

鋼鉄道橋の設計の現状と今後の動向

池田 学

(公財) 鉄道総合研究所

鋼鉄道橋の設計の現状と今後の動向



**(公財)鉄道総合技術研究所
構造物技術研究部 鋼・複合構造
池田 学**

説明内容

1. **鋼鉄道橋の設計標準の変遷**
2. **現行設計標準の概要**
3. **部分係数法のメリット**
4. **設計者に求めること**
5. **設計の今後の動向**

はじめに

「良い橋が設計できる」とは

- 「良い橋」とは？
- 「設計」と「照査」は違う
- 「良い橋が設計できる」ための設計標準の役割とは？

1. 鋼鉄道橋の設計標準の変遷

昔の鋼構造物の例



鋼桁(上路プレートガーダー)



鋼ラーメン橋脚



鋼トラス橋

最近の鋼構造物・合成桁の例



鋼・合成標準の変遷(1)

明治45年 鋼鉄道橋設計示方書

昭和3年 鋼鉄道橋設計示方書

昭和15年 鋼鉄道橋標準示方書〈土木学会〉

昭和31年 鋼鉄道橋設計示方書解説〈土木学会〉

昭和34年 高張力鋼鉄道橋設計示方書案〈土木学会〉

昭和35年 溶接鋼鉄道橋設計示方書案〈土木学会〉

昭和36年 新幹線鋼鉄道橋設計基準案〈国鉄〉

昭和38年 合成桁鉄道橋設計示方書案〈土木学会〉

鋼・合成標準の変遷(1)

明治45年 鋼鉄道橋設計示方書

鋼 鉄 道 橋 設 計 示 方 書

(明治 45 年 2 月規定)

第一章 總 則

第一條 本示方書ハ廣軌及狹軌鐵道ノ鐵道橋設計ニ使用スルモノトス。

第二條 上構 (Super structure) 用材料ハ綴釘 (Rivet) 及特ニ明文アルモノヲ除ク外總テ建築用鋼 (Structural steel) トス。

第三條 橋梁上ニ於テ列車通過ニ要スル空間 (Clearance) ハ建設規定ニ依ルベシ。

第四條 構 (Truss) 及桁 (Beam) ノ心々幅ハ支間 (Effective span) ノ二十分ノ一ヨリ大ニシテ且ツ指定横荷重 (Lateral load) ノ作用ニ依リ橋桁ノ轉覆セザル程度以上タルベシ。

第五條 構ノ高サハ支間ノ十分ノ一以上桁ノ高サハ支間ノ十二分ノ一以上クルヲ可トス。

鋼・合成標準の変遷(2)

昭和45年 建造物設計標準(鋼鉄道橋)〈土木学会〉

昭和49年 建造物設計標準
(鋼とコンクリートの合成桁鉄道橋)〈土木学会〉

昭和58年 建造物設計標準(鋼鉄道橋、
鋼とコンクリートとの合成鉄道橋)〈国鉄〉

(昭和62年国鉄分割民営化)



