

第3回 鋼構造技術継承講演会
「経験豊富な先人に学ぶ次世代への承継技術」
配布資料

平成27年12月3日

土木学会 鋼構造委員会

鋼橋メンテナンスはやりくりのマネジメント

橋守支援センター

BMC

阿部 允

今回のテーマとねらい

最近、公共施設の老朽化の進行でメンテナンスの重要性が認識されるようになった。しかし、鉄道は道路に比べ橋梁の高齢化が2~30年早く、現在、道路で抱える課題は相当早い時期に始まっていた。当時を振り返ると、メンテナンスは後追いの対応だけでは中々改善できない。むしろ、意に反して負担が増大することもあった。そこで決め手になったのが「予防保全」への切り替えと「やりくりのマネジメント」の導入であったように思う。特に、鋼橋はその特性を活かせば大きな効果をもたらすことも可能である。ここでは、そこでの経験を紹介するとともに、これからのメンテナンスの役割と、そこで必要になるとと思われる技術について触れる。

鋼鉄道橋におけるメンテナンスの足取りと活動歴

- 高度成長後のメンテナンス（国鉄、1970年代）
 - ・スクラップ&ビルド中心
 - ・事後保全によるメンテナンスコストの削減
 - ・要員削減を目指す技術基準の構築、マニュアル化

- 鉄道の高度化と財政の悪化（国鉄、1980年代）
 - ・スピードアップ、省力化
 - ・重大事故・災害対策（疲労対策など）
 - ・老朽化対策（高齢化と財源不足）

- 更なる安全の強化と民営化に向けて（国鉄・JR、1990年~2000年代）
 - ・資産管理重視
 - ・事後保全から予防保全へ
 - ・インハウスエンジニアの再強化、技術基準の見直し

- ニーズの高度化、高齢橋梁の増大（現在）
 - ・資産管理重視（長寿命化、大規模改修、事業収益性の確保）
 - ・人材育成（インハウス：プロの育成、やりくりのマネジメント力、地域橋守）、脱省力化
 - ・構造物の信頼性強化（管理の効率化（スマート化）、IT化、モニタリング）

メンテナンスの今後のテーマと有効な技術

これからのメンテナンスの課題は、老朽化に伴う事故・災害の防止、メンテナンスの効率化、および既存ストックの活用になってくるだろう。メンテナンスは建設に比べ手間がかかり制約条件も多い。これは、まさに子育てと同じだ。どんなに困難でも、理にかなわなくても、途中でやめるわけにはいかないのである。そこで、その困難に取り組む戦略的「やりくり」をするための体制や技術が必要になってくる。以下、そのために必要となる主な項目を上げてみた。

また、これらは鋼橋を活かし、競争力を高めるために欠かせないものでもある。

- | | | |
|-------------|---|---------------------------|
| ○ 修繕、更新中心 | ➡ | 長寿命化（老朽化、鋼橋の寿命、目標設定）、壊す技術 |
| ○ 目視による実態把握 | ➡ | 定量的実態把握（異常と変化の早期検知、性能把握） |
| ○ 事後保全 | ➡ | 予防保全（重大化防止、防災、劣化防止、予測技術） |
| ○ 損傷診断 | ➡ | 性能診断（耐荷力、余寿命、計算に乗る） |
| ○ マニュアル作業 | ➡ | やりくり管理（メリハリ、全体最適）、スマート化 |
| ○ 請負契約的体系 | ➡ | 委任契約的体系（英知とマネジメント、責任の所在） |

取り組み事例の紹介

- **新幹線鋼橋の疲労：**
頻発していた鋼橋の疲労対策
事後保全から予防保全へ、インハウスエンジニアの強化、管理の処方箋の構築（カルテ）
- **第三セクター鉄道の活性化**
廃線回避のための延命化 負担になっていたコストと財源確保の改善と、不安視されていた老朽化による架け替え負担からの解放
・余寿命診断、管理の効率化、重大事故・災害防止策および重大化防止策の構築
- **ゴルフ場橋梁の長寿命化と管理の効率化**
心配していた構造物の更新負担に対し、性能診断の導入で実態把握し延命化を実現、重大事故防止策（リダンダンシー確保とFCM把握）、効率的管理体制の構築

まとめ

メンテナンスの役割は、変化する要求性能を満足させ続けることと、資産の目減りを防ぐ活動といえる。また、子育てと同様に、すでに供用中ということで、出来が悪いとか財源が厳しいからといって途中で放棄はできない。そこで「やりくり」のマネジメントが必要になる。

「やりくり」のメンテナンスは個々の特性や制約条件を十分考慮する必要がある。そのためには、損傷の把握だけでなく、性能としての把握も必要になる。また、それらはより定量化することで実態把握の精度を上げることも必要である。「鋼」はそれが得意な分野でもあるといえる。

今後は、「事後保全」から「予防保全」への転換が要件になってくるだろう。そして、予防保全は「劣化防止」だけでなく「安全」や「便益」の確保を含めた取り組みとすることで本来の長寿命化を実現できる。そのためには、これまでのマニュアル仕事から、将来見通しを立てた戦略的「マネジメント」の導入が不可欠だ。（コミッションング）

併せて、結果責任のとれるインハウスエンジニアの育成が要件となる。即ち、メンテナンスは「愛情と責任感」をベースに、「理性」ではなく「英知」による取り組みができるプロの育成が急務、特に、インハウスエンジニアの強化が決め手になってくるだろう。

鋼橋のメンテナンスは やりくりのマネジメント

平成27年12月3日

NPO橋守支援センター 理事長
阿部 允

鋼橋メンテナンスの足取りと活動

- ・ 高度成長後のメンテナンス(1970年代)
スクラップ&ビルド、事後保全による対策とコスト削減、
要員削減のための技術基準(マニュアル化)
- ・ 鉄道の高度化と財政の悪化(1980年代)
スピードアップ、老朽化対策、財源不足、省力化
- ・ 安全強化と民営化に向けて(1990~2000年代)
予防保全強化、資産管理重視、インハウスエンジニアの再強化
- ・ ニーズの高度化と長寿命化対策(現在)
信頼性強化、大規模改修、管理体制のスマート化(プロと地域橋守)

