

鋼桁のせん断強度と曲げとせん断の相関

Outline

- 背景および目的
- 鋼桁の耐荷力式
- FEMパラメトリック解析の概要
- FEMパラメトリック解析結果
- まとめ

背景および目的

- 許容応力度設計法から性能照査型設計法へ
 - 多様な設計法
 - 限界状態→後座屈強度の考慮
- 部材数の低減→製作コストの削減
- ハイブリッド桁
 - フランジにウェブより高強度な鋼材を使用
- せん断耐荷力←ハイブリッド桁に対しては？
 - 斜張力場作用を認めるのか？
 - 曲げとせん断の相関はあるのか？
 - 曲げを受けたときのウェブの先行降伏の影響

背景及び目的

- 比較的薄肉なI形断面桁の数値解析
 - せん断強度の確認
 - 曲げとせん断の相関についての確認
- 今後の指針作りの基礎資料を与える
 - 我が国独自の指針作りは可能か？

- 連続合成桁の中間支点付近を対象
 - 比較的大きなせん断力を受ける
 - 床版のせん断強度, 曲げ強度への寄与は少ない
 - 鋼桁のみをモデル化

鋼桁の耐荷力式

□ せん断耐荷力式

- バスラーの式
- 前田らの式
- 米国 AASHTO LRFDで採用されている式

□ 曲げ耐荷力式

- 三上の式
- 米国 AASHTO LRFDで採用されている式

□ 曲げとせん断の相関

せん断耐荷力式

□ バスラーの式 $V_n = V_{cr} + V_t$

□ せん断耐荷力 =
弾性せん断座屈強度 + 斜張力場作用による増加分

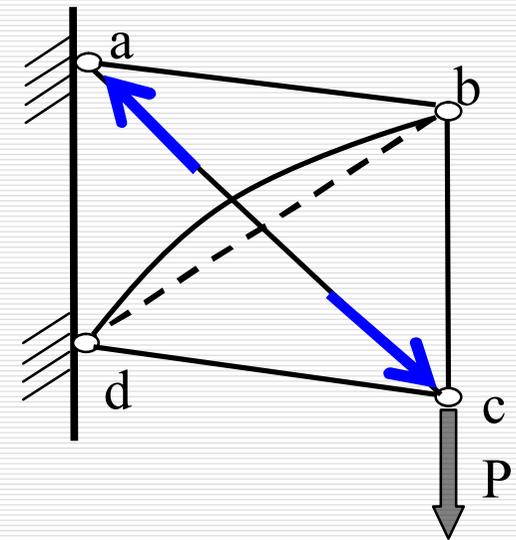
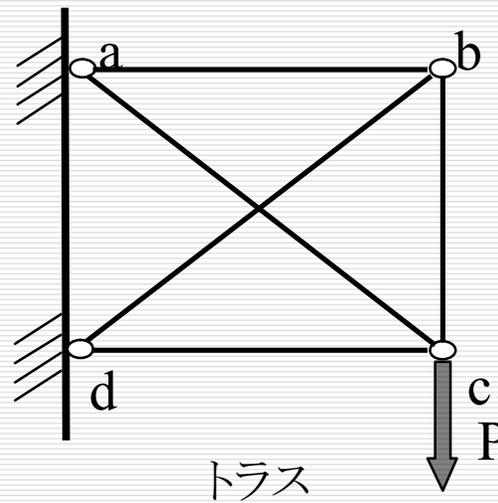
- 弾性せん断座屈強度: V_{cr}
- ウェブ幅厚比に応じたせん断座屈応力
 - 座屈係数の決定方法で変化する