許容応力度設計法

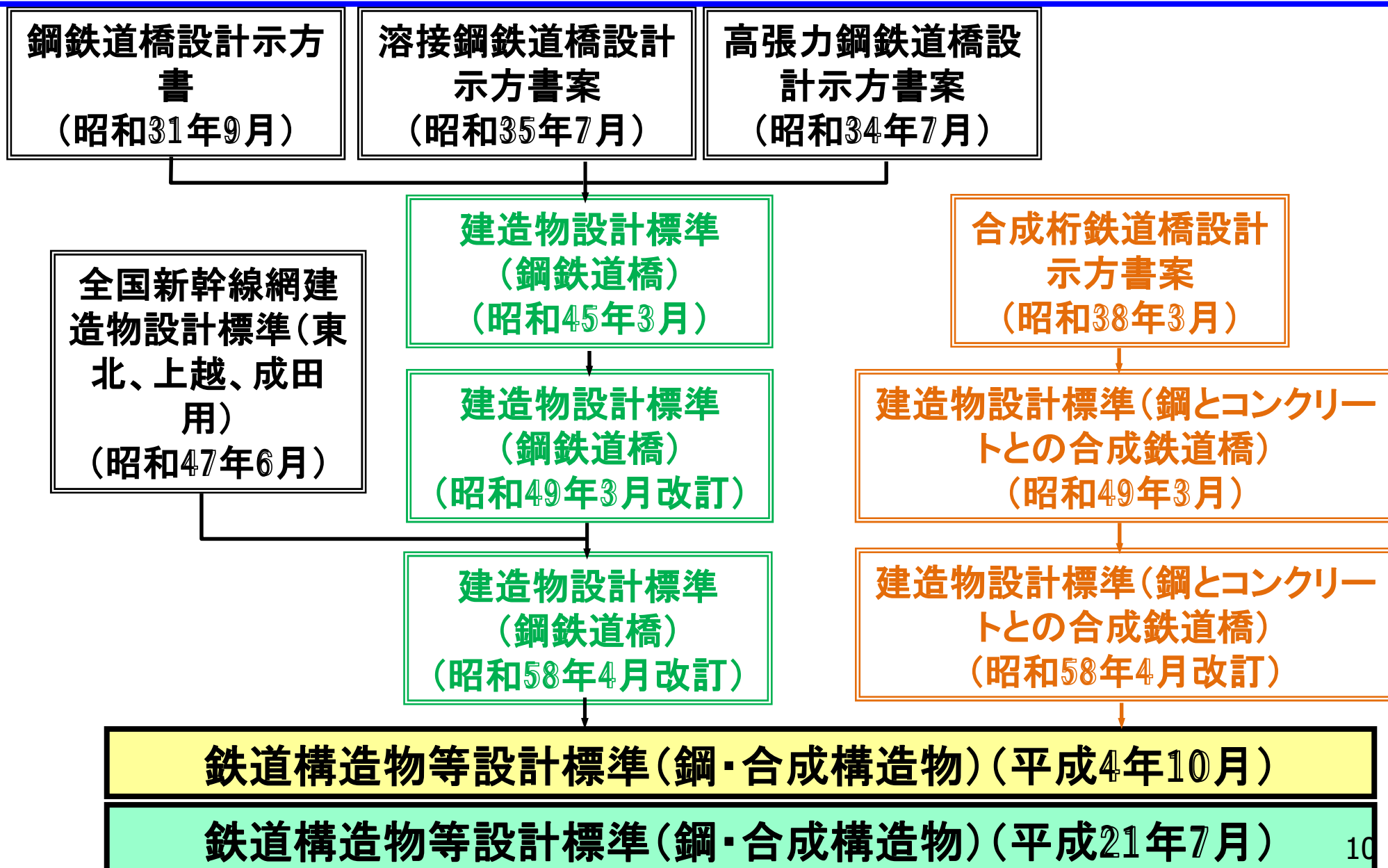


限界状態設計法

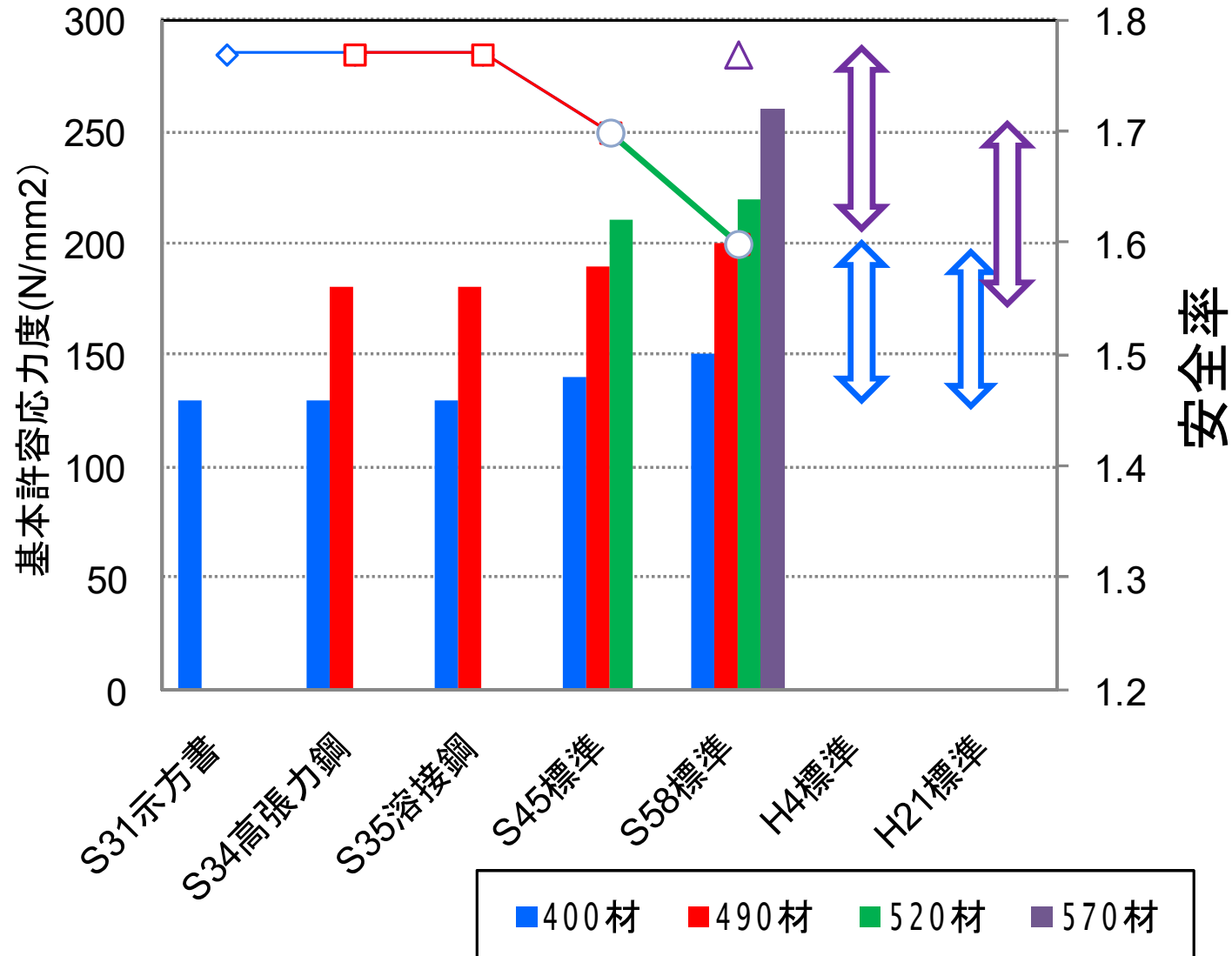
平成4年 鉄道構造物等設計標準・同解説
(鋼・合成構造物)〈旧運輸省監修、鉄道総研編〉

平成21年 鉄道構造物等設計標準・同解説 **性能照査型体系**
(鋼・合成構造物)〈国交省監修、鉄道総研編〉

鋼・合成標準の変遷(昭和30年代以降)



鋼材の許容応力度・安全率の変遷



→改訂に伴い安全率を徐々に低減(改訂のメリット)

照査式の変遷

許容応力度設計法による照査式

$$\sigma \leq \sigma_a$$

限界状態設計法、性能照査型設計法による照査式

部分係数法

設計応答値(設計断面力等)

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

設計限界値(設計部材耐力等)

性能照査型設計体系への移行(1)

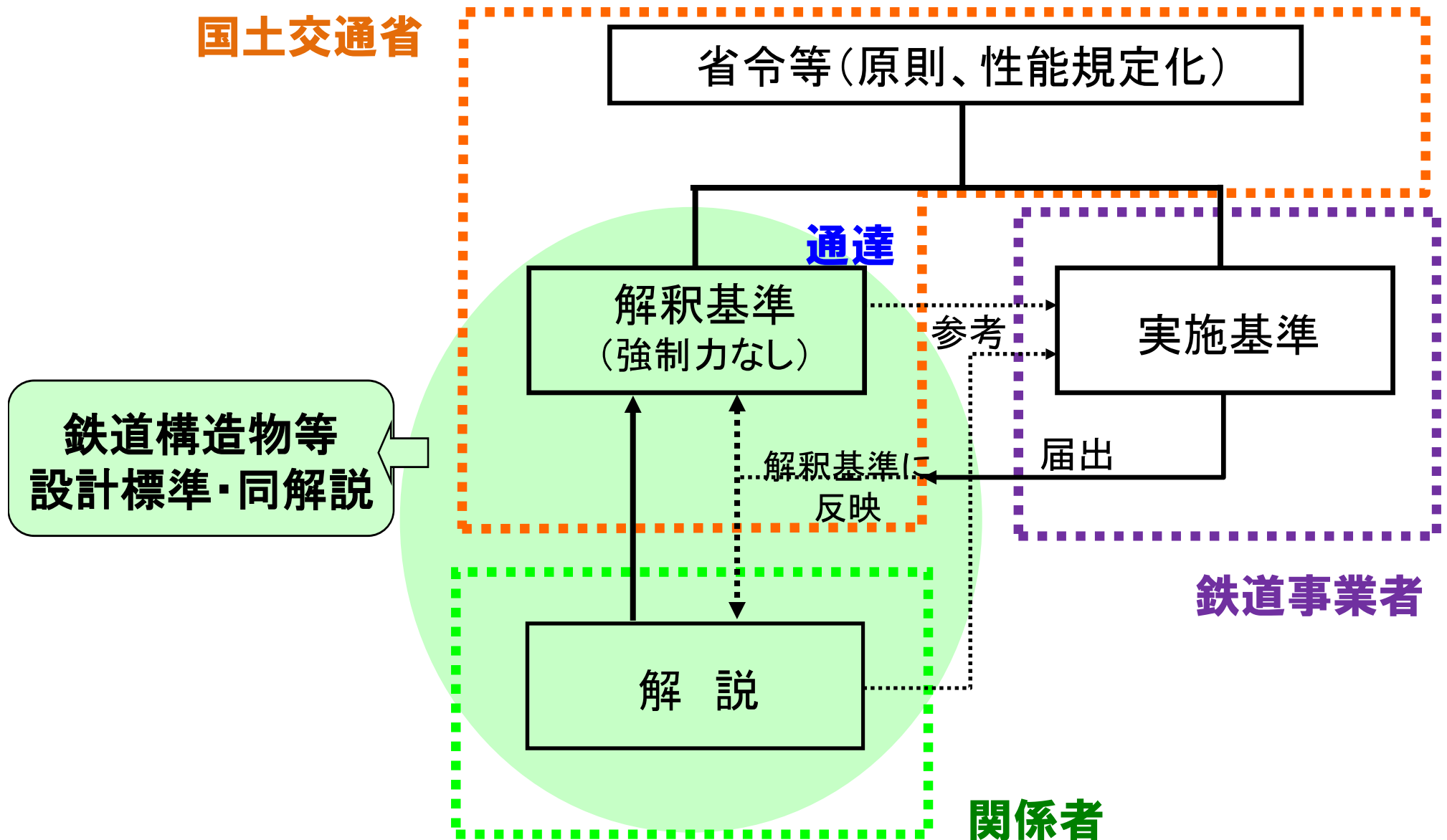
- 平成10年 運輸技術審議会 諮問第23号
「今後の鉄道技術行政のあり方について」答申

