gupta, V. et al, (2006). Development of web slenderness limits for composite I-girders accounting for initial bending moment. Structural Engineering / Earthquake Engineering. 23. 10.2208/jsceseee.23.229s.

コンパクト断面判定式の提案



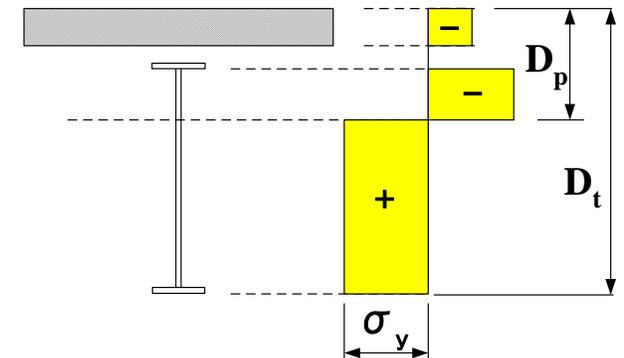
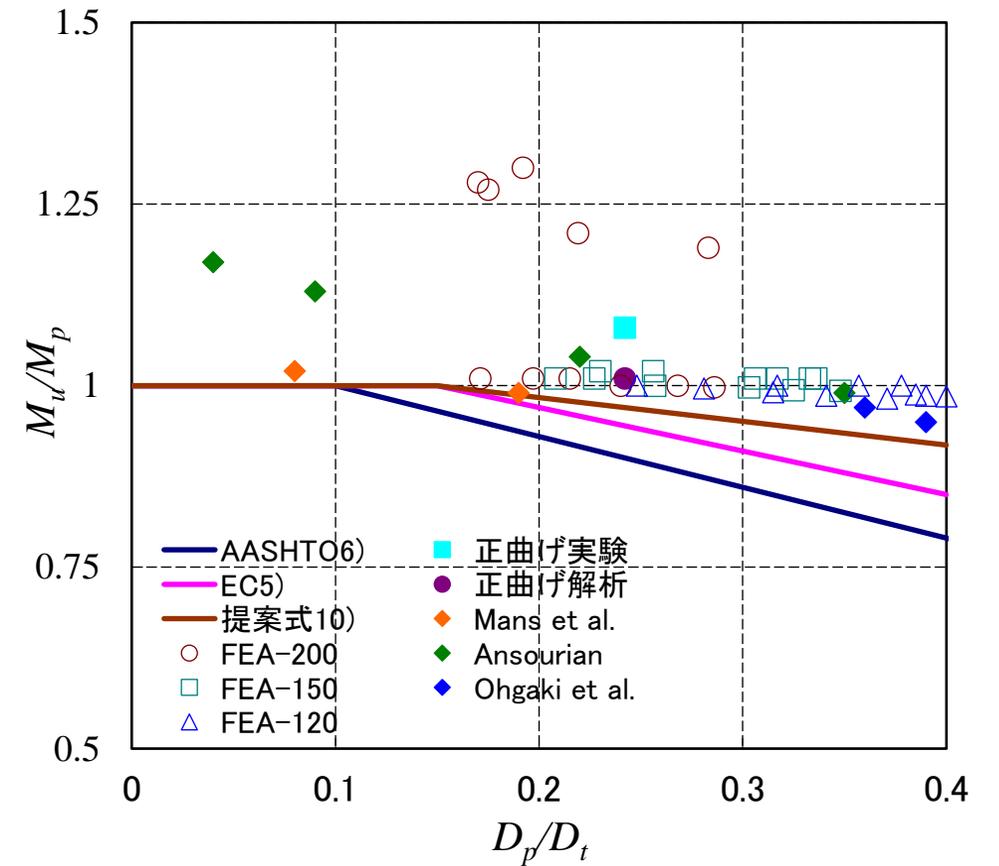
提案式

$$\frac{b_w}{t_w} \leq \frac{2.0}{\alpha} \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