せん断耐荷力式

□ バスラーの式 $V_n = V_{cr} + V_t$

□ 斜張力場作用による増加分: V_t

- 斜張力場作用
- 後座屈強度

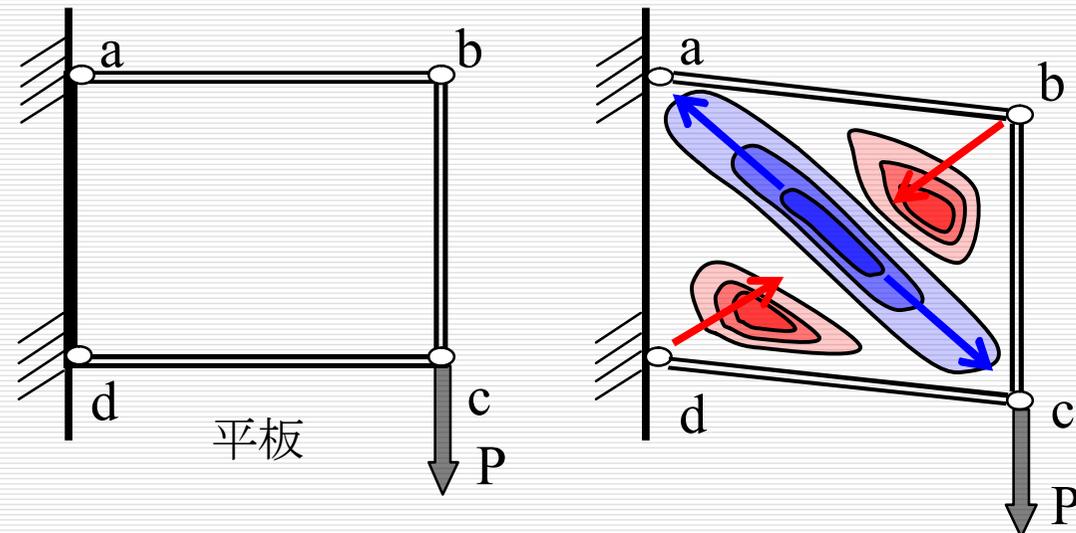


せん断耐荷力式

□ バスラーの式 $V_n = V_{cr} + V_t$

□ 斜張力場作用による増加分: V_t

- 斜張力場作用
- 後座屈強度



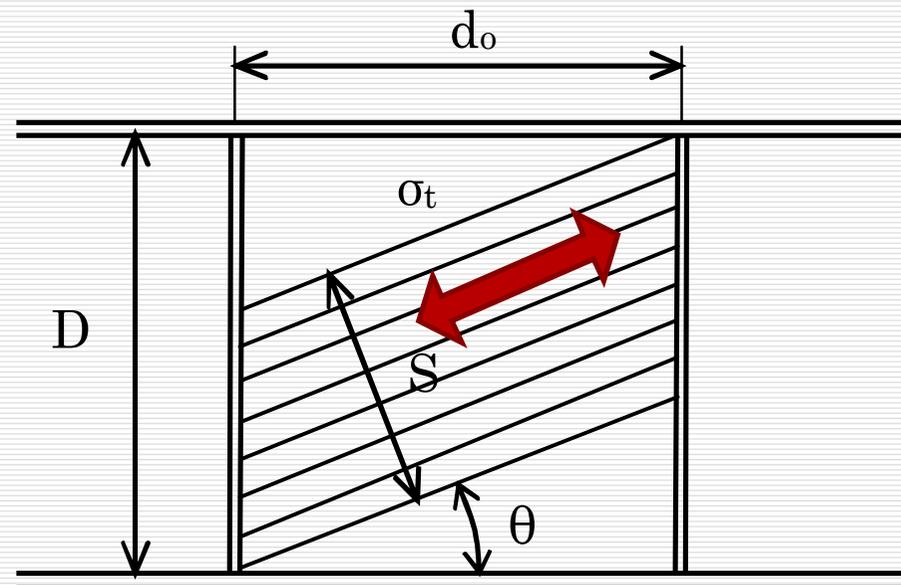
- もともとは航空機の翼に用いられるような非常に薄い板を対象としていた考え方

せん断耐荷力式

□ バスラーの式 $V_n = V_{cr} + V_t$

- 斜張力場の応力が降伏応力に達した時に最大
- 降伏条件の判定では斜張力場の傾きを45度と仮定

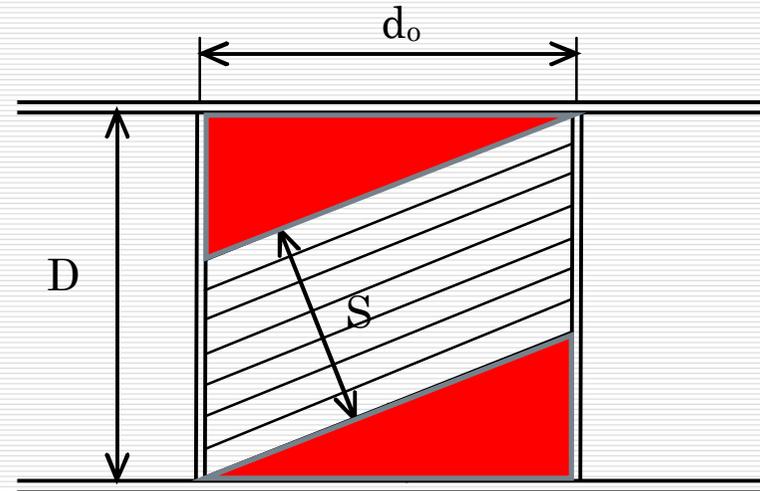
$$V_n = V_p \left[\frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\left(1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_o}{D}\right)^2}} \right]$$



せん断耐荷力式

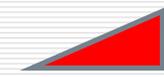
□ バスラーの式 $V_n = V_{cr} + V_t$

$$V_n = V_p \left[\frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\left(1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_o}{D}\right)^2}} \right]$$



□ 修正式も提案されている

$$V_n = V_p \left[\frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\left(1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_o}{D}\right)^2 + \left(\frac{d_o}{D}\right)}} \right]$$

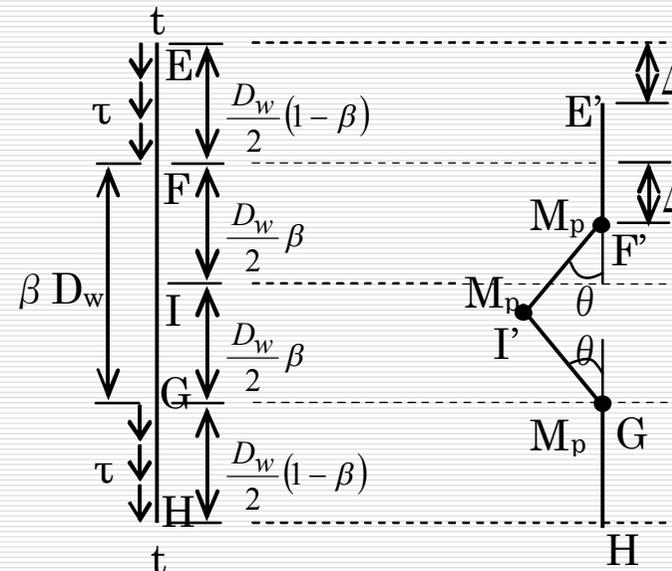
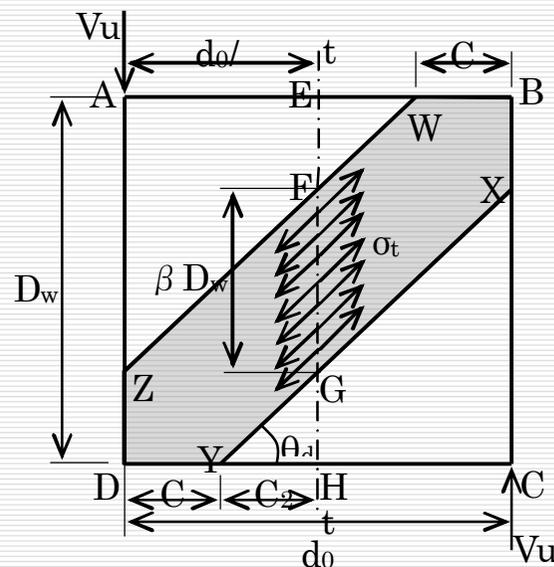
 の部分の取り扱いが異なる

せん断耐荷力式

□ 前田らの式

- バスラーの式における斜張力場作用による応力増加分の算出方法が異なる

$$V_u = \frac{2C}{1 + \alpha^2} t_w (1 - \gamma) \sigma_{yw} \alpha^{0.7\gamma} + \tau_{cr} D_w t_w$$



せん断耐荷力式

□ LRFDで採用されている式

■ バスラーの式と同じ

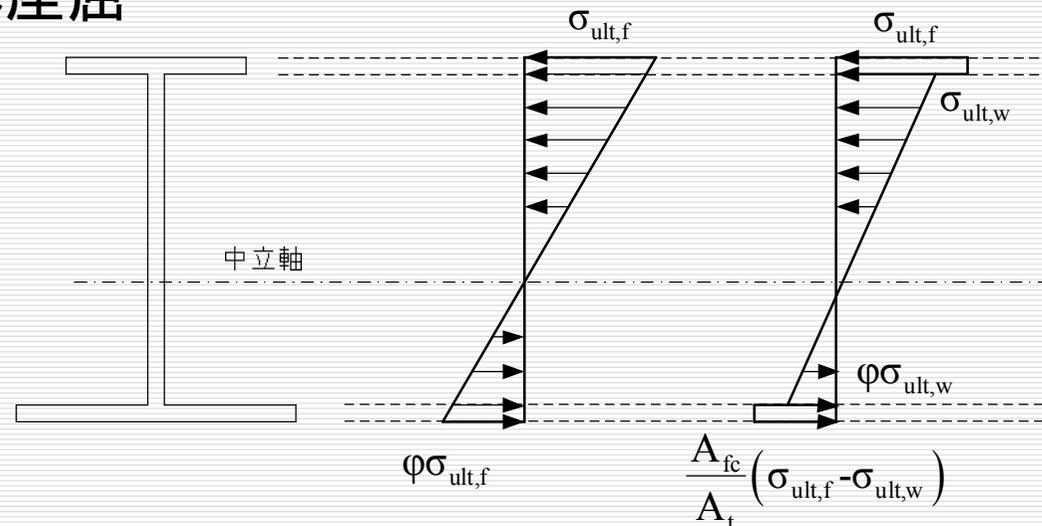
■ $\frac{(b_{fc} t_{fc} + b_{ft} t_{ft})}{Dt_w} \geq 0.8$ を満たす場合 $V_n = V_p \left[C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_o}{D}\right)^2}} \right]$

