

第72回 土木学会 年次学術講演会
2017年05月11日(月)・12日(火)・13日(水) 九州大学伊都キャンパス

ハイブリッド合成桁・ホモジニアス合成桁 の終局曲げ耐力における比較検討

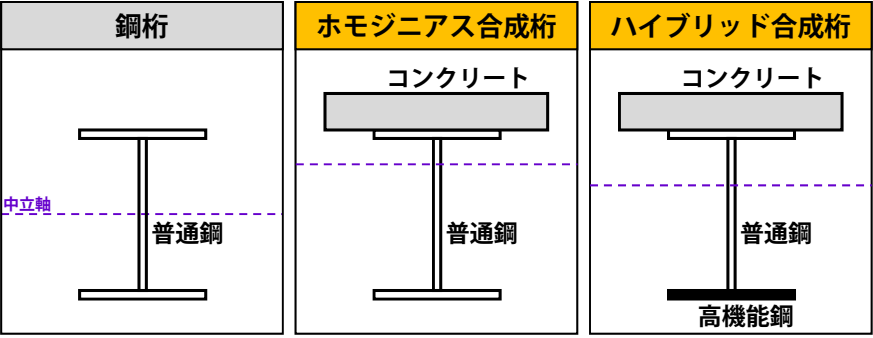


筑波大学
University of Tsukuba

山本亨輔
システム情報系・助教
構造エネルギー工学域

千野隆之介
大学院・システム情報工学研究科
構造エネルギー工学専攻 博士前期課程1年生

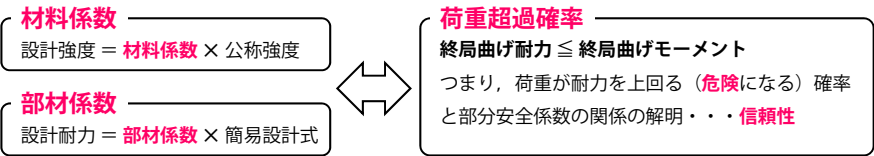
研究背景



- 1) 限界状態設計法の導入による鋼製橋梁の合理化の可能性
① 労力・費用の低減
② 信頼性の高い構造
- 2) 合成桁ではコンクリート床版による座屈に対する拘束効果が考慮可能
鋼桁のさらなる薄肉化、補剛材の省略
- 3) ハイブリッド合成桁においては圧縮域が拡大するため、座屈が懸念される
塑性域では座屈が先行？

社会的ニーズ：信頼性の高い設計法

部分安全係数法ベースの限界状態設計法



信頼性の高い設計方法を次のように定義する

荷重超過確率から材料係数・部材係数を求めることができる

技術的課題

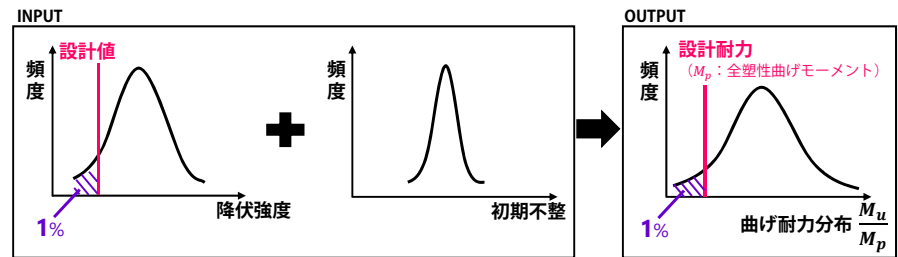
- 1) 材料係数と部材係数は独立でない
- 2) 床版の圧壊と主桁の座屈のどちらが先行するか分からない
- 3) 統計的な検討が必要

研究目的

降伏強度と初期不整を確率変数とした合成桁モデルの材料係数と部材係数を独立に求める

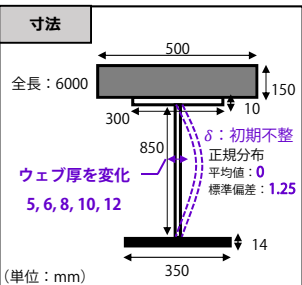
Methodology

- 1) 降伏強度のばらつき分布から材料係数を定める
- 2) 合成桁の設計耐力を全塑性曲げモーメントとする
- 3) モンテカルロ法により合成桁モデルの終局曲げ耐力を求める
- 4) 終局曲げ耐力と設計耐力の比を部材係数とする



