

第2編 示方書案編

§ 1 概要

鋼構造に関する基準強度、部分係数が体系的に整理されたものは、1980年に東海鋼構造研究グループによる「鋼構造部材の抵抗強度の評価と信頼性設計への適用」¹⁾が最初であり、これを受けて1987年に「座屈設計研究に関する現状と課題」²⁾が発表され、1990年「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」³⁾でそれまでの成果がまとめられている。一方、(社)土木学会の出版物としては、1994年に「鋼構造物の終局強度と設計」⁴⁾が、1997年には「鋼構造物設計指針」⁵⁾発刊されている。

設計フォーマットや部分係数の議論については、「鋼構造物の終局強度と設計」の第2編 1.1 設計フォーマット、および付録：「鋼構造設計指針」の改訂案に、詳しく述べられている。

ここで、上記で用いられている部分係数について整理すると、以下の通りである。それぞれにおいて科研の推奨値を基に算出していることがわかる。

科研(1990)

基本となる部分係数として「材料係数、製作係数、設計係数」の3つから抵抗強度係数を算出している。抵抗係数 Φ を試算しており、その推奨値を提示している。鋼・合成構造標準示方書で採用しているISOフォーマットとの対比では、「製作係数+設計係数=部材係数」という関係にある。

鋼構造物の終局強度と設計(1994)

座屈パラメータの小さい領域での係数を、設計を除く部分のみとしている。「材料係数+製作係数」から $\Phi_0=0.92$ という値を算出し、座屈等によって低減を受ける部分では科研での推奨値を用いている。

鋼構造物設計指針(1997)

材料係数に相当する試験法係数と部材強度係数を用いて表現している。試験法係数 $\Phi_t=0.92$ より、科研の推奨値にこの係数を割り掛けすることで部材強度係数を算出している。例えば、柱部材のグループ1であれば、科研の推奨値=0.88より $0.88/0.92=0.9565$ を丸めて0.957を提示している。

鋼・合成標準示方書[2007年制定]では、照査式として以下のフォーマットを用いている。

$$\gamma_i \frac{\sum \gamma_a \cdot S(\gamma_f \cdot F_k)}{R(f_k/\gamma_m)/\gamma_b} \leq 1.0 \quad (1.1.1)$$

ここで、 γ_m は材料係数、 γ_b は部材係数、 γ_a は構造解析係数、 γ_f は作用係数、 γ_i は構造物係数である。このうち部材係数が、第5章部材の耐力にて示されている。第5章の5.2部材係数の解説には、「これらは基本的に鋼構造物設計指針 PartA に示された抵抗係数の逆数を取ったものであるが、書式の簡略化のため、PartA で考慮されている細長比パラメータ λ_0 より小さい領域での低減を考慮していない」と、部材係数の根拠は鋼構造物設計指針であることが記されている。

以下に、今回、示方書案を提示するに当たり、留意した事項を以下に示す。

(1) 部分係数と特性値（基準耐荷力曲線）との関係について述べる。

部材係数と耐荷力曲線はペアで考えないといけない。基準耐荷力曲線を定めて、目標信頼性指標が所定の数値となるように部分係数を定めることになる。これを明確に示すためには、これまでの示方書類の記述のように、安全率を示してから許容値の算出式を改めて示す、というものではなく、同じ条文の中で部分係数と基準耐荷力曲線式を示す、という表現方法が必要と判断した。

これによって、基準耐荷力曲線を変えれば部分係数も変える必要があること、あるいは、別の部分係数だけを適用することはできないこと、を示すことができていると考える。

(2) 平均値なのか、下限値なのかを、明確にしておく必要がある。

「鋼構造物の終局強度と設計」では、「(途中略)、部材の真の強度式として信頼できるのは平均値であり、将来の改訂時に強度の平均値を与える式が分かっていると不都合が生じる可能性がある(以下略)」と記されている。