■ 満たさない場合

$$V_n = V_p \left[C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_o}{D}\right)^2} + \left(\frac{d_o}{D}\right)} \right]$$

曲げ耐荷力式

- 三上の式
- 曲げを受ける桁の崩壊
 - フランジ座屈
 - 横座屈, ねじれ座屈
 - 垂直座屈
 - ウェブ座屈



- それぞれの終局強度を算出して最小のもので耐荷力を制限する

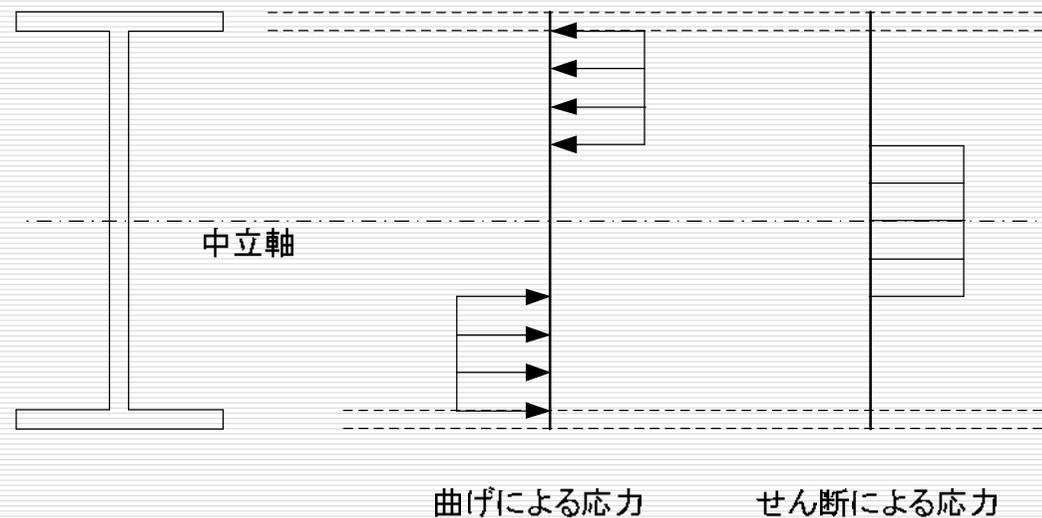
曲げ耐荷力式

- LRFDで採用されている式
- 曲げを受ける桁
 - 局部座屈
 - 横ねじれ座屈のいずれかで制限される
- 終局強度の小さい方を耐荷力として採用
 - 特徴としては
 - ハイブリッド係数
 - 荷重低減係数を用いている

曲げとせん断の相関

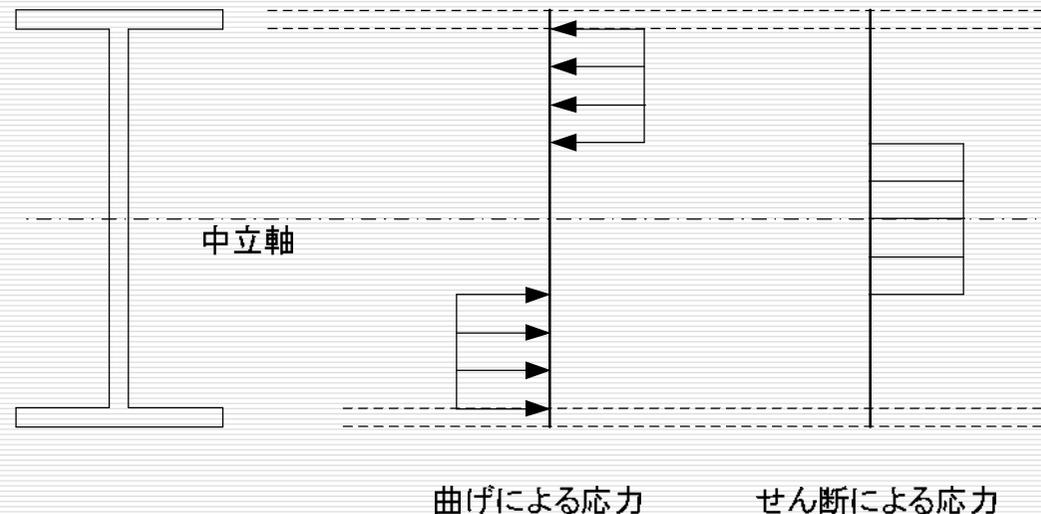
□ バスラーの考え方

- フランジによって受け持たれていたモーメント
- フランジの降伏によりウェブに再分配される
- ウェブのせん断耐力が低下する



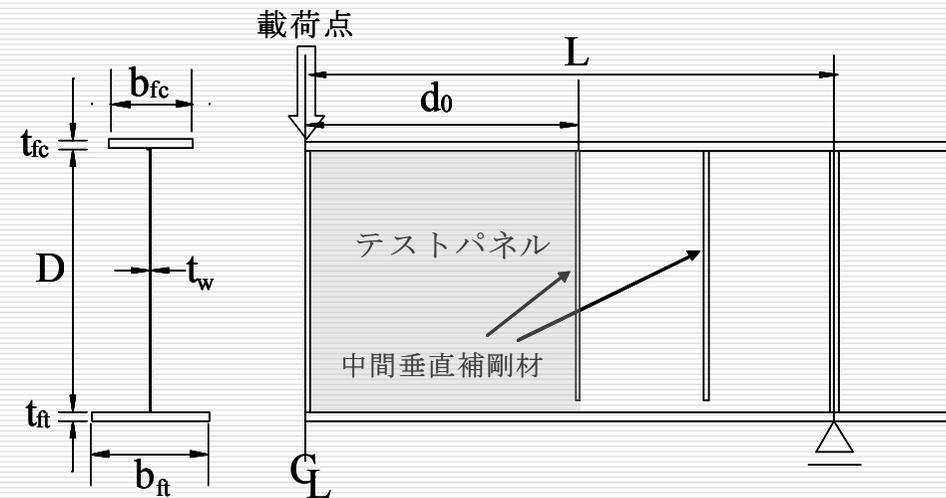
曲げとせん断の相関

- ハイブリッド桁における曲げとせん断の相関
 - ウェブの先行降伏によりさらにせん断耐力が低減
 - 斜張力場作用(後座屈強度)は認められていなかった
 - 2004年度版LRFDにおいて斜張力場作用が認められた
- ホモジニアス桁とハイブリッド桁で同じ耐荷力式を採用