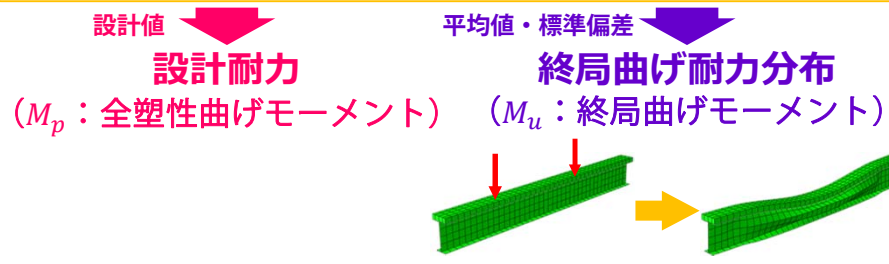
モンテカルロ法の適用

基本となる合成桁モデルを作成



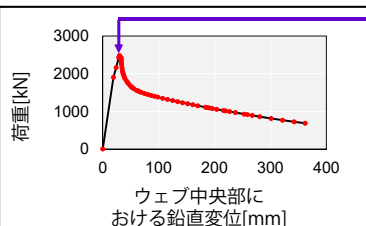
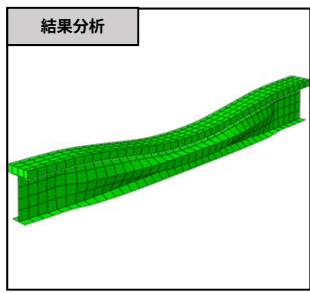
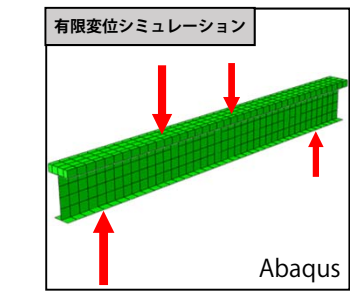
	コンクリートの 圧縮強度 (N/mm^2)	普通鋼の 降伏強度 (N/mm^2)	高機能鋼の 降伏強度 (N/mm^2)
設計値	33.98	239.80	520.83
公称値	35	235	500
平均値	42.37	293.75	603.90
標準偏差	3.568	23.5	36.50

FEMモデルの入力値が設計値を下回る確率：1%



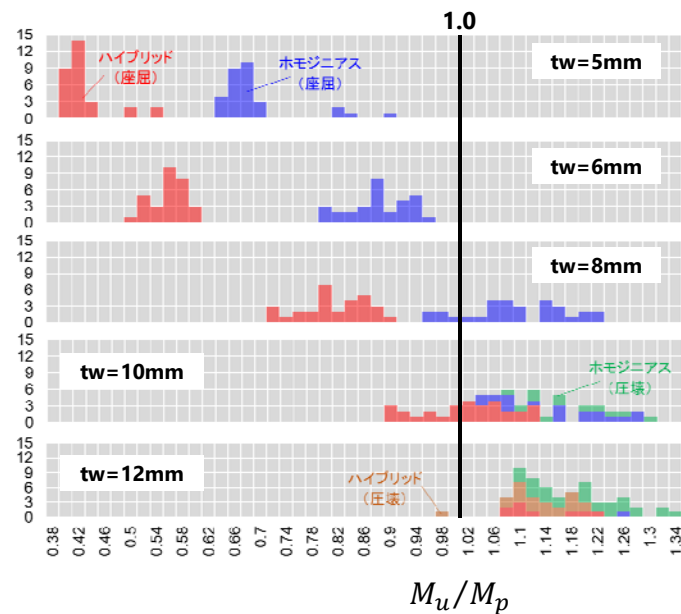
有限変位理論に基づく有限要素法

大変形問題に対応した
有限要素モデルの合成桁を4点曲げ載荷

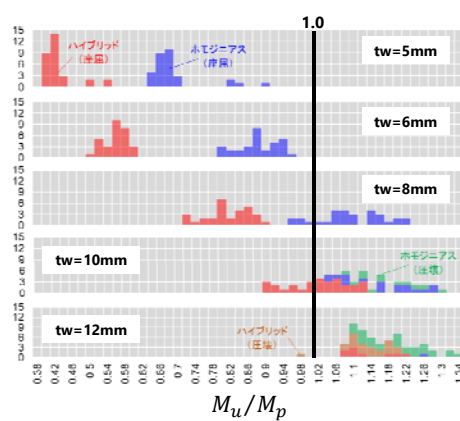


- ① 座屈発生
 - ② 座屈発生より先に圧壊ひずみに達する
⇒ 圧壊発生
- ▼
- 終局として M_u を算出

終局曲げモーメント分布



結果の考察



ウェブの薄肉化を進めると

合成桁は**全塑性曲げモーメントに達する前に**終局限界状態に達する

ホモジニアス合成桁の終局耐力の方が全塑性曲げモーメントに近い

(ハイブリッド合成桁の M_p は大きくなるため)

↓

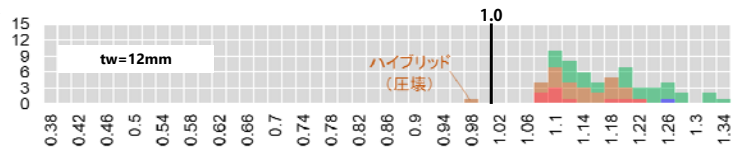
ハイブリッド合成桁の場合、**設計耐力は高めに**算出されるが座屈により性能は発揮できない

↓

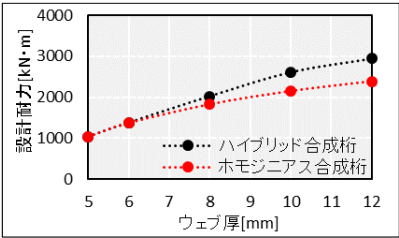
ウェブの薄肉化には**限界**がある

ハイブリッド合成桁は、ホモジニアス合成桁よりも**薄肉化の限界条件が厳しい** (厚肉構造ではやや有利)

ハイブリッド合成桁の有用性

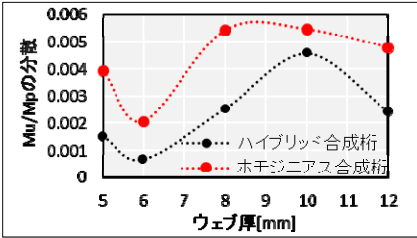


ホモジニアス合成桁：耐力分布が設計耐力より大きい（過剰安全）
ハイブリッド合成桁：耐力分布が設計耐力により近い（合理設計）



設計耐力

ハイブリッド合成桁の場合、
設計耐力は高めに算出される



Mu/Mpの分散

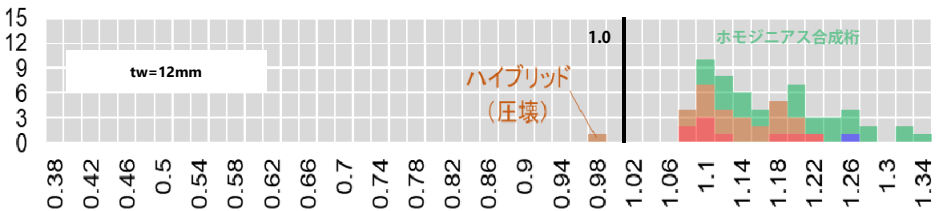
ハイブリッド合成桁の場合、
実際の耐力はばらつきが小さい

結論

公称値ではなく、信頼確率1%の材料強度を用いて設計耐力を算出した
乱数として発生させた材料強度・初期不整を合成桁モデルに与えた
モンテカルロ法により合成桁の曲げ耐力分布を求めた