また、平均値で整理した方が、統計处理的な解釈の違いが生じにくい、とも考えられるため、本案では平均値を基準としている。

(3) 従来の基準耐荷力曲線を用いていることに対する留意点

従来の基準耐荷力曲線は、塑性化を考慮しない弾性設計を基本としていること、および式の簡略化・弾性設計ということを明確に示すために、座屈パラメータの小さい領域では=1で頭打ちにしている。このために厳密には、部材強度の低減を受ける範囲と材料強度のばらつきだけを考慮する範囲に分けて、部分係数を設定する必要があり、「鋼構造物の終局強度と設計」「鋼構造物設計指針」では、これを考慮した形で部分係数を設定している。

既刊の鋼・合成構造標準示方書では、上記の考慮がなされておらず、すべての領域で材料係数・部材係数を乗じて抵抗強度を算出している。今回の案の提示においても、範囲を分けての部分係数の設定は行っていない。

今後は、

- ・「材料係数だけ」「材料係数×部材係数」の範囲を区分して、従来の耐荷力曲線式を利用する。
- ・塑性領域を考慮した基準耐荷力曲線の設定、それに対応した部分係数を設定する。

の両者を比較して、基準耐荷力曲線の持つ意味合い、部分係数の役割を、理解しやすい形態とすることが望ましいと考える。

(4) 基準とする数値の違い

部分係数を求める際に、既刊の鋼・合成構造標準示方書では、鋼構造物設計指針の逆数をとっているため、科研での推奨値（計算結果を丸めた数値）を基に算出している。本報告書では、丸め誤差を取り除くため科研の計算結果をそのまま用いている。また、鋼構造物設計指針では材料係数（＝試験法係数）として0.92を用いているが、本報告書ではSGSTフォーマットによる算出結果0.9412を用いている。このため、既刊の数値と異なっている。

例えば、柱（グループ1）では

既刊 $0.88/0.92=0.9565 \rightarrow 0.957$ より、 $1/0.957=1.044 \rightarrow 1.04$

本報告書 $1/(0.8755/0.9412)=1.075 \rightarrow 1.08$

(5) 有効数字は3桁（小数第二位）で

部分係数を0.05単位で丸めた場合には、SM490級では最大10N/mm²生じるため大きいと感じられる。そこで0.01単位で数値を丸めて表示している。

(6) 信頼性指標 $\beta = 3.0$ として算出している

SGSTフォーマットでは、信頼性指標 β を3あるいは4として各種の試算を実施している。これに対して、現行の道路橋示方書の信頼性指標は5～6程度とかなり高いという情報を得ている。本案では抵抗側だけを議論して部分係数を算出しているため、鋼構造物の安全性を照査する場合には、全体の安全性の程度を議論することを忘れてはいけない。

(7) 章構成について

既刊の部分係数を提示する並びは、道路橋示方書にならって整理されていると思われるが、一見してそれを理解することは難しいと言える。耐荷力としての整理であれば、板要素、部材、断面の順とすると明確となるが、示方書の利用者にとっては、あまり使われない板要素が始めに示されることは好まれないと思われる。

本案では、あえて既刊の並びと変えることで、比較してもらうことを意図とした。

また、第6章には安全性に対する要求性能及び照査、第10章以降には、部材、骨組構造物、板構造物に関する一般事項が述べられているが、この報告書では対象としていない。

参考文献

- 1) 東海鋼構造研究グループ：鋼構造部材の抵抗強度の評価と信頼性設計への適用(上)(下)、橋梁と基礎、1980.11.
- 2) 福本ゆう士：座屈設計研究に関する現状と課題、土木学会論文集、第380号/I-7、1987年4月.
- 3) 福本ゆう士ら：鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究、平成元年度科学研究費補助金研究成果報告書、平成2年3月.
- 4) 土木学会：鋼構造物の終局強度と設計、鋼構造シリーズ6、1994年7月.
- 5) 土木学会：鋼構造物設計指針 PartA 一般構造物、鋼構造シリーズ9A、1997年4月.