今後のテーマと有効な技術

- ① 長寿命化と壊す技術:
老朽化と鋼橋の寿命、活線施工、更新技術
- ② 実態把握の高度化:
異常と変化の早期検知、性能把握
- ③ 予防保全重視へ:
重大化防止、防災強化、劣化防止、予測技術
- ④ 性能診断力強化:
耐荷力、余寿命、走行性などより定量的に
- ⑤ やりくりのマネジメント:
メリハリ、全体最適、マネジメントの導入、スマート化
- ⑥ 請負契約から委任契約へ:
責任の所在とインハウスエンジニアの強化、プロの育成

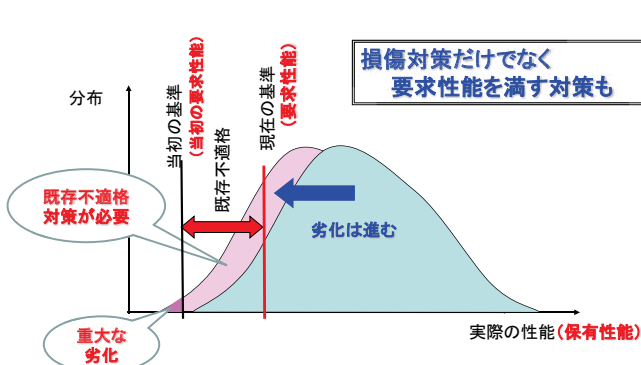
鋼橋150年寿命について

- 概念的に橋の寿命は50年程度としている
- 荒廃に対する実態調査から(鉄道橋)
 - ・ 鋼鉄道橋の平均経年は約70年
 - ・ 荒廃に対する実態調査から(約8千橋)
鋼鉄道橋の余寿命は70~90年

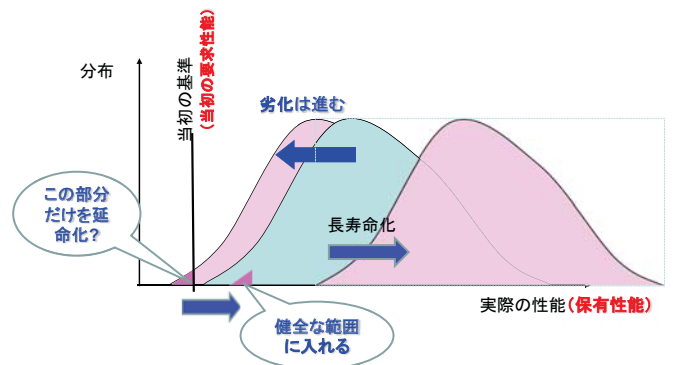
結論

鋼橋の寿命は実質的に150年程度といえる
経年の影響は受けるが「手当」しただいで寿命は決まる
メンテの程度で大きく寿命は左右される
お金をかければ延命効果は期待できる

経年劣化、既存不適格

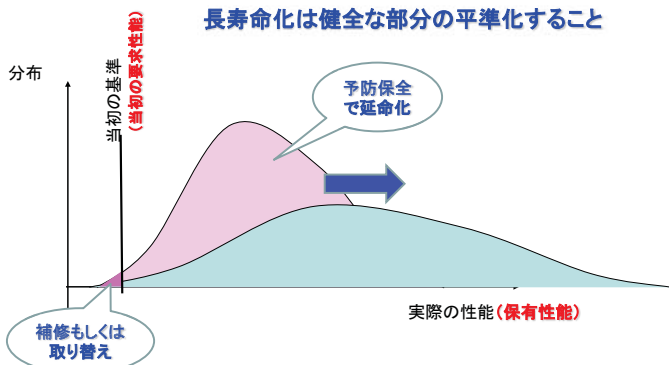


経年劣化による性能低下と長寿命化？



長寿命化は健全部の平準化

長寿命化は健全な部分の平準化すること



性能規定で言う「健全度」とは！

維持管理標準：構造物に定められた要求性能に対し、当該構造物が保有する健全さの程度

健全度 = 1 - 損傷度 ?

「健全度」とは、初期状態を「1」とした時から「損傷度」を引いたもの

健全度 = 保有性能 / 要求性能

「健全度」とは要求性能を満足させる度合い

損傷診断から保有性能診断へ

損傷・劣化診断

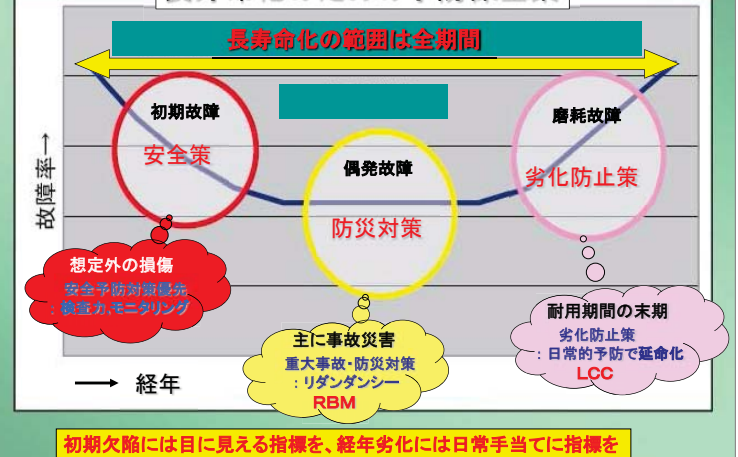
損傷があるか：「病気」や「怪我」

- ① 緊急性
- ② 原因の究明
- ③ 措置の提案

保有性能診断

- ① 安全性：耐荷力、耐震性
- ② 耐久性：丈夫か、余寿命は
- ③ 使用性：乗り心地、便益
- ④ 冗長性：復旧性、リダンダンシー

長寿命化のための予防保全策



予防保全での取り組み(ゾーニング)