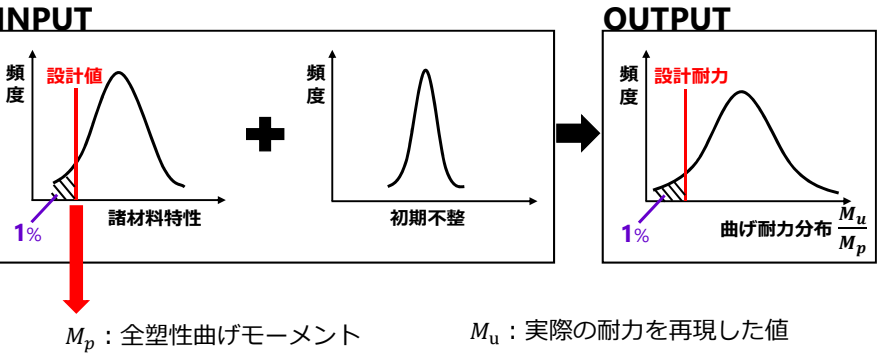
板厚が一定以上であれば、ハイブリッド合成桁の方が有利である

- ① ハイブリッド合成桁のほうが設計耐力が上
- ② ハイブリッド合成桁の耐力分布は、より設計耐力に近い
- ③ 耐力分布の発散値が改善される

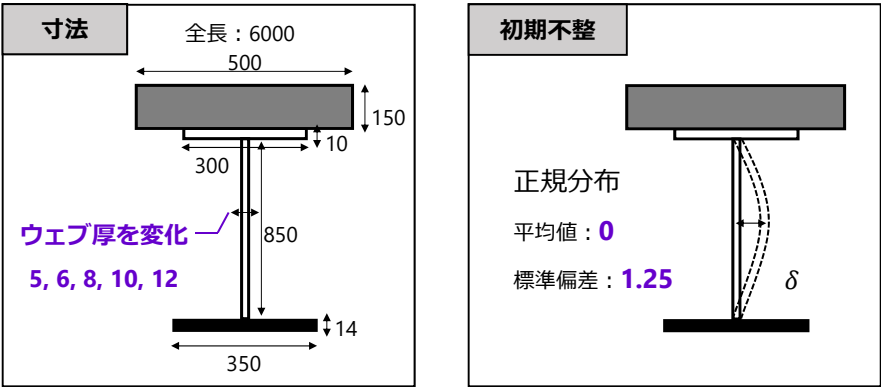


研究概要

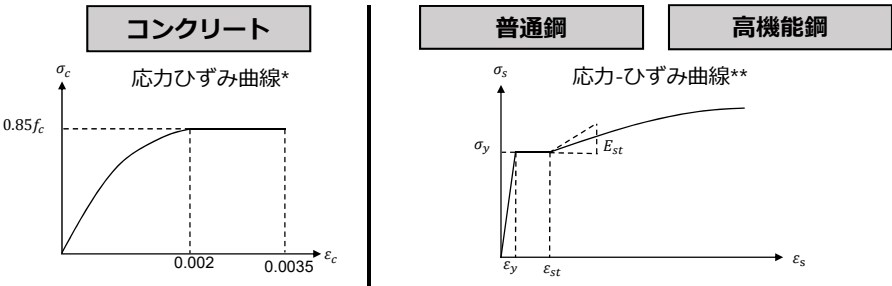
- ツール：Abaqus（汎用FEMソフト）
- 解析概要：4点曲げを模擬した破壊試験
材料特性、初期不整に不確定性を与える ➡ 曲げ耐力分布
- 設計値・耐力：累積確率密度が1%になるときの値とする。



モデル形状



材料特性

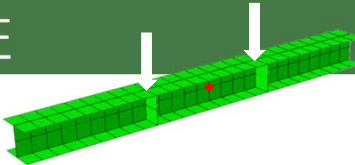


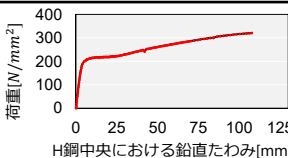
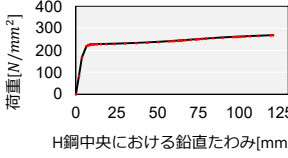
	コンクリートの 圧縮強度(N/mm ²)*	普通鋼の降伏強度 (N/mm ²)*	高機能鋼の降伏強度 (N/mm ²)*
設計値	33.98	239.80	520.83
公称値	35	235	500
平均値	42.37	293.75	603.90
標準偏差	3.568	23.5	36.50

*コンクリート示方書 **土木学会鋼構造技術小委員会 ***山本ら：材料特性が鋼-コンクリートハイブリッド合成桁の曲げ耐力確率分布に及ぼす影響(2008)