§ 2 案文

次頁より、案文の形で第 5 章の条項を示す。

第5章 部材の耐力

5.1 一般

- (1) 第6章～第9章の照査に用いる設計部材耐力は、耐力の特性値を部材係数 γ_b で除した値とする。
- (2) 耐力の特性値は設計材料強度に基づき定めるものとする。

【解説】

既存の設計基準では、鋼材の保障降伏点強度を設計材料強度に選ぶ場合が多いが、JISに規定されている保証降伏点強度は、比較的小さな試験片について規定された範囲内のひずみ速度で実施された引張試験によって保障されている。同一圧延鋼材中の降伏点強度の分散はそれほど大きくないが、形鋼材に見られるように無視し得る程小さな値でもない。さらに、降伏点強度は試験時のひずみ速度が速い程大きく、試験方法に依存するが、静的な降伏点強度が、保証降伏点強度を大きく下回ることはない。本示方書では、これらを統合的に判断し、3.4.2に示された材料強度の特性値を材料係数で除すことで求められる設計材料強度を用いて部材の耐力（以降、原則として断面力表示の場合には耐力、応力表示の場合には強度と表現する）を定めることとする。また部材の無次元化耐力は、原則として特性値に対応する耐力で表し、断面係数などの変動による耐力への影響は部材係数の中に考慮されるものとする。

5.2 板

5.2.1 圧縮を受ける両縁支持板

- (1) 圧縮を受ける両縁支持板の部材係数は、1.11 とする。
 (2) (1)の部材係数を用いる場合の耐力は次式を用いる

$$\sigma_{rd} = \begin{cases} \frac{f_{yd}}{\gamma_b} & (R \leq 0.70) \\ \left(\frac{0.7}{R}\right)^{0.86} \frac{f_{yd}}{\gamma_b} & (0.70 < R) \end{cases} \quad (5.2.1)$$

ここに、 σ_{rd} : 設計局部座屈強度
 f_{yd} : 設計降伏強度
 R : 幅厚比パラメータ

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_{yk}}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}}$$

ν : ポアソン比
 k : 座屈係数。k=4.0
 E : 鋼のヤング係数
 f_{yk} : 材料強度の特性値 (規格値)
 B : 固定縁間距離 (図-解 5.2.1 参照)
 t : 板厚

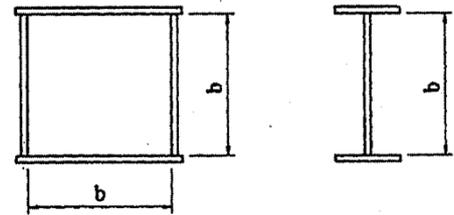


図-解 5.2.1 両縁支持板の固定縁間距離

【解説】

基準となる耐荷力曲線は、「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]に示された平均値曲線を用いる。

部材係数は、平均値曲線に対する抵抗係数から算出する。「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]で算出した抵抗係数 (=0.847) は、SGST フォーマットによる材料係数、製作係数、部材係数に対応したものであるが、本標準示方書で扱うフォーマットでは、材料係数を分離して「製作係数+部材係数」を部材係数として取り扱っている。そこで、鋼材の単一材料で構成される断面を対象としているという条件のもとで、抵抗側の材料強度の特性値の関数の中にある材料係数を関数の外に出せるものとし、これを算出した。

$$\Phi_m = (1 - k R V_m) M_m = (1 - 1.65 \times 0.11) \times 1.15 = 0.9412$$

$$\gamma_m = 1 / \Phi_m = 1 / 0.9412 = 1.062$$

$$\gamma_b = 1 / 0.847 / 1.062 = 1.112 \rightarrow 1.11 \text{ (採用値)}$$

ここで、 $k R$ は信頼性係数 $\beta = 3.0$ に対応した下界の程度を表す任意の定数である。

5.2.2 面内曲げを受ける両縁支持板

- (1) 面内曲げを受ける両縁支持板の部材係数は、1.03 とする。
- (2) (1)の部材係数を用いる場合の耐力は次式を用いる

$$\sigma_{rd} = \begin{cases} \frac{f_{yd}}{\gamma_b} & (R \leq 1.00) \\ \left(\frac{1}{R}\right)^{0.72} \frac{f_{yd}}{\gamma_b} & (1.00 < R) \end{cases} \quad (5.2.2)$$