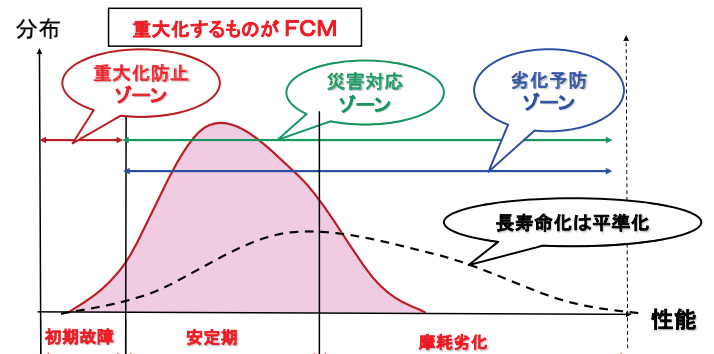
施設設備を常に当てにできる状態に保つこと

安全の確保：重大損傷の防止(FCM)
リダンダンシーの確保

脆弱性の解消：防災対策とBCP

耐久性強化：劣化の防止と早期対策
身近でこまめな対応

性能水準でのゾーニング



重要破壊部材

FCM: Fracture Critical Members,

米国のAASHTO LRFD基準

破壊すると橋梁の崩壊や機能不全を招く
恐れのある部材(米国では引張り部材としている)

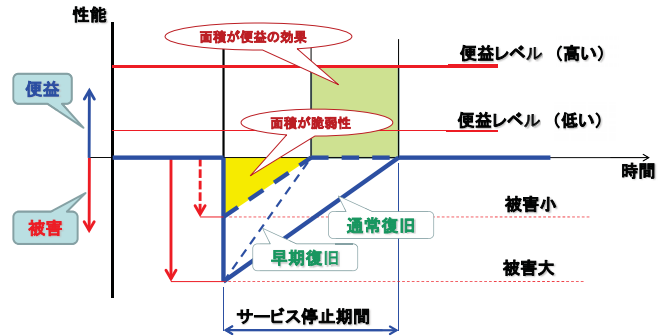
FCMを有する橋の設計、製作、維持管理の安全水準を規定化

米国のAASHTO FCMを持つ橋の検査は

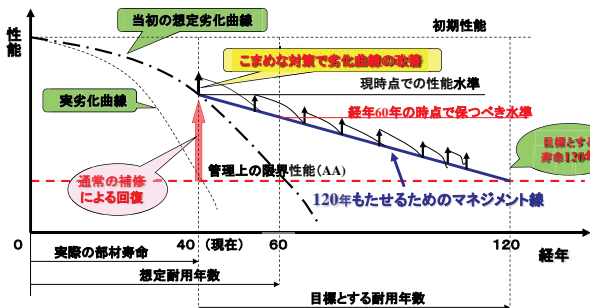
- 近接目視(Hands-on Inspection)を義務付け
- 検査費用: FCB以外の200%~500%と査定

脆弱性のマネジメントモデル

- ・脆弱性は小さい方がよい
- ・サービス停止時間も短い方がよい



延命化のマネジメント線図



橋の寿命は橋が決めるのではなく人が決める

「劣化を予測して直すのではなく」、「目標とする性能水準」を設定して、検査した劣化に対しこまめに手当をする」

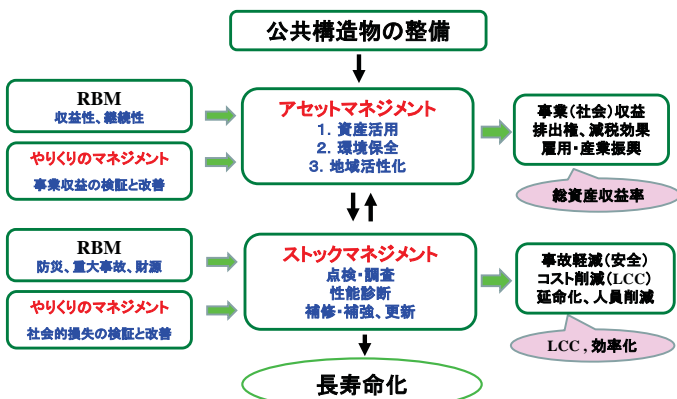
マネジメントでは

- ・ 損傷対策 : ストックマネジメント
- ・ 脆弱性対策 : リスクベースマネジメント
- ・ ストック効果 : アセットマネジメント

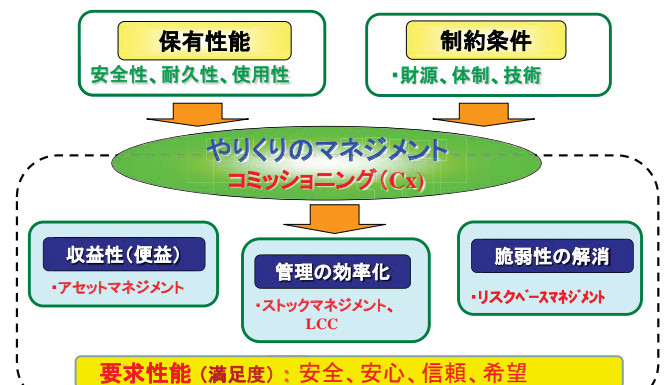
この活動にはCxの導入を

Cx: コミッシュニング

橋梁の長寿命化のマネジメント体系



やりくりのマネジメントの体系



「やりくり」のマネジメント

いろいろな制約条件のもと、
その時点で責任もってできることを
確実に実施するためのマネジメント

「理性」から「英知」へ

理想は意識しつつ、今できることの最善を尽くす
また、徹底した信頼性の追求は効率化につながる

事例紹介

○ 新幹線鋼橋の疲労対策

重大な損傷としての疲労亀裂、検査しづらい、米国ではFCM
総点検で見つからない恐れ、予防保全、検査力の強化、カルテ

○ 第三セクター鉄道の活性化(いすみ鉄道)

赤字路線、平均70年超え、取り換え負担
上下分離へ、黒字転換、検査の効率化実現

○ ゴルフ場橋梁の延命化と人材活用

放置状態で40年、地震による被害警備、劣化は進む
診断で取替不要、リダンダンシーの確保、管理の処方箋作成、

疲労損傷への取り組み

— 予防保全で30年間疲労事故ゼロ —

1. 予防保全への移行

事後保全から予防保全で発生いを制御
重大化を防ぐことを重視、FCMの抽出

2. インハウスエンジニアの育成・強化

40人の専門家を育成(性能診断、効果的対策
工法の開発、損傷の原因究明、カルテの更新)

3. カルテの構築で人材育成と技術の蓄積

処方箋の構築、職員の橋守育成、専門家との連携

いすみ鉄道の事例

第三セクタ鉄道廃線回避へ

- ① 地元の強い希望で、第三セクター鉄道として存続
- ② 収入1.1億円、経費2.6億線の赤字路線
- ③ 経年70年を超えた橋梁で、更新に30億円
- ④ 地元負担が限度を超え、廃線計画へ
- ⑤ 寿命を二倍にして存続可能に、上下分離へ
- ⑥ 地元と一体の営業努力で黒字化