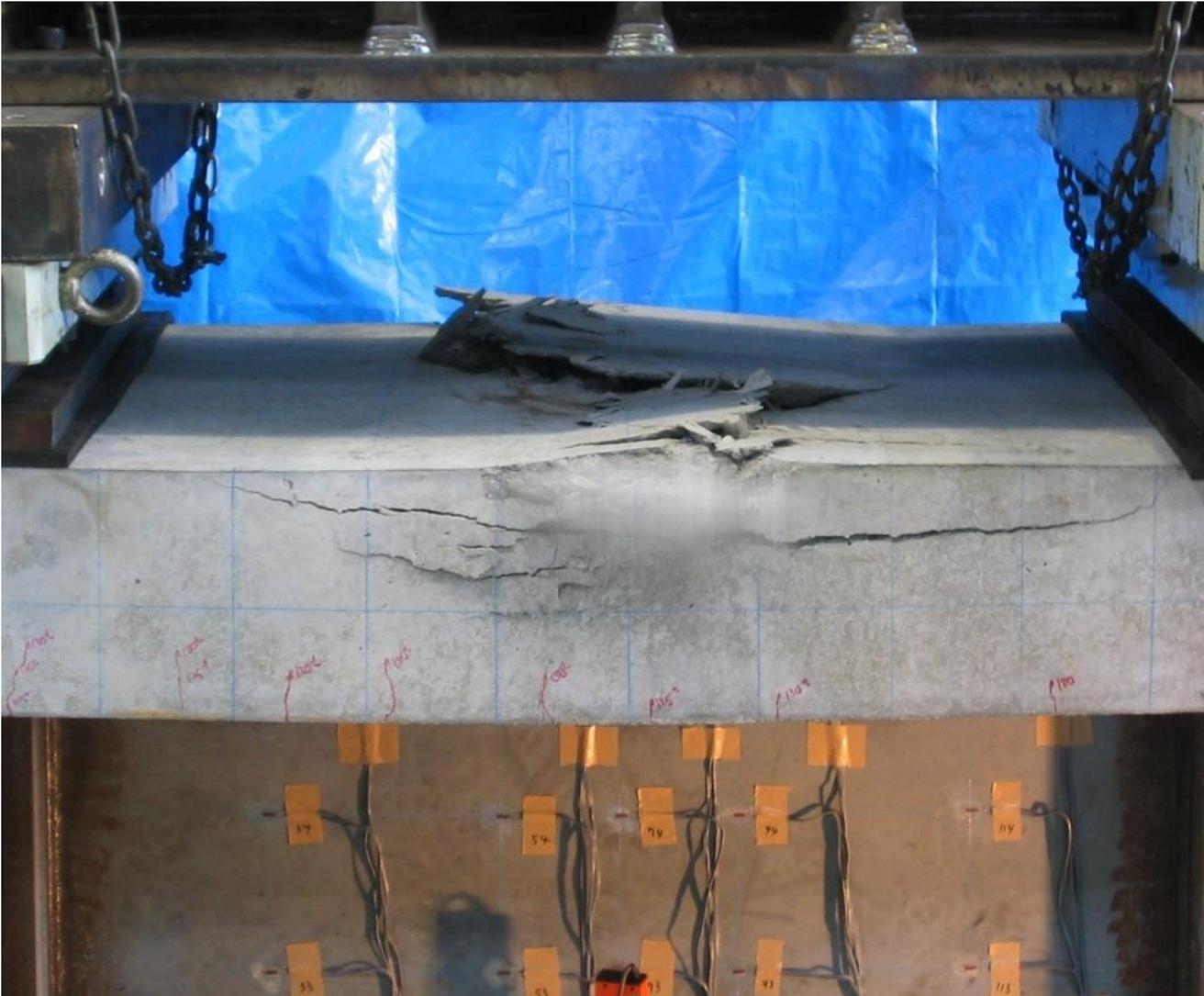


終局時のひずみ分布

RC床版圧壊時の曲げ耐力

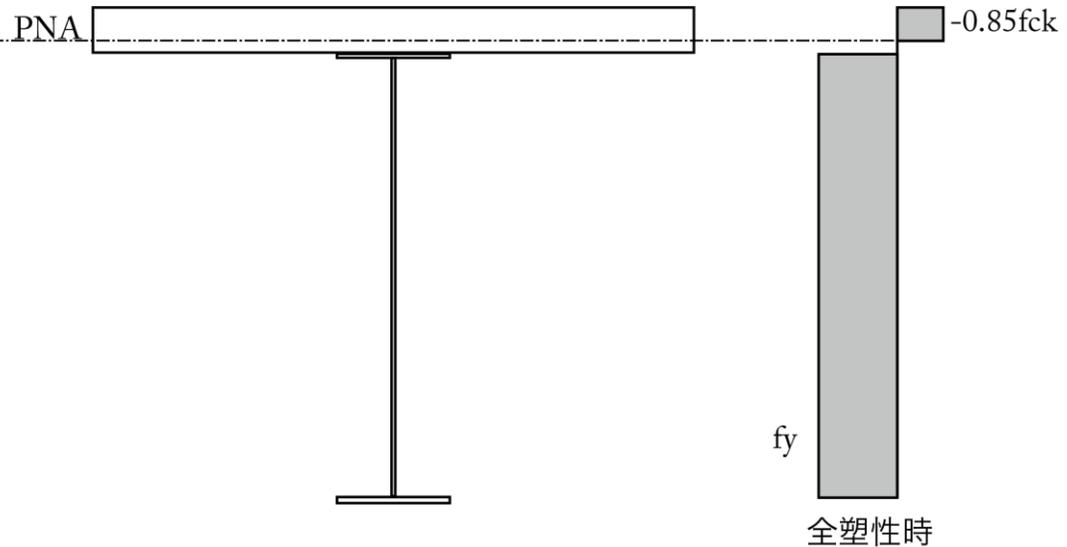


合成桁の曲げ耐力の実験：塑性中立軸床版内



塑性中立軸床版内
床版上側は圧壊
床版下側は引張クラック

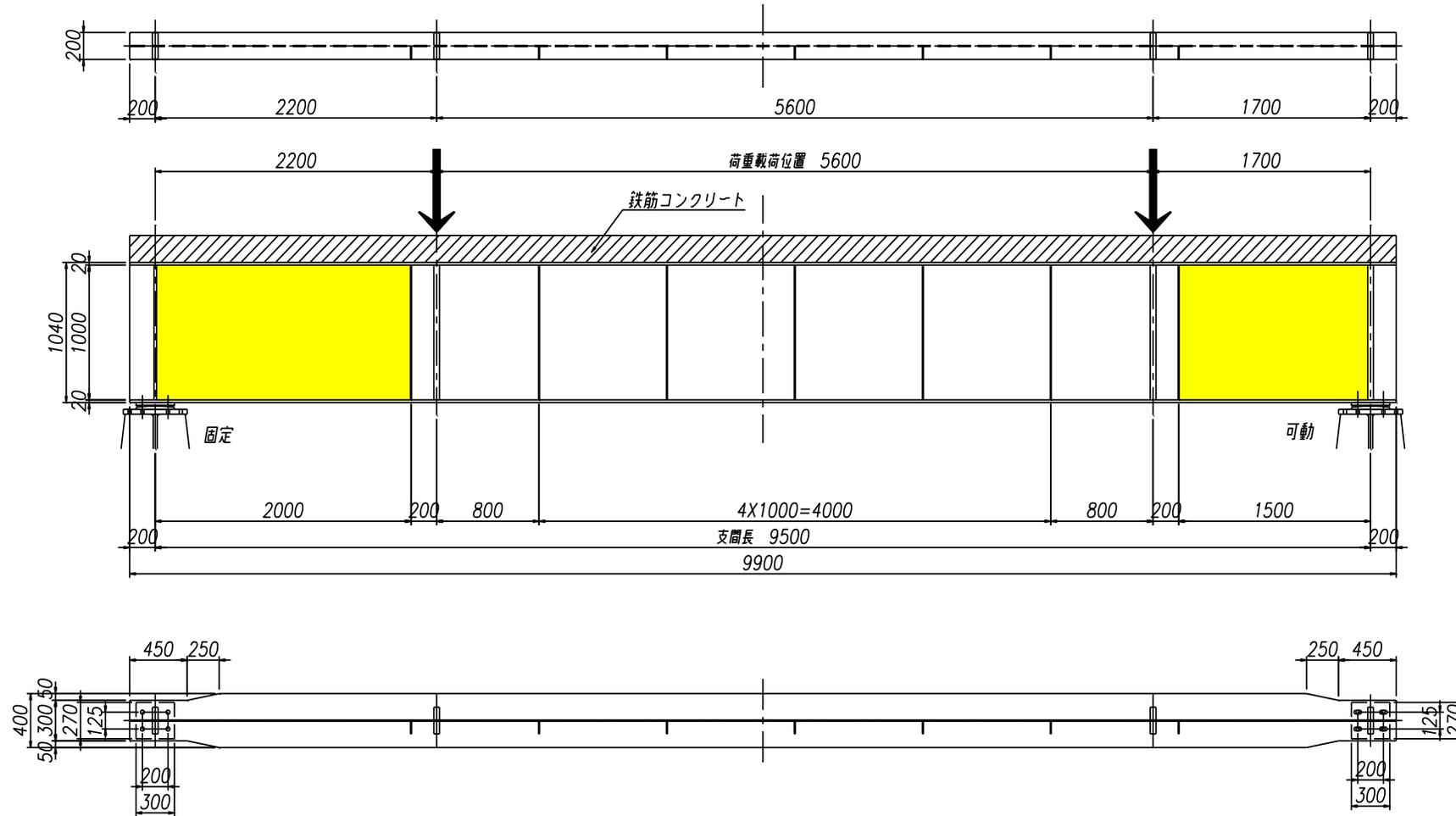
全塑性モーメントに達することを確認



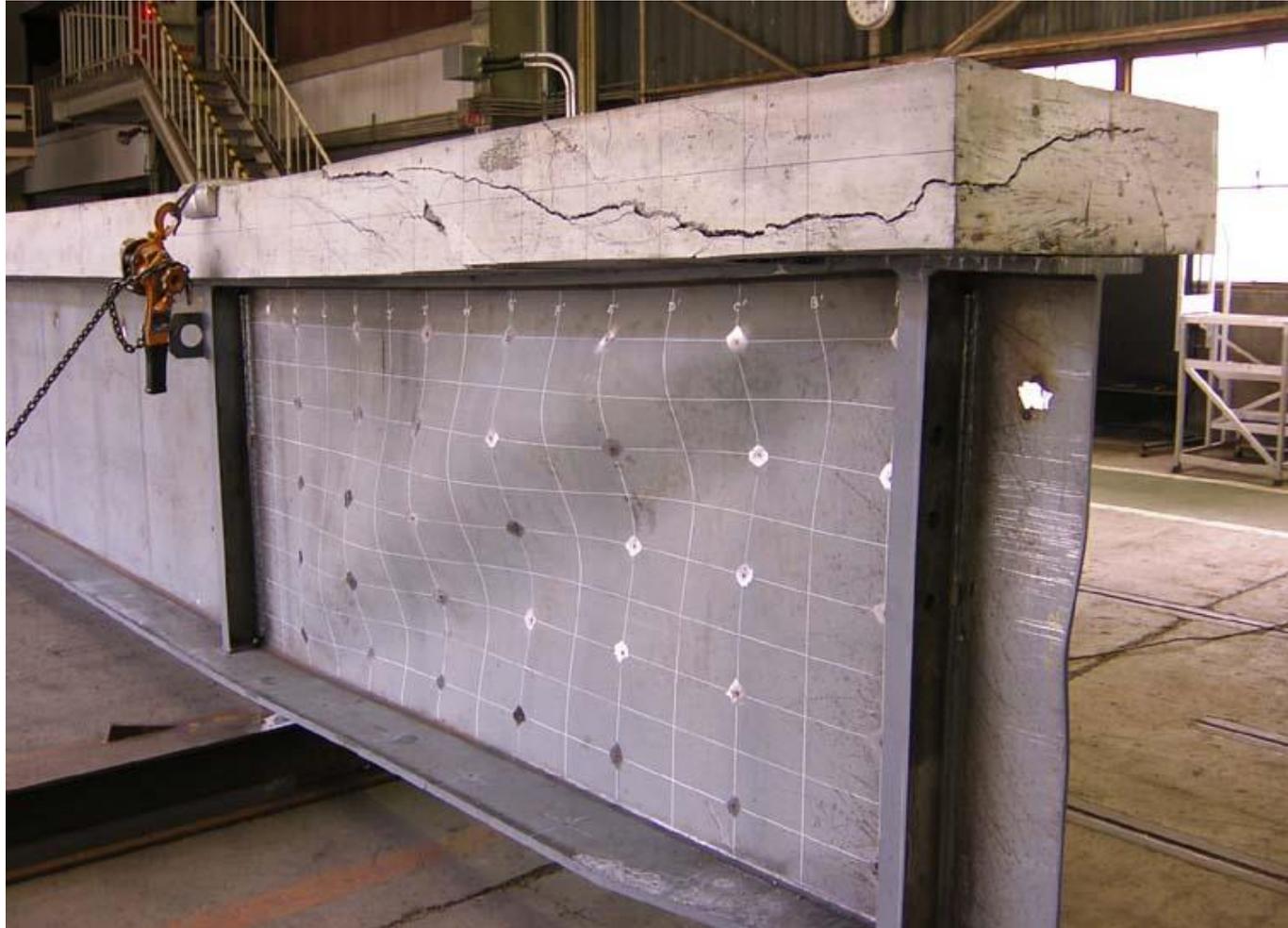
せん断耐力， 曲げとせん断の相関

稲葉他, 合成I桁の曲げ, せん断相関強度解明に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, 2010, 66 巻, 2 号, p. 393-405

せん断耐力試験

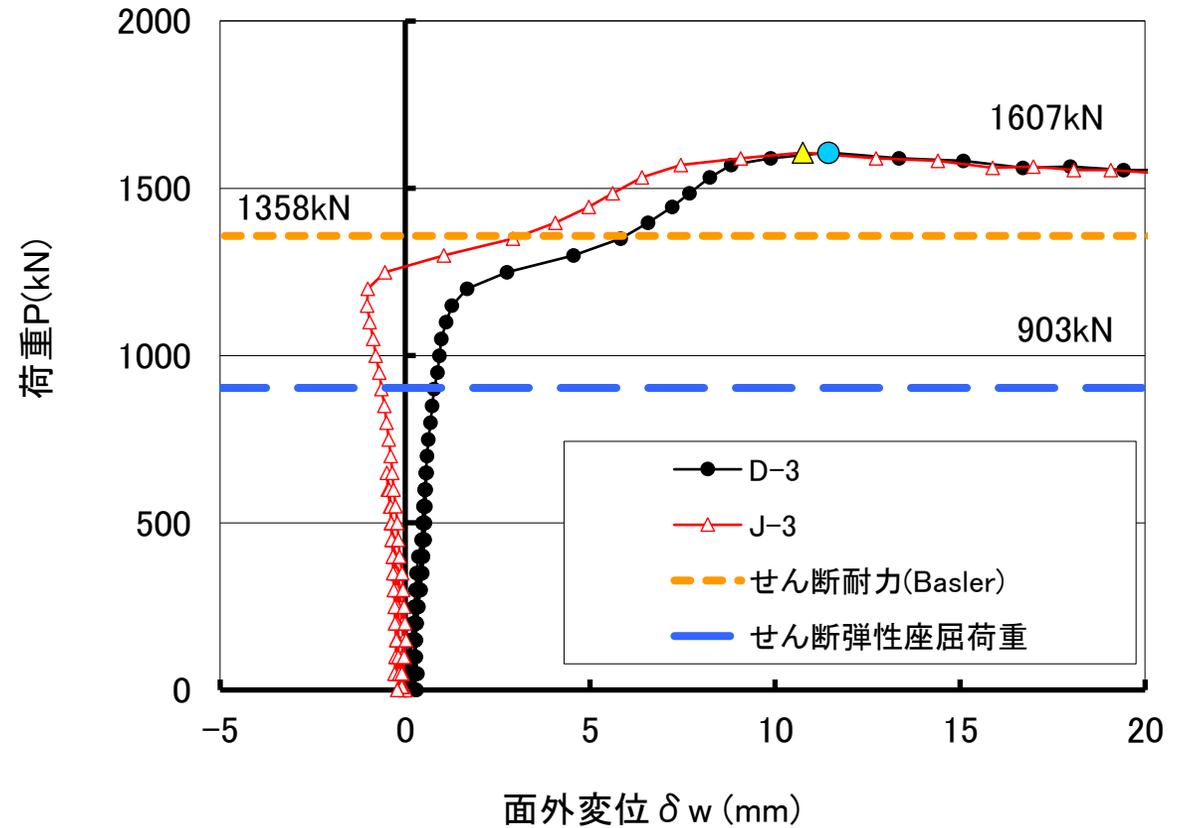


せん断試験



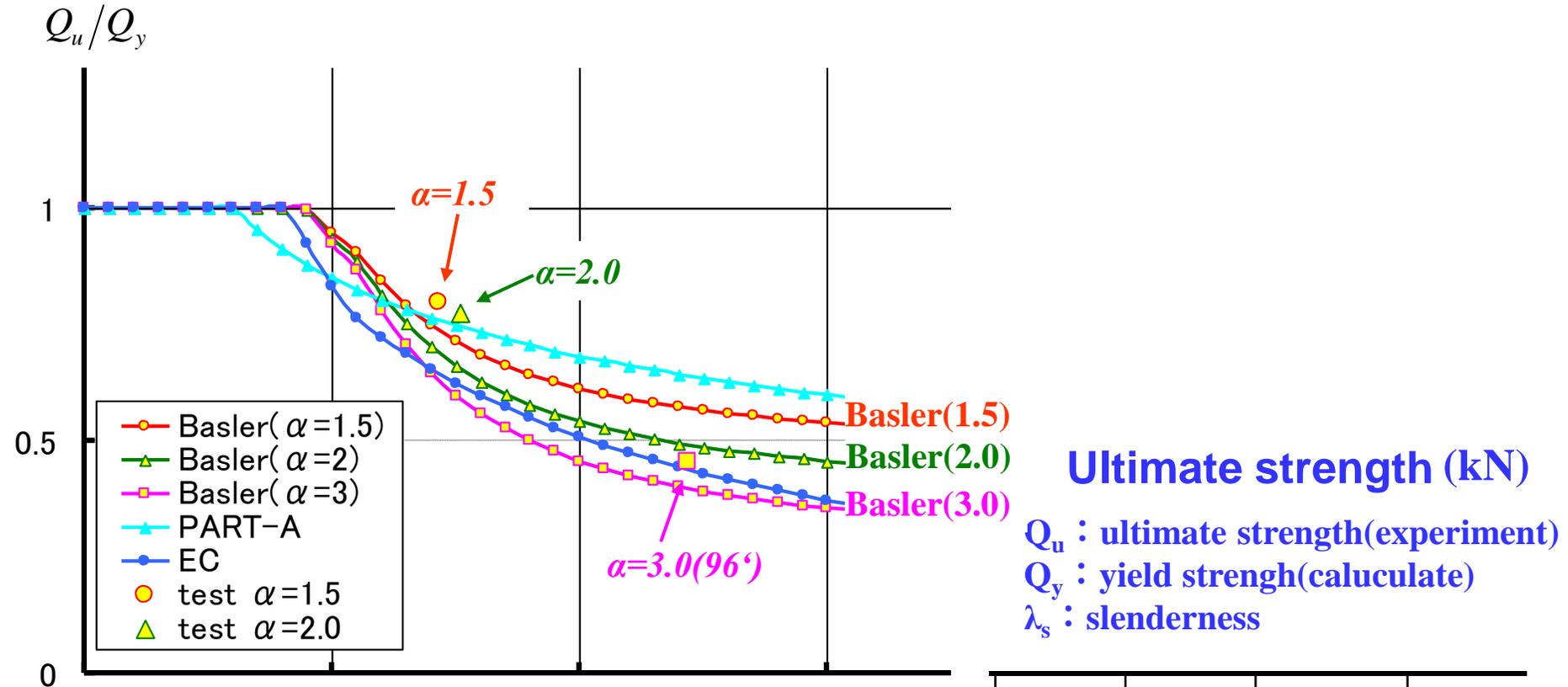
試験後の供試体
斜め張力場が発生

せん断座屈による斜め張力場



使用限界：腹板弾性座屈式
終局限界：Basler式

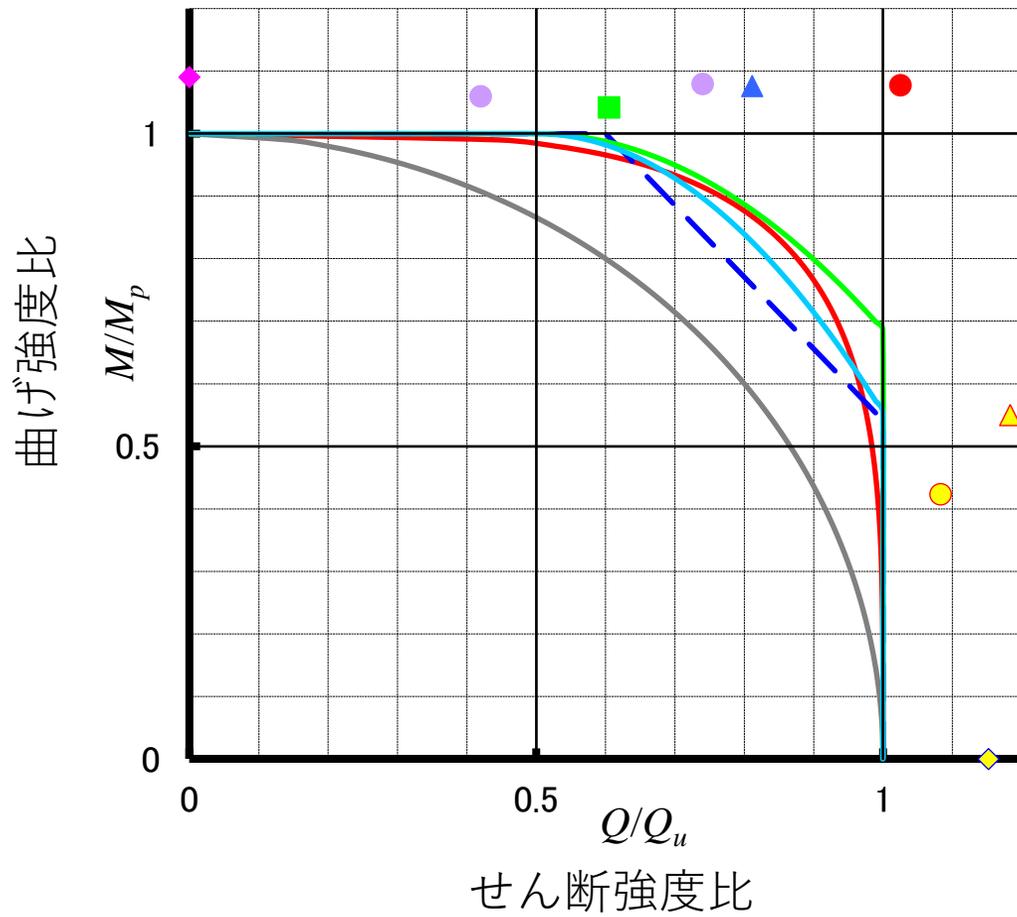
せん断耐力の比較



$$\lambda_s = \sqrt{(\tau_y / \tau_E)}$$

	Q_u	Q_y	Q_u/Q_y	λ_s
$\alpha=1.5$	1269	1596	0.80	1.43
$\alpha=2.0$	1233	1596	0.77	1.52
$\alpha=3.0(96')$	1499	3291	0.46	2.44