ここに、 σ_{rd} : 設計局部座屈強度
 f_{yd} : 設計降伏強度
 R : 幅厚比パラメータ

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_{yk}}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}}$$

ν : ポアソン比
 k : 座屈係数。k=23.9
 E : 鋼のヤング係数
 f_{yk} : 材料強度の特性値（規格値）
 B : 固定縁間距離（図・解 5.2.1 参照）
 t : 板厚

【解説】

基準となる耐荷力曲線は、「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]に示された平均値曲線を用いる。

部材係数は、平均値曲線に対する抵抗係数から算出する。「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]で算出した抵抗係数（=0.915）を用いて、5.2.1と同じ手順で算出する。

5.2.3 面内圧縮を受ける片縁支持板

- (1) 面内圧縮を受ける片縁支持板の部材係数は、1.11 とする。
- (2) (1)の部材係数を用いる場合の耐力は次式を用いる

$$\sigma_{rd} = \begin{cases} \frac{f_{yd}}{\gamma_b} & (R \leq 0.7) \\ \left(\frac{0.7}{R}\right)^{0.64} \frac{f_{yd}}{\gamma_b} & (0.7 < R) \end{cases} \quad (5.2.3)$$

ここに、 σ_{rd} : 設計局部座屈強度
 f_{yd} : 設計降伏強度
 R : 幅厚比パラメータ

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_{yk}}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}}$$

ν : ポアソン比
 k : 座屈係数。 $k=0.425$
 E : 鋼のヤング係数
 f_{yk} : 材料強度の特性値 (規格値)
 b : 自由突出幅 (図-解 5.2.2 参照)
 t : 板厚

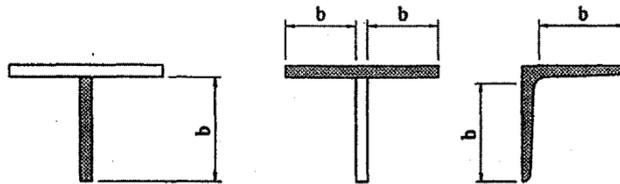


図-解 5.2.2 片縁支持板の自由突出幅

【解説】

基準となる耐荷力曲線は、「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]に示された平均値曲線を用いる。

部材係数は、平均値曲線に対する抵抗係数から算出する。「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]で算出した抵抗係数 (=0.847) を用いて、5.2.1 と同じ手順で算出する。

5.2.4 せん断力を受ける両縁支持板

- (1) 面内圧縮を受ける片縁支持板の部材係数は、1.06 とする。
 (2) (1)の部材係数を用いる場合の耐力は次式を用いる

$$\tau_{rd} = \begin{cases} \frac{f_{vyd}}{\gamma_b} & (R_r \leq 0.7) \\ \left(\frac{0.6}{R_r}\right)^{0.32} \frac{f_{vyd}}{\gamma_b} & (0.7 < R_r) \end{cases} \quad (5.2.4)$$

ここに、 τ_{rd} : 設計せん断強度
 f_{vyd} : 設計せん断降伏強度
 R_r : 幅厚比パラメータ

$$R_r = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_{vyk}}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_r}} \quad (5.2.5)$$

f_{yk} : 材料強度の特性値 (規格値)
 ν : ポアソン比
 E : 鋼のヤング係数
 k : 座屈係数。 $k=0.425$

$$k_r = \begin{cases} 5.34 + 4.0 \left(\frac{b}{a}\right)^2 & (1 < \frac{a}{b}) \\ 4.0 + 5.34 \left(\frac{b}{a}\right)^2 & (1 \geq \frac{a}{b}) \end{cases} \quad (5.2.6)$$

a : 板の固定縁間距離 (縦方向長) (図-解 5.2.3 参照)
 b : 板の固定縁間距離 (横方向長) (図-解 5.2.3 参照)
 t : 板厚

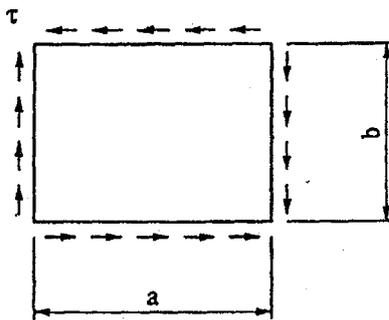


図-解 5.2.3 板の固定縁間距離

【解説】

基準となる耐荷力曲線は、「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]に示された平均値曲線を用いる。