FEMパラメトリック解析の概要

- 2主桁橋を想定
- FEM解析
- 合計320体
 - 2軸・1軸対称桁

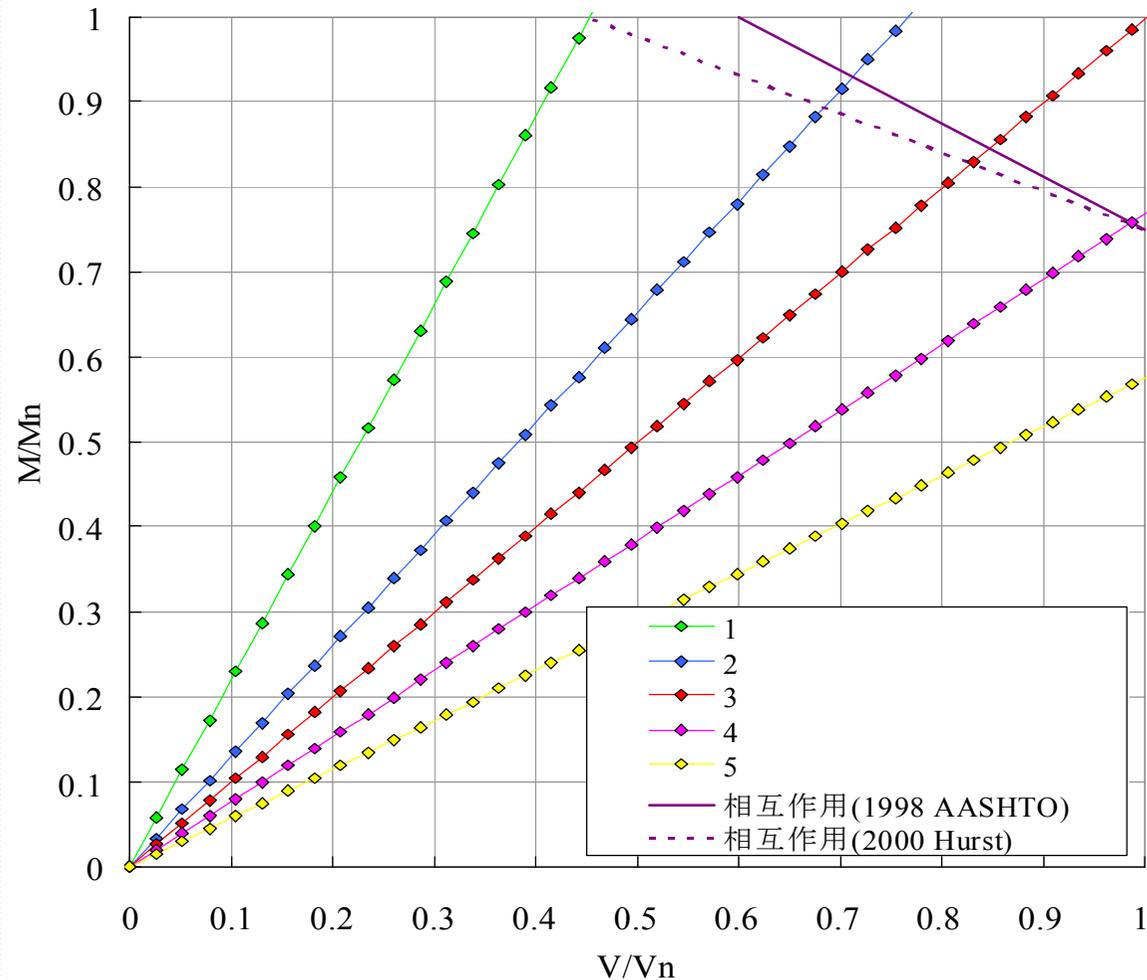


D (mm)	$\frac{2D_c}{t_w}$	$\frac{b_{fc}}{t_{fc}}$	$\frac{D_{cp}}{D}$	F_{yf} (N/mm ²)	F_{yw} (N/mm ²)	$\frac{d_0}{D}$	中間垂直 補剛材厚設計
3000	125	6	0.50	430	235	1	道路橋示方書 AASHTO (LRFD)
	150		0.75			2	
	180					3	

FEMパラメトリック解析の概要

□ 5つの载荷経路

■ 曲げとせん断
の相関を確認



FEMパラメトリック解析の概要

□ 供試体名

asy-18-2-40-A-3

スパンの長さ: 1~5

中間垂直補剛材厚の種類:

A (AASHTO), J (道路橋示方書), N (なし)

ウェブ鋼材の種類: 40 (SM400 材) または 49 (SM490Y 材)

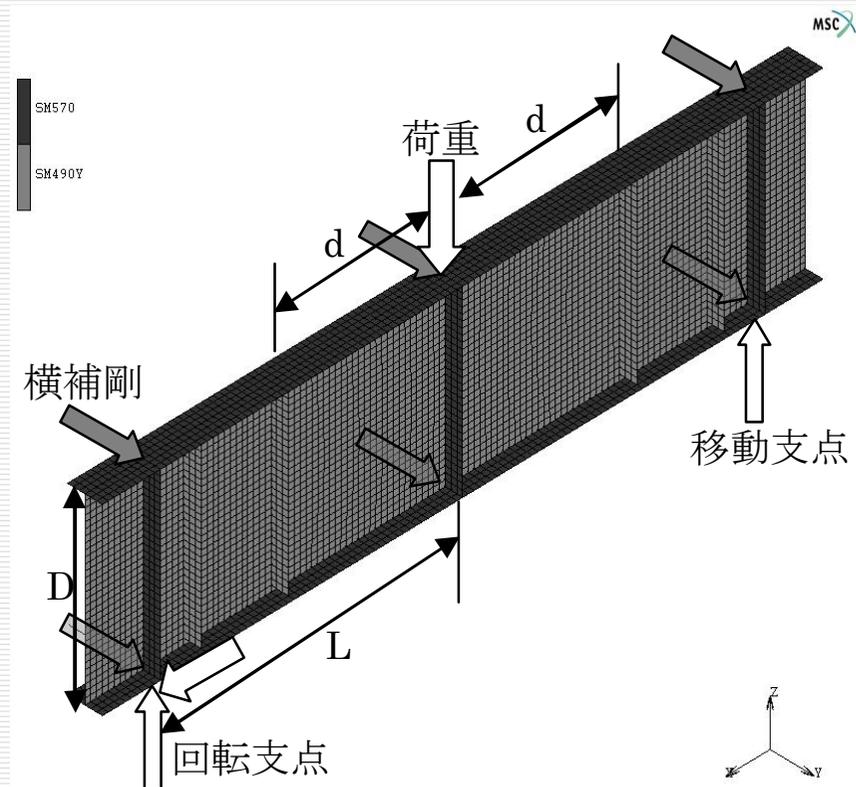
アスペクト比(d_0/D): 1, 2, 3

ウェブ幅厚比($2D_c/t_w$): 12.5 (125), 15 (150), 18 (180)