実態把握

1. 専門家による性能診断(実態把握)

定量的診断で性能把握(安全性と余寿命)

2. FCMの抽出

致命的損傷(FCM)の抽出
リダンダンシーの把握と重点検査箇所の設定

3. 制約条件を踏まえた措置の検討

制約条件の把握(人材、財源、営業運転、法規制)
橋守カルテ(管理の処方箋)、専門家との連携

やりくりの整理表(ストックマネジメント) ～目標水準の設定と整理の～事例

| 要求性能 | 要求水準 | 優先度 |
|------------------|----------------|-----|
| 安全性 | 耐荷力保持 FCM対策 | 1 |
| 耐久性(LCC) | 150年寿命 | 1 |
| 使用性 (利便性) | | 4 |
| 復旧性 (リダンダンシー) | 脆弱性:落橋防止対策 | 1 |
| 施工性 | | 4 |

＝優先度＝

1. 絶対条件
2. 条件付条件
3. 特長付要件
4. 標準的でない

やりくりの整理表(アセットマネジメント)
～目標水準の設定と整理の～事例

| 要求事項 | 要求水準 | 優先度 |
|------------|-----------------------|-----|
| 収益性 | 現状維持 | 4 |
| 利便性 | | 4 |
| 環境保全 | 廃棄物30%削減 排出権取引へ | 3 |
| 地域の活性化(雇用) | 地産地消で 橋守を雇用 | 1 |
| 資産(ストック)価値 | 劣化度を30%改善 寿命を2倍にする | 1 |

=優先度=

1. 絶対条件
2. 条件付条件
3. 特長付要件
4. 標準的でよい

やりくりの整理表
～やりくりの要素(制約条件)～事例

| | 制約条件 | 優先度 (重み付) | 考慮すべき要因と 工夫の方法の例 |
|-----|------------------|--------------|--|
| 資金 | 今年度予算 現状維持か以下 | 1 | 定常予算、補助金の活用、 節約、カット、用途の明確化、 効果のパフォーマンス |
| 人材 | 退職者雇用 | 1 | インハウス、専門家 職人、マネージャー、 協力会社 |
| 技術 | 専門家支援 橋守カルテ構築 | 1 | 標準、規程、マニュアル 専門技術、設計、製作、 施工、測定・計測 |
| 時間 | | 4 | 作業時間、養生時間、 工事期間、 仕入時間、運転保安 |
| 環境 | | 4 | 景観、騒音、 廃棄物、交通支障 |
| その他 | | | |

いすみ鉄道の事例

処方箋(橋守カルテ)の検証と見直し

1. 専門家による近接踏査で検査の処方箋を作成

- ・ FCM(破壊重要部材)の抽出:検査方法の提示
- ・ 重点検査項目の選定



2. FCMIについては特別メニュー(予算)で事前対策

検査のグレード、足場の要否、検査頻度などはここで示す

3. それ以外のものは「重点検査項目」として点検

橋守カルテの活用



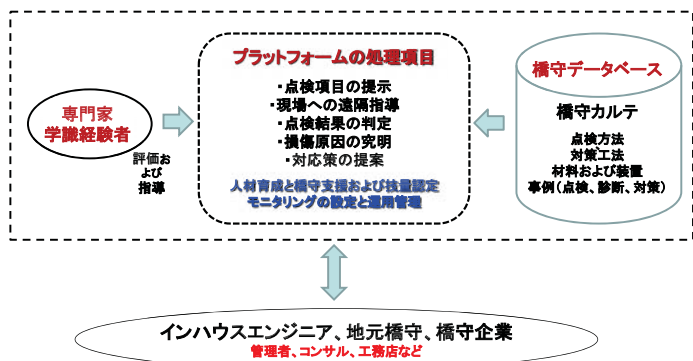
4. 10年に一度は専門家による処方箋の見直しを

- ・ 内容は、「橋守カルテ」に記載し蓄積し更新していく。
- ・ 通常業務は、インハウスエンジニアもしくは地元(OB)橋守がカルテに従って行う

要求性能

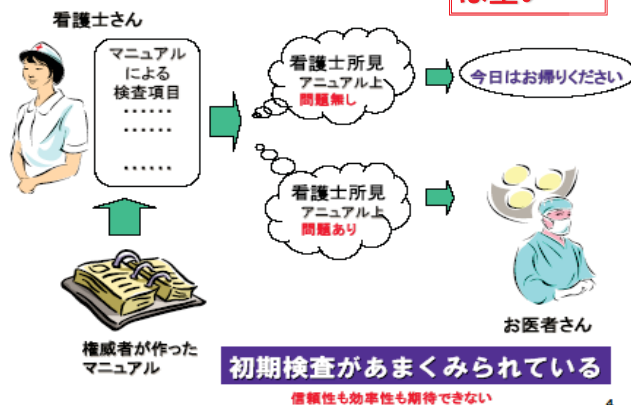
- 40年前に海岸近くのゴルフ場に建設されたラーメン橋
- 計画的なメンテナンスはほとんど行われていない
- 腐食を中心に劣化がかなり進んでいる(断面欠損も)
- さらに、3.11東北地震時に震度「5強」の地震被災
支点部の変状にやや損傷
- 安価に寿命を二倍にしたい
- 今後の長寿命化の維持管理手法を提示してほしい
橋守カルテ、メンテナンスシナリオ
- 今後の体制についての提案も
現体制の活用で

