

鋼橋の未来に向けての 合理的な構造設計法について

野上邦栄（首都大学東京）

鋼橋の未来に向けての 合理的な構造設計法について

首都大学東京
野上邦栄

鋼橋の設計法 ～その歴史変遷、最新情報から未来の設計法まで～

小委員会の目的

■ 鋼橋の実挙動を踏まえた上で、現在の設計手法に含まれている不合理な点を洗い出し、現在の設計手法の枠組みは維持しながら設計手法を合理的に改善するための提案を行う。

- 現在の設計手法は、実際の鋼橋の力学挙動は大幅に単純化された設計計算である。
- 計算結果と実際の構造物挙動に乖離する事象が存在している。（斜橋の設計等）
- 有限要素解析などの構造解析におけるハード・ソフトは、目覚ましく進歩し、構造物の実挙動を正確に捉えることができるようになってきた。
- 鋼とコンクリートの持ち味を生かした橋の開発も進み、その合理的な設計法についても実績が積まれてきている。

- ① 連続合成桁の負曲げ区間の設計法
- ② 連続桁中間支点の設計曲げモーメントの評価方法
- ③ 曲線橋および斜橋の実挙動の把握
- ④ 2次部材の設計法（対傾構、横構および支点上補剛材）
- ⑤ ケーブル等の安全率の評価と設定
- ⑥ 局部座屈と全体座屈の連成座屈の評価法

鋼構造委員会の活動

～鋼橋の合理的な構造設計法 に関する調査研究小委員会～

2012年10月～2014年9月

鋼橋の設計法 ～その歴史変遷、最新情報から未来の設計法まで～

WG① 連続合成桁の負曲げ区間の設計法

目的

既往の研究成果を踏まえ、合成桁の設計における不合理な点を抽出し、現在の設計法の合理的な改善案を検討

- 道路橋示方書の合成桁の規定は、昭和47年から変化なし
- 技術の進展により、合理性の面から現在の設計手法について見直しが必要

中間支点部の床版コンクリート剛性の評価に着目

道路橋示方書Ⅱ 鋼橋編の規定

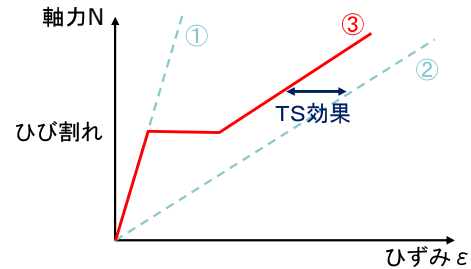
断面力計算・・・床版コンクリートの合成作用を考慮
応力度照査・・・引張域のコンクリート剛性を無視



- ◆ 構造解析と断面設計で床版コンクリートの扱いが異なる
- ◆ コンクリートひび割れ後の曲げモーメント再配分が考慮されていない

■ 床版コンクリート剛性の変化による骨組解析・応力照査を比較

- ①床版コンクリート剛性を考慮（合成断面）
- ②床版コンクリート剛性を無視（鋼桁＋鉄筋）
- ③テンションスティフィニング(TS)効果を考慮



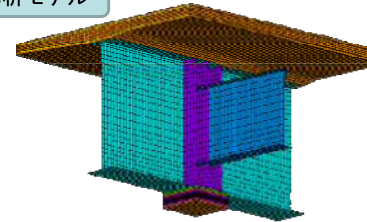
引張力を受ける鉄筋コンクリートの挙動

- 床版コンクリート剛性の違いが設計結果に及ぼす影響を検証

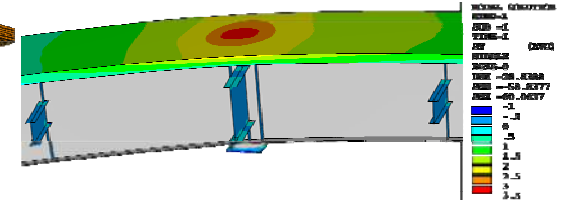
■ 詳細にモデル化したFEM解析と骨組解析を比較

- 骨組解析では考慮できない3次元挙動の影響を検証
- 骨組解析自体に不合理性がないかを検証

解析モデル



解析結果



- その他、各種のひび割れ幅算定式の違い、不等径間における合成桁の適用性について検討

WG② 連続桁中間支点の設計曲げモーメントの評価方法

<目的>

骨組解析における連続桁の中間支点上の曲げモーメントは凸形状になっているが、実際は支持する支承に幅があるため、その値は低減される。

コンクリート橋ではすでに10%程度低減するようにしているため、FEA等により、鋼橋についても実状にあった評価法を提案する。

(3) 連続構造の中間支点上の設計曲げモーメントは、式(14.3.1)により算出することができる。

$$M_1 = M - qa^2/8 \quad (14.3.1)$$

ただし、 $M_1 \geq 0.9M$

ここに、 M_1 ：中間支点上の設計曲げモーメント (N・mm)

M ：中間支点上の曲げモーメント (N・mm)

$q = R/a$ (N/mm)

R ：中間支点の反力 (N)

a ：断面の圆心位置における反力の橋軸方向分布幅 (mm)