曲げとせん断の相関



- $$\left(\frac{M}{M_{pl}}\right)^n + \left(\frac{Q}{Q_u}\right)^n \leq 1.0$$
- 4乗則
 - 2乗則
 - - AASHTO
 - EC(曲げせん断実験用)
 - EC(せん断実験用)
 - 曲げせん断①
 - ▲ 曲げせん断②
 - 曲げせん断③
 - せん断 $\alpha=1.5$
 - ▲ せん断 $\alpha=2.0$
 - × 2重合成せん断

合成桁の場合、
相乗効果での低減なしか、
4乗則で安全側の評価可能

国内LSD設計例/金谷郷高架橋(2012)



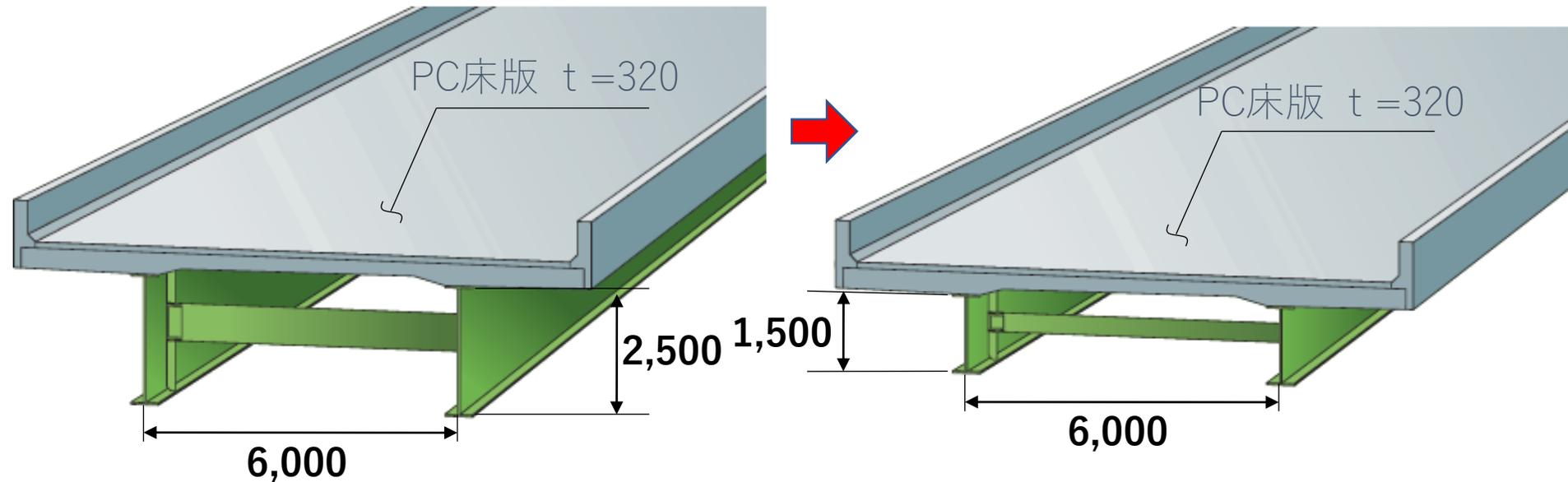
金谷郷高架橋の設計条件

主な項目	旧道示 (許容応力度設計法)	金谷郷高架橋に使用した 限界状態設計法
荷重 (作用)	D (死荷重) +L (活荷重)	使用限界状態 D+L 終局限界状態 1.3D+2.0L
耐力 (抵抗)	$\sigma_y / 1.7$ (許容応力度)	使用限界状態 σ_y (降伏応力度) /1.15 弾性座屈強度/1.15 終局限界状態 M_u (終局モーメント)
設 計	弾性設計	終局時は弾塑性設計

正曲げ区間：コンパクト断面 (合成断面)

負曲げ区間：ノンコンパクト断面 (鉄筋+鋼桁断面)

金谷郷高架橋のコンパクト断面



ASD設計 (旧道示)
桁高スパン比1/16
鋼重1.00

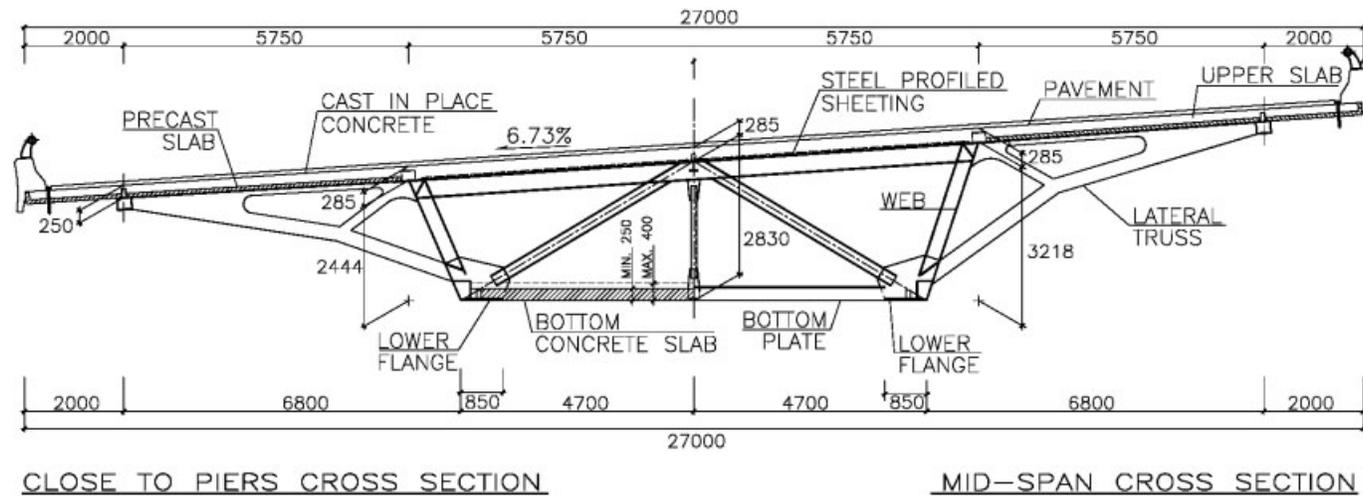
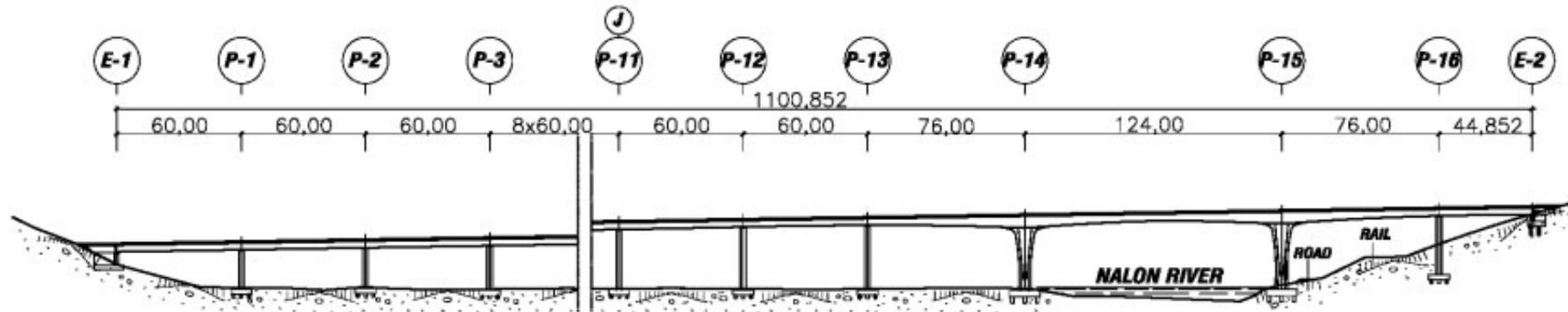
LSD設計
桁高スパン比1/25
鋼重0.82

佐々木：コンパクト断面設計を採用した鋼連続合成桁橋,
https://www.jasbc.or.jp/images/imageparts/title/release/ronbun/2012/H24_02.pdf

二重合成桁

稲葉尚文：鋼・コンクリート2重合成I桁橋の実用化に向けた研究，埼玉大学博士論文

2重合成桁:スペインでの事例



中間支点上:2重合成桁



Fig. 5. Hogging bending moment zone with double composite action

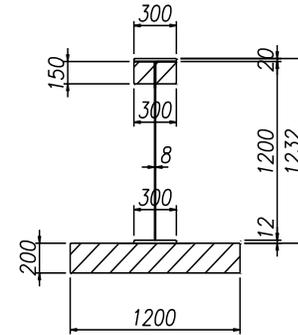
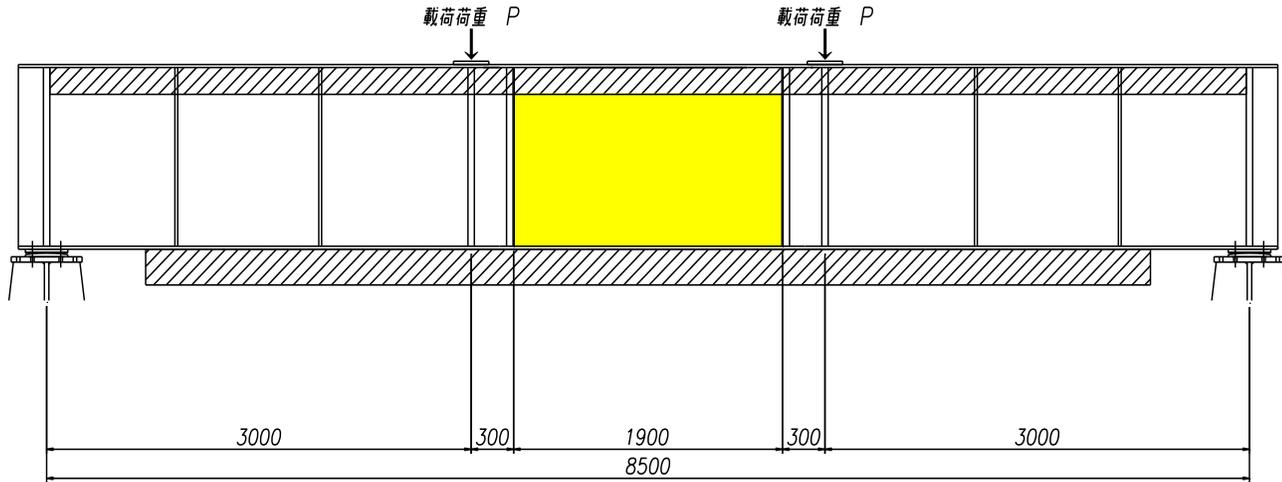
中間支点とメインスパン



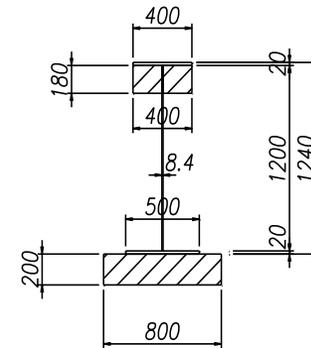
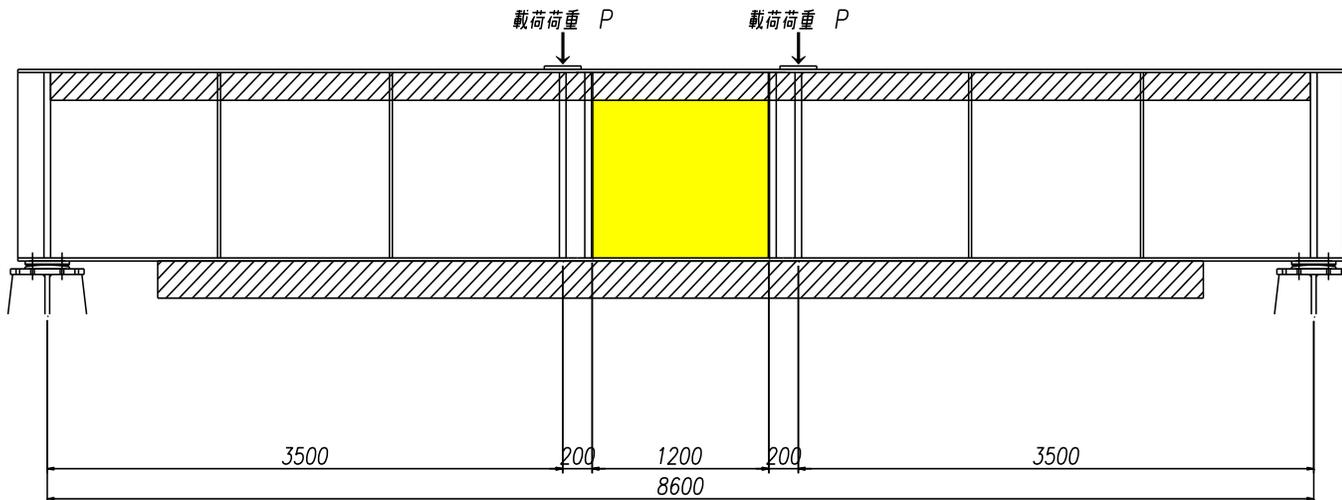
Fig. 15. View of the rigid connection between main pier and steel deck



