

ハイブリッド桁の曲げとせん断の相関強度評価法の提案

建設工学課程 構造研究室 宍戸香織
指導教員 長井正嗣

1. はじめに

ハイブリッド桁は、フランジに高降伏点鋼材、ウェブに低降伏点鋼材を組み合わせた桁である。近年、プレートガーダー橋の支間の増大の要求と高強度鋼の開発により、経済性に優れているハイブリッド桁が注目されている。我が国においてはハイブリッド桁の適用できる限界状態設計法に関する試案が出版され¹⁻³⁾、ハイブリッド桁に関する研究も積極的に行われているが、限界状態設計法を確立するほどの基礎的なデータは少ない。特にハイブリッド桁の曲げとせん断の相関強度に関する研究は少ない。

これまでにハイブリッド桁でもホモジニアス桁と同様の式を用いて耐荷力を算出できること、顕著な曲げとせん断の相互作用が見受けられないことなどが確認されている⁴⁾。しかしながら、いずれも限られたパラメータであり、より多くのパラメータを組み合わせたハイブリッド桁で曲げとせん断の相関強度を検証する必要がある。

本研究では、曲げとせん断の相関強度を明らかにすることを目的とする。まず、曲げとせん断を受ける種々のハイブリッド桁を設計し、複合非線形有限要素解析を行う。さらに、有限要素解析により得られたせん断耐荷力を分析し、既存のせん断耐荷力式の評価精度、曲げ・せん断の相関関係を検討する。そして、今回の解析結果に基づき、ハイブリッド桁へ適用可能な曲げ・せん断強度の照査方法を提示する。

2. ハイブリッド桁の耐荷力式

(1) 終局せん断強度

ウェブが弾性座屈した後、腹板は圧縮主応力には抵抗できず、斜張力場が卓越してせん断力を支持する。一般には斜張力場による強度を考慮して鋼桁のせん断耐荷力とされる。

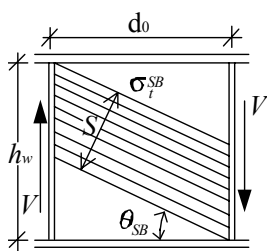
せん断耐荷力に関しては様々な式が提案されているが、Basler式と三上式がよく用いられる。また、ハイブリッド桁を対象として、前田らが評価式を提案している。図1に提案された評価式の各崩壊メカニズムを示す。斜張力場が発生するとき、Basler式値 V_{SB} 、三上式値 V_{MG} および前田式値 V_{mae} はそれぞれ次のようになる。

$$V_{SB} = t_w h_w \tau_{wy} \left(\tau_{cr}^{SB} / \tau_{wy} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \tau_{cr}^{SB} / \tau_{wy}}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \right) \quad (1)$$

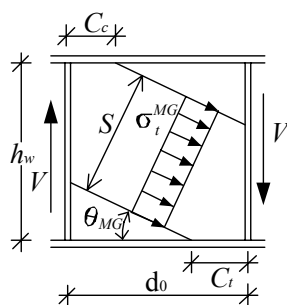
$$V_{MG} = \tau_{cr}^{MG} t_w h_w + \sigma_t^{MG} t_w h_w (\sin \theta_{MG} \cos \theta_{MG} - \alpha_c \sin^2 \theta_{MG}) \quad (2)$$

$$V_{mae} = \tau_{cr}^{SB} t_w h_w + \frac{2C}{1 + \alpha^2} t_w \left(1 - \frac{\tau_{cr}^{SB}}{\tau_{wy}} \right) \sigma_{wy} \alpha^{(0.7 \tau_{cr}^{SB} / \tau_{wy})} \quad (3)$$

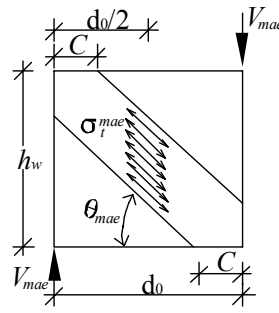
ここに、 t_w ：腹板厚； h_w ：腹板高； τ_{wy} ：腹板の降伏せん断応力度； τ_{cr}^{SB} ：Baslerのウェブのせん断座屈強度； τ_{cr}^{MG} ：三上のウェブのせん断座屈強度； σ_{wy} ：腹板の降伏応力度； σ_t^{MG} ：斜張力場が形成されるとき引張応力； θ_{MG} ：斜張力場が形成されるとき傾斜角； α ：アスペクト比； α_c ：非対称断面の影響を考慮する係数； C ：斜張力場領域の広がり幅をそ