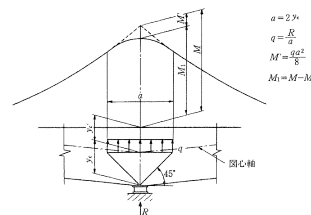


図-解 14.3.3 中間支点上の設計曲げモーメント

「道路橋示方書（Ⅲコンクリート橋編）・同解説」（平成24年3月）より抜粋

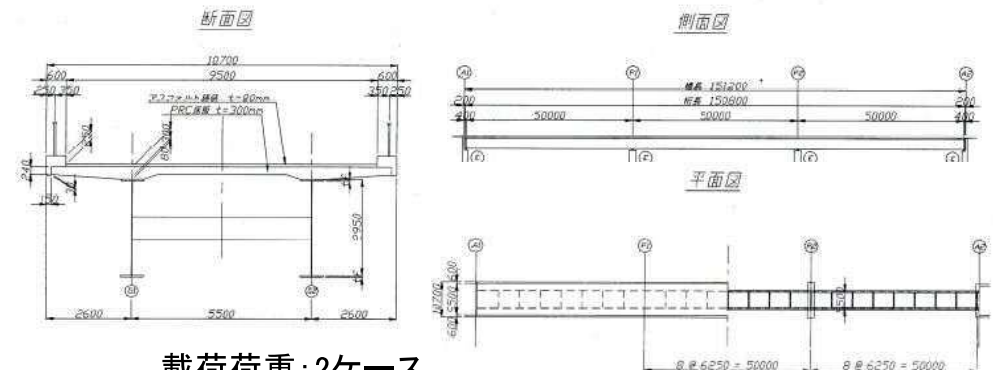
<現状>

- 骨組解析とFEM解析による比較検証を実施中

- 対象モデル：

3径間連続合成2主1桁橋

（社）日本橋梁建設協会「連続合成2主桁橋の設計例と解説（平成17年8月）」



載荷荷重：2ケース

活荷重（鋼桁＋鉄筋）

前死荷重（鋼桁のみ）

WG③ 曲線橋および斜橋の実挙動の把握

【目的】

曲線橋および斜橋について、格子解析の結果と実際の挙動との間に乖離がないか F E A を用いて検証を行うことを目的とする。

検証結果から、曲線橋や斜橋の合理的な設計法の提案につなげる。

- 実際の挙動を適切に評価するための F E A モデル化の検討
 - ・ 各部材、床版のモデル化方法および材料構成則などの検討
- 曲線や斜角の影響が現れる主桁のねじれや端横桁に着目

【現状】

線形条件を変えた下記の 5 ケースについて、それぞれ格子解析と F E A を実施。

橋梁形式：3 径間連続合成鋼桁橋

- ①直線橋、②端支点 斜角 70° 、③全支点 斜角 70°
- ④曲線 $R=500m$ 、⑤曲線 $R=1000m$

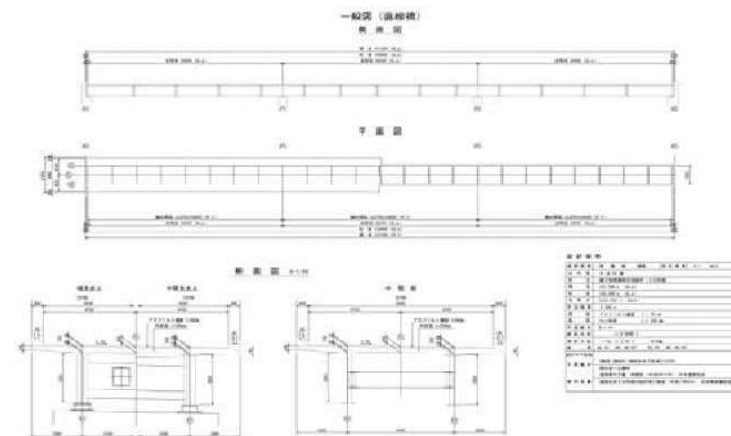


図 一般図（直線橋）

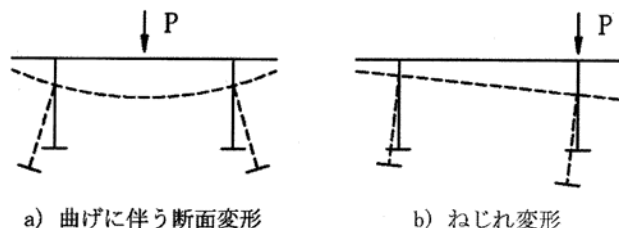
WG④ 2次部材の設計法 (対傾構、横構および支点上補剛材)

【研究目的】

①二次部材の役割と設計法

鋼桁橋で一般的に用いられる対傾構や横構などの二次部材について、その役割や設計法を FEA (有限要素解析) 等により見直し、合理的な設計法を提案する。

(例) 横構省略により考えられる挙動



a) 曲げに伴う断面変形

b) ねじれ変形

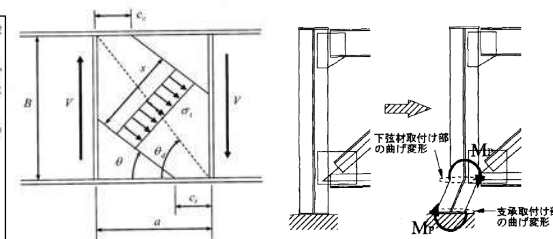
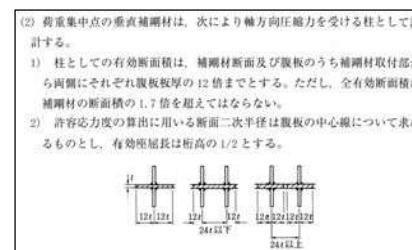
WG④ 2次部材の設計法 (対傾構、横構および支点上補剛材)

【研究目的】

②支点上補剛材の設計法

鋼桁橋の支点上補剛材の設計法を FEA により検証し、実状にあった設計法を提案する。(腐食等による残存耐力の評価に活用できないか)

また、横構を省略すると支点上補剛材の設計に影響するため、この場合の設計法についても検証する。



腹板が弾性座屈を起こした後に斜張力場となる。その場合の腹板の有効幅と支点上補剛材の耐力の評価

横構を省略した場合の地震時水平力に対する支点上補剛材の評価

【課題】

① 二次部材の役割と設計法

- 弾性域において横構などの二次部材の省略は概ね問題ない。
- 塑性域（終局時）における安全性の検証は必要。
 - NCHRP Report406 (By AASHTO)を参考に、二次部材の有無が橋全体の破壊に至る終局状態の確認。
 - 二次部材の合理化について検討。