二重合成桁の実験



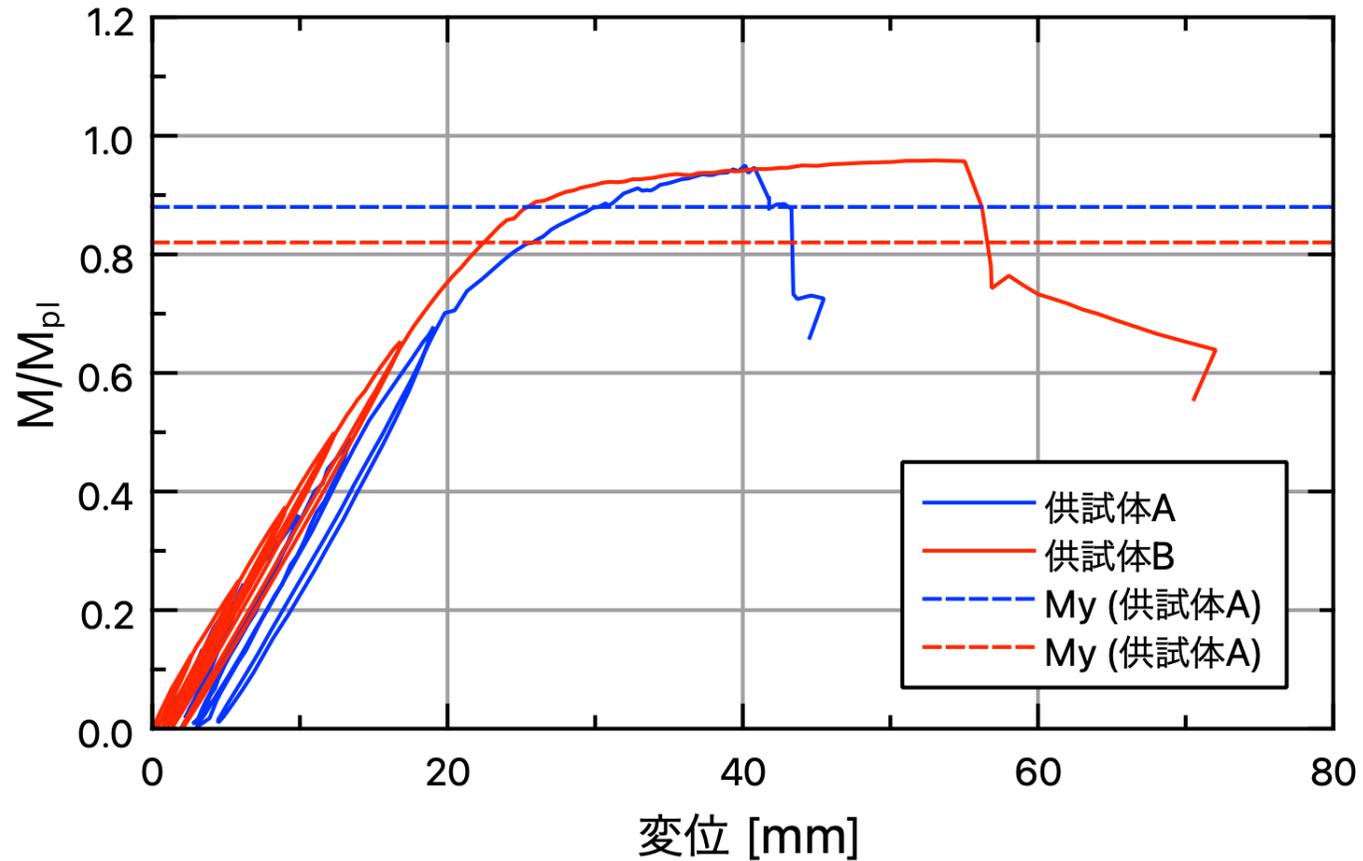
上下逆で載荷



稲葉他, 2重合成I桁の
曲げ及びせん断強度の
評価方法に関する実験
的研究,
土木学会論文集
A, 2010, 66 巻, 1 号, p.
117-132, 2010

実験結果

2重合成桁：曲げ実験

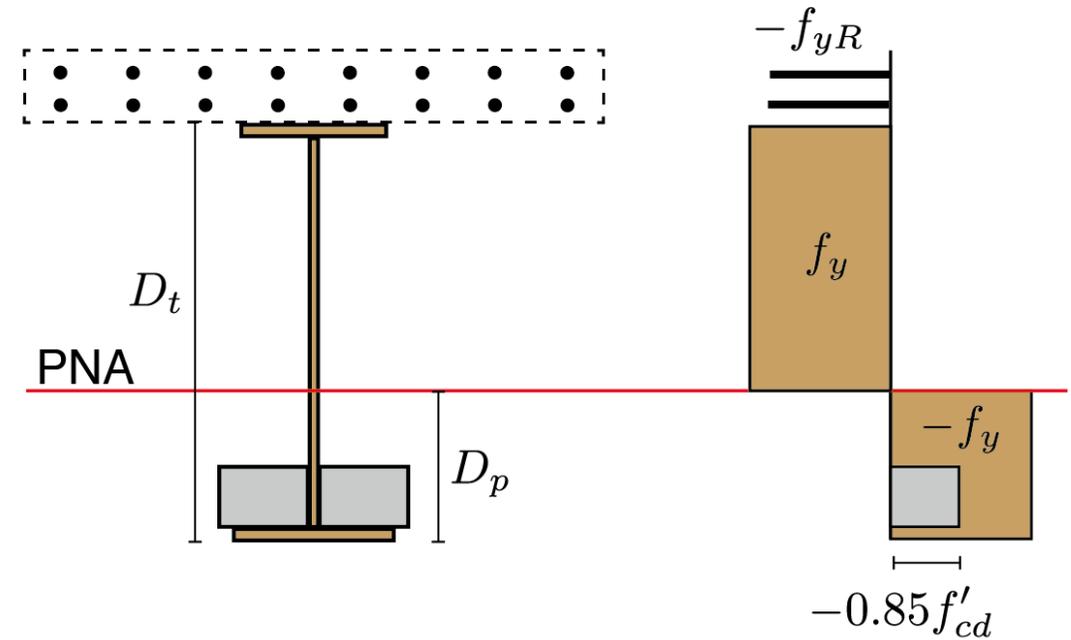
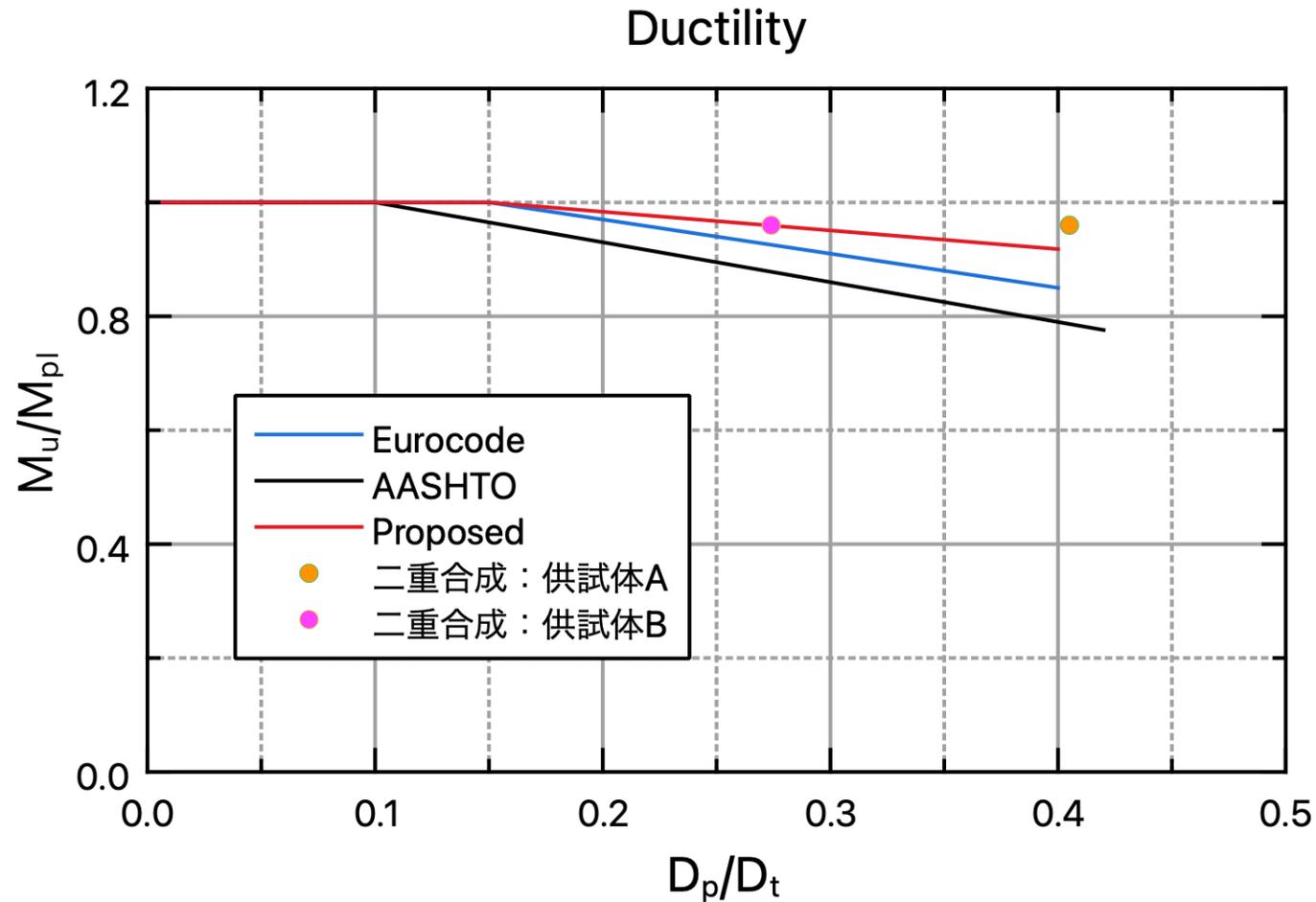


断面はコンパクト断面

終局モーメント < 全塑性モーメント
→ 圧縮床版の圧壊



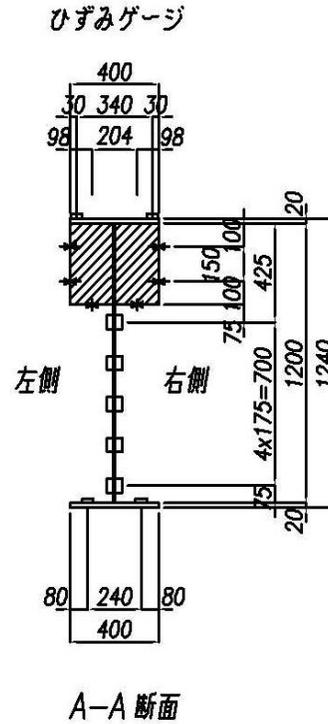
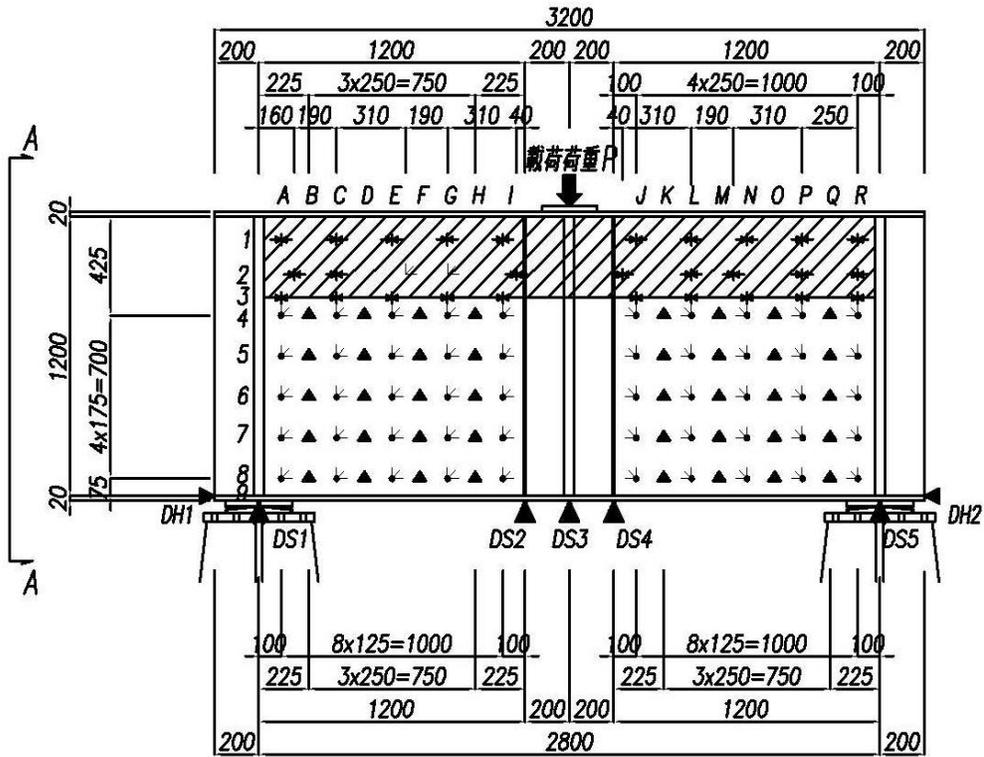
二重合成桁の圧壊時の曲げ強度式