断面の対称性: asy ($D_{cp}/D=0.75$), sy ($D_{cp}/D=0.50$)

FEMパラメトリック解析の概要

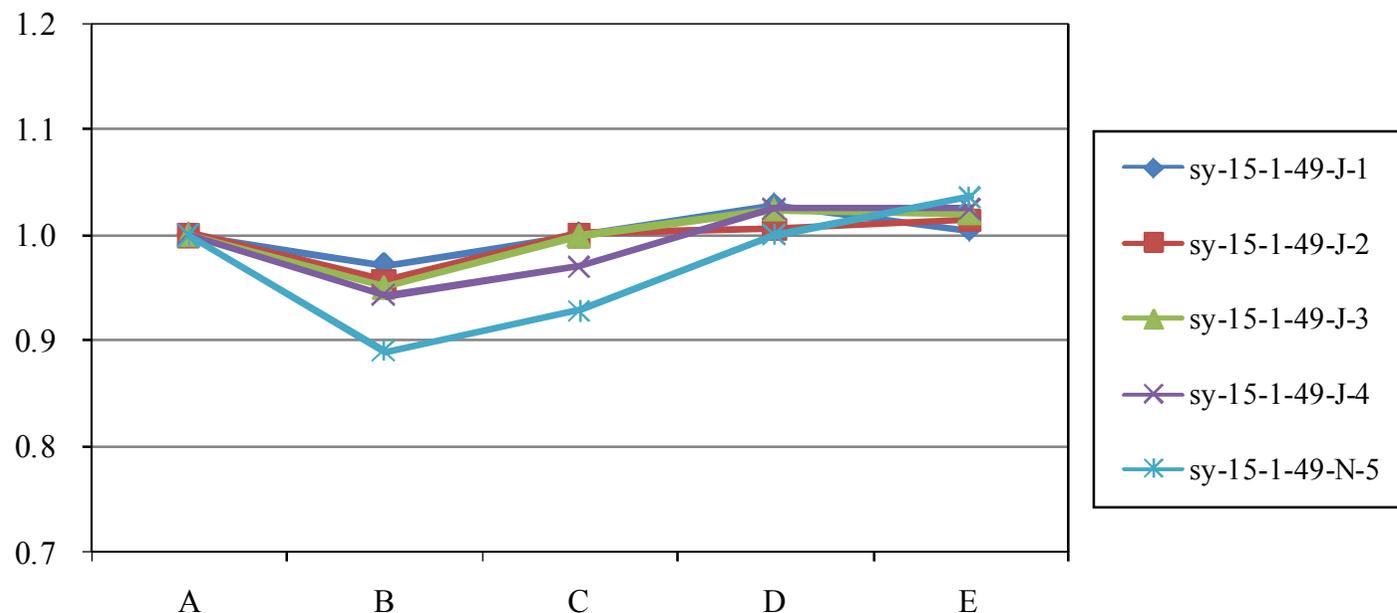
- 単純ばり中央1点载荷
- 残留応力とウェブの初期不整を考慮
- $E=200,000\text{N/mm}^2$
- $\nu=0.3$
- 弾性-完全塑性を仮定
- 要素分割数
 - ウェブ: 30~60
 - フランジ: 6~8



FEMパラメトリック解析結果

□ 解析実行演算装置の違いおよび結果への影響に関する検討

- 対称桁の5体 (sy-15-1-49-Jグループ) および非対称桁の5体 (asy-15-1-49-J グループ) については全ての大学で解析を行った



FEMパラメトリック解析結果

- 垂直補剛材の設計方法による違いは小さい
- 以降の考察では垂直補剛材がAASHTO LRFDで設計されたものを対象とする

2軸対称桁

	M_u/M_n			
	平均値	最大値	最小値	標準偏差
道路橋示方書	0.947	1.019	0.838	0.053
AASHTO	0.942	1.021	0.838	0.055
	V_u/V_n			
	平均値	最大値	最小値	標準偏差
道路橋示方書	0.919	1.021	0.871	0.053
AASHTO	0.919	1.021	0.871	0.053