部材係数は、平均値曲線に対する抵抗係数から算出する。「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]で算出した抵抗係数 (=0.892) を用いて、5.2.1 と同じ手順で算出する。

5.3 部材

5.3.1 柱

- (1) 圧縮を受ける柱の部材係数は、グループ 1 : 1.08、グループ 2、3 : 1.11 とする。
 (2) (1)の部材係数を用いる場合の耐力は次式を用いる

$$N_{rd} = \begin{cases} \frac{A_g Q_c f_{yd}}{\gamma_b} & (\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0) \\ \frac{A_g Q_c f_{yd}}{2\bar{\lambda}^2} \frac{\left(\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\bar{\lambda}^2} \right)}{\gamma_b} & (\bar{\lambda} > \bar{\lambda}_0) \end{cases} \quad (5.2.7)$$

$$\text{ただし、} \quad \beta = 1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2$$

- ここに、 N_{rd} : 部材の設計軸方向圧縮耐力
 A_g : 照査する断面の総断面積
 f_{yd} : 設計降伏強度
 $\bar{\lambda}$: 細長比パラメータ

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{Q_c f_{yk}}{E}} \frac{\ell}{r} \quad (5.2.5)$$

- ℓ : 部材の有効座屈長で、両端ピンの支持条件の場合の部材長 L を基準とし、部材両端の支持条件に応じて表-解 5.3.1 に示す値を標準とする。ただし、拘束が不十分と考えられる場合には、その値を合理的な値まで増大させるものとする。
 r : 着目する部材軸に関する総断面積の断面二次半径
 E : 鋼のヤング係数
 $\bar{\lambda}_0$: 限界幅厚比パラメータで、断面形状および製作過程により表-解 5.3.2 より選択する。
 α : 初期不整係数で、表-解 5.3.2 より選択する。
 Q_c : 局部座屈を生じる短柱の無次元化耐力

$$Q_c = \frac{\sum(\sigma_{rd} A_{fc})}{A_g f_{yd}} \quad (5.2.6)$$

- σ_{rd} : 両縁支持板、片縁支持板、補剛版、および鋼管に関する局部座屈強度
 A_{fc} : σ_{rd} を計算した板要素または鋼管の断面積
 Σ : 断面積を構成する板要素の総和

表-解 5.3.1 部材の有効座屈長 l

座屈波形が点線のような場合		1	2	3	4	5	6	
有効座屈長 l の理論値		$0.5L$	$0.7L$	L	L	$2L$	$2L$	
支持条件	上端	回転に対する条件	固定	自由	固定	自由	自由	固定
		水平変位に対する条件	固定	固定	自由	固定	自由	自由
	下端	回転に対する条件	固定	固定	固定	自由	固定	自由
		水平変位に対する条件	固定	固定	固定	固定	固定	固定

表-解 5.3.2 鋼柱断面の区分

断面	座標軸	グループ	α	$\bar{\lambda}_0$
圧延箱桁 	両軸とも	1	0.089	0.2
溶接箱桁 	両軸とも	1	0.089	0.2
圧延I形 	両軸とも	1	0.089	0.2
溶接I形 	$t \leq 40$ 両軸とも	2	0.224	0.2
	$t > 40$ 両軸とも	3	0.432	0.2
	両軸とも	2	0.224	0.2
その他	両軸とも	3	0.432	0.2

【解説】

基準となる耐荷力曲線は、「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]に示された平均値曲線を用いる。

部材係数は、平均値曲線に対する抵抗係数から算出する。「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]で算出した抵抗係数(=0.8755、0.8507)を用いて、5.2.1と同じ手順で算出する。福本らは個々の断面毎に算出した抵抗係数をもとにして、各グループでの最小となる値を丸めて推奨値として提示しているが、ここでは、最小となる値そのまま(p.114、表-4)を用いて算出する。