② 支点上補剛材の設計法

- 腹板の有効幅(12t)や有効座屈長などで根拠が不明確な部分があり
- 二次部材を省略した場合や大規模地震に対しての検証が課題。
 - 橋全体のFEAを実施し、実挙動を反映した支点上補剛材の設計法について検討。

【現状の成果】

- 既往の研究について文献収集（検討課題の抽出）
- 二次部材の省略に対する安全性の検証方法
- 解析モデルの検討

WG⑤ ケーブルの安全率の評価

目的

エクストラードズド橋の安全率の経緯について調査を行い、鋼斜張橋への適用について提案を行う。
鋼斜張橋とエクストラードズド橋で使用されるケーブルは、異なった安全率(2.5と1.67)が道路橋示方書に規定。

ケーブル安全率の現状

- 吊形式橋梁のケーブル安全率（道示Ⅱ鋼橋編 17.5 ケーブルの許容値）
 - > 破断強度に対して、吊橋 3.0 斜張橋 2.5
- PC鋼材の安全率（道示Ⅲコンクリート橋編 3.4 PC鋼材の許容応力度）
 - > 引張強さの60% (安全率1.67)
 - または降伏点の75% (1.33)
 - > 外ケーブル、大偏心外ケーブル（エクストラードズド橋の斜材）は、**活荷重応力の発生頻度、応力変動および2次応力が小さい**ことから、従来のPC鋼材と同じ安全率を用いて設計できる。
(18章外ケーブル構造)



同じ鋼線であるのに

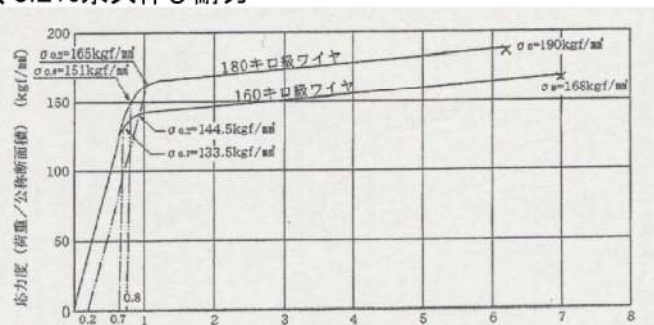
エクストラードズド橋ケーブル
引張強度の60% (安全率1.67)
降伏点の75% (1.33)



鋼斜張橋ケーブル
引張強度の40% (安全率2.5)
降伏点の60% (安全率1.67)

エクストラードズド橋の安全率

- 死荷重割合が大きく、斜材の鉛直分担率が小さいため、活荷重による変動応力に応じて、安全率を1.67 ($0.6\sigma_B$) ~ 2.5 ($0.4\sigma_B$) に設定。
- PC鋼材の降伏点は、0.2%永久伸び耐力
- 斜ケーブルは、**取替前提で設計**



吊橋ケーブルの構成則

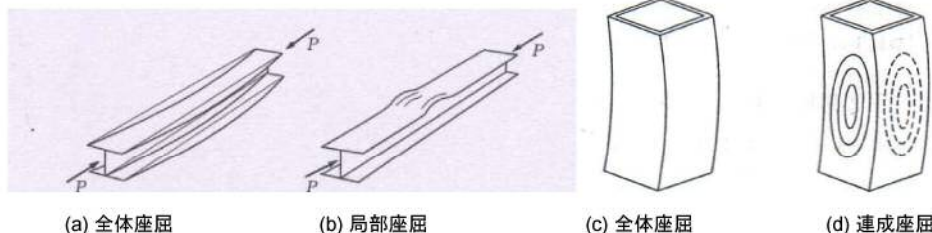
検討方針

- (1) 国内外の設計基準および研究論文などに関する調査
- (2) 斜ケーブルの安全率1.67 ($0.6\sigma_B$) の根拠の解明
 - 鋼線の材料特性に相違はない
 - 防錆技術やソケット構造にも相違はない
 - 斜ケーブルの死荷重と活荷重の応力比が異なるのか？
- (3) ケーブル安全率の低減化に向けた検討
 - 斜張橋の**斜ケーブルを取替前提**とすれば、安全率の低減は可能か。
 - 安全率1.67で設計した斜ケーブルは、終局限界状態に対して、つまり1.7 (D+L) の照査において降伏点を超えており、**ケーブルの降伏を許す設計が可能か。**
 - **ケーブル鋼材の降伏点**は、エクストラードズド橋では0.2%永久伸び耐力、斜張橋、吊橋では、0.7%および0.8%全伸び耐力を採用しており、その考え方の整理が必要。



この安全率は、部分係数法からの説明が必要？

WG⑥ 局部座屈と全体座屈の連成座屈の評価法



- ◆ 全体座屈と局部座屈の連成座屈が生じる部材の挙動は実際複雑であり、部材の耐力評価はかなり困難
- ◆ 部材の全体座屈強度に対する構成要素の局部座屈の影響を厳密に評価し、設計に反映させることは困難

【WGの目的】

積公式を用いた連成座屈評価式は実際の挙動と乖離が大きいため、FEA等を利用して実状に合った合理的な連成座屈公式の検討、提案を行う。

検討方針

- (1) 諸外国の設計基準の連成座屈設計法に関する調査
 - AISC, AASHTO, EN, DAST-012, DIN18800
- (2) 国内外の研究論文調査
- (3) 連成座屈設計法の精度比較
 - 積公式
 - 有効幅を考慮した細長比法
 - Qファクター法
- (4) 連成座屈解析
 - 柱の細長比パラメータと板の幅厚比パラメータ
 - 部材全体系の初期たわみ
 - 板要素の初期たわみ
 - 応力～ひずみ関係の非線形性
 - 残留応力