全塑性時の応力ブロック

Dt, Dpを上記のように定義すれば
提案式で2重合成も適用可能

二重合成桁せん断耐力実験

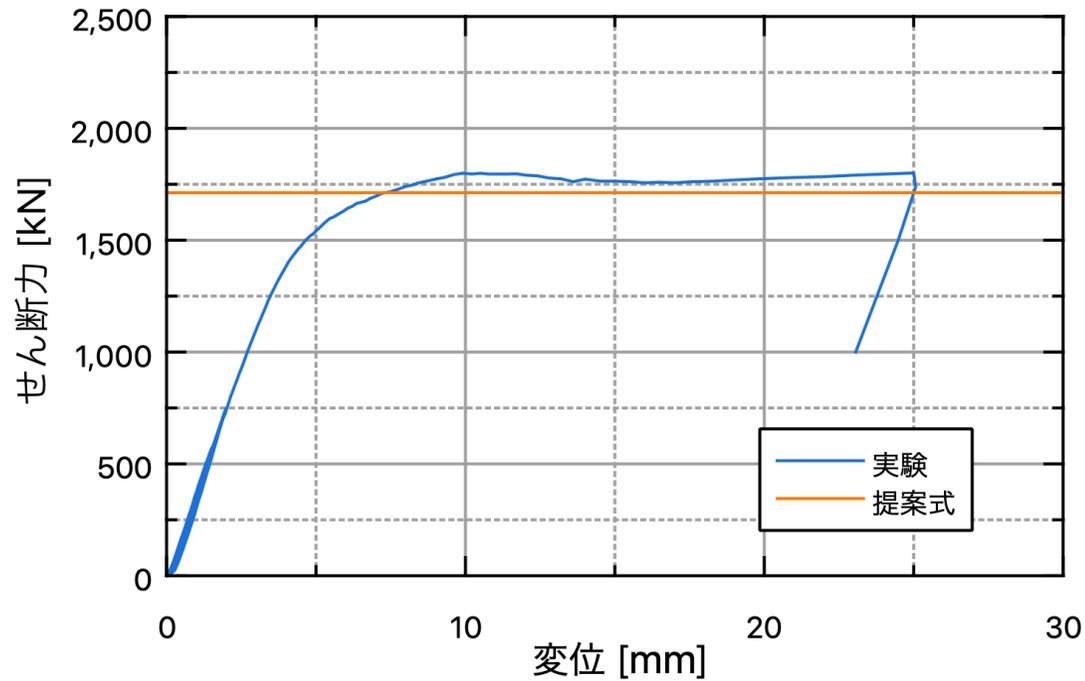


試験終了後の供試体
斜め張力場が形成されている

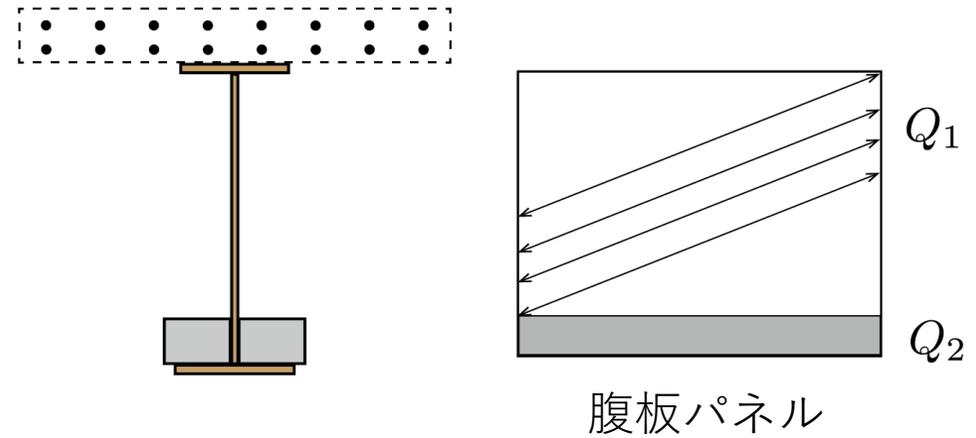
注記：上下逆転して載荷

実験結果と強度評価式

二重合成桁 せん断試験



提案式の考え方



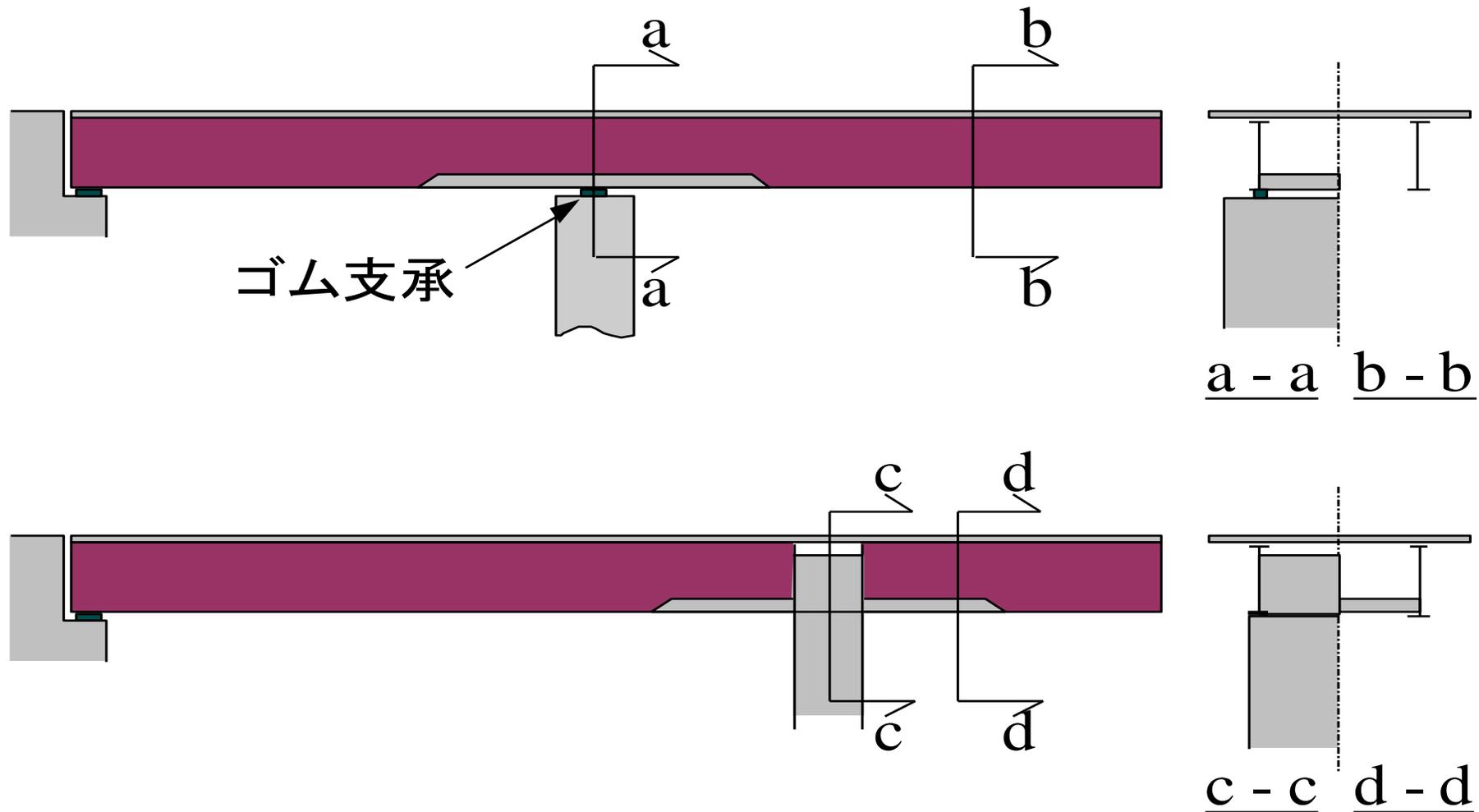
$$(\text{せん断耐力}) = Q_1 + Q_2$$

Q_1 = Basler式 (斜め張力場)

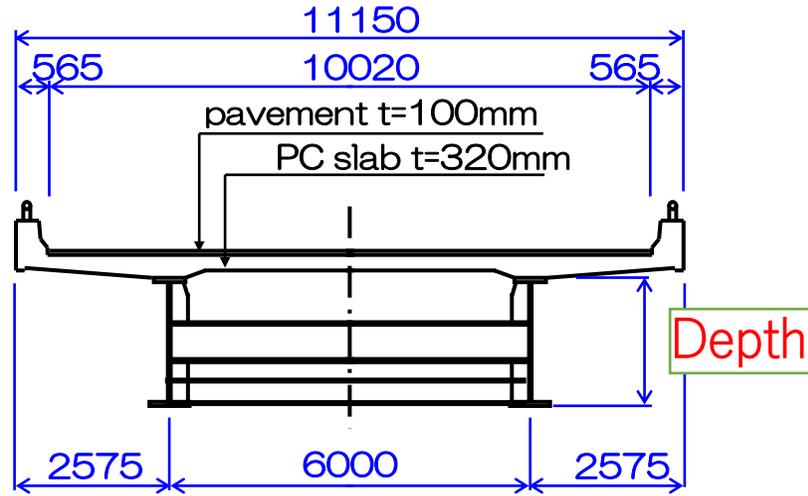
Q_2 = せん断降伏強度

二重合成桁の試設計

二重合成桁のメリット：橋梁全長にわたってコンパクト断面可能

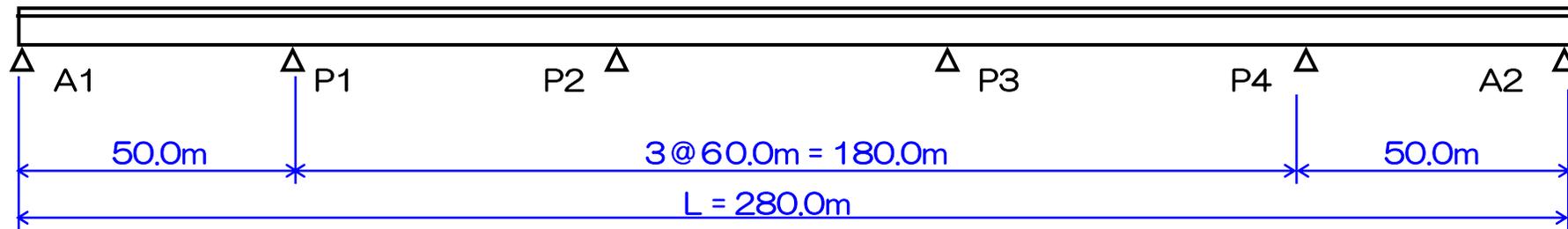


Case Study 1: スパン長=60m



想定断面

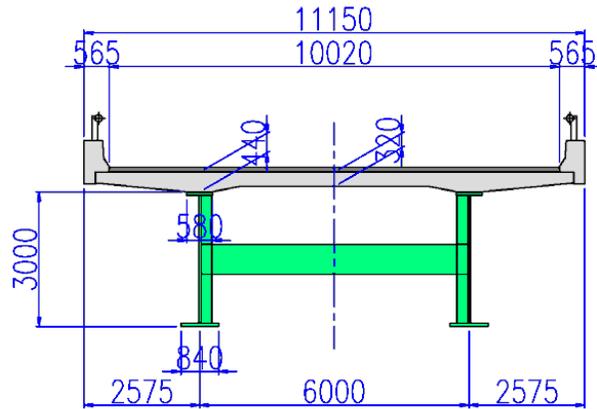
許容応力度設計法（旧道示）と
限界状態設計法との比較を実施



Side View

許容応力度設計法による断面サイズ

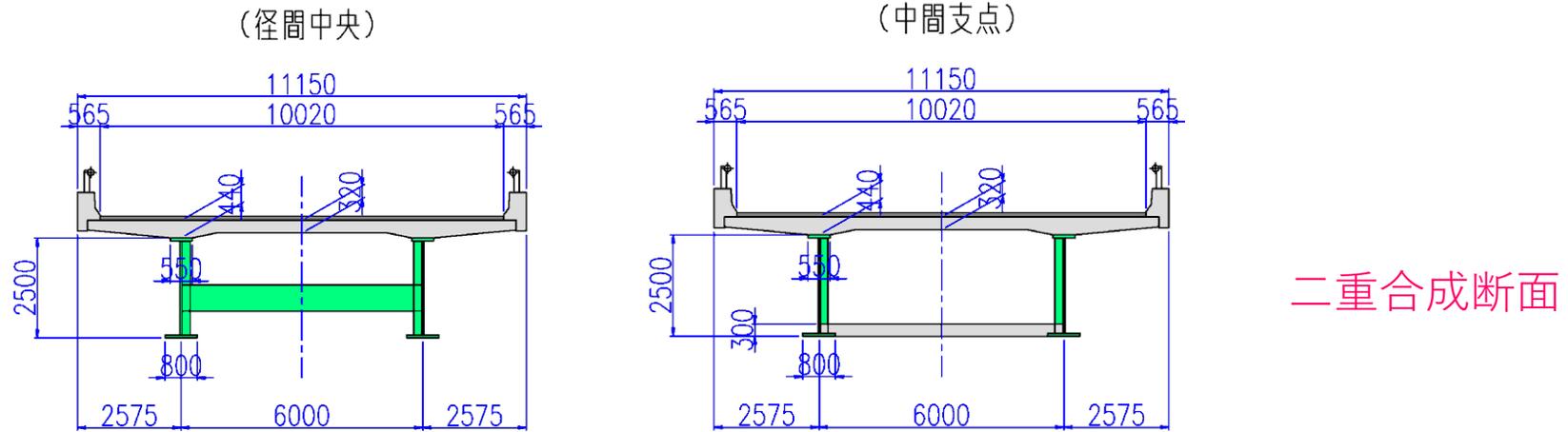
許容応力度設計法(旧道示)の結果



中間支点断面も通常合成桁のひび割れ制御設計

	Span Center	Intermediate Support
U Flg.	580x27 (SM490Y)	580x54 (SM570)
Web	2933x20 (SM490Y)	2902x27 (SM570)
L Flg.	840x40 (SM490Y)	840x44 (SM570)
Steel weight A (t/m)	1.694	2.302