モデリングの妥当性検証

H型鋼の4点曲げ実験との比較



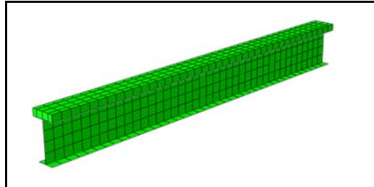
	破壊形状	荷重-変位関係
実験値		
解析値		

➡ 解析条件は概ね一致。
この条件をハイブリッド合成桁の4点曲げ解析に当てはめる。

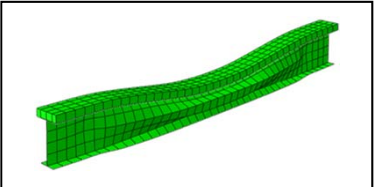
解析結果

変形の様子

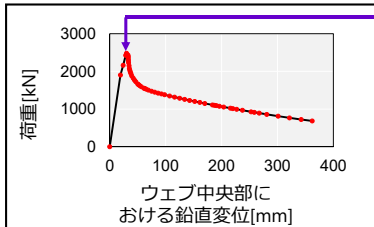
解析前



解析後



座屈or圧壊??



①座屈発生

②座屈発生より先に圧壊ひずみに達する

⇒圧壊発生



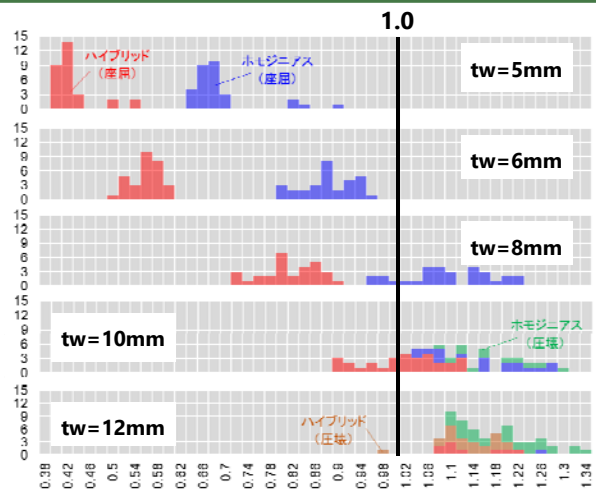
壊れた瞬間の M_u を算出

解析結果

M_u/M_p 分布

- ・ハイブリッド合成桁
⇒圧縮領域拡大の影響で、
早期に座屈が発生しやすい

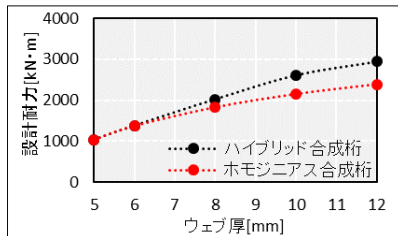
- ・座屈が先行する断面でも、
全塑性曲げモーメントを
上回る場合がある



縦軸：頻度[回]

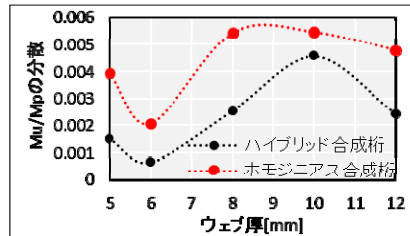
横軸： $\frac{M_u}{M_p}$

考察



設計耐力

ウェブ厚が十分厚く、
座屈抵抗性能が高い場合は、
ハイブリッド合成桁が**優位**



Mu/Mpの分散

ハイブリッド合成桁が**優位**
▼
構造物の安定性に繋がる

まとめと課題

まとめ

- ①ハイブリッド合成桁とホモジニアス合成桁の曲げ耐力を比較した。
その際、材料特性と初期不整にばらつきを与え繰り返し計算した。
- ②**設計耐力**において、特定のモデルにおいてハイブリッド合成桁の優位性を確認できた。
- ③曲げ耐力分布の**分散値**において、ハイブリッド合成桁の優位性を確認できた。

今後の課題

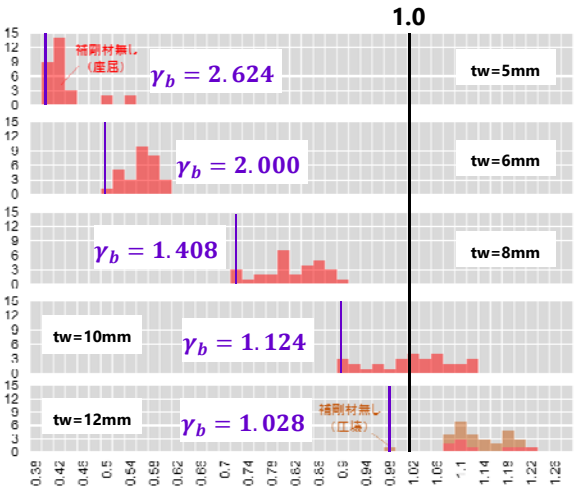
- ①種々のモデルに対して解析を行う

解析結果

M_u/M_p 分布

部材係数 γ_b の設定

横軸 : $\frac{M_u}{M_p}$
縦軸 : 頻度 [回]



研究概要

ツール : Abaqus (汎用FEMソフト)