新しい連成座屈設計法の提案？

全体座屈と局部座屈の連成座屈の評価方法の一例

(1) 積公式(道路橋示方書)

$$\sigma_{ca} = \sigma_{cag} \cdot \frac{\sigma_{cal}}{\sigma_{ca0}}$$

σ_{ca} : 連成を考慮した柱の許容応力度
 σ_{cag} : 連成を無視した柱の許容応力度
 σ_{cal} : 構成板・パネルの上限値
 σ_{ca0} : 降伏点

(2) 有効幅を考慮した細長比法(DAST-Richtlinie 012(1980))

板座屈の発生による柱の**有効断面**の低減を考慮して、部材の細長比を修正し、この修正細長比に対する柱強度を連成座屈強度とする。

(3) Qファクター法(AISC(1969))

局部座屈を生じるような柱と同断面の短柱強度 σ_{cu} をはじめに求め、これをその柱の仮定の低減された降伏応力 $Q\sigma_y$ と考えて、既存の柱設計強度式の降伏応力 σ_y を $Q\sigma_y$ に置き換えて設計式として用いるものである。

$$Q = \frac{\sigma_{cu}}{\sigma_y} \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma}{\sigma_y} = Q \cdot f(\sqrt{Q} \cdot \lambda)$$

Qファクター法

18

道路橋示方書Ⅱ鋼橋編

～許容応力度設計法～

鋼橋の設計法 ～その歴史変遷、最新情報から未来の設計法まで～

道路橋示方書の変遷

- 1886年 国県道の築造標準(内務省令)
- 1909年 道路構造令および街路構造令(内務省令)
- 1926年 道路構造令に関する細則案(内務省土木局)
- 1939年 鋼道路橋設計示方書案(内務省土木局)
- 1956年 鋼道路橋設計示方書(建設省道路局長)
- 1964年 鋼道路橋設計示方書
- 1965年 合成ゲタ設計施工指針
- 1966年 鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針
- 1972年 鋼道路橋設計示方書(統合)
- 1972年～1980年 道路橋示方書 I 共通編、
II 鋼橋編、
III コンクリート橋編、
IV 下部構造編、
V 耐震設計編

21

- 1993年 道路橋示方書
 - A,B活荷重
- 1994年 道路橋示方書
 - ケーブル安全率
- 1996年 道路橋示方書
 - 兵庫県南部地震、適用板厚100mm
- 2002年 道路橋示方書
 - 疲労、耐久性、設計の合理化(耐震設計など)



- 2012年 **道路橋示方書**
 - 疲労耐久性の向上、設計の合理化、施工品質の確保



22

基準類

■ 構造令(法令)

● 示方書(通達)

- ・ 規準、基準
- ・ 便覧
- ・ 指針
- ・ 内規



H24改定経緯と主な改定項目

前回改定以降, 進められてきた調査研究による知見の反映

1. 疲労耐久性の向上
 - (1) 疲労設計に関する規定化
 - (2) 鋼床版の構造細目の見直し
2. 施工品質の確保
 - (1) 溶接品質確保のための配慮事項
 - (2) 架設時の安全性の確保のための配慮事項
3. 設計の合理化
 - (1) 鋼部材の強度規定の見直し・充実
 - (2) 高力ボルト摩擦接合継手の設計の見直し

設計の合理化

3章 許容応力度

3.2 鋼材の許容応力度

- 圧縮柱の許容応力度を見直し
- アンカーボルトの許容応力度を見直し
- 摩擦接合用高力ボルトの許容力を見直し

4章 部材の設計

4.3 軸方向力と曲げモーメントを受ける部材

- 強度照査式の見直し

7章 連結

7.3 高力ボルト継手

- 厚板・多列ボルト配置への配慮事項を追加
- 「18章 施工」において無機ジンク仕様とすべり係数を見直し

(1) 鋼部材の強度規定

■ 圧縮柱の許容応力度

【背景】

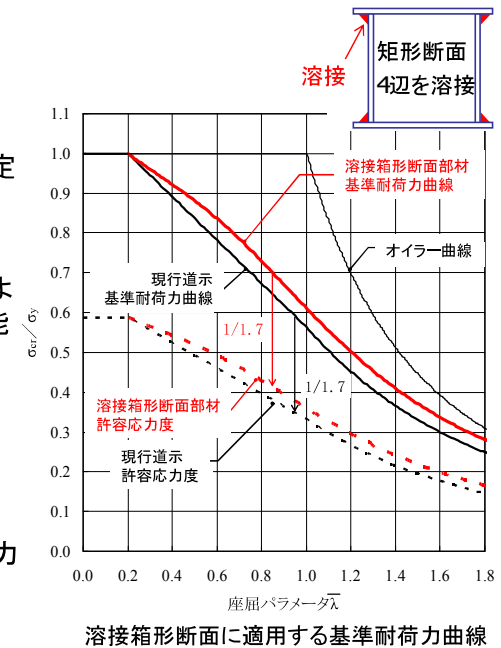
- 従来より、様々な断面形状の柱を想定した耐荷力の下限値に相当する基準耐荷力を基に許容応力度を設定。