(a) Basler 式



(b) 三上式



(c) 前田ら式

図1 各崩壊メカニズム

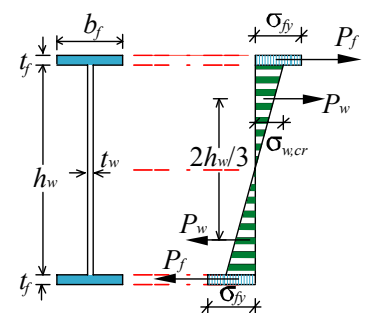


図2 終局限界状態における応力状態

それぞれ表す．

(2) 終局曲げ強度

検討対象は降伏前に腹板が座屈するスレンダー断面とする．すなわち，図2に示すような応力分布で終局状態に至る．よって，終局曲げ強度 M_{ult} はフランジのみで負担可能な終局曲げ強度とウェブの終局曲げ強度の合計として次式のように算定する．

$$M_{ult} = A_f \sigma_{fy} (h_w + t_f) / 2 + t_w h_w^2 \sigma_{w,cr} / 6 \quad (4)$$

ここに A_f : フランジの断面積; t_f : フランジ厚; σ_{fy} : フランジの降伏応力度; $\sigma_{w,cr}$: 曲げ座屈を考慮した腹板の終局強度をそれぞれ表す．

3. 解析概要

図3および表1に示す6つのグループ，合計96個のモデルに対して複合非線形有限要素解析を行う．腹板高 h_w とフランジの断面寸法が一定で，アスペクト比（横縦比） α ，腹板厚 t_w をパラメータとする．桁の支間距離 L により，桁に作用する曲げとせん断の占める割合を調整する．なお，せん断座屈耐力を最小とし，かつ図2に示すテストパネルの幅 B_{pw}

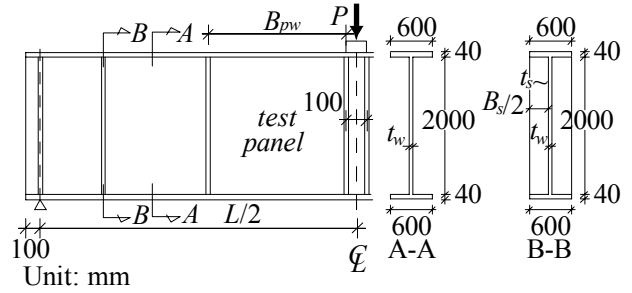


図3 ハイブリッド桁の概略図

を最大とするように各パネルの寸法を決める．また，終局状態において局部破壊が生じないように，補剛材を厚くする．

解析にはDiana 9.3を使用し，8節点シェル要素のCQ40Sを用いる．モデルA10TW16-49を例として，境界条件およびメッシュ分割を図4に示す．フランジと補剛材の降伏応力度を 450N/mm^2 ，ウェブの降伏応力度を 355N/mm^2 とする．鋼材はVon Mises応力の降伏条件を考え，応力-ひずみ関係はmulti-linearモデルとする．ヤング率は $2 \times 10^5\text{N/mm}^2$ ，ポアソン比は0.3である．

テストパネルのウェブのみへ初期不整を導入す

表1 モデルのパラメータ

解析グループ	h_w (mm)	t_w (mm)	α	A_f $/A_w$	t_s (mm)	モデル数 (個)		
A10TW16	2000	16	1.0	1.50	32	20		
A15TW16			1.5			14		
A20TW16			2.0			13		
A10TW19		19	1.0			1.26	40	22
A15TW19			1.5					14
A20TW19			2.0					13

合計： 96

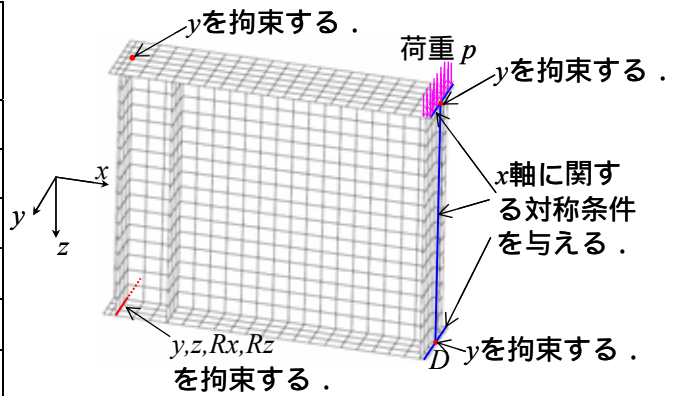


図4 境界条件及びメッシュ分割の例 (1/2モデル)