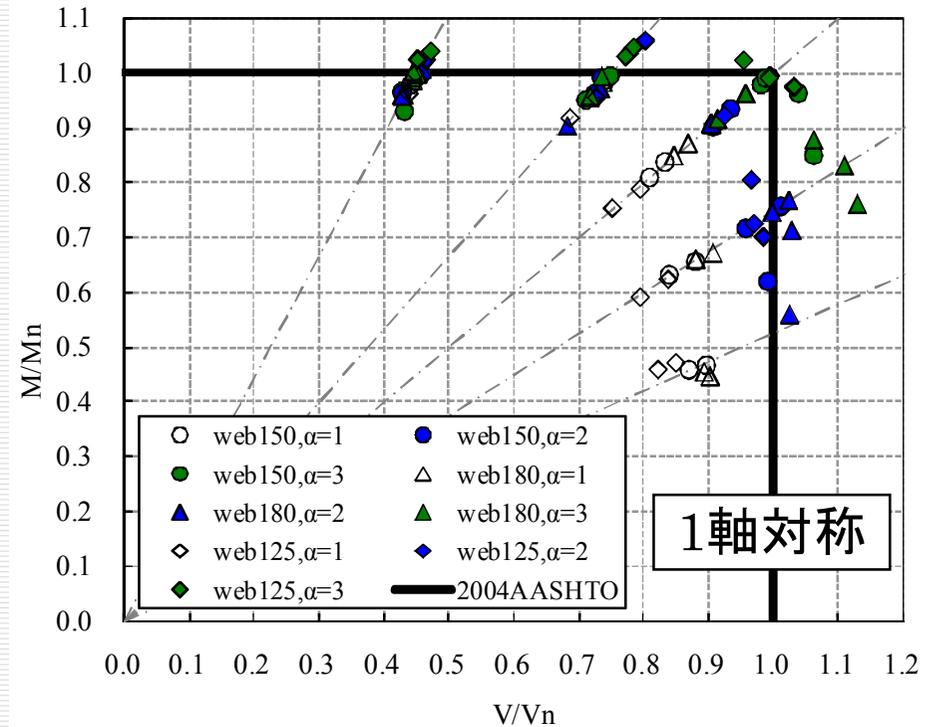
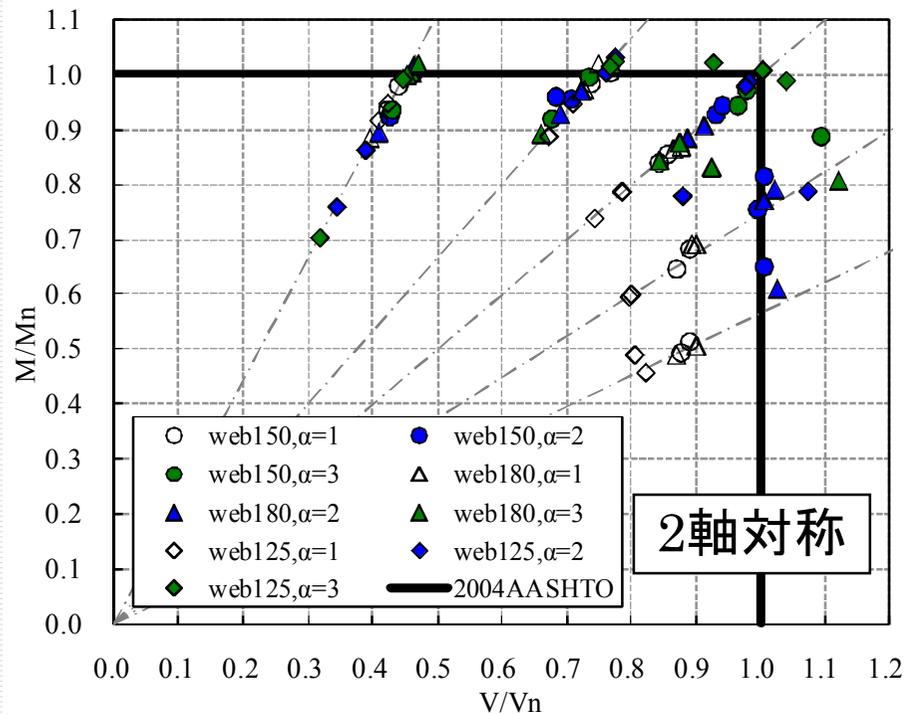
1軸対称桁

	M_u/M_n			
	平均値	最大値	最小値	標準偏差
道路橋示方書	0.961	1.019	0.811	0.048
AASHTO	0.950	1.005	0.811	0.049
	V_u/V_n			
	平均値	最大値	最小値	標準偏差
道路橋示方書	0.936	1.109	0.841	0.080
AASHTO	0.936	1.109	0.841	0.080

FEMパラメトリック解析結果

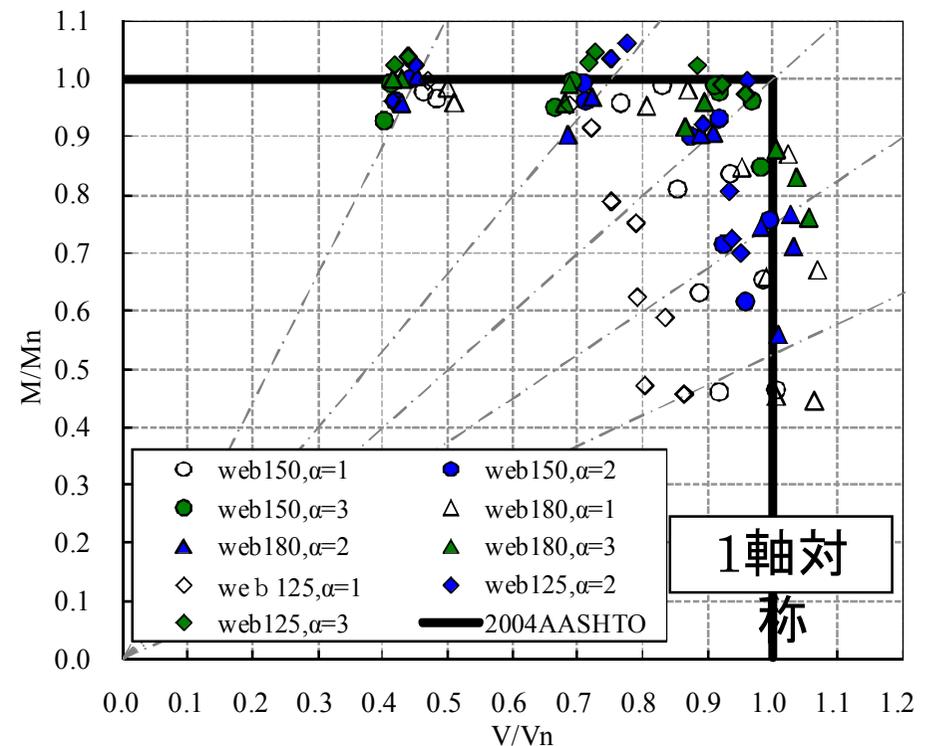
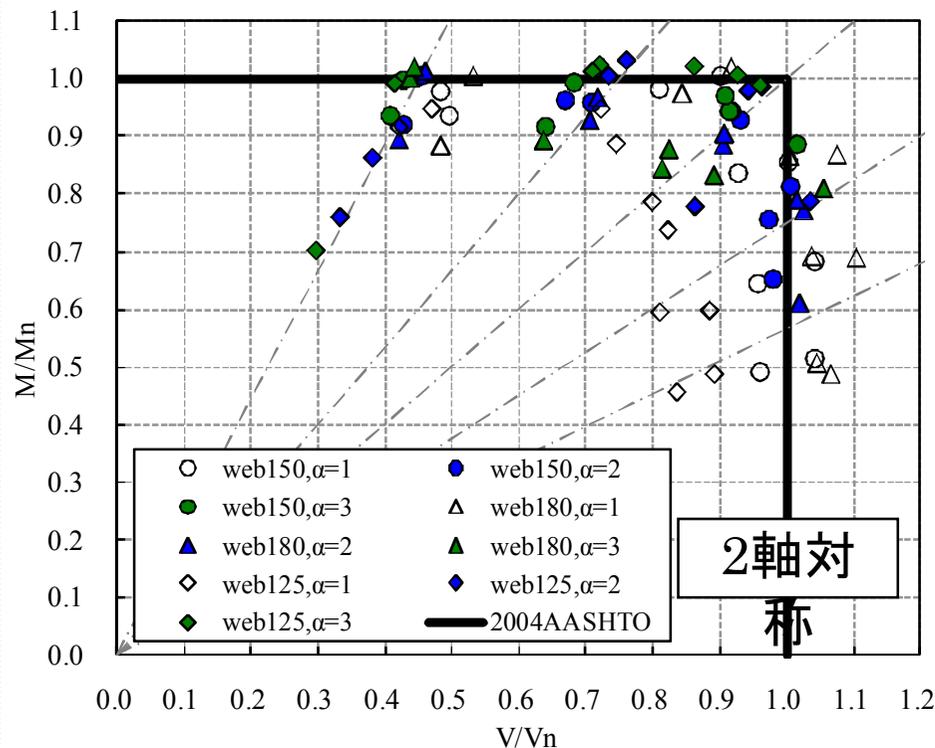
□ LRFDのせん断, 曲げ耐荷力で整理