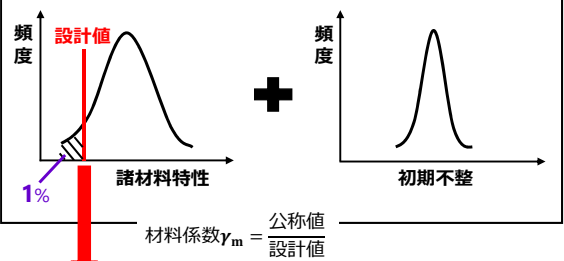
解析概要 : 4点曲げを模擬した破壊試験

材料特性、初期不整に不確実性を与える

モンテカルロ
シミュレーション

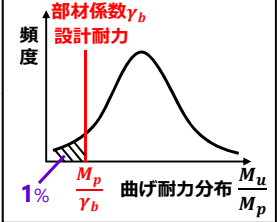
設計値・耐力 : 累積確率密度が1%になるときの値とする。

INPUT



M_p : 全塑性曲げモーメント

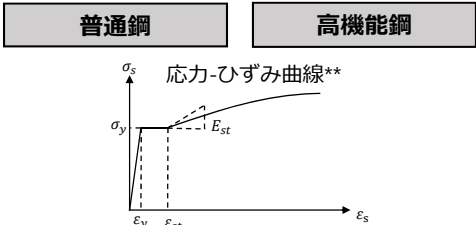
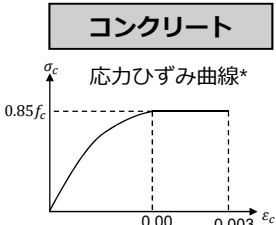
OUTPUT



M_u : 実際の耐力を再現した値

材料特性

材料係数：設定値と公称値の比

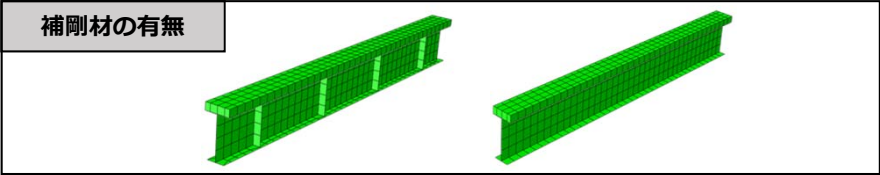
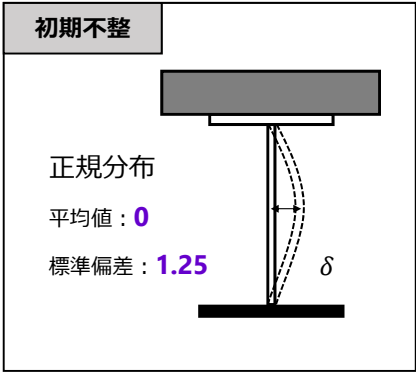
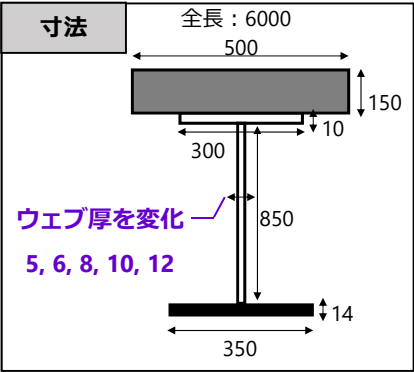


	コンクリートの 圧縮強度(N/mm ²)*	普通鋼の降伏強度 (N/mm ²)*	高機能鋼の降伏強度 (N/mm ²)*
設計値	33.98	239.80	520.83
公称値	35	235	500
平均値	42.37	293.75	603.90
標準偏差	3.568	23.5	36.50
材料係数 γ_m	1.027	0.982	0.963

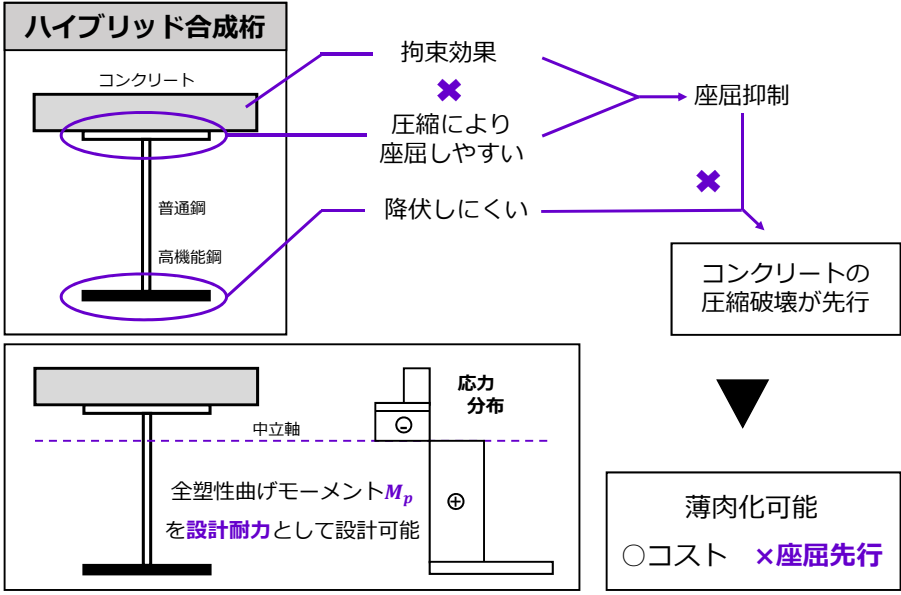
*コンクリート示方書 **土木学会鋼構造技術小委員会 ***山本ら：材料特性が鋼-コンクリートハイブリッド合成桁の曲げ耐力確率分布に及ぼす影響(2008)

モデル形状

※単位[mm]