新技術や個別事情への対応を柔軟にするため、**法令等に基づく技術基準**は、原則として、備えるべき性能を規定した、いわゆる**性能規定**とする必要がある。

一方、性能規定化された省令等の解釈を強制力を持たない形で具体化、数値化して明示しておく必要がある。**(解釈基準)**

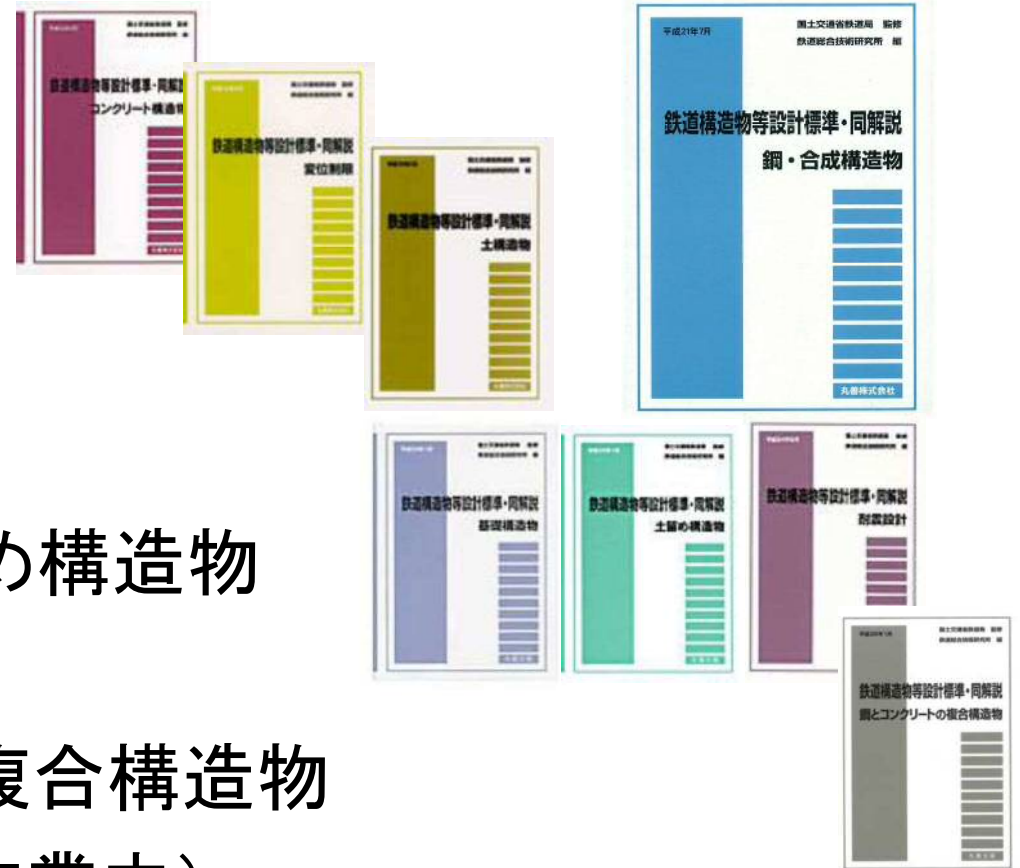
また、鉄道事業者は、省令等に適合する範囲内で、個々の鉄道事業者の実情を反映した詳細な技術基準**(実施基準)**を策定し、これに基づき**施設や車両の設計や運用**を行う必要がある。

性能照査型設計体系への移行(2)



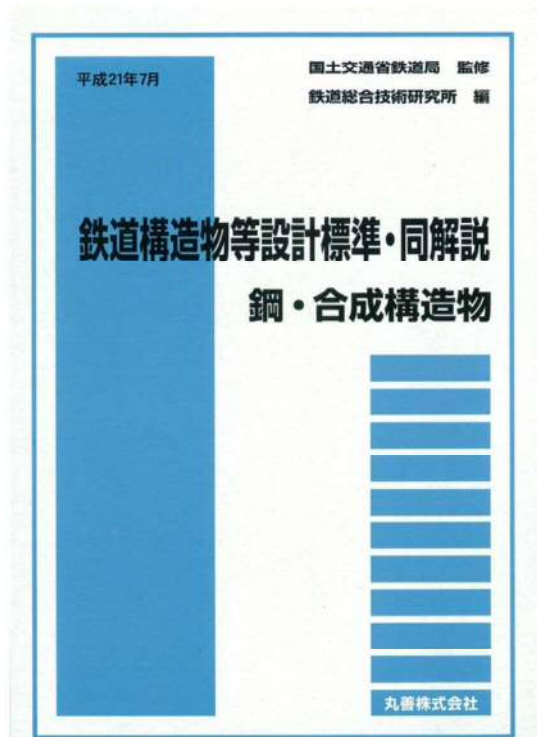
鉄道構造物等設計標準の種類

平成16年	コンクリート構造物
平成18年	変位制限
平成19年	土構造物
平成21年	鋼・合成構造物
平成24年	基礎構造物、土留め構造物
	耐震設計
平成28年	鋼とコンクリートの複合構造物
平成29年以降	トンネル(改訂作業中)



順次、性能照査型に改訂・制定

鋼・合成構造物の技術基準の性能規定化



鉄道構造物等設計標準
(鋼・合成構造物)
[2009年]



鉄道構造物等維持管理標準
(鋼・合成構造物)
[2007年]

2. 現行設計標準の概要

全体構成(1)

第Ⅰ編 共通

第Ⅱ編 鋼構造物

第Ⅲ編 合成桁

通達範囲

構造計画編

施工編

付属資料

参考資料扱い

第Ⅰ編 共通

1章 総則

2章 設計の基本

3章 構造物の要求性能と性能照査

4章 作用

5章 材料

6章 付帯設備および付属物

—鋼構造物と合成桁の共通編

—作用、材料など共通の内容

全体構成(2)

第Ⅰ編 共通

第Ⅱ編 鋼構造物

第Ⅲ編 合成桁

通達範囲

構造計画編

施工編

付属資料

参考資料扱い

第Ⅱ編 鋼構造物

1章 応答値の算定

2章 安全性の照査

3章 使用性の照査

4章 復旧性の照査

5章 耐久性の検討

6章 部材

7章 連結部

8章 構造物

9章 支承部

全体構成(3)

第Ⅰ編 共通

第Ⅱ編 鋼構造物

第Ⅲ編 合成桁

通達範囲

構造計画編

施工編

付属資料

第Ⅲ編 合成桁

1章 応答値の算定

2章 安全性の照査

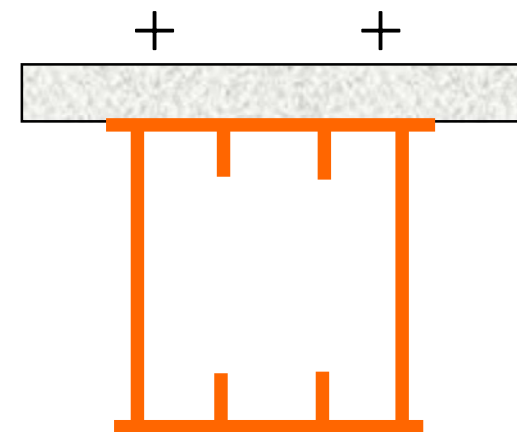
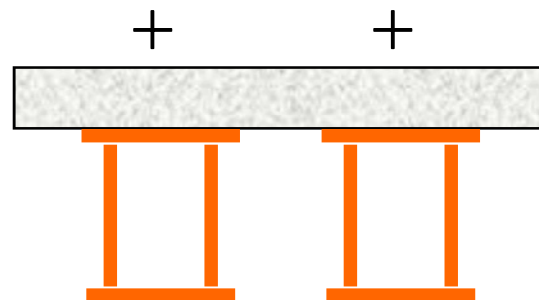
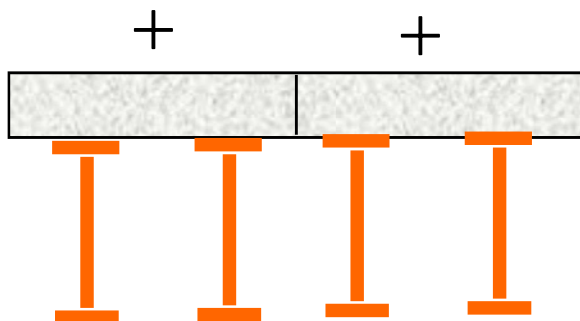
3章 使用性の照査