- アスペクト比の影響大
- ウェブ鋼材の影響小



FEMパラメトリック解析結果

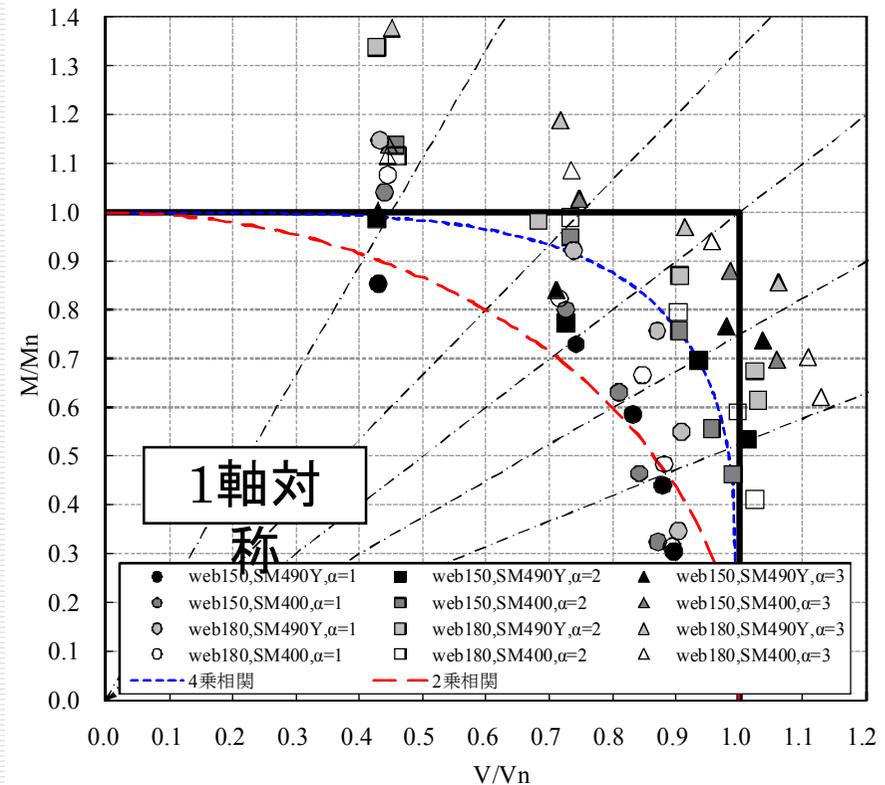
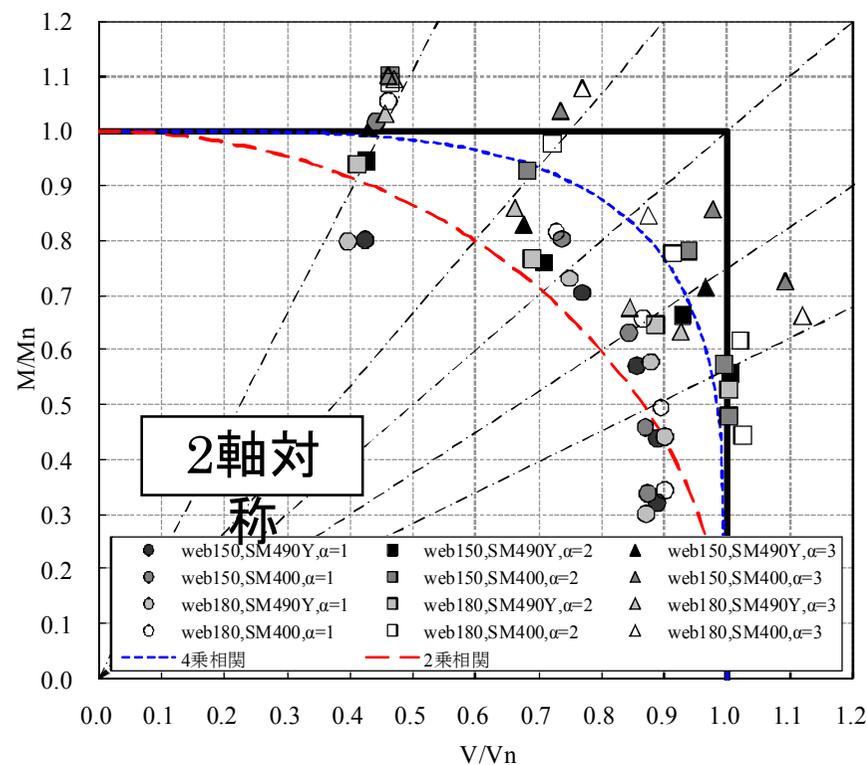
- せん断強度を前田らの式を用いて整理
- アスペクト比による違いは小さくなった
- ばらつきはある