橋守支援センターの
「点検支援プラットフォーム」



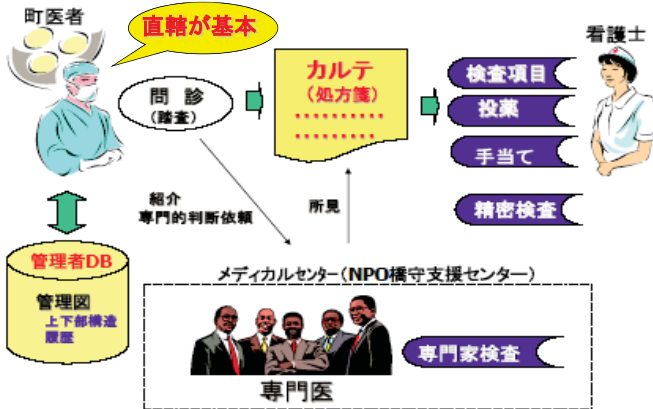
今までの検査手順でよいか

一次判定
は重い



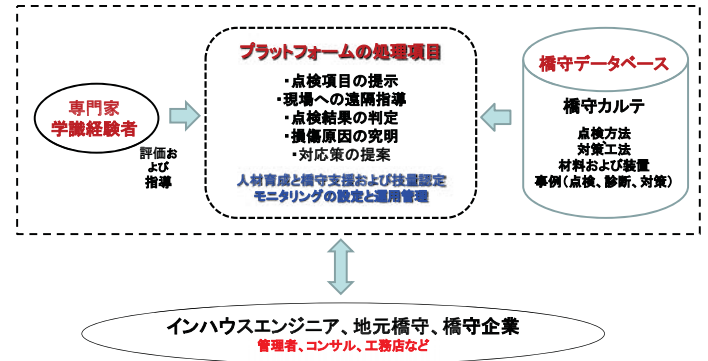
信頼できる効率的な検査体制へ

専門家との連携



5

橋守支援センターの「点検支援プラットフォーム」



「橋守」の精神

- 愛情 …… 自分のものでして
定自分の車、自分の家、自分の子供
- 責任感 …… 結果責任のとれる技術
どんなことがあっても最後は……
言い訳は解決にならない

「橋守カルテ」で個々を大切に

橋守活動の方針

1. 繕い (Repair から Retrofit へ)
自分のもの、予防保全、性能把握と満足度
 2. やりくり (マネジメント)
愛情と責任感、マネジメントで知恵の活用
 3. 分かち合い (ネットワーク)
技術と人材の共有化、知財活用で普及
- マニュアル通りに管理することではない

まとめ

- ・メンテナンスの役割は変わりうる要求性能を確保することと、資産の目減りを小さくすること
- ・やりくりのメンテナンスは、個々の特性や弱点を十分把握し、制約条件にはメリハリをつけて対応する。
そのためには「損傷」だけでなく、「性能」面からも実態を把握する必要がある。
- ・やりくりのメンテナンスの基本は「予防保全」、そして、そのターゲットは「安全」と「便益」の確保と「劣化防止」である。そこで成果を上げるためには「マネジメント」の導入が不可欠
- ・やりくりのマネジメントでは「インハウスエンジニア」の強化が決め手となる。(「愛情」と「責任感」、「理性」から「英知」へ)

鋼橋の座屈・耐震設計の高度化に関する2、3の話題



名城大学/(株)耐震解析研究所
宇佐美 勉

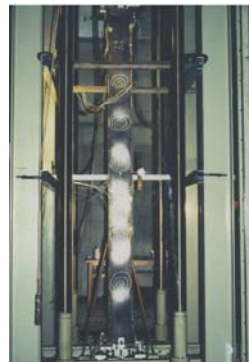
講演内容

1. 自己紹介と研究分野の概要
2. 許容応力度設計は弾性設計なのか？
3. 残留応力を初期たわみに代替え出来ないか？
4. 初期たわみの合理的導入方法は？
5. 大地震時の $2.0\epsilon_y$ の応答ひずみは許容できないひずみなのか？
6. 終わりにあたって

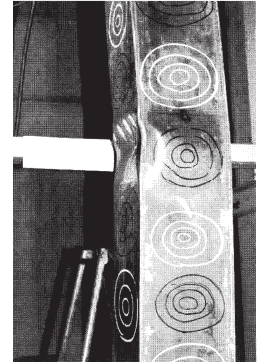
自己紹介

- 1965, 1967 名古屋大学工学部卒業, 修士修了
- 1971 米国ワシントン大学(セントルイス市)博士修了
- 1971~ 岐阜大学, アジア工科大学院(バンコック), 名古屋大学教授, 名古屋大学名誉教授
- 2006~2012 名城大学理工学部建設システム工学科教授
- 2007~2012 名城大学「高度制震実験・解析研究センター (ARCSEC)」研究リーダー
- 2012~2015 名城大学理工学部教授, 特任教授
- 2015~ 名城大学総合研究所

専門: 鋼構造, 座屈耐荷力, 耐震工学に関する実験と数値解析

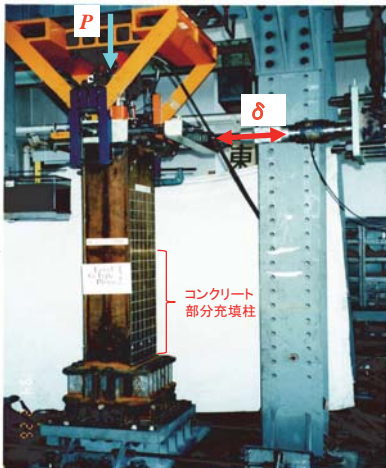


局部座屈発生



終局状態

中心軸圧縮柱の連成座屈実験(1981)



コンクリート部分充填柱



鋼製橋脚 (名高速)

鋼製橋脚モデルの耐震実験 (1991)

名城大学 高度制震実験・解析研究センター(ARCSEC)



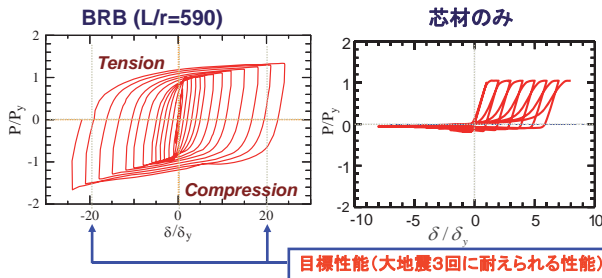
BRB供試体

制震ダンパー(座屈拘束フリース, BRB)の性能実験(2009)

BRBの性能実験



拘束材除去後の
ブレース材



編著書

話題 1

許容応力度設計は弾性設計なのか？

現行の鋼上部構造の許容応力度設計は、塑性化を許さない「弾性設計」であるとしている人は少なくない。本当にそうだろうか？

- ① 中心軸圧縮柱
- ② はり-柱(軸力と曲げを受ける部材)
- ③ 板要素

を取り上げて検証する。

レベル2地震動に対する鋼上部構造の設計 (H24年道路橋示方書・V 耐震設計編 pp.261-262)