4章 復旧性の照査

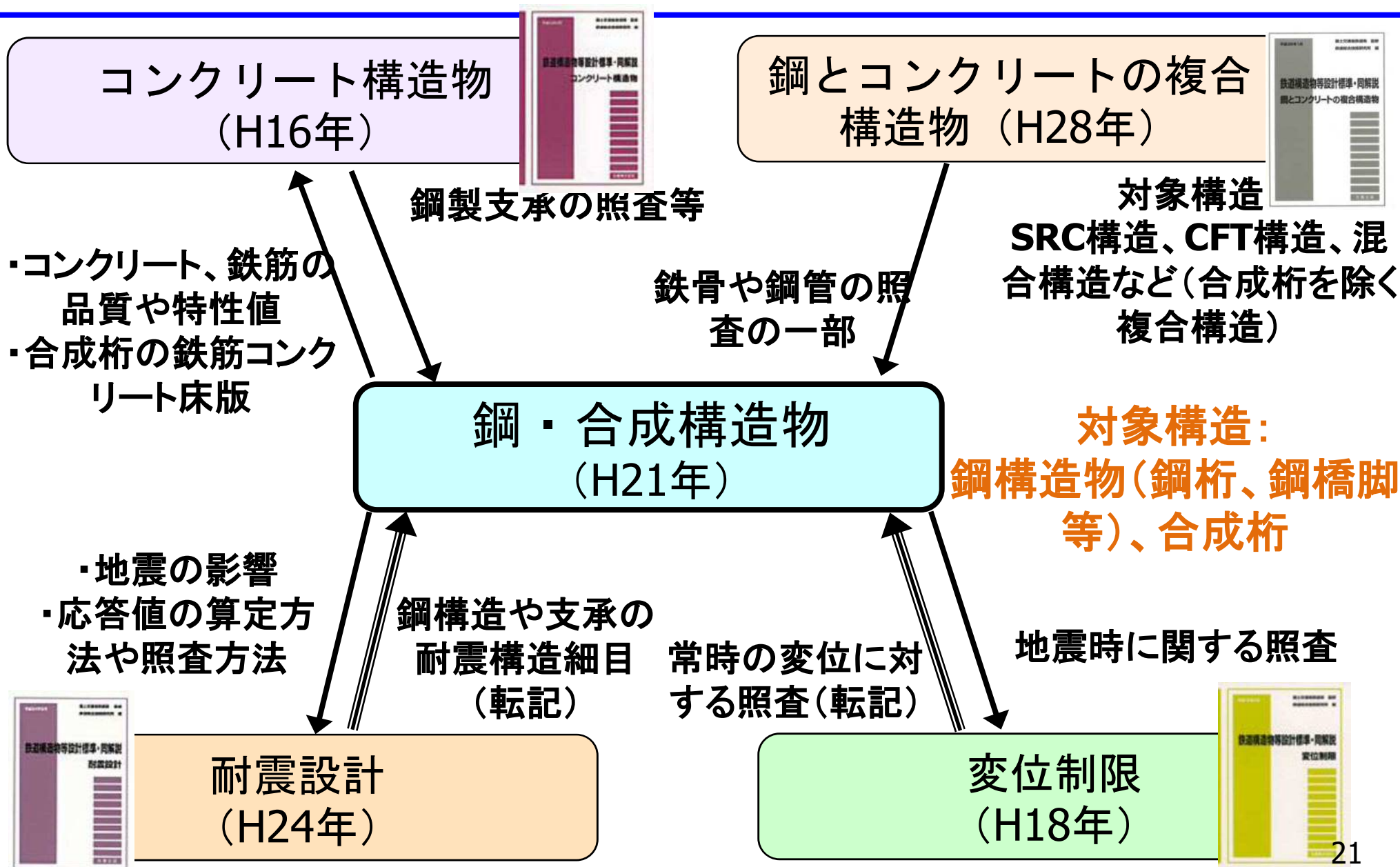
5章 耐久性の検討

6章 部材および構造物

参考資料扱い



鋼・合成標準と他設計標準の関連



適用範囲

➤ 列車荷重を支持する鋼構造物および合成桁を対象

新設構造物を主として対象

既設構造物や仮設構造物の性能照査にも準用可能

➤ 鋼構造物は、150m程度までの支間の桁構造

標準的な橋脚やラーメン構造を対象

➤ 合成桁は、活荷重合成桁の完全合成桁を対象

支間80m程度までを対象

設計耐用期間

構造物の設計耐用期間は、構造物に要求される供用期間、維持管理の方法および環境条件等を考慮して定める。通常
の環境条件の場合、適切な検査等の維持管理がなされると
いう前提で、100年を設計耐用期間の一つの目安（旧標準で
は、在来線60年、新幹線70年を疲労の照査における標準的
な設計耐用期間）とする。

要求性能

要求性能	定義
安全性	想定されるすべての作用のもとで、構造物が使用者や周辺の人々の生命を脅かさないために保有すべき性能
使用性	想定される作用のもとで、構造物の使用者が快適に構造物を使用するための性能、および周辺の人々が快適に生活するための性能
復旧性	想定される作用のもとで、構造物が損傷を受けないための性能、または損傷を受けた場合に性能回復が容易に行えるための性能
耐久性	想定される作用のもとで、時間の経過に伴う構造物あるいは部材の性能の低下に対する抵抗性