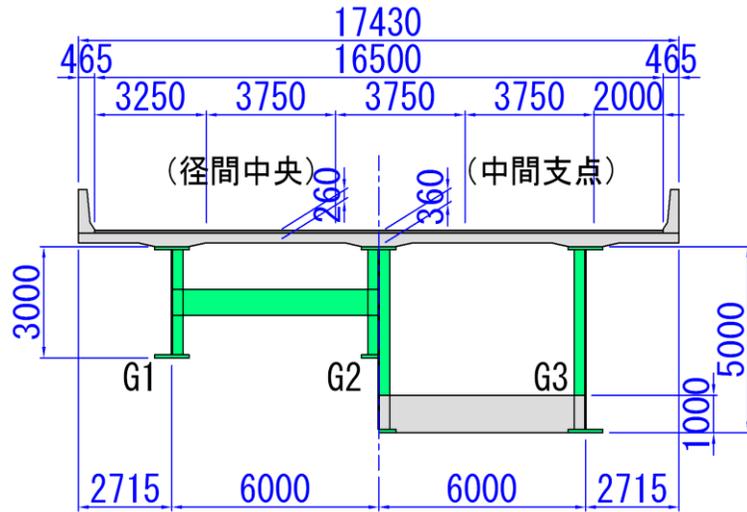
限界状態設計法による設計と経済性の比較



	Span Center	Intermediate Support
U Flg.	550x17 (SM490Y)	550x46 (SM570)
Web	2455x18 (SM490Y)	2429x23 (SM570)
L Flg.	800x28 (SM490Y)	800x25 (SM570)
Steel weight B (t/m)	1.192	1.588
Ratio B/A	0.704	0.690

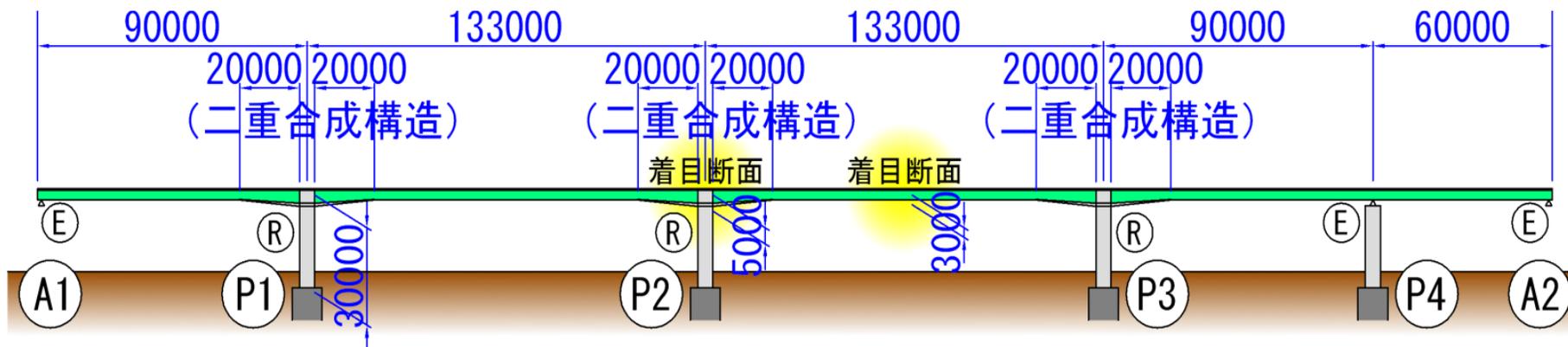
⇒ 30% 低減

Case Study 2 (スパン長 = 133m)



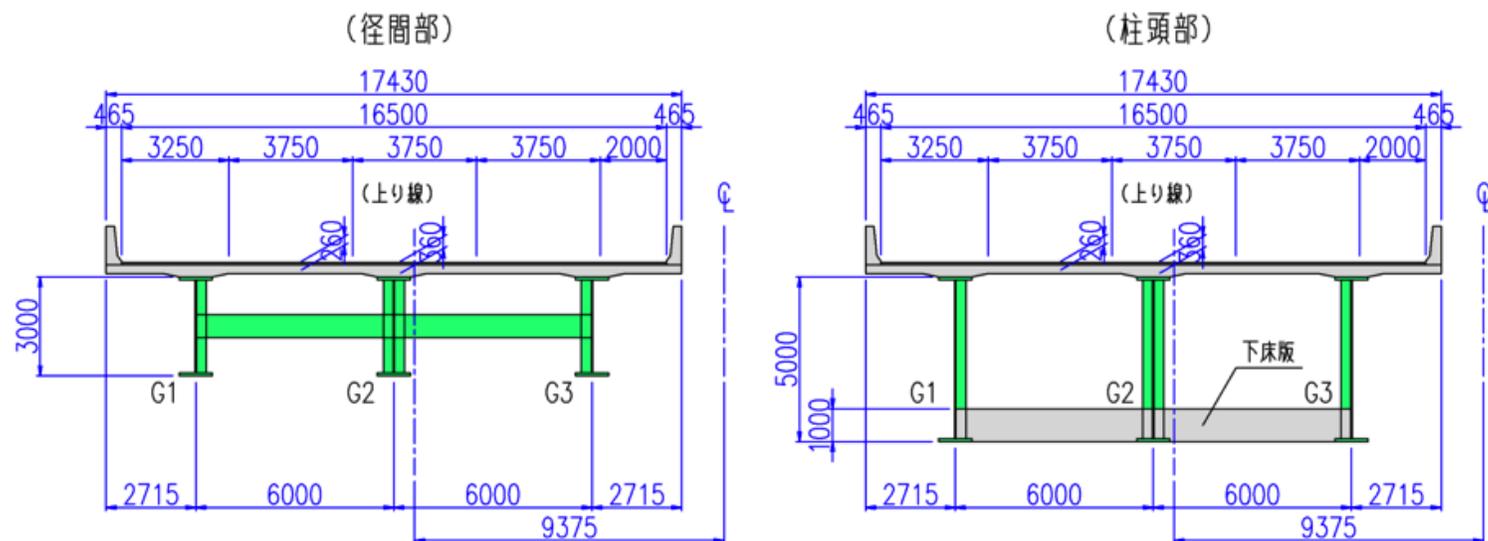
5 径間連続合成桁
剛構造タイプ

断面図



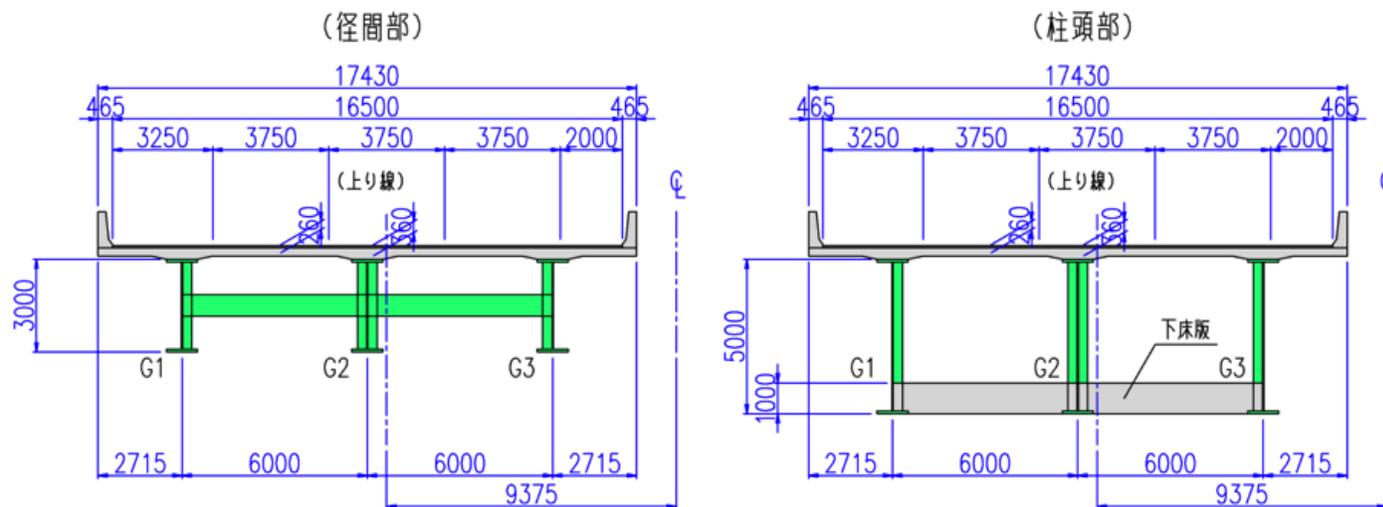
側面図

許容応力度設計法による断面サイズ



	Span Center	Intermediate Support
U Flg.	1000x39 (SM570)	1000x100 (SM570-H)
Web	2895x25 (SM570)	4905x30 (SM570)
L Flg.	1000x66 (SM570-H)	1000x95 (SM570-H)
Steel weight A (t/m)	4.18	7.99

限界状態設計法による設計と経済性の比較



限界状態設計法による断面

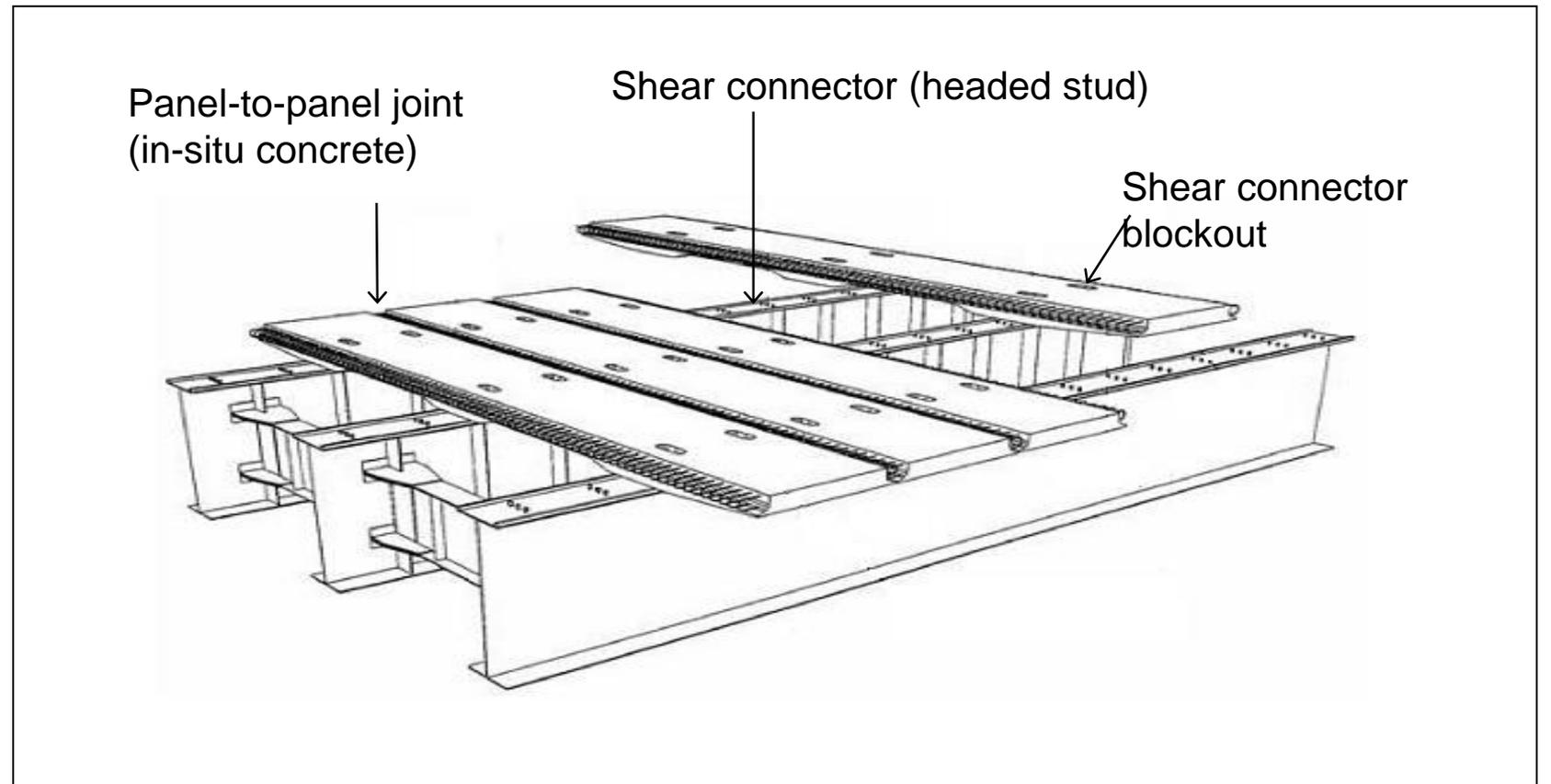
	Span Center	Intermediate Support
U Flg.	1 0 0 0 x30 (SM570)	1000x47 (BHS500)
Web	2930x18 (BHS500)	4923x24 (BHS500)
L Flg.	1000x40 (SM570)	1000x30 (BHS500)
Steel weight B (t/m)	2.89	4.60
Ratio B/A	0.69	0.58