14.2 鋼上部構造

14.2.1 耐力及び許容変形量並びに応答値を算出するためのモデル化

(解説)

鋼アーチ橋のアーチリブや鋼トラス橋の弦材、斜材や垂直材、斜張橋や吊橋の鋼製の主塔等の主要部材については、その重要性からレベル2地震動に対しても応答が割り増し係数1.7を考慮した許容応力度以下に収まるように設計するのが望ましい。仮に塑性化を許容する場合にも、既往の研究成果により提案された方法をそのまま適用するのではなく、提案方法の根拠、実験との比較による提案方法の妥当性の検証等、詳細かつ慎重に検討する必要がある。

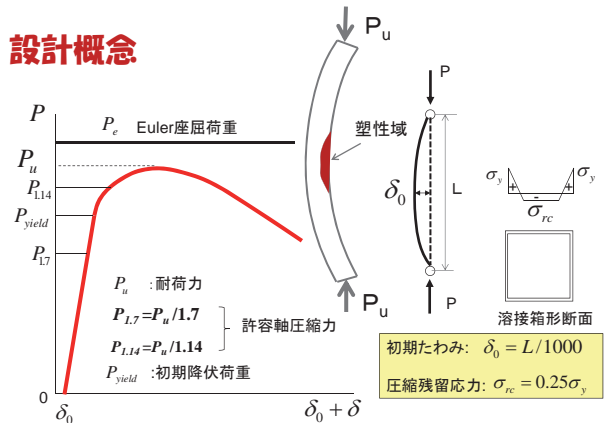
(講演者のコメント)

上の文章からは、

応答値が、割り増し係数1.7を考慮した(即ち安全率を1.0にした)許容応力度以下に収まるように設計すれば、塑性化を許さない「弾性設計」になると示方書作成母体は考えているように読み取れる。そうであれば、許容応力度設計に対する誤解を招く表現である。

中心軸圧縮柱

設計概念



設計式 (道路橋示方書)

●耐荷力 σ_u ……レベル2地震に対する限界値

$$(1) \frac{P_u}{A \cdot \sigma_y} \equiv \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = f(\bar{\lambda})$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{L}{r} \quad \text{細長比パラメータ}$$

許容応力度設計法は、 $\sigma_u, \sigma_{1.7}, \sigma_{1.14}$ を限界値とする限界状態設計法

●許容応力度

$$(2) \sigma_{1.7} = \frac{\sigma_u}{1.7}$$

安全率: 1.7 ……主荷重に対する限界値

$$(3) \sigma_{1.14} = \frac{\sigma_u}{1.7/1.5} = \frac{\sigma_u}{1.14}$$

割り増し(1.50) ……レベル1地震に対する限界値

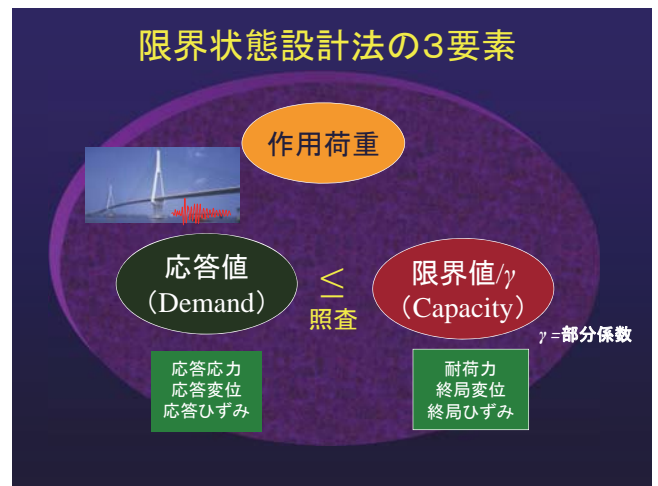
●初期降伏力 σ_{yield}

初期たわみL/1,000の柱の弾性有限変位解析から求められた最大線応力(座屈設計ガイドライン, p.83)

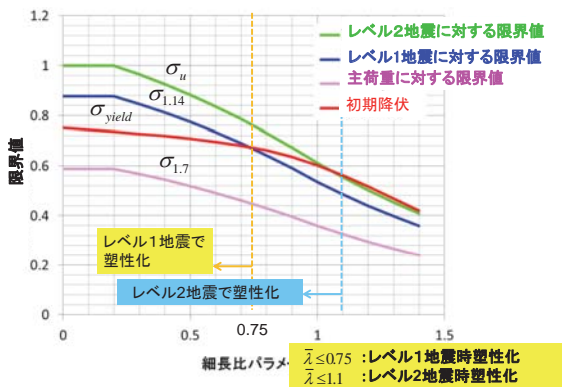
$$(4) \sigma_{max} = f(P, \bar{\lambda}) = \sigma_y - \sigma_{rc} = 0.75\sigma_y \rightarrow \sigma_{yield} = P/A$$

初期たわみL/1,000, 残留応力0.25 σ_y を持つ柱の初期降伏応力

限界状態設計法の3要素



中心軸圧縮柱の限界値の比較



はり一柱

(圧縮力と曲げを受ける部材)

はり一柱の耐荷力相関式 (面内挙動)

$$(1) \frac{P}{P_u} + \frac{C_m M}{M_y (1 - P/P_e)} = 1.0$$

中心軸圧縮柱の耐荷力
モーメント増幅係数
座屈安定限界式

$$(2) \frac{P}{P_y} + \frac{M}{M_y (1 - P/P_e)} = 1.0$$

弾性限界式
(残留応力無視)

$$C_m = 0.6 + 0.4\kappa$$

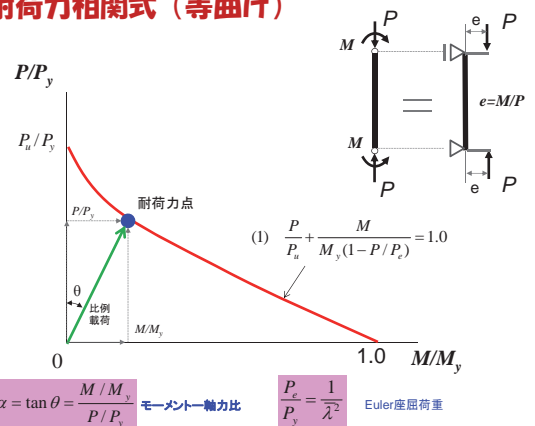
$$(-1.0 \leq \kappa \leq 1.0)$$

モーメント修正係数



Note: 式(1), (2)から求められる小さい方の荷重が耐荷力となる。
等曲げ($\kappa=1.0$)の時は、常に式(1)により決まる。

耐荷力相関式 (等曲げ)