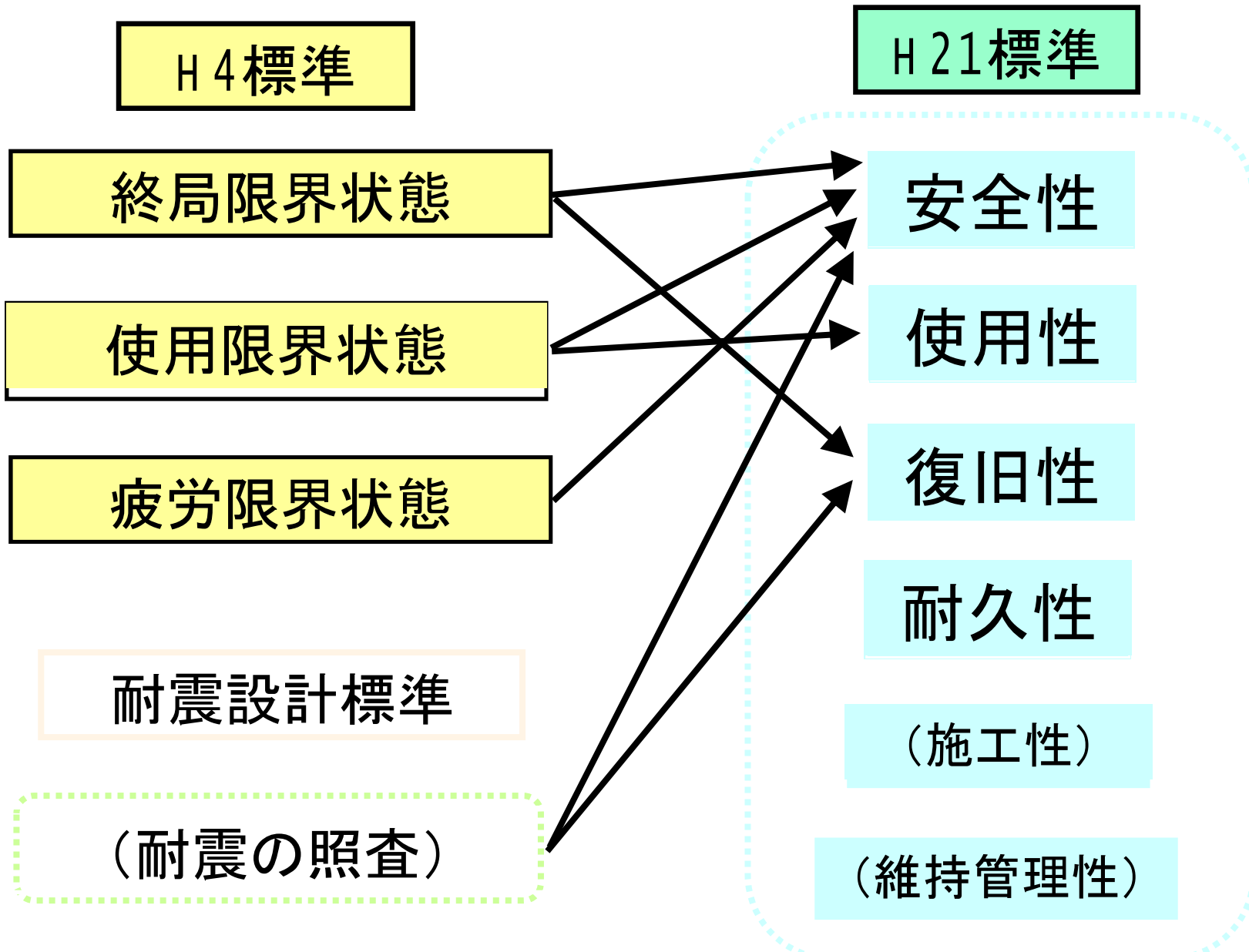
上記以外にも、以下の性能についても検討を行う。

施工性	構造物の施工の安全性や容易性、および確実性
維持管理性	構造物の維持管理の容易性

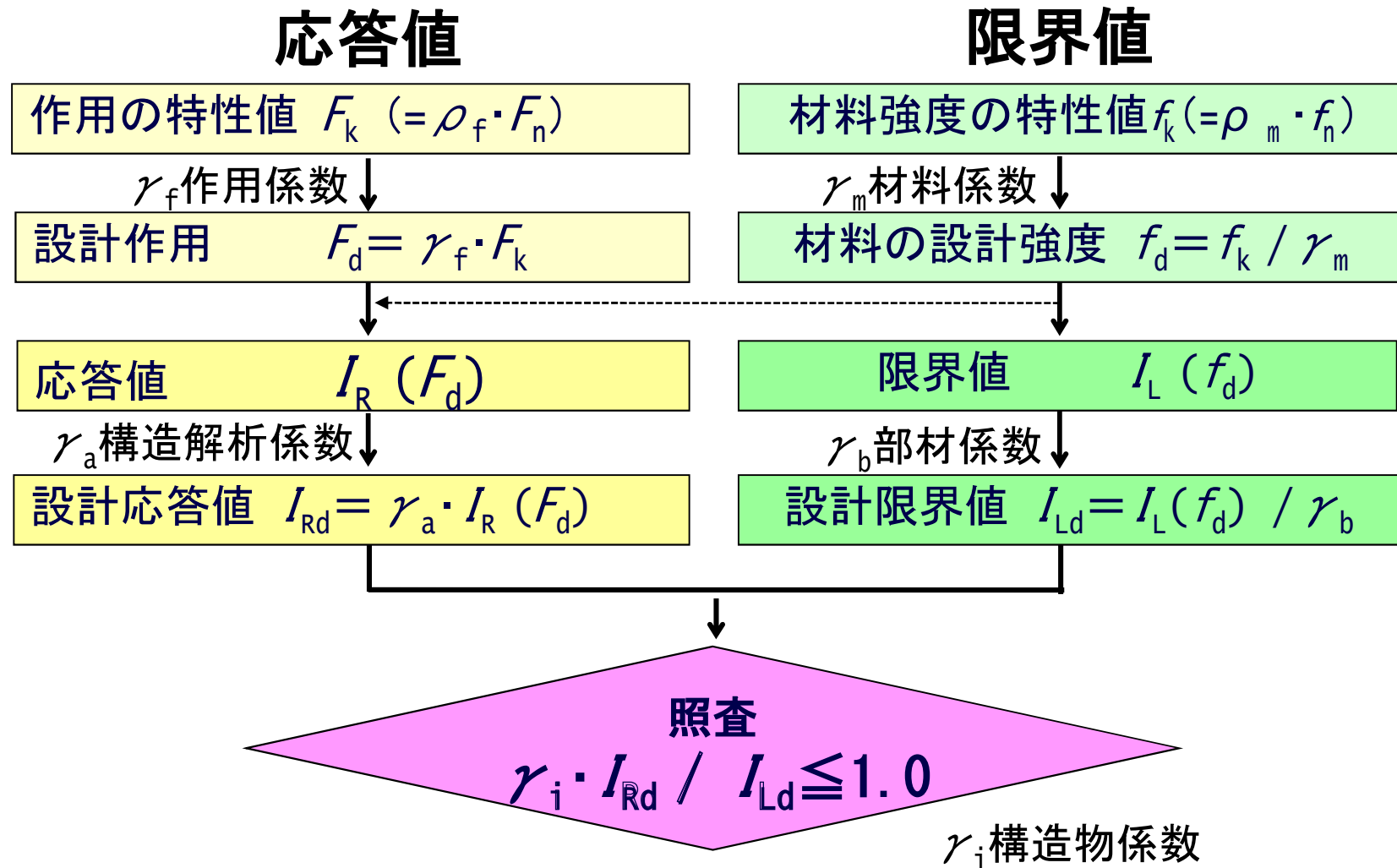
要求性能・性能項目と照査指標の例(鋼構造物)

要求性能	性能項目	照査指標の例
安全性	耐荷性	断面力、応力度、板要素の幅厚比
	安定性	転倒モーメント、上揚力
	耐疲労性	応力度
	走行安全性	変位・変形、振動数
	公衆安全性*	ボルト強度(遅れ破壊)
使用性	乗り心地	変位・変形、振動数
	外観	防錆処理の検討、初期錆汁対策
	振動・騒音*	振動レベル・騒音レベル、対策
復旧性	部材や軌道の損傷に関する復旧性	変位・変形、断面力、応力度
耐久性	耐腐食性	腐食環境と塗装仕様

各限界状態と要求性能の関連

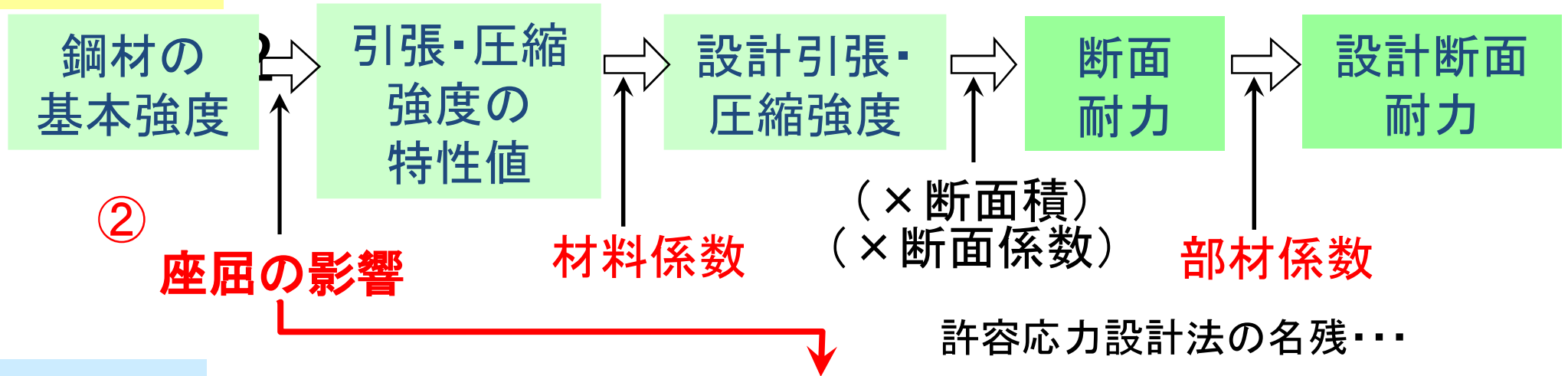


照査式

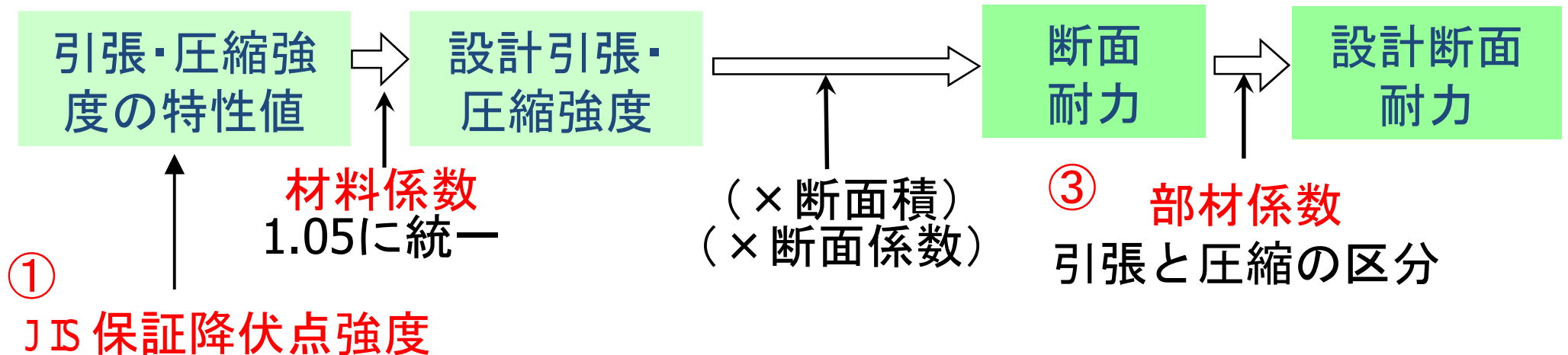


鋼部材の設計断面耐力の算定(1)