- 断面形状に応じて強度分類することにより、より合理的な耐荷力を設定できる可能性。

【改定内容】

3.2.1 構造用鋼材の許容応力度

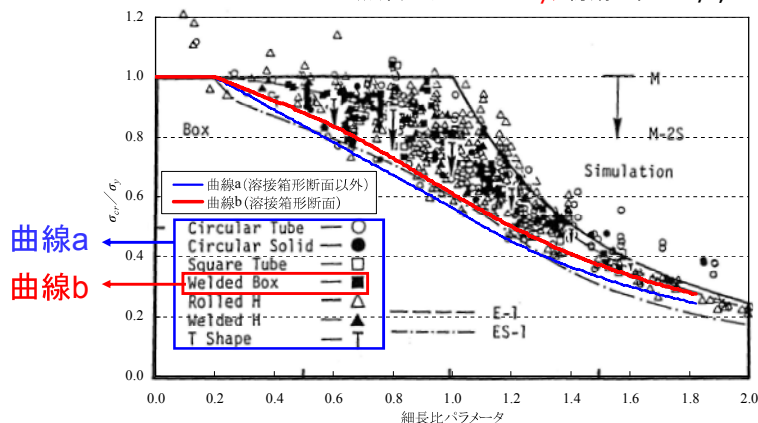
- 従来の許容応力度に加えて、適用頻度の高い溶接箱形断面に適用する許容応力度を設定



(1) 鋼部材の強度規定

■ 圧縮柱の許容応力度

- 曲線a: 従来の耐荷力曲線
(各種の断面形状を対象とした下限値相当の耐荷力曲線)
- 曲線b: 新たに設定した基準耐荷力曲線
(溶接箱形断面のみを対象とした下限値相当の耐荷力曲線)
(残留応力: $0.25\sigma_y$, 初期たわみ: $L/1,000$)



様々な断面形状の柱を対象とした試験結果と基準耐荷力曲線の関係

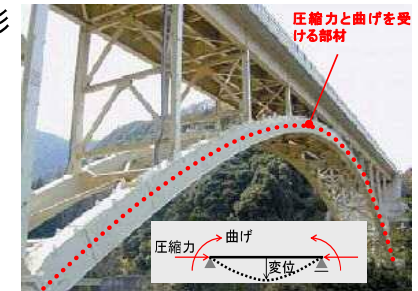
(1) 鋼部材の強度規定

■ 軸方向力と曲げを受ける部材の強度照査式

【改定内容】

4.3 軸方向力と曲げモーメントを受ける部材

- 部材のたわみに伴う付加曲げモーメントの影響(微小変位理論に基づく解析を前提)に対する係数を見直し。
- 有限変位理論により断面力を算出する場合には、付加曲げモーメントの影響を考慮しないことを規定。



強度照査式

$$\text{改定前: } \frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}\right)} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{baoz} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}}\right)} \leq 1$$

$$\alpha_o = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}} = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{ey}/1.7} = 1 - \frac{\sigma_c}{0.588\sigma_{ey}}$$

$$\text{改定後: } \frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy} \alpha_y} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{baoz} \alpha_z} \leq 1 \quad \alpha_y = 1 - \frac{\sigma_c}{0.8\sigma_{ey}}$$

⇒ただし、有限変位理論によって断面力を算出する場合には1

(1) 鋼部材の強度規定

■アンカーボルトの許容せん断応力度

【改定内容】

3.2.3 溶接部及び接合用鋼材の許容応力度

- 従来, 施工の不確実性, 計算外の外力の機会等を考慮し, 鋼材の許容値の70%程度に低減した値を規定。
- 今回, 低減しない値に見直し。施工や外力の不確実性の影響は, 具体の照査の際に適切に考慮。

(N/mm²)

鋼種	SS400	S35CN	S45CN
許容せん断応力度	60 80	80 110	80 110

※関連する編におけるアンカーボルトの扱い

支承部, 落橋防止構造においては, 施工品質の確保への配慮, 引張・せん断に対する照査を前提に, 一般には上記の不確実性を考慮しなくてよい。

(2) 高力ボルト摩擦接合継手

■無機ジンク仕様の場合のボルト設計

【背景】

- 構造の合理化, 簡素化を図った鋼桁の普及により, 厚板の適用事例が増加。
- 厚板・多列化した場合のボルト継手への従来設計の適用性について不明確な部分あり。
- 塗装仕様の場合のすべり係数について, 最近の研究, 塗膜管理値等を踏まえると合理化の余地あり。



合理化構造(2主桁)

【改定内容】

- 接合面を無機ジンク塗装する場合の設計法を一部見直し。
 - すべり係数を従来の0.4から0.45に引き上げ(ボルト継手の許容力の見直し)
 - 多列配置や, フィラーの配慮事項を規定



多列ボルト継手の適用事例

(2) 高力ボルト摩擦接合継手

■無機ジンク仕様の場合のボルト設計

3.2.3 溶接部及び接合用鋼材の許容応力度

- 無機ジンクを塗装する場合のボルト継手の許容力の見直し

ボルトの等級 ねじの呼び	F8T	F10T	S10T
M20	35	44	44
M22	44	54	54
M24	51	63	63

・すべり係数の見直し

項目	すべり係数
接触面を塗装しない場合	0.40
接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合	0.45

18.5.3 接合面の処理(高力ボルト)

- 塗膜管理値を踏まえ, 塗装仕様を見直し

項目	条件
接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚	30 50 μm以上
接触面の合計乾燥塗膜厚	90 100~200 μm
乾燥塗膜中の亜鉛含有量	80%以上
亜鉛末の粒径(50%平均粒径)	10 μm程度以上

(2) 高力ボルト摩擦接合継手

■無機ジンク仕様の場合のボルト設計

7.3 高力ボルト継手

7.3.1 一般

- ボルトに作用する力が不均等にならないよう, 1ボルト線上に並ぶ本数に配慮
- ボルト列数が8列を超える場合の, 高力ボルトの許容力の低減係数を提示

列数に応じた低減係数

1ボルト線上に並ぶボルト本数	低減係数
8本以下	1.00
9本	0.98
10本	0.96
11本	0.94
12本	0.92

7.3.15 フィラー

- フィラーの厚さに関する配慮事項を追加(厚い側の母材板厚の1/2程度以下で, かつ25mm以下を推奨)