PCa床版ひび割れ制御

大城他：プレキャスト床版連続合成桁の曲げひび割れ幅に関する実験，構造工学論文集， Vol. 56A, pp. 1027-1040, 2010

プレキャスト床版の連続合成桁の検討

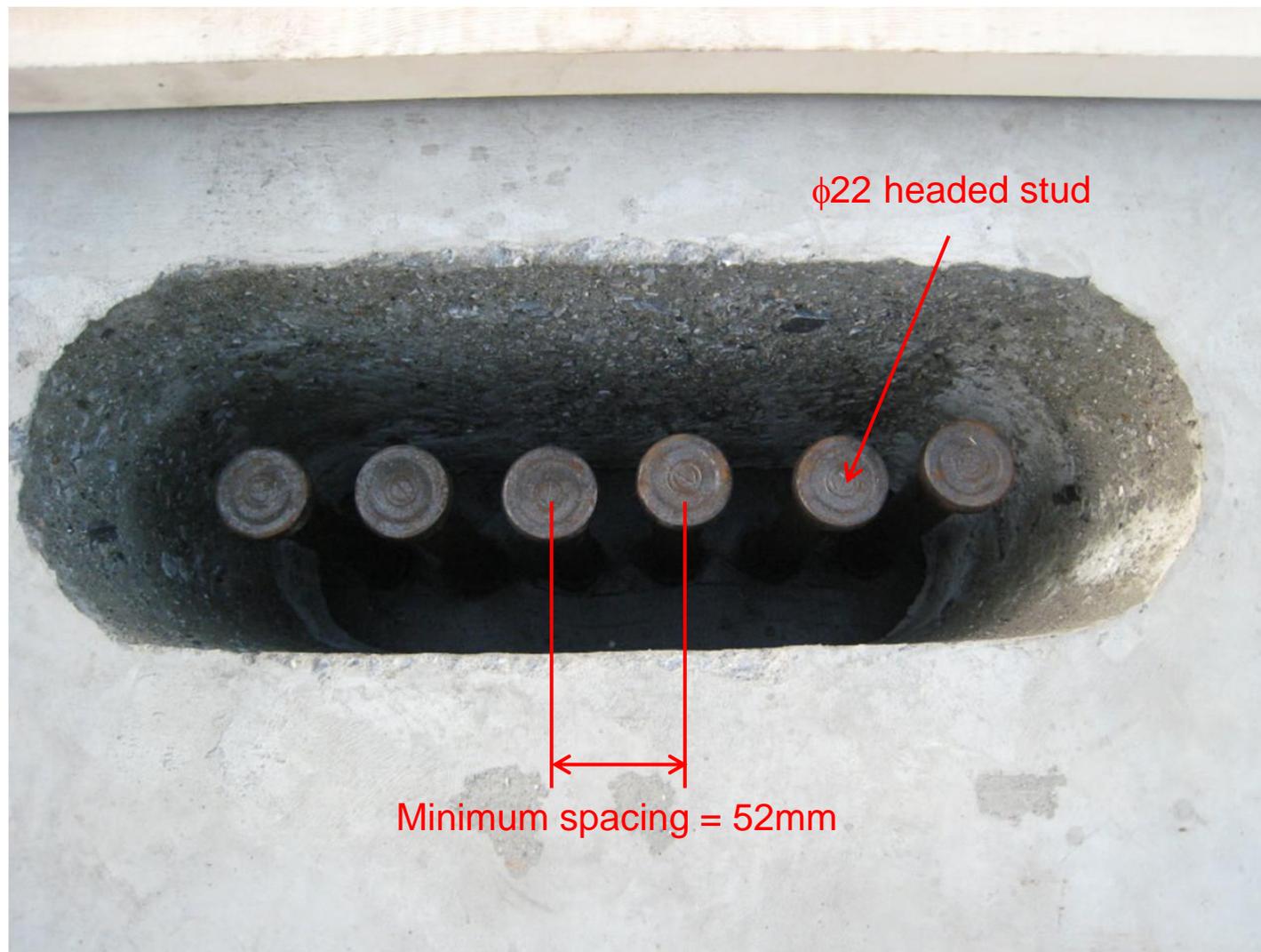
- Panel-to-panel joint (looped connection)
- Shear connector blackout
- Stud arrangement



PCaパネル間の継ぎ手（ループ継ぎ手）

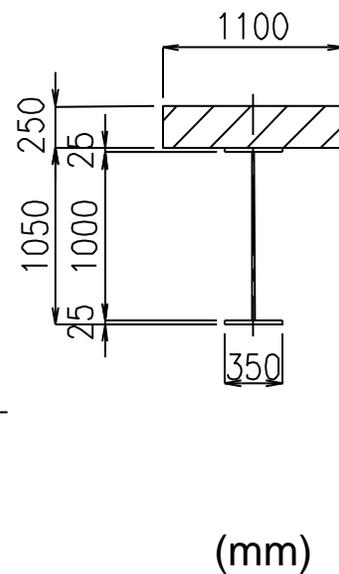
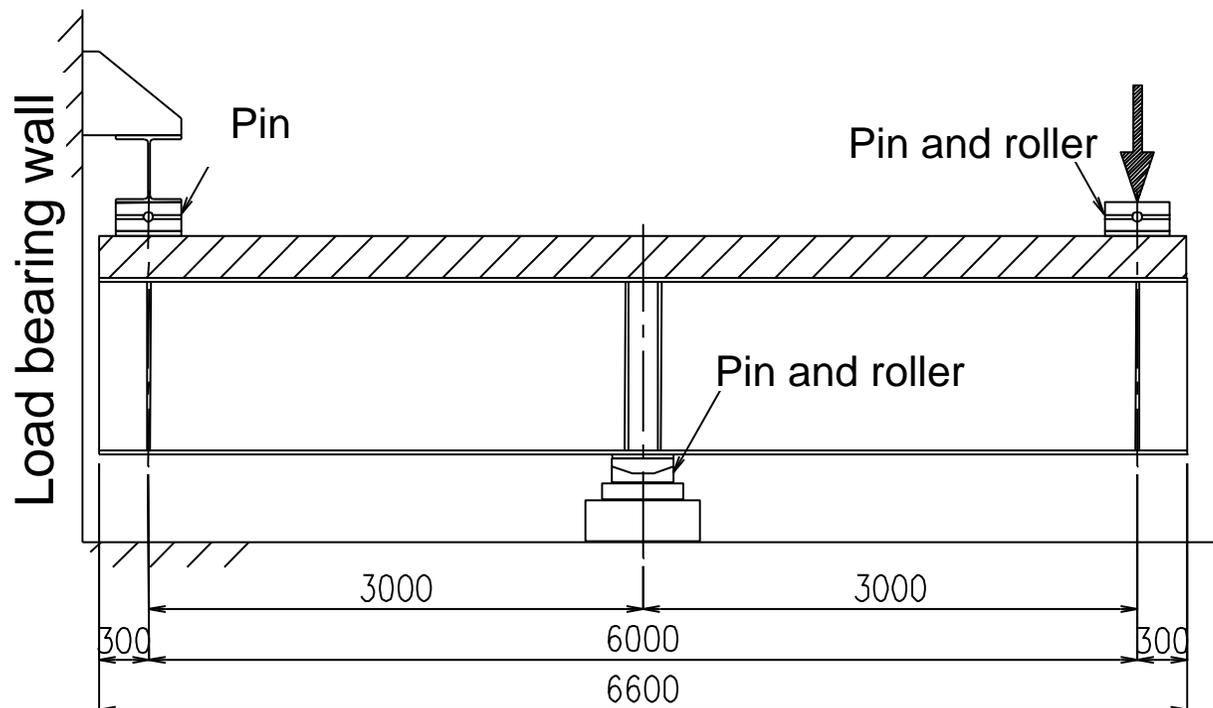


ずれ止めの設置



負曲げ部のひび割れ幅の検討

供試体



供試体

B-2 場所打ち

C-2 プレキャスト

スタッド

6列

橋軸方向ピッチ: 800mm

鉄筋

D19 (397N/mm²)

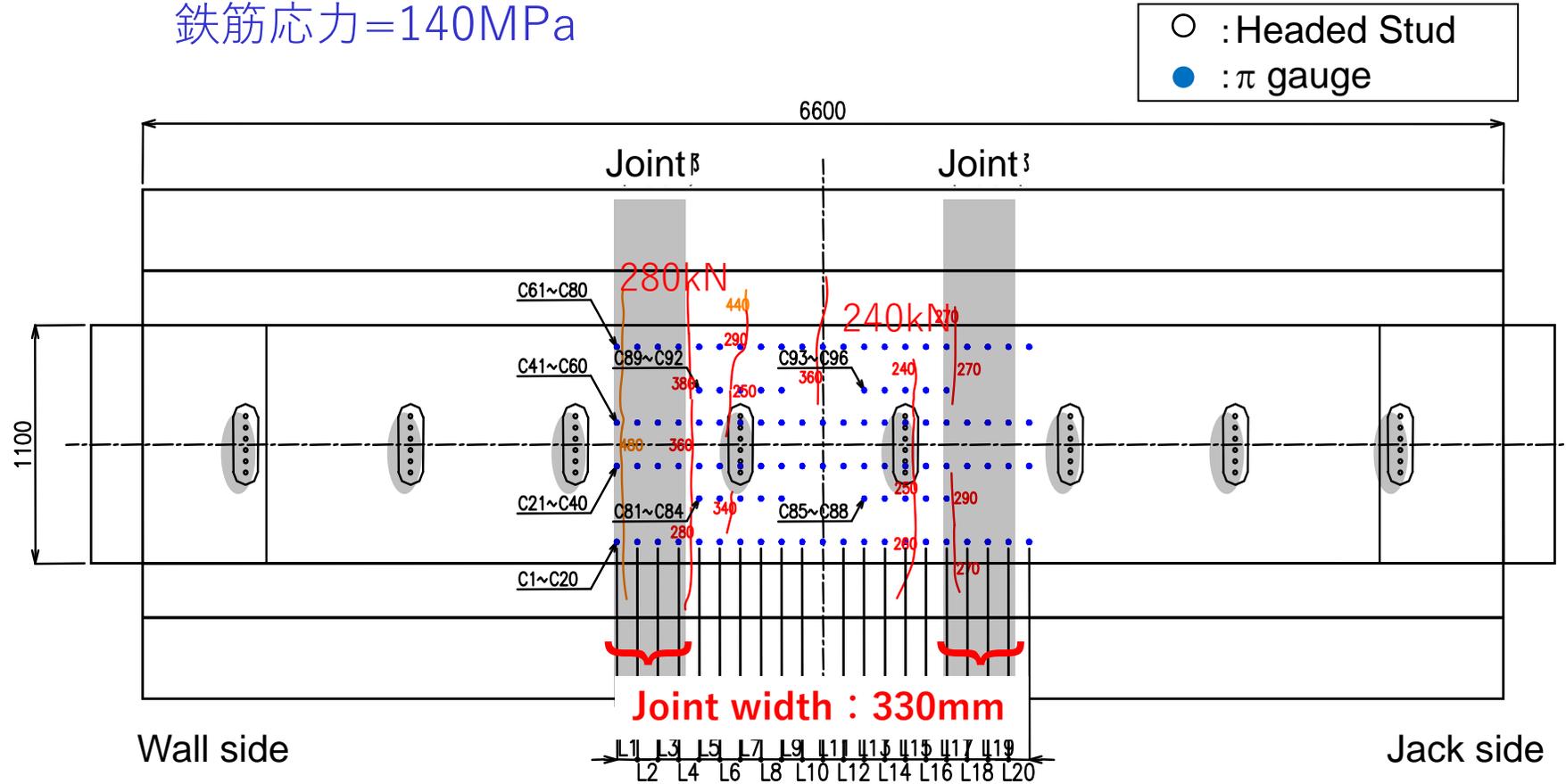
鉄筋比1.36%

実験状況



ひび割れ図: C-2 供試体 (PCa)