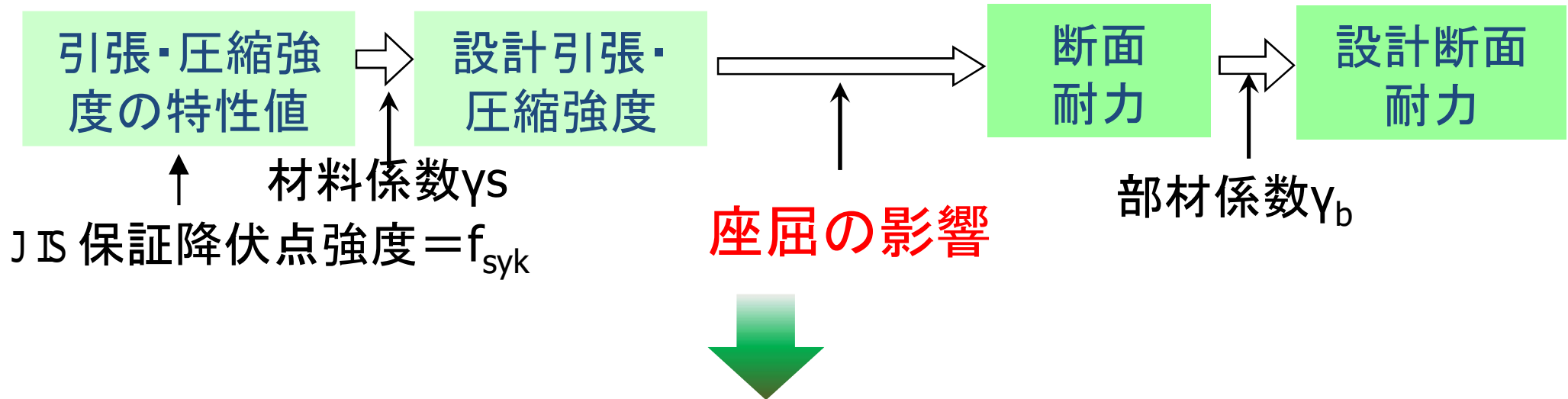
H4標準



H21標準



鋼部材の設計断面耐力の算定(2)



(例) 設計軸方向耐力 N_{ud} の算定式

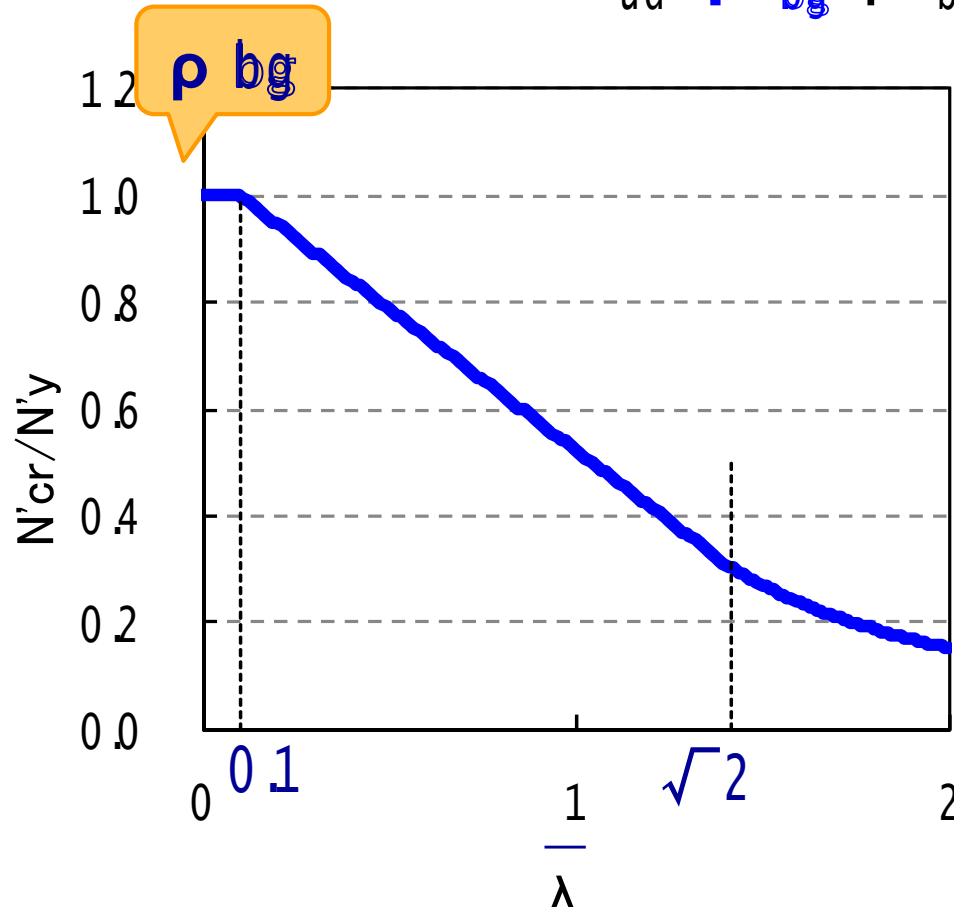
$$N_{ud} = \rho_{bg} \cdot \rho_{bl} \cdot A \cdot (f_{syk} / \gamma_s) / \gamma_b$$

- ・ ρ_{bg} : 部材の全体座屈の影響を考慮した耐力の低減係数
- ・ ρ_{bl} : 板の局部座屈の影響を考慮した耐力の低減係数
 - ・ 引張力を受ける部材の場合は、両係数とも1.0

鋼部材の設計断面耐力の算定(3)

■ 全体座屈の影響を考慮した耐力の低減係数 ρ_{bg}

$$N_{ud} = \rho_{bg} \cdot \rho_{b1} \cdot A \cdot f_{syd} / \gamma_b$$



柱の耐力曲線

・柱の座屈耐荷力曲線

$$\rho_{bg} = 1.0 \quad (\lambda \leq 0.1)$$

$$= 1.0 - 0.53(\bar{\lambda} - 0.1) \quad (0.1 < \lambda \leq \sqrt{2})$$

$$= \frac{1.7}{2.8\bar{\lambda}^2} \quad (\lambda > \sqrt{2})$$

・細長比パラメータ $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{syk}}{E}} \cdot \frac{\ell}{r}$$

鋼部材の設計断面耐力の算定(4)

■軸方向耐力における部材係数 γ_b

$$N_{ud} = \rho_{bg} \cdot \rho_{b1} \cdot A \cdot f_{syd} / \gamma_b$$

・引張力を受ける部材

- 1.05 (520N / m m²級以下の鋼材)
- 1.1 (570N / m m²級の鋼材)

降伏から破断までの余裕度の差を考慮

・圧縮力を受ける部材

- 1.1 (570N / m m²級以下の鋼材)

引張降伏耐力と座屈耐荷力の算定精度の違いを考慮

耐久性の検討(1)

●「鋼材の耐腐食性」の検討

要求：腐食量を一定レベル以下に留める

検討方法：

- ・適切な塗装仕様の選定(定期的な塗り替え前提)
- ・適切な耐候性鋼材の選定(JIS or 高耐候性)
 - 耐候性鋼材の100年後の腐食量が0.5mm以下 等



安全性、使用性、復旧性の照査の際に経時変化を考慮しなくてよい。

耐久性の検討(2)