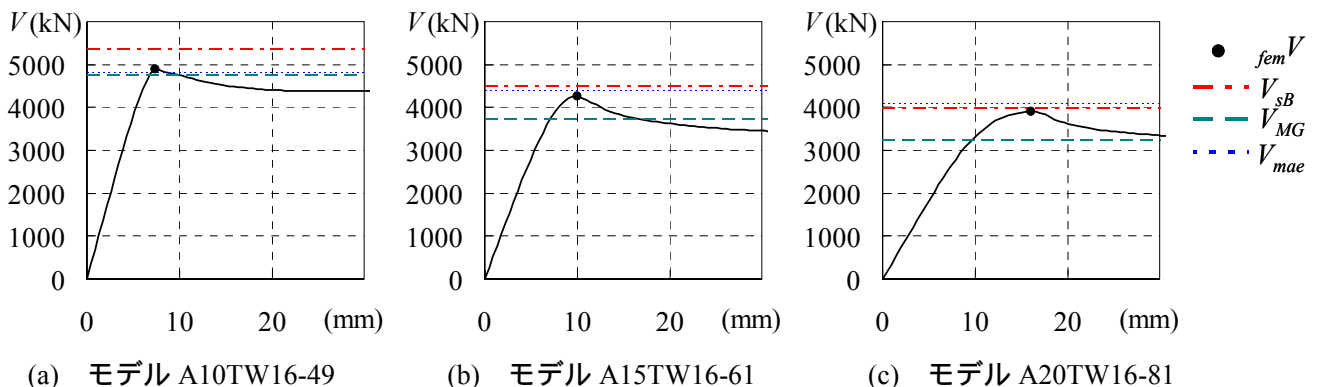


図5 せん断荷重 V ~ 変位 の関係曲線

る²⁾。桁の中央へ漸増荷重 p （強制変位）を鉛直方向に与え、荷重が低下した後も解析を行う。

解析モデルの表記例を次のようにする。

解析モデル A10TW16-49：アスペクト比が 1.0，腹板厚が 16mm，支間距離 L が 4900mm である 1 個のモデルを示す。

4. 解析結果

(1) ハイブリッド桁の変形挙動

モデル A10TW16-49，A15TW16-61 および A20TW16-81 を例として，図 5 にせん断荷重 V ~ 変位 δ の関係曲線を示す。なお， δ は図 4 に示す D 点における荷重方向の変位である。これらのモデルについては，いずれも終局時において作用曲げモーメントが小さく，せん断座屈が卓越している。せん断荷重 ~ 変位関係曲線において最大荷重を終局せん断荷重（以下，解析値と呼ぶ）として定義する。式(1) ~ (3) によって算出した Basler 式値 V_{SB} ，三上式値 V_{MG} および前田式値 V_{mae} を図中に示す。結果を見ると，Basler 式は危険側の予想，三上式はすべてのモデルにおいて安全側の予想となり，前田ら式はアスペクト比の増大に伴って評価精度が低くなる傾向

が見られた。

解析値 $f_{em}V$ に達するときの変形コンター図を図 6，Von Mises 応力分布図を図 7 に示す。モデル A10TW16-49 はせん断座屈が支配的となり，テストパネルに斜張力場が形成され，終局状態に至ったことが分かる。モデル A10TW16-293 は曲げが支配的となり，テストパネルに斜張力場が形成されずに，終局状態に至ったことが分かる。また，Von Mises 応力分布によりテストパネルの上端部に腹板の降伏応力度 ($\sigma_{wy}=355\text{N/mm}^2$) を超えた領域も見られ，ウェブの曲げ座屈が発生したと判断する。

(2) 曲げとせん断の相関強度

曲げとせん断の相関曲線をすべての解析グループについて図 8 に示す。縦軸を pM_{eq}/M_{ult} とし，横軸が解析値 $f_{em}V$ を V_{SB} ， V_{MG} および V_{mae} で割った値，縦軸が終局曲げモーメント pM_{eq} と式(4) によって計算された終局曲げ強度 M_{ult} で無次元化した値である。縦軸の pM_{eq} は解析値 $f_{em}V$ に達するとき，テストパネルの等曲げ位置に算出した作用曲げモーメントである。また，鉄道橋の設計標準で採用された 2 乗相関則および合成桁橋に用いられる 4 乗相関則を同図