設計式 (道路橋示方書)

●耐荷力・・・レベル2地震動に対する限界値

$$(1) \frac{P/P_y}{P_u/P_y} + \frac{\alpha \cdot P/P_y}{(1-\bar{\lambda}^2) \cdot P/P_y} = 1.0 \rightarrow \text{耐荷力: } \frac{P}{P_y} \equiv \frac{P^{bc}}{P_y} = g(\alpha, \bar{\lambda})$$

$bc = \text{beam-column}$

●許容軸圧縮力

$$(2) P_{1.7}^{bc} = \frac{P^{bc}}{1.7} \quad \dots \text{主荷重に対する限界値}$$

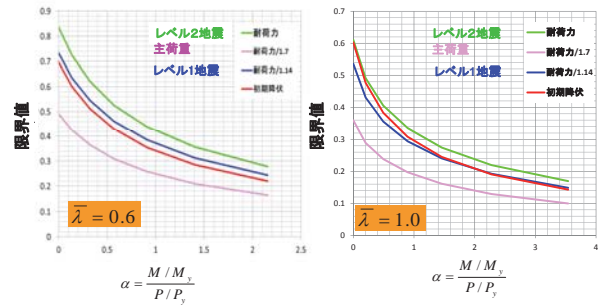
$$(3) P_{1.14}^{bc} = \frac{P^{bc}}{1.7/1.5} = \frac{P^{bc}}{1.14} \quad \dots \text{レベル1地震動に対する限界値}$$

●初期降伏力 初期たわみL/1,000のはり一柱の弾性有限変位解析から求められた最大緑応力

$$(4) \sigma_{\max} = f(P, \alpha, \bar{\lambda}) = \sigma_y - \sigma_{rc} = 0.75\sigma_y \rightarrow \text{初期降伏力: } P^{bc}$$

初期たわみL/1000, 残留応力0.25σ_yを持つ梁一柱の初期降伏力

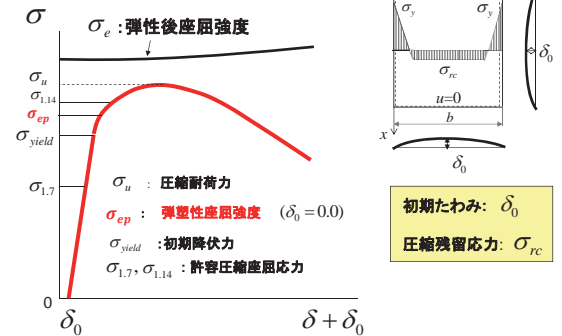
偏心圧縮柱の限界値の比較



$\bar{\lambda} = 0.6$: レベル1, レベル2地震時共, 塑性化.
 $\bar{\lambda} = 1.0$: レベル2地震時のみ塑性化

板要素

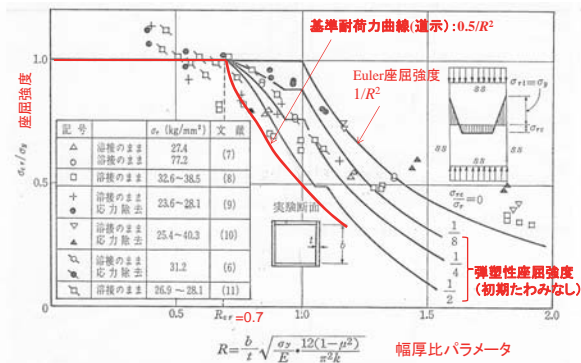
板要素の圧縮座屈強度



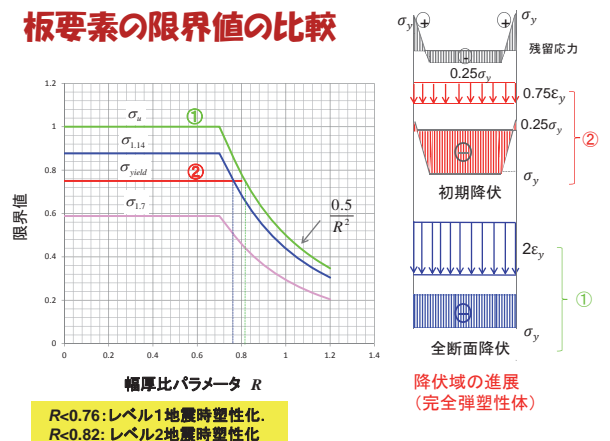
初期たわみ: δ_0
 圧縮残留応力: σ_{rc}

両縁支持板の弾塑性座屈強度

(S48年～道路橋示方書・II 鋼橋編)



板要素の限界値の比較



$R < 0.76$: レベル1地震時塑性化.
 $R < 0.82$: レベル2地震時塑性化

まとめ

- 許容応力度設計は、耐力等を安全率により低減させた**限界値**(許容応力度)と**応答値**を比較して安全性を確保する設計法で、限界状態設計法に変わらない。
設計フォーマット: 応答値 ≤ 限界値 (=耐力等 / 安全率)
- 実験あるいは弾塑性有限変位解析によって求められた**耐力**を基準に限界値を設定する場合、安全率の大きさによっては必ずしも**弾性設計**ではない。
- すなわち、レベル2地震に対しては常に塑性化を許容し、レベル1地震に対しては場合によっては塑性化を許容する**疑似弾性設計(Pseudo-elastic design)**である。

Structural Steel Design (1964), The Ronald Press, p.22
In view of the discussion thus far, it is apparent that the term "elastic design" is technically a misnomer.
許容応力度設計を弾性設計と称するのは、技術的な観点からは誤りである。