道路橋示方書Ⅱ鋼橋編

～性能設計法への改定～

鋼橋の設計法 ～その歴史変遷、最新情報から未来の設計法まで～

性能設計法の導入に向けた取り組み

・関連動向

1998年 ISO2394「構造物の信頼性に関する一般原則」

性能照査型設計の推奨

1999年 鉄道構造物等設計標準 性能規定化

2000年 建築基準 性能規定化

2002年 国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」



2002年 道路橋示方書改定（性能規定化に向けた第一段階）



改定方針の決定（信頼性の概念、性能規定型の踏襲、標準解の充実と逐次反映）

- 性能が満足されることを合理的に説明できる性能規定化
- 要求性能、限界状態の明確化
- みなし仕様（標準解）の充実

性能設計法の導入に向けた取り組み

2012年 道路橋示方書改訂（性能規定化に向けた第二段階）



- 部分係数法の導入
- 要求性能のさらなる具体化
- みなし仕様の充実



2012年末 道路橋示方書（部分係数版）中間とりまとめ

- 要求性能に対応した照査体系への転換
- 信頼性に基づく照査手法の評価と部分係数の設定

2014年 道路橋示方書（部分係数版）の通達か？

鋼橋の未来に向けた 構造設計法

鋼橋の設計法 ～その歴史変遷、最新情報から未来の設計法まで～

性能設計体系への転換

- 要求性能を満たす解の拡大
 - 技術開発
 - 幅広い選択肢
 - コストダウン
- 国際化への対応の強化
- 鋼構造の多分野に対する競争力の強化
- ✓ 構造性能の評価法
- ✓ 要求性能の照査方法
- ✓ 構造物に対する権限と責任のあり方
- ✓ 設計者や施工会社の保証契約

安全性に関する信頼性の確保
持続可能で的確な維持管理・更新
性能規定化体系の完成系へ

37

性能設計体系への転換

- 既設構造物の合理的な補修・補強
 - 材料特性、環境条件(現交通量、塩害、風など)は既知
 - 補修設計での想定する設計供用期間の活荷重などは変化するか？
- 耐久性(時間軸の性能)の明確化
 - 耐久性能の新しい設計体系の構築
 - これまでは強度保証であり、時間軸の性能検証は？
 - 劣化・損傷を見つけやすい構造？
 - 取り換え可能な構造？
 - 維持管理・交通規制の確実性および容易性
- 技術開発に対する要求性能の明確化
 - 抵抗側の評価法の構築
 - 接合・連結部の強度、耐久性の照査
 - 部材単位(骨組モデル)の性能照査

38

橋の耐荷性能

- 永続作用や変動作用が支配的な状態
 - 橋全体としての性能照査は、個々の部材に対して強度(または終局強度)と機能(または降伏強度)のそれぞれに対して余裕度を照査
- 最初に降伏する部材、最初に破壊する部材の安全性を担保することで橋全体系の限界状態を超えないことを満足する
- 様々な降伏比を有する部材を統一的に扱う

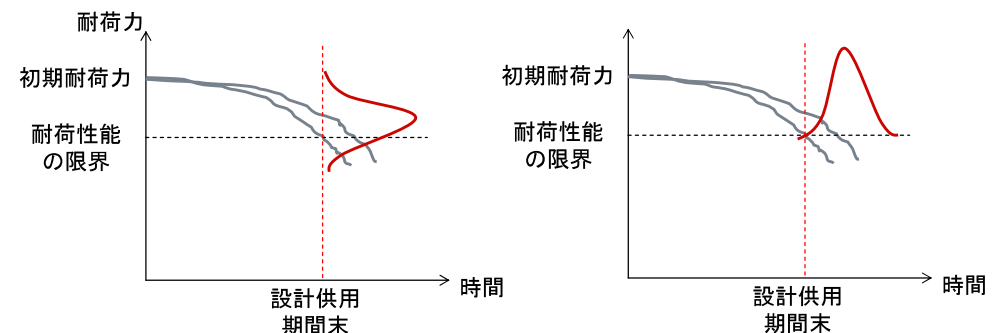
橋の状態 設計で考慮する状態	橋全体として部分的にも損傷が生じておらず、かつ橋としての機能が損なわれていない状態	橋全体として部分的にも損傷が生じているが、橋としての機能に及ぼす影響は限定的であり、速やかな機能回復が行いうる状態	橋として落橋など致命的ではない状態
永続支配	適当な確からしさを確保し、満足する	適当な確からしさを確保し、満足する	適当な確からしさを確保し、満足する
変動支配	適当な確からしさを確保し、満足する	適当な確からしさを確保し、満足する	適当な確からしさを確保し、満足する
偶発支配	—	—	適当な確からしさを確保し、満足する

道路橋示方書(部分係数版)中間とりまとめより抜粋

39

橋の耐久性能

- $\gamma \times (\text{劣化を考慮した耐荷力}) > \text{耐荷性能の限界}$
設計供用期間末における残存耐荷力や劣化を予測する必要性 → できるか？
- $\gamma \times (\text{耐荷性能が保持できる時間}) > (\text{設計供用時間})$
設計の前提条件の保持時間(腐食代がなくなるまでの時間、塩分が鋼材に到達する時間、累積損傷によりき裂が生じるまでの時間)で置き換えられる



40

H24道路橋示方書(共通編)の改訂における道路橋の維持管理(1)