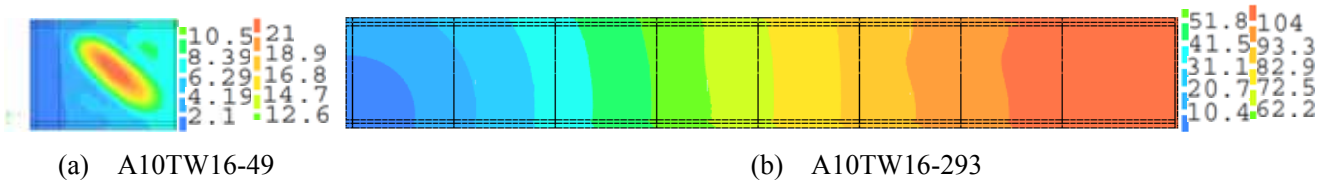


図 6 $f_{em}V$ 時の変形コンター図

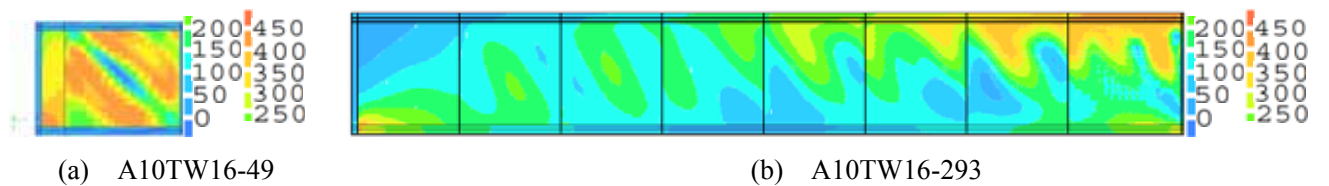


図 7 $f_{em}V$ に達するときの Von Mises 応力分布図

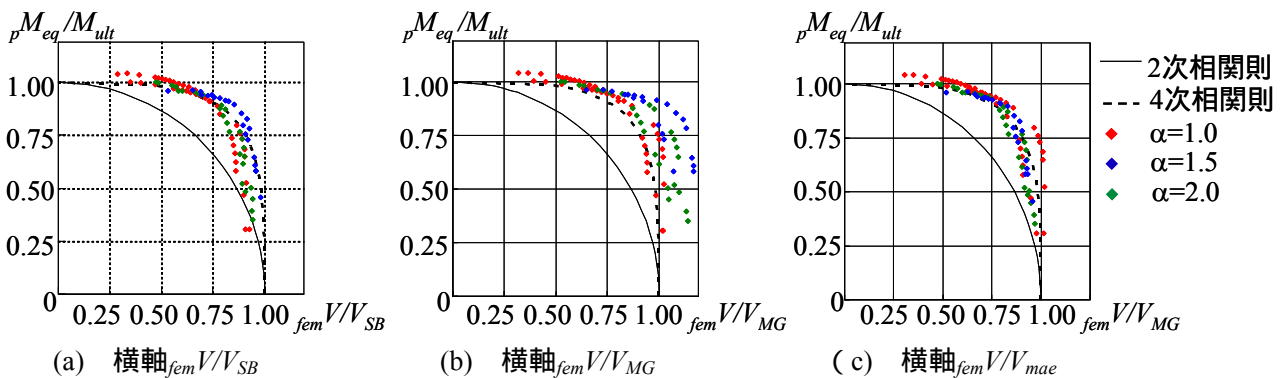


図 8 曲げとせん断の相関曲線

にあわせてプロットする。

各グループについては、一方の作用曲げあるいはせん断荷重が小さい場合、一方の強度が単独作用時の終局強度に達していることが分かる。しかし、一方の作用荷重が大きい領域では、一方の強度が単独作用時の終局強度に達しておらず、曲げ・せん断の相関関係が見られた。また、相関強度は4次相関則の方に近づいている。

5. 曲げとせん断の相関強度評価法の提案

以上の解析結果に基づいて、合成桁の架設系や非合成桁における終局限界状態での相関強度の照査について、下記の照査方法を提案する。

(1) 曲げ強度：

作用曲げモーメント M_{max} はパネルの等曲げ換算位置に作用するモーメント ${}_pM_{eq}$ とし、終局曲げ強度 M_{ult} を超えない。 M_{ult} は2節に示したウェブの曲げ座屈を考慮したものとする。