5.3.2 はり

- (1) 曲げを受けるはりの部材係数は、圧延断面および箱型・ π 型断面：1.05、溶接断面：1.12 とする。
- (2) (1)の部材係数を用いる場合の耐力は次式を用いる

$$M_{rd} = \begin{cases} \frac{M_n}{\gamma_b} & (\bar{\lambda}_b \leq \bar{\lambda}_{b0}) \\ \frac{M_n}{2\bar{\lambda}_b^2} \left(\frac{\beta_b - \sqrt{\beta_b^2 - 4\bar{\lambda}_b^2}}{\gamma_b} \right) & (\bar{\lambda}_b > \bar{\lambda}_{b0}) \end{cases} \quad (5.2.8)$$

$$\text{ただし、} \quad \beta_b = 1 + \alpha_b (\bar{\lambda}_b - \bar{\lambda}_{b0}) + \bar{\lambda}_b^2$$

ここに、 M_{rd} : 強軸曲げに関するはり部材の設計曲げ耐力

M_n : はり断面の曲げ基準耐力

コンパクト断面の場合 $M_n = f_{yd} \cdot Z$

ノンコンパクト断面の場合 $M_n = f_{yd} \cdot W$

スレンダー断面の場合 $M_n = f_{yd} \cdot W_{eff}$

f_{yd} : 設計降伏強度

Z : 塑性断面係数

W : 圧縮フランジの弾性断面係数

W_{eff} : 局部座屈による有効幅を考慮して求めた有効断面係数

$\bar{\lambda}_{b0}$: はりの限界細長比パラメータ (表-解 5.3.3)

α_b : はりの初期不整係数 (表-解 5.3.3)

$\bar{\lambda}_b$: はりの細長比パラメータ

M_n^- : 次式で与えられるはり断面のまげ基準耐力の特性値 (規格値)

$$M_n^- = M_n \frac{f_{yk}}{f_{yd}}$$

f_{yk} : 材料強度の特性値 (規格値)

M_E : 面外変形に対して両端単純支持はりの弾性横ねじれ座屈モーメント。

表-解 5.3.3 はりの曲げ耐力式のパラメータ

	α_b	$\bar{\lambda}_{b0}$
圧延 I、H 断面 箱型、 π 断面	0.15	0.40
溶接 I、H 断面	0.25	0.40

【解説】

基準となる耐荷力曲線は、「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]に示された平均値曲線を用いる。

部材係数は、平均値曲線に対する抵抗係数から算出する。「鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究」[福本ら、1990]で算出した抵抗係数(=0.882、0.852)であるが、最新の知見に基づく第1編 § 3の数値(=0.898、0.838)を用いて、5.2.1と同じ手順で算出する。福本らは個々の断面毎に算出した抵抗係数をもとにして、各グループでの最小となる値を丸めて推奨値として提示しているが、上記の数値は最小となる値そのまま(p.102、表-9)を示している。

参考文献

福本ゆう士ら(1990)：鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究、平成元年度科学研究費補助金研究成果報告書。

§ 3 まとめ

本報告書での案文の提示では、§ 1に示した留意事項に基づいて整理した。今後、標準示方書として利用するためには、引き続き以下の整理が必要と考える。

- ・ 6章、10章以降と、内容の整理を図る必要がある。

特に第6章と第5章の関係が実務者にとってわかりにくいと感じる。例えば、鋼管は現在第5章に組み込まれているが、圧縮部材の柱として鋼管断面として取り扱うのか、鋼管だけを取り出して扱うのか、検討が必要である。他にケーブルやPC鋼材の扱いも同様である。

- ・ 既刊の鋼・合成構造標準示方書の項目を網羅する必要がある。

その他の板要素、部材を取り込む必要がある。

また、せん断を受ける周辺支持板は、推奨値としての値ではなく、科研報告書の付録に示されている数値を用いている。これらの数値の適用に関しては、議論が必要と考える。

組み合わせを受ける場合には、科研では自乗和式を用いているが、鋼・合成構造標準示方書では章を改めて部材として表記している。これの整合を図る必要もある。