1.3 設計の基本理念

□ 維持管理の**確実性**と容易性

- 設計段階で予定する維持管理行為に対する容易さ
- 点検などの維持管理が困難な部位をできるだけ少なくするなど維持管理できることの確実性
- 設計段階から、将来の劣化損傷、被災などの事象に対して、できるだけ維持管理できない箇所や部位、構造を避けることに配慮することを規定
- 設計段階から維持管理の方法や必要となる維持管理設備について、可能な範囲で、具体的に想定して、配置計画や構造設計に反映すべきことを明記

41

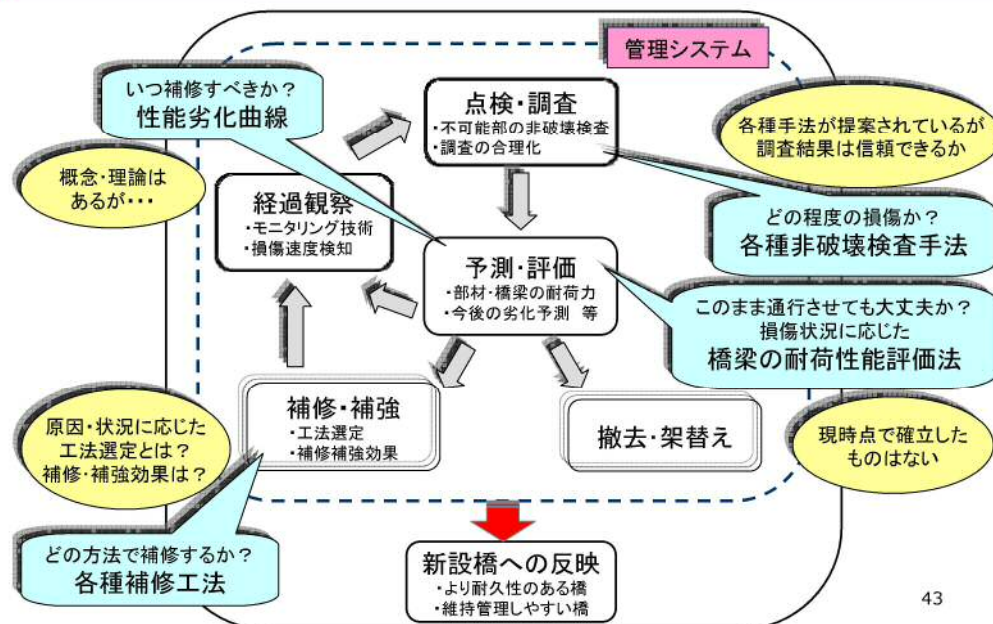
H24道路橋示方書(共通編)の改訂における道路橋の維持管理(2)

1.6.2 構造設計上の配慮事項

- 一部の部材の損傷や異常によって、橋全体の性能が大きく損なわれることの影響を設計段階から念頭に置くとともに、致命的な状態を回避できる対策について設計で考慮する
 - 構造全体としての**補完性または代替性**の確保
 - 発散振動等の自励的で制御困難な現象の防止
 - フェイルセーフ機能の付与
- 供用期間中に更新が想定される部材については、予め更新が**確実かつ容易**に行えるように配慮

致命的な状態になり得るかどうかに対する統一的な評価基準に基づく調査手法は確立されていないため、設計で考慮することが望ましいことを定めている

維持管理に必要な技術開発の現状



43

既設構造物の残存耐力と性能回復評価のための構造解析

□ 既設構造物の解析モデルにおける配慮事項

- 作用(荷重状態)の変化
 - 利用形態の変更や環境条件(物理的、化学的、生物学的性格)の変化
 - 静的解析(静水圧、基礎変位、等)→動的解析(地震動、衝撃力、等)。
- 構造全体および部材の変化
 - 全体形状の変化(嵩上げ、平行移動、等)。
 - 部材レベルでの変化(添接、接着、交換、等)。
 - 補剛部材取付けによる断面形状変化
- 境界条件の変化
 - 支承部の変化、基礎の浮上り、構造物の一部が接触あるいは接地等。
- 時間依存型の作用による劣化
 - 腐食による板厚減少
 - 疲労によるき裂進展
- 経年に伴う材料物性値変化および地盤の変化

モデル化の不確実性の低減

44

1	Abaqus (米国、現在仏)	・MARCの開発者らによって新たに開発された代表的な汎用解析コード ・耐力力解析、座屈後解析などの非線形解析において定評がある。原子力分野でよく用いられる。 ・ツリー形式・エンティティベースの専用プリポストプロセッサを有するAbaqus FEAが開発されている。 ・弾性解析のみ利用可能なStudent版を安価に入手可能である。 ・部材の発生・消滅を表現できる時間関数を有している。
2	MSC. Marc (米国)	・非線形解析を対象として早期に作られた汎用解析コード。 ・専用プリ・ポストプロセッサとしてMENTATが標準で用意されている。
3	ANSYS (米国)	・ASMEの原子力品質保証水準を黎明期から満たしており、原子力分野での解析実績が豊富。
4	NASTRAN NASA(米国)	・代表的な汎用解析コード。線形解析の豊富なオプションで、幅広いユーザの支持がある。 ・MSC. Nastran, NX Nastran, NEi Nastranの3派があり、互換性は完全にはないため注意が必要である。後者2派は、それぞれプリ・ポストプロセッサとしてFemap, SolidWorksと連携を強化している。 ・ファイルの授受形式として用いられることが多い。
5	ADINA M.I.T.(米国)	・MITのK.J.Bathe教授が開発している汎用解析コード。構造、熱、流体と幅広い分野をカバーする。 ・非線形動的解析に定評が高い。 ・エンティティベースのプリ・ポストプロセッサが用意されている。 ・近年までソースコードが入手可能であったが、現在は実行形式のみの提供である。なお、解析モデルの自由度を制限したStudent版が安価に入手可能である。 ・部材の発生・消滅を表現できる時間関数を有している。
6	DIANA (オランダ)	・オランダの公的機関TNOが土木・建築専用コードとして開発した。コンクリートの埋込み鉄筋やひび割れ挙動を考慮できる。 ・対話型プリ・ポストプロセッサiDIANAが用意されている。 ・DIANAをソルバーとして、MIDAS社(韓国)からプリ・ポストプロセッサ一体型の解析統合環境を販売。
7	ADVENTURE 東大(日本)	・ソリッド要素を基本とする大規模構造解析コード。 ・従来シェル要素で解いていたような問題を、ソリッド要素でモデル化し大規模並列計算(1000万自由度クラス)で解こうとするもの。