(2) せん断強度：

作用せん断強度 V_{max} はパネルに作用する最大せん断力 V とし、終局せん断強度を超えない。4節に示したように、三上式がすべての解析モデルについて安全側の評価となったため、ここに終局せん断強度を三上式値 V_{MG} とする。

(3) 相関強度：

ハイブリッド桁について、曲げとせん断の相関強度が以下に示す4乗相関則を満足し、 ${}_pM_{eq}/M_{ult}$ あるいは V/V_{MG} が 0.5 を超えるとき、曲げとせん断の相関について照査すべきである。

$$\left(\frac{{}_pM_{eq}}{M_{ult}}\right)^4 + \left(\frac{V}{V_{MG}}\right)^4 \leq 1 \quad (5)$$

以上に提案した曲げ・せん断の相関関係曲線および照査領域を図9に示す。式(5)を用いて曲げ・せん断の相関を照査すれば、アスペクト比にかかわ

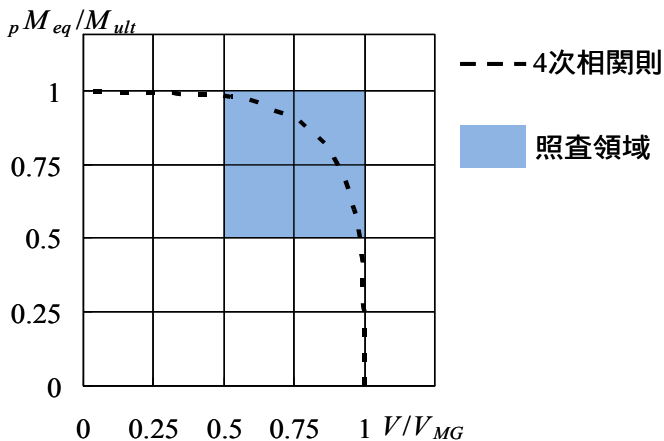


図9 曲げ・せん断の相関強度

らず、すべての解析モデルに対して安全性を確保できることが分かる。また、解析対象はハイブリッド桁のため、正曲げだけではなく負曲げにも適用できると考える。

6. まとめ

鋼桁は曲げとせん断を同時に受けるため、桁のせん断強度、曲げ・せん断の相関関係を明らかにする必要がある。本研究では曲げとせん断それぞれの強度に対する比率が異なる種々のハイブリッド桁に対して複合非線形有限要素解析を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) せん断が卓越するモデルについて3つのせん断耐力式の精度を検討したところ、Basler式は危険側の予想、三上式はすべてのモデルにおいて安全側の予想となり、前田式はアスペクト比の増大に伴って評価精度が低くなる傾向が見られた。
- (2) 曲げ・せん断の関係を把握するため、縦軸をテストパネルに作用する等曲げモーメント終局曲げ強度の比、横軸を最大せん断荷重と3つのせん断耐力式の比としてそれぞれ無次元化し、グラフ化した。その結果、作用曲げとせん断荷重が大きい領域では曲げ・せん断の相関が見られ、4乗相関則に近づいていることを確認した。
- (3) 終局荷重時の変形コンター図および応力分布図により、せん断が卓越するモデルについてはテストパネルに斜張力場が形成され、終局状態に至ったこと、曲げが卓越したモデルについては、テストパネルの上端部に曲げ座屈が発生し、終局状態に至ったことが分かった。
- (4) 今回の解析結果に基づいて、合成桁の架設系や非合成桁における終局限界状態における相関強度の照査方法を提案した。

参考文献

- 1) (社)日本鋼協会：限界状態設計法に基づいたハイブリッドの構造設計基準(案), JSSC テクニカルレポート, No.53, 2002
- 2) (社)日本鋼構造協会・鋼橋性能向上研究会・合理化設計法部会：合成桁の限界状態設計法試案, JSSC テクニカルレポート, No.70, 2006
- 3) 土木学会鋼構造委員会 合成桁の限界状態に関する調査検討小委員会：鋼・合成構造標準示方書に基づく新たな設計, 2009.9
- 4) 前田亮太, 野村昌孝, 野阪克義, 奥村 学, 伊藤満：ハイブリッド桁の斜張力場作用を考慮したせん断耐力に関する研究, 土木学会構造工学論文