●「鋼材の耐腐食性」の検討

要求：腐食量を一定レベル以下に留める



しかし、実際には……

鋼直結軌道や橋まくらぎの上フランジ、鋼床版等塗り替えができず、腐食量の抑制が困難な部位がある。



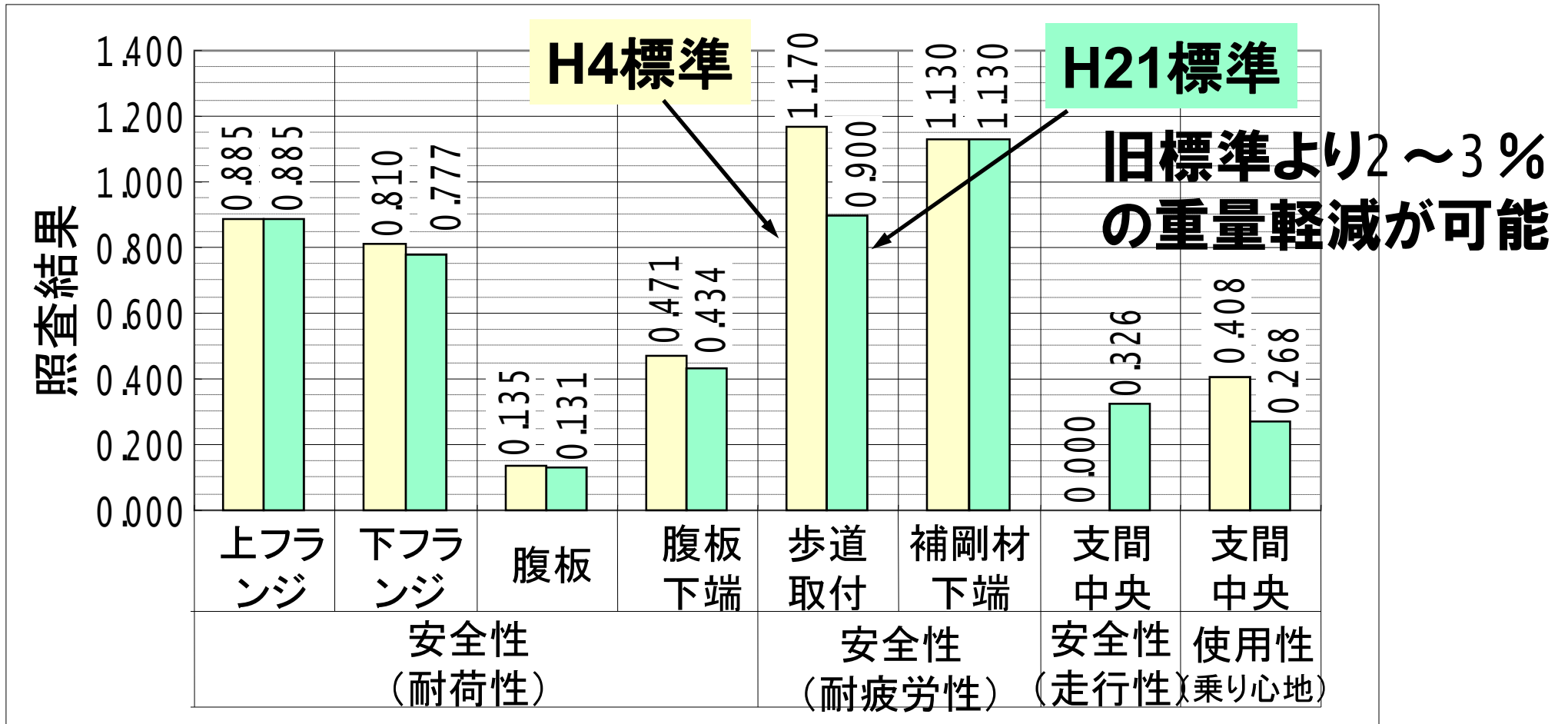
将来予想される腐食量に応じて腐食しろを設定して、それを板厚から減じた断面で安全性等の照査を行う。

(一般的な腐食しろ：上フランジ1mm、鋼床版3mmなど)

(耐候性鋼材＋塗装が前提)

試設計結果(旧標準との比較)

上路桁の試設計結果



改訂時に試設計により従来標準との比較を行う

3. 部分係数法のメリット

部分係数法のメリット(1)

弾性設計では許容応力度設計法と同じでは？

(部分係数法は煩雑・・・)



- ・各安全係数の意味が明確
- ・作用ごとに作用係数の設定可
→死荷重と活荷重などの安全率の違いを考慮可能
(許容応力度設計法は、すべて同一の安全率)
- ・安全係数の精査により、従来より経済化が図れる可能性

部分係数法のメリット(2)

新材料を適用する場合の照査法を考える……

●許容応力度設計法

許容応力度をいくつに設定するかムズカシイ

(抵抗側のみでなく、作用側の安全率も含まれているため)

●部分係数法

個々の算定式、安全係数を検証することで、部分的に照査法を見直すことが可能

SBHSを鉄道橋の照査体系に取り入れる事例を紹介

橋梁用高降伏点鋼板(SBHS)とは

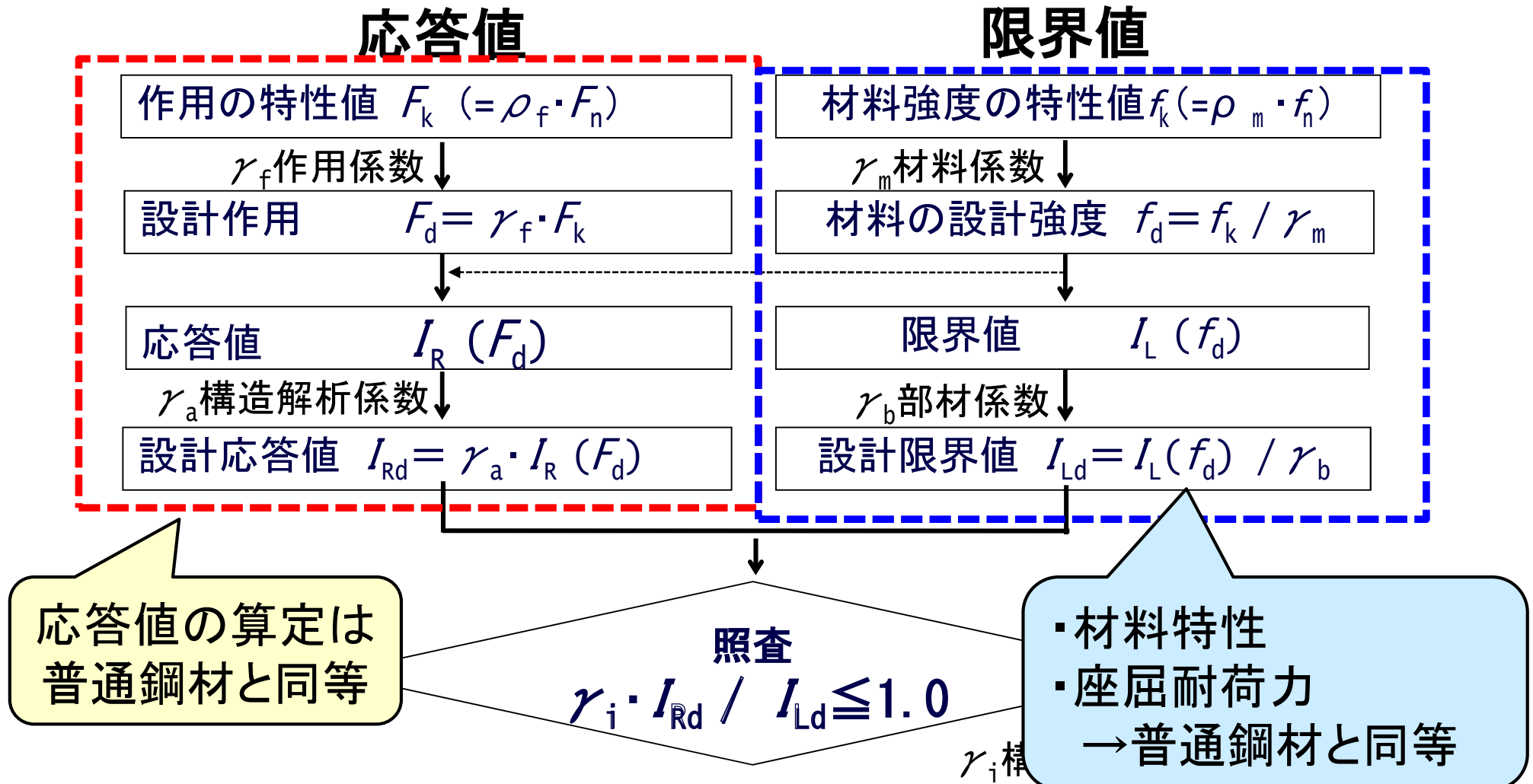
- ・降伏強度や引張強度に加えて、破壊じん性、溶接性、加工性、耐候性を高度化した鋼材
- ・SBHSの有効活用により、高強度化による鋼重削減や、予熱温度の軽減等による製作の省力化が可能となる。
- ・2008年10月 JIS3140制定
- ・道路橋ではすでに適用事例あり → 鉄道橋では実績なし



東京港臨海大橋

照査法の検討

SBHSを適用するためには・・・



4. 設計者に求めること

設計者に求めること

一人のコードライターの立場からの意見

- 構造計画・構造設計の重要性
- 仕様設計(ディテール)と性能設計のバランス
- 解析を上手に活用する(照査≠設計計算≠解析)
- 施工や維持管理の情報のフィードバック
- 「設計標準に100%従う」から、「設計標準を利用する」へ
設計標準を柔軟に対応(性能設計の利点)