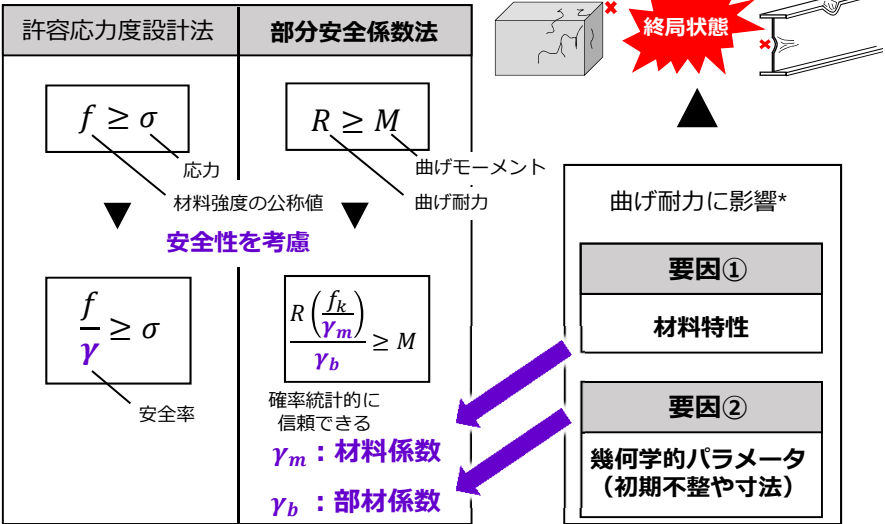


研究背景



部分安全係数

材料係数と部材係数



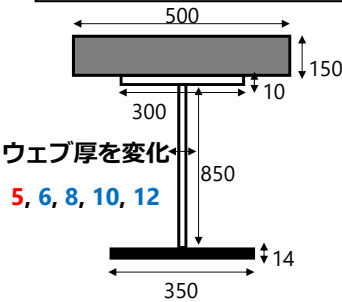
*山本ら：材料特性が鋼-コンクリートハイブリッド合成桁の曲げ耐力確率分布に及ぼす影響(2008)

断面寸法の決定方法

AASHTOの断面区分設定式

$$\bullet \frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_{yc}}}$$
$$\bullet \frac{D}{t_w} \leq 150$$
$$\bullet f_{yc}, f_{yw} \leq 485$$

D_{cp} : 塑性中立軸までのウェブ圧縮高さ、
 t_w : ウェブ厚、 E : ヤング率、 D : ウェブ高、
 f_{yc} : 圧縮フランジの降伏強度、 f_{yw} : ウェブの降伏強度



・すべて満たせば **コンパクト断面**

終局曲げ耐力が全塑性曲げモーメント M_p に達することのできる断面

・満たさない時 **ノンコンパクト断面**

解析結果

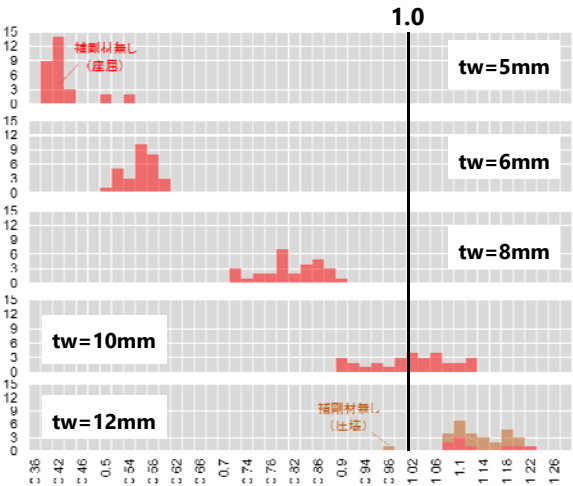
M_u/M_p 分布

横軸 : $\frac{M_u}{M_p}$

縦軸 : 頻度[回]

・ウェブ厚**増加**
⇒耐力・座屈抵抗性の向上

・座屈が発生する場合でも $\frac{M_u}{M_p} > 1$ となる断面が存在する



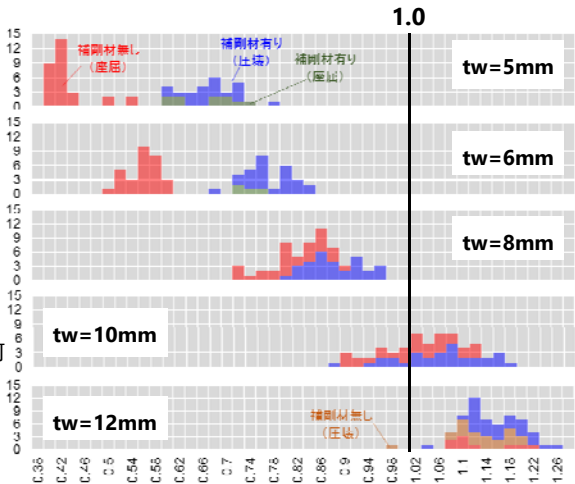
解析結果

M_u/M_p 分布

横軸： $\frac{M_u}{M_p}$

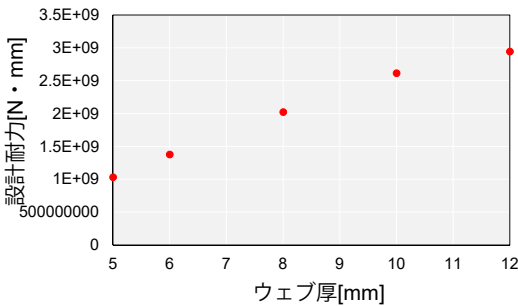
縦軸：頻度[回]

AASHTOの定める断面区分式
⇒コンパクト断面と
ノンコンパクト断面の区別不可



考察

設計耐力とウェブ厚の関係



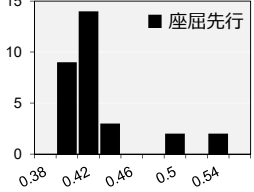
ウェブ厚5mmと12mmを比べる

$$\frac{12\text{mm}}{5\text{mm}} = 2.4 \quad \frac{\text{設計耐力}(12\text{mm})}{\text{設計耐力}(5\text{mm})} = 2.85$$