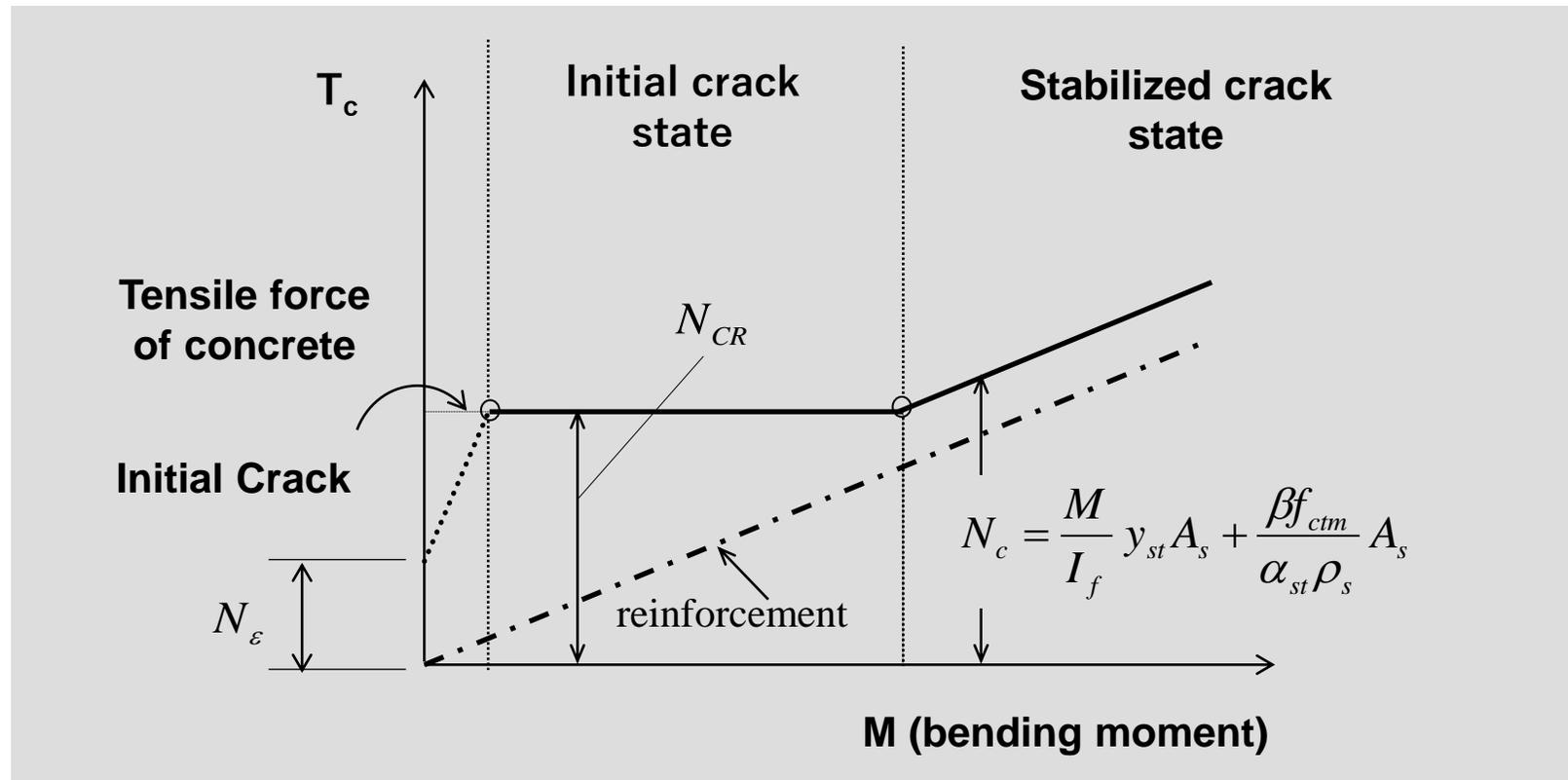
鉄筋応力=140MPa



ひび割れ間隔=ジョイント幅

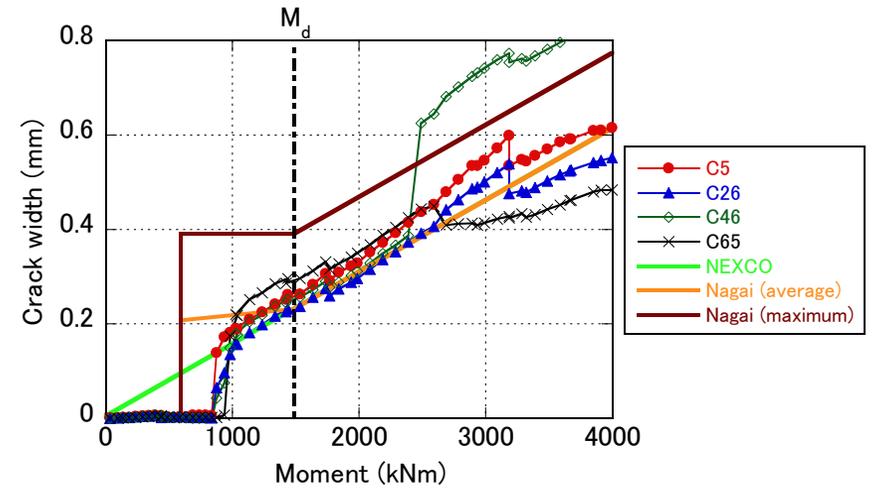
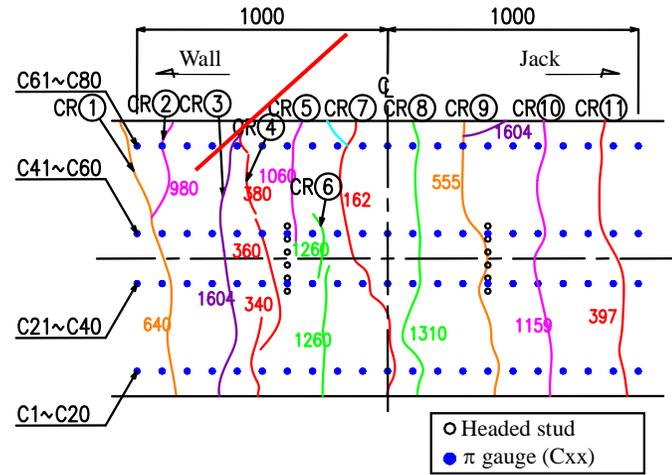
ひび割れ幅の計算

- Crack state
 - 初期ひびわれ状態
 - 安定ひび割れ状態
 - コンクリート床版の収縮による初期引張力 (N_ε)

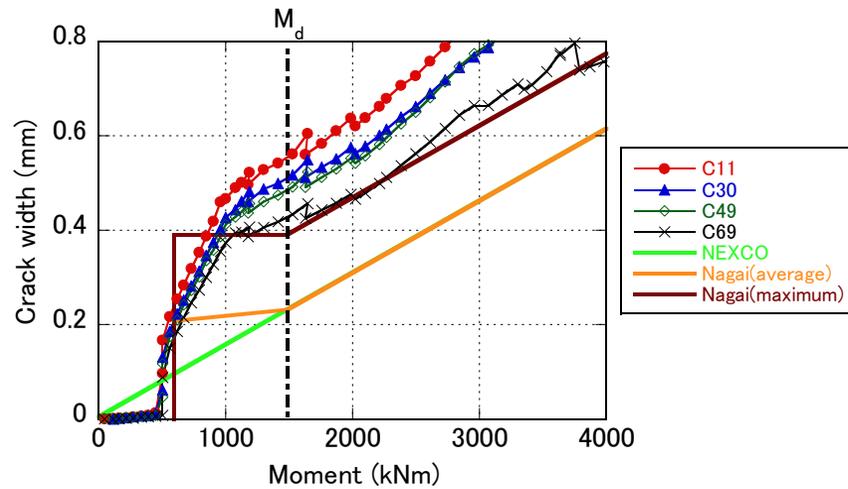


B-2供試体 (場所打ちコンクリート)

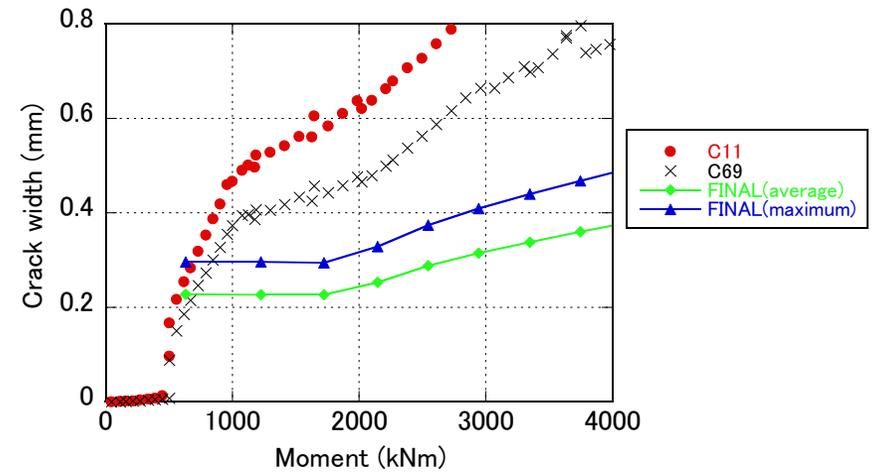
B-2



CR4



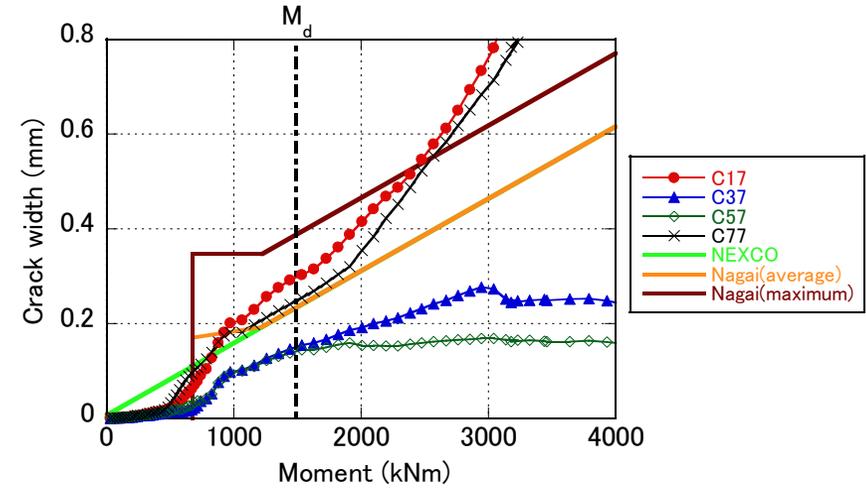
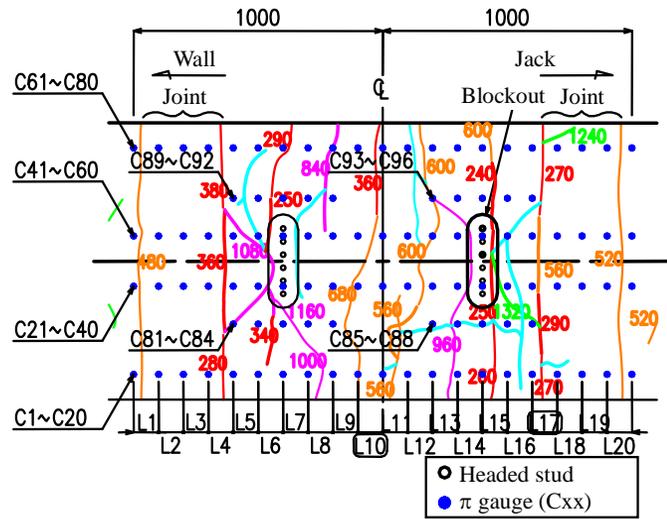
CR7



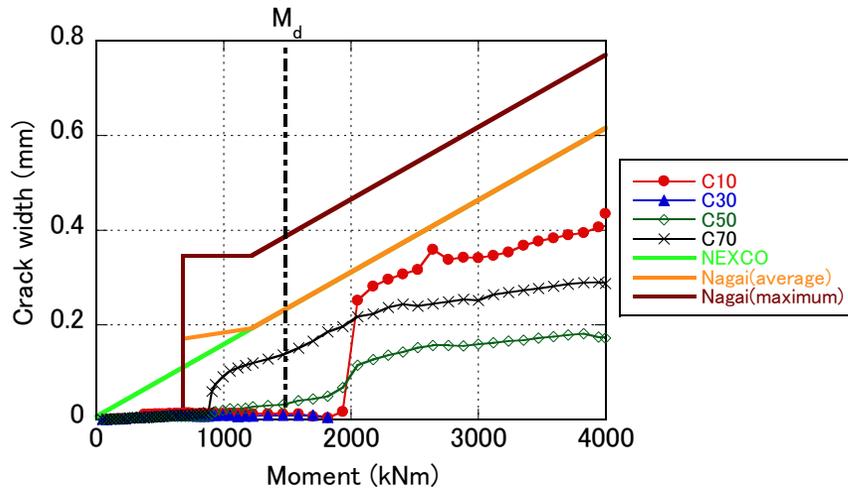
Comparison of CR7 crack width between Experiment and

C-2 供試体 (Pca床版)

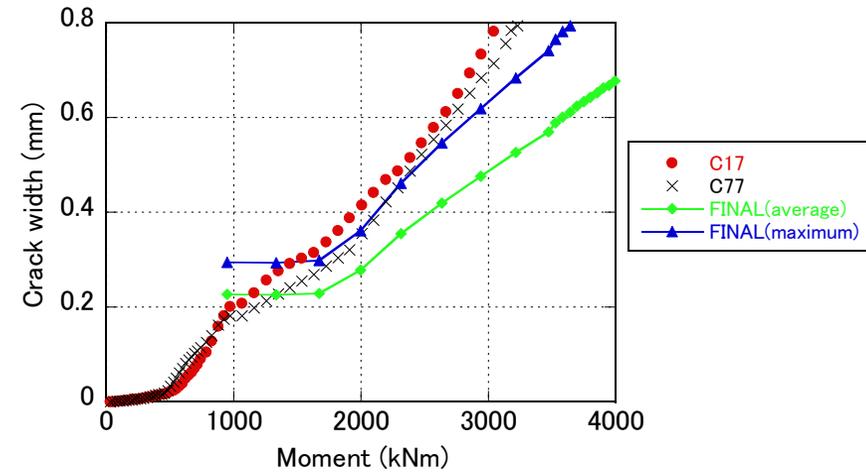
C-2



L17



L10 (panel)



Comparison of L17 (joint) crack width between experiment and FEA

まとめ

床版がUFCに変わると既往の研究が適用できない場合がある。

例えば

- 正曲げ合成桁のコンクリート圧壊時の強度式
- UFC連続合成桁負曲げ部分の設計法
- ひび割れ幅（パネル見開き）の算定方法
- 負曲げ作用状態での床版疲労強度
- 限界状態設計法でのUFC合成桁の最適桁高
- 2重合成桁の最適断面

Analysis of crack width with FE model

- FE program: FINAL
- Crack of concrete: smeared crack model
- Shrinkage considered as initial strain