構造設計の重要性

“設計”と“照査”は違う

設計：要求される性能を念頭において計画された構造物の形を創造し，性能を照査し，設計図を作成するまでの一連の作業

構造設計：構造物の具体的な形状・寸法を設定すること

照査：構造物が，要求性能を満たしているか否かを，理論的あるいは経験的に確証のある解析や適切な供試体による実験等により判定する行為

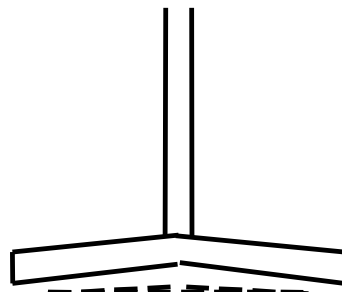
- 設計標準は「照査」するための標準
- 設計標準で「構造設計」はできない。

維持管理情報のフィードバック(1)

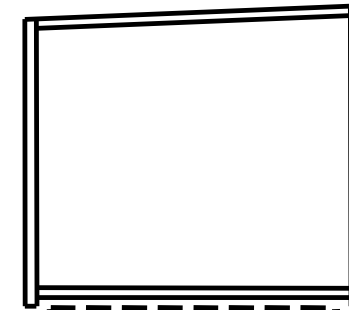
耐候性鋼橋のディテールの変更例

海岸に近い鉄道橋の一部の部材に層状さびが発生

【当初】上面に滞水しないように



【当初】薄雨水が回り込まないように



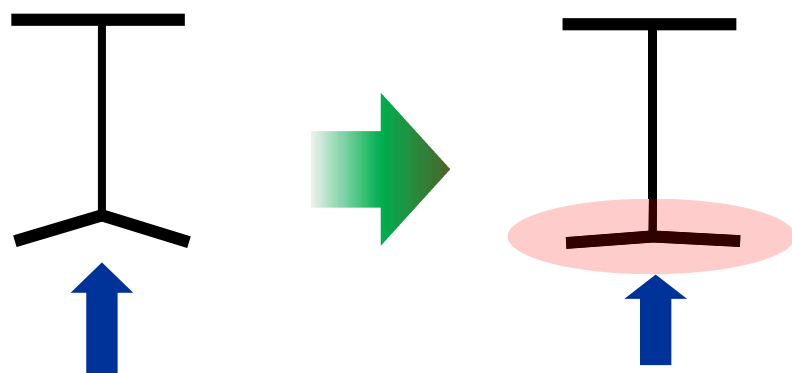
うろこ状さび, 層状さび



維持管理情報のフィードバック(2)

耐候性鋼橋のディテールの変更例

I 形桁の構造によるさび発生状況の差

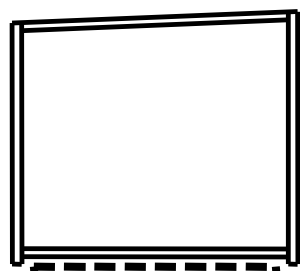


推奨した構造に層状さびが発生
理由: 雨水に濡れないために塩分が蓄積

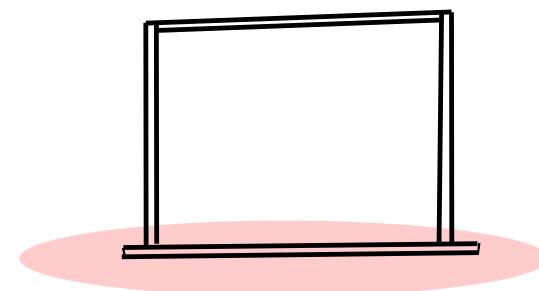
維持管理情報のフィードバック(3)

耐候性鋼橋のディテールの変更例

トラス橋下弦材の構造によるさび発生状況の差



層状さび



雨水による濡れなし

塩分の蓄積

雨水による濡れ

5. 設計の今後の動向

設計の今後の動向(私見)

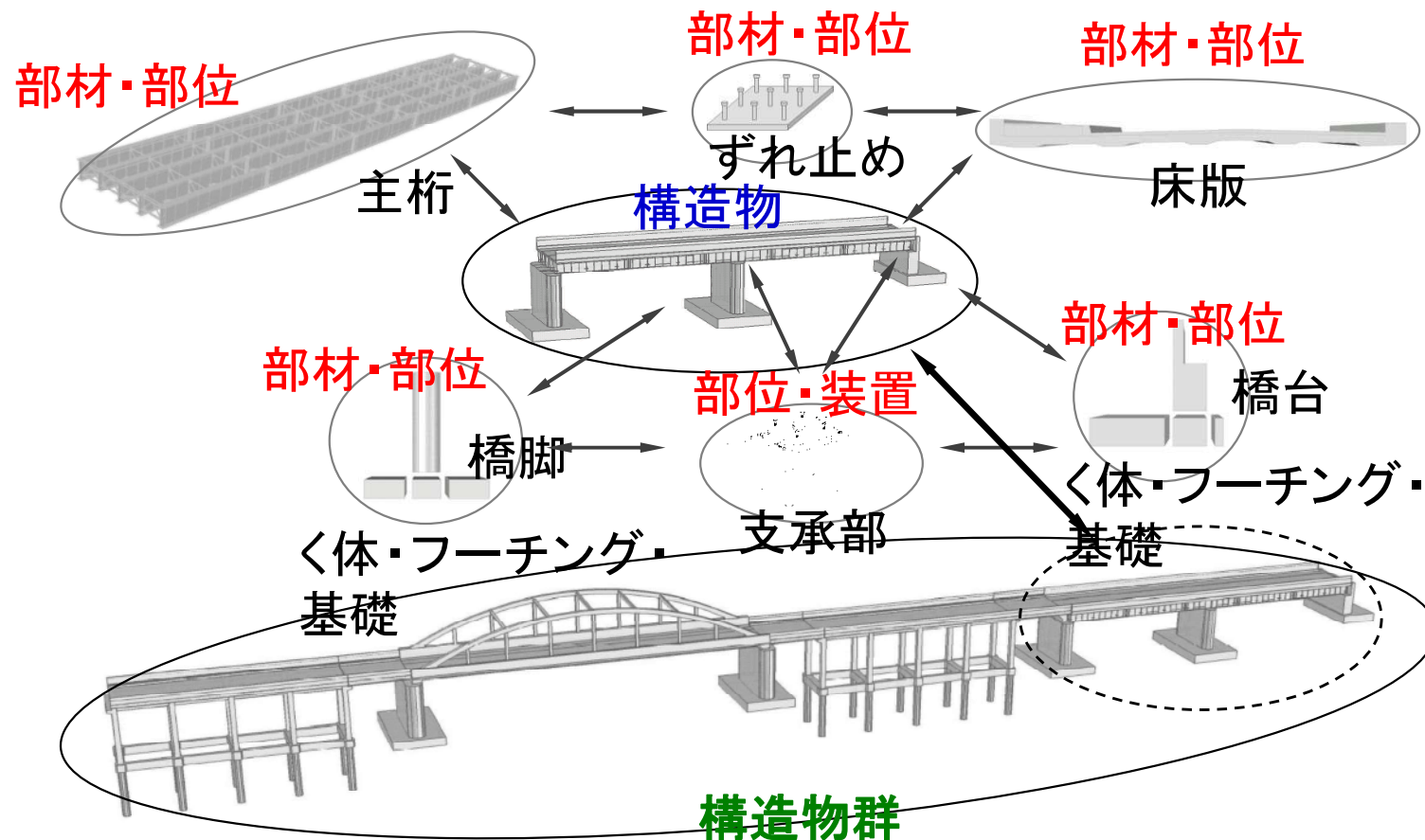
- 真の限界状態設計法への移行
見かけ上の限界状態(降伏ベース)でなく……
- 標準設計と詳細設計の二極化
- 三次元解析の適用 → C I M の導入(設計→施工→維持管理)
- 部材の照査 → 構造物の照査へ
- 複合構造の積極的な活用(構造の合理化、騒音低減等)
- 設計標準の定期的な改訂(最新技術の導入、技術継承)

設計の今後の動向

部材の照査→構造物の照査へ

2014年制定 複合構造標準示方書

- (a) **構造物群** (複数の構造物が組み合わされたもの) で照査
- (b) **構造物** の照査
- (c) 構造物を構成する **部材・部位** (構造物の構造要素) で照査



まとめ

- 1. 鋼鉄道橋の設計標準の変遷**
- 2. 現行設計標準の概要**
- 3. 部分係数法のメリット**
- 4. 設計者に求めること**
- 5. 設計の今後の動向**