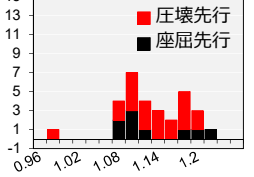
補剛材による座屈抑制⇒より経済的な設計が可能

横軸： $\frac{M_u}{M_p}$ 縦軸：頻度[回]

ウェブ厚5mm



ウェブ厚12mm

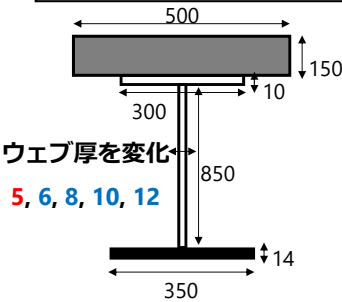


断面寸法の決定方法

AASHTOの断面区分設定式

$$\begin{aligned} &\bullet \frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_{yc}}} \\ &\bullet \frac{D}{t_w} \leq 150 \\ &\bullet f_{yc}, f_{yw} \leq 485 \end{aligned}$$

D_{cp} : 塑性中立軸までのウェブ圧縮高さ、
 t_w : ウェブ厚、 E : ヤング率、 D : ウェブ高、
 f_{yc} : 圧縮フランジの降伏強度、 f_{yw} : ウェブの降伏強度



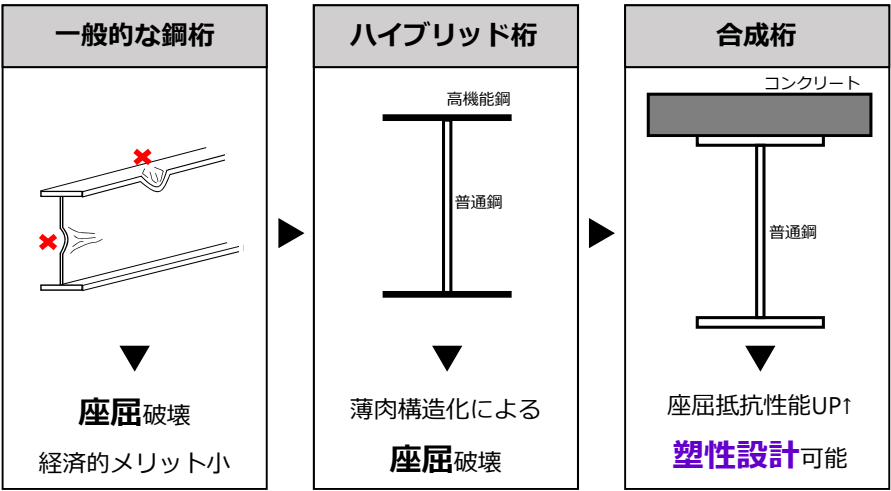
すべて満たせば **コンパクト断面**

最大曲げ耐力が全塑性曲げモーメントに達することのできる断面をコンパクト断面

満たさない時 **ノンコンパクト断面**

研究背景

橋梁に **塑性設計** を取り入れる



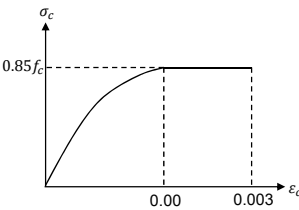
入力諸元

材料特性

コンクリート

普通鋼

高機能鋼



応力-ひずみ曲線

$$\sigma_c = 0.85f_c \left(\frac{\epsilon_c}{0.002} \right) \left(2 - \frac{\epsilon_c}{0.002} \right) \quad (\epsilon_c \leq 0.002)$$

$$\sigma_c = 0.85f_c \quad (0.002 \leq \epsilon_c \leq 0.0035)$$

	設計値	公称値	平均値	標準偏差
圧縮強度 $f_c(N/mm^2)$	33.98	35	42.37	3.568
圧壊ひずみ ϵ_c	0.0035	0.0035		

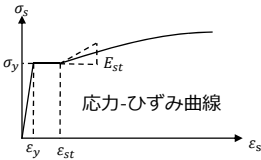
入力諸元

材料特性

コンクリート

普通鋼

高機能鋼



応力-ひずみ曲線

$$\sigma_s = E \epsilon_s \quad (\epsilon_s \leq \epsilon_y)$$

$$\sigma_s = \sigma_y \quad (\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{st})$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_y} = \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} \left[1 - \exp \left\{ -\xi \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_y} - \frac{\epsilon_{st}}{\epsilon_y} \right) \right\} \right] + 1 \quad (\epsilon_s \geq \epsilon_{st})$$

	設計値	公称値	平均値	標準偏差
ヤング率 $E(N/mm^2)$	200000	200000		
降伏強度 $\sigma_y(N/mm^2)$	239.80	235	293.75	23.5
硬化係数 $E_{st}(N/mm^2)$	4070	4070		
硬化ひずみ ϵ_{st}	0.0180	0.0180		
硬化曲率 ξ	0.49	0.49		