FEMパラメトリック解析結果

□ 曲げ強度を三上の式を用いて整理

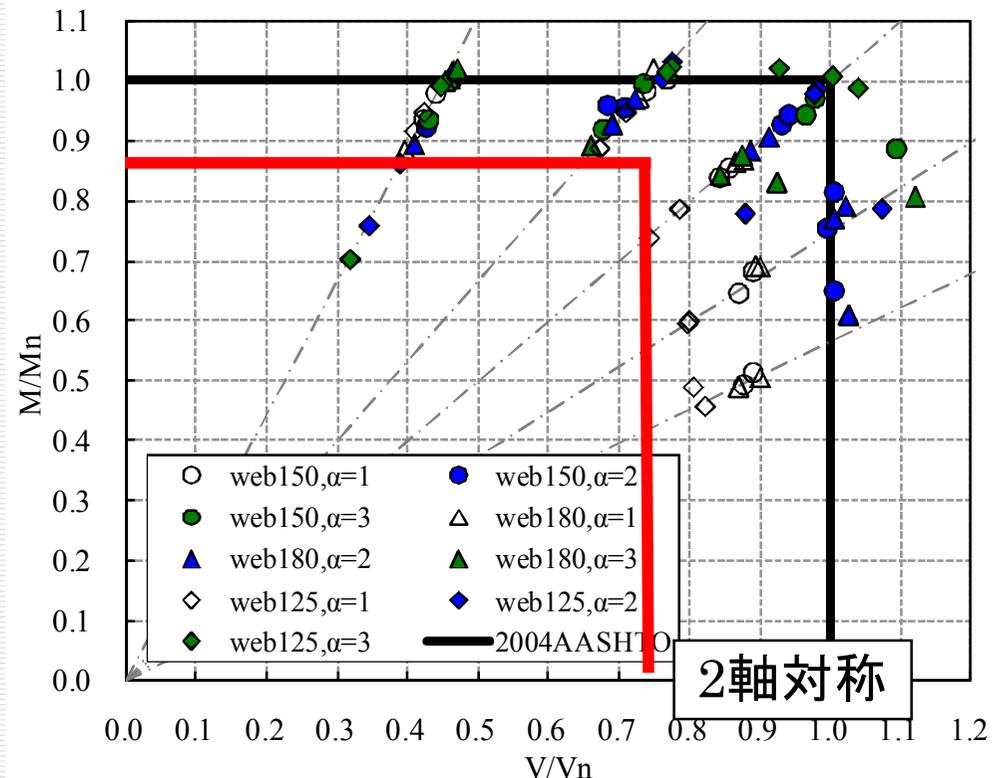
- 今回の解析結果ではばらつきが大きくなった
- 横補剛間隔の影響も検討する必要有り



FEMパラメトリック解析結果

□ 曲げとせん断の相関

- 多少の相関はあるように見受けられる
- 設計式としては部材係数などを考慮するため相関は無視した方が簡便になる
- ウェブパネル内での最大モーメントを用いて整理



FEMパラメトリック解析結果

□ せん断強度式の提案

- 2軸対称・1軸対称両方を含んだデータを整理した

		経路3含まない				経路3含む			
		LRFD		前田らの式		LRFD		前田らの式	
最大値	最小値	1.13	0.79	1.10	0.79	1.13	0.74	1.10	0.75
標準偏差		0.092		0.076		0.087		0.079	
平均値		0.95		0.97		0.93		0.94	

- 前田らの式の方が僅かではあるが標準偏差が小さい
 - 平均値が小さいことを考慮して係数を設定することにより設計式として使用可能
- LRFD式ではアスペクト比の影響を考慮する必要あり

FEMパラメトリック解析結果

□ せん断強度式の提案

■ 基本はAAHSTO LRFD式

■ アスペクト比に応じて変化する係数を用いて修正

■ $V_{n_pro} = V_n \times f(\alpha)$

$$f(\alpha) = \left(\frac{\sin \theta_{\alpha=2}}{\sin \theta_{\alpha}} \right)^{\lambda}$$

■ λ の決定方法

□ ケースi: 無次元化耐荷力において、2軸対称桁と1軸対称桁全てを含んだ平均値が1.0となるように決定する。

□ ケースii: 無次元化耐荷力において、2軸対称桁と1軸対称桁それぞれにおいて、アスペクト比による無次元化耐荷力の変化が最小となるように決定する。

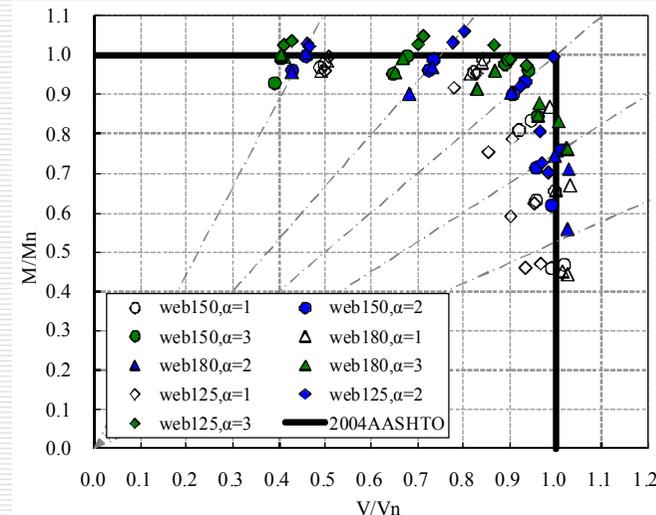
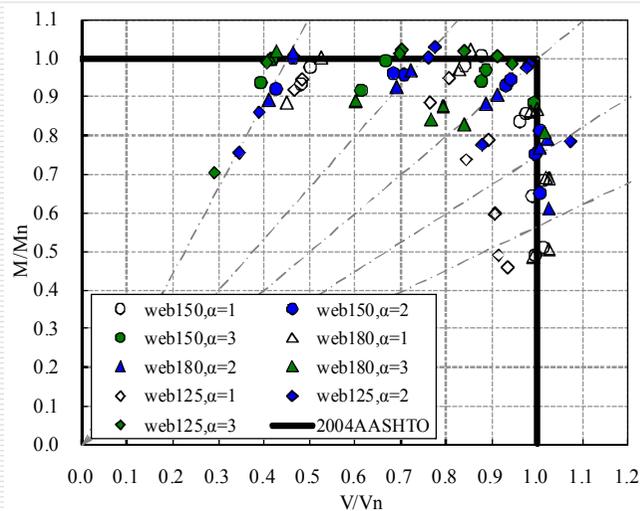
FEMパラメトリック解析結果

□ せん断強度式の提案

■ 提案式の比較

		LRFD		前田らの式		提案式			
						ケースi		ケースii	
最大値	最小値	1.13	0.79	1.10	0.79	1.09	0.81	1.07	0.84
標準偏差		0.092		0.076		0.058		0.045	
平均値		0.95		0.97		1.00		0.98	

■ ケースiiが最も標準偏差が小さい→妥当



まとめ

□ ハイブリッド桁の耐荷力に関する数値解析

- 2軸対称桁・1軸対称桁、ウェブ鋼材、ウェブ幅厚比、アスペクト比のパラメータを組み合わせ、計320体の解析モデル

□ 得られた主な結果

- LRFDで採用されているせん断耐荷力式はアスペクト比1.0でやや危険側，3.0でやや安全側
- 曲げとせん断の相関が僅かに見受けられたが，部材係数などの安全係数で対応可能であり，耐荷力式には含まない方が簡便な式となる

まとめ

□ 得られた主な結果

- 前田らの式はアスペクト比による差は小さいがばらつきが大きくなった
- LRFD式のアスペクト比の違いを修正する係数を提案した

		LRFD		前田らの式		提案式			
						ケースi		ケースii	
最大値	最小値	1.13	0.79	1.10	0.79	1.09	0.81	1.07	0.84
標準偏差		0.092		0.076		0.058		0.045	
平均値		0.95		0.97		1.00		0.98	

□ 今後の課題

- 提案式のホモジニアス桁への適用性は？