土木学会鋼構造委員会腐食した鋼構造物の性能回復技術検討小委員会報告書(2013)より抜粋

45

望ましい解析データの保存形態

- 維持管理にFEM解析値を活用する上で、モデル作成作業が最大のネックであり、モデル作成を効率化する効果は大きい。
- 維持管理業務の特殊性に鑑み、作成した解析データは担当者が代わっても、将来にわたり同じデータが使用できるよう、保存方法と将来の利用が容易なわかり易いデータ構成に留意すべきである。
- 望ましい解析データの一つの保存形態として、以下のデータをエクセルに保存する。(腐食の場合)
 - (1) 構造物の代表的構造諸元
 - (2) 設計板厚, 部材断面, 設計荷重
 - (3) 計測値(残存板厚, 材料物性値, 荷重変化に伴う発生ひずみ, 振動計測値)
 - (4) 補修経歴

46

リダンダンシーの活用

- 冗長性(余計に大きい、多い、長い)
補完性または代替性(道示の表現)
 - その時点や部分だけをとれば余計であるが、将来にわたっての時間や対象とする事物を包含する空間やシステム全体にとって、必要最小限としてしまうと、全体として充分機能しなくなり、場合によっては陳腐化したり、破綻したりという、むしろ全体にとって望ましくない状況に至ることを回避するための余裕
- すでに存在するリダンダンシーの活用
- 将来のためのリダンダンシーの確保(不確定要因に対する安全余裕度)
- AASHTO
 - 荷重伝達経路リダンダンシー(Load Path Redundancy: 荷重伝達経路の多重化(荷重分担可能な多重並列部材))
 - 構造リダンダンシー(Structural Redundancy): 外的不静定構造
 - 内的リダンダンシー(Internal Member Redundancy): 部材の冗長性(組立部材、多要素の構成断面)

47

リダンダンシーの活用

- FCM:破壊危険部材
 - 橋梁の引張部材で、部材の破断が直ちに全体の崩壊に繋がるもの
 - 設計者は、計画時にFCMsを明確にする
 - FCMsは、粘り強い鋼材、溶接性、厳密な検査を要求
- FCMにリダンダンシーを与えることで全体の効率的な維持管理を可能にする?
 - 予測不能な箇所や未知要因により致命的な損傷は生じる可能性に対応
- FHWA(2012.6.20)
 - 設計・施工において、FCMsの認定には荷重伝達経路リダンダンシーを考慮
 - 研修点検において、仮想クラック解析による構造リダンダンシーを考慮

48

海外における動向

- ISO2394
 - 次期改定において、リスク評価、構造ロバスト性の概念を導入
- ISO13822
 - 既存構造物の性能評価
- AASHTO LRFR
 - 新設では $\beta_T = 3.5$ 、既設橋では $\beta_T = 2.5 \sim 3.5$
 - 橋梁の損傷状態に対して低減係数(0.85~1.0)の検討
 - 構造形式の相違によるリダンダンシー係数(0.85~1.0)の設定の検討
 - 大型車交通量に応じた活荷重係数(1.4~1.8)の設定の検討
- Eurocode
 - 第2世代Structural Eurocodeの検討
 - 既設構造物の評価の導入

49

海外における動向

ISO/TC167: 鋼構造とアルミニウム構造

- ISO10721-2: 鋼構造物 その2 製作および架設(50頁)
ISO Draft案(=EN-1090-2(2008))
 - 「鋼構造及びアルミニウム構造物の施工 その2鋼構造物に対する技術的要求仕様」(200頁)
 - 溶接、ファスナー、架設、表面処理、幾何学的許容誤差、検査・試験
- ISO10721-1: 鋼構造物 その1 材料と設計
現在改定の動きはないが??

↓

P-Members: 16か国
ISO/TC167: 2011年から参加(年2回)
JSSC国際委員会
国際基準整合化WG(杉山委員長)

アンブレラコード化

50

今後の設計法について

- 2011.3.11の東日本大震災における最大の外力(津波、地震動)を受けて、設計外力の考え方も変更か
 - 設計外力ばかりでなく、社会インフラの役割を考慮した「減災」「構造物の粘り強さ」の導入
 - 設計荷重(偶発作用)を超える作用に対して、構造物の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発・整備
 - 変形しつつも崩壊し難い「粘り強い構造」
 - 設計荷重で設計れた断面に、費用効果に配慮しつつ、補強、すなわち段階的かつ付加的に対策を講じて、「粘り強さ」を確保(実験や数値解析による確認必要か)
- 変状予測 → 減災効果
 ■ 終局状態想定 → 復旧難易度

51

今後の設計法について

- 道路橋、鉄道橋、港湾構造の設計基準の改訂
 - 性能照査型設計(部分係数形式+限界状態設計法)

座屈設計、耐震設計、耐風設計、耐久設計の連携

- 座屈設計=強度設計
- 耐震設計=強度設計+じん性設計
- 耐久設計=維持管理性+リダンダンシー

- ↓
- 部材単位設計から全体構造設計への変化?
 - FEM解析の適用
 - 非線形解析の適用

52