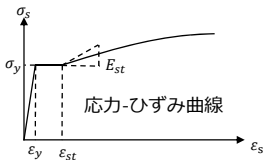
入力諸元

材料特性

コンクリート

普通鋼

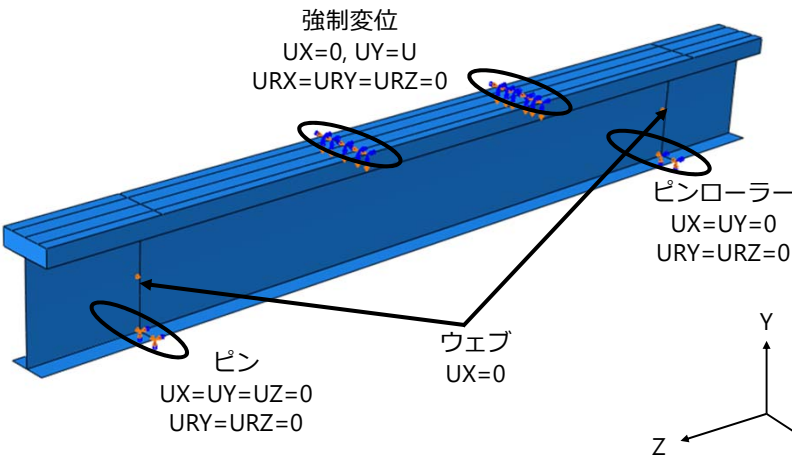
高機能鋼



$$\sigma_s = E \varepsilon_s \quad (\varepsilon_s \leq \varepsilon_y)$$
$$\sigma_s = \sigma_y \quad (\varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st})$$
$$\frac{\sigma_s}{\sigma_y} = \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} \left[1 - \exp \left\{ -\xi \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} - \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_y} \right) \right\} \right] + 1 \quad (\varepsilon_s \geq \varepsilon_{st})$$

	設計値	公称値	平均値	標準偏差
ヤング率 $E(N/mm^2)$	20000 0	20000 0		
降伏強度 $\sigma_y(N/mm^2)$	520.83	500	603.90	36.50
硬化係数 $E_{st}(N/mm^2)$	5000	5000		
硬化ひずみ ε_{st}	0.0089	0.0089		
硬化曲率 ξ	0.35	0.35		

境界条件

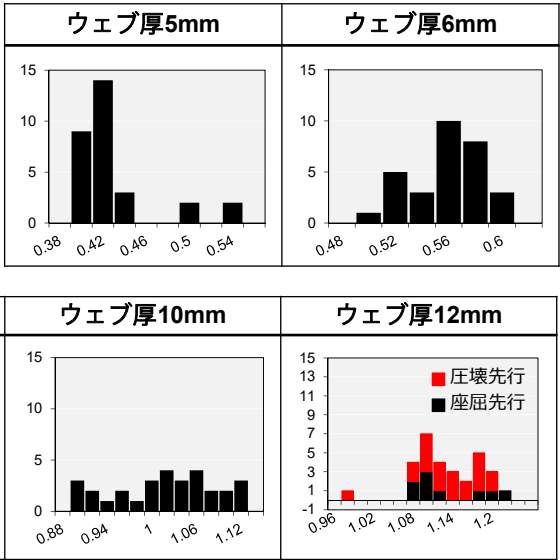


解析結果

M_u/M_p 分布

横軸: $\frac{M_u}{M_p}$ 縦軸: 頻度[回]

ウェブ厚上昇
⇒平たく分布
⇒断面形状によって
ばらつきの影響の
受け方が変わる

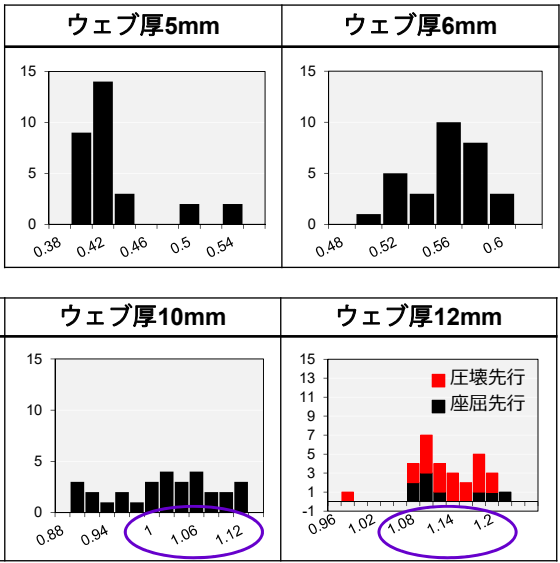


解析結果

M_u/M_p 分布

横軸: $\frac{M_u}{M_p}$ 縦軸: 頻度[回]

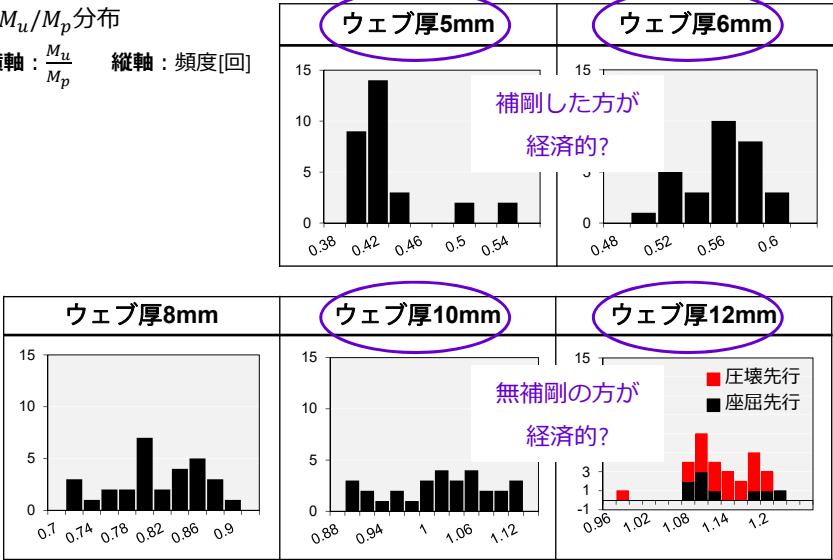
座屈が先行する場合でも、
全塑性曲げモーメントを
上回る



解析結果

M_u/M_p 分布

横軸: $\frac{M_u}{M_p}$ 縦軸: 頻度[回]



解析結果

M_u/M_p 分布

横軸: $\frac{M_u}{M_p}$

縦軸: 頻度[回]

■ 座屈先行

■ 圧壊先行