話題 2

残留応力を初期たわみに代替出来ないか？

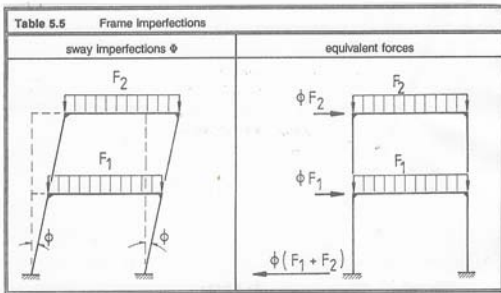
大規模橋梁の数値解析においても、初期不整として初期たわみと残留応力の両方を考慮することが要求されるようになってきている。

初期たわみはまだしも、残留応力を考慮することは大変な作業である。残留応力を初期たわみに代替できないか？

Eurocode3ではそのような方法が既に提案されている。

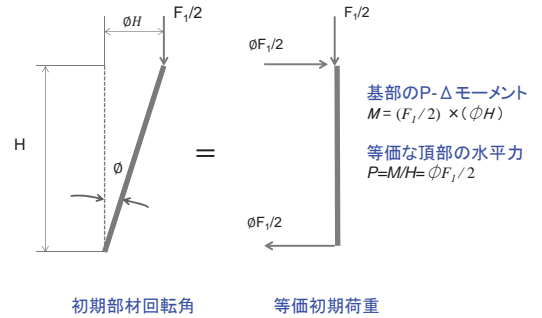
Eurocode3 の考え方

(1) 初期部材回転角と等価初期荷重(どちらかを選択する)



ECCS: Essentials of Eurocode 3 – Design Manual for Steel Structures in Building, p.16, 1991

初期部材回転角と等価初期荷重



(2) 初期部材回転角の大きさ

| number of storeys | number of columns in plane | | | |
|-------------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | $n_c = 2$ | $n_c = 3$ | $n_c = 4$ | $n_c = 5$ |
| $n_s = 1$ | 1/200 | 1/220 | 1/230 | 1/240 |
| $n_s = 2$ | 1/240 | 1/260 | 1/275 | 1/285 |
| $n_s = 3$ | 1/275 | 1/300 | 1/315 | 1/325 |
| $n_s = 4$ | 1/300 | 1/325 | 1/345 | 1/355 |

等価初期たわみの算定方法

中心軸圧縮柱および板要素を取り上げる。

- 初期たわみおよび残留応力の**規定値***に基づく耐力
- 初期たわみのみを考慮して算定した耐力

→両者の耐力が等しくなる時の(2)の初期たわみを**等価初期たわみ**とする。

* 規定値 中心軸圧縮柱: $\delta_0 = L/1000$ $\sigma_{rc} = 0.25\sigma_y$

両縁支持板: $\delta_0 = b/150$ $\sigma_{rc} = 0.25\sigma_y$

初期不整の関数で表した中心軸圧縮柱の耐荷力

(織田・長谷川・宇佐美, 1996)

$$\frac{P_u}{P_y} = \begin{cases} 1.0 & \bar{\lambda} \leq 0.2 \\ \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} [\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\bar{\lambda}^2}] & \bar{\lambda} \geq 0.2 \end{cases}$$

$$\beta = 1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2$$

公式における係数 α を初期たわみと残留応力の関数で表す。

$$\alpha = A_1 \cdot X + A_2 \cdot Y + A_3 \cdot X \cdot Y$$

$X = 1,000 \times (\delta_0 / L)$ 初期たわみ

$Y = \sigma_{rc} / \sigma_y$ 圧縮残留応力

$A_1 \sim A_3$: 初期不整敏感度係数(文献参照)

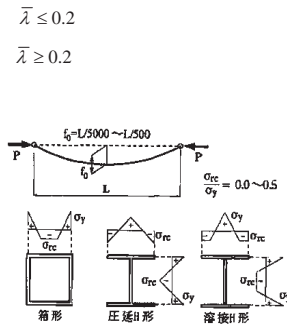
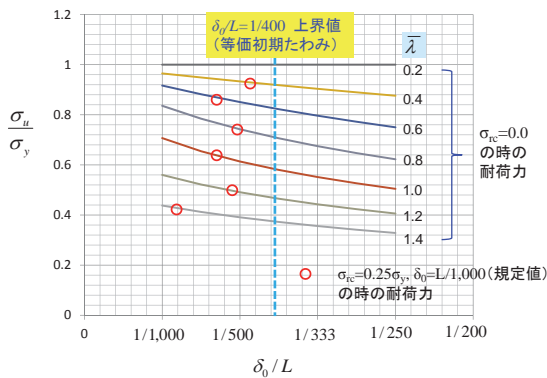


図-1 柱の初期不整

表-1 柱の初期不整敏感度式(4)の係数

| | A_1 | A_2 | A_3 |
|------------|-------|-------|---------|
| 箱形 | 0.152 | 0.428 | -0.0264 |
| 圧延H (強軸回り) | 0.162 | 0.162 | 0.139 |
| 圧延H (弱軸回り) | 0.113 | 0.156 | 0.0478 |
| 溶接H (強軸回り) | 0.143 | 0.871 | 0.267 |
| 溶接H (弱軸回り) | 0.129 | 0.434 | 0.0402 |

中心軸圧縮柱の等価初期たわみ



初期不整の関数で表した板要素の耐荷力式

(宇佐美・天雲, 1993; 宇佐美・葛, 1996)

両縁支持板

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{1}{2R} [\bar{\beta} - \sqrt{\bar{\beta}^2 - 4R}] \leq 1.0 \quad (R \geq R_0)$$

R : 幅厚比パラメータ

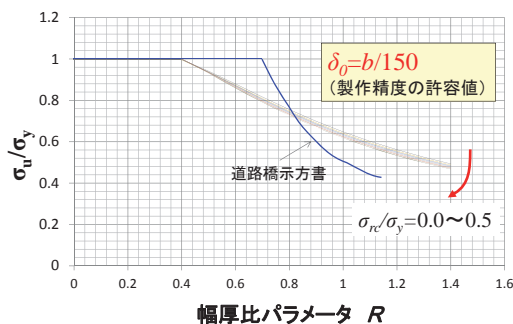
片持板

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{1}{2R} [\bar{\beta} - \sqrt{\bar{\beta}^2 - 4R}] + 2.5R(\bar{\beta} - R - 1)^2 \leq 1.0 \quad (R \geq R_0)$$

$$\bar{\beta} = 1 + \bar{\alpha} \cdot (R - R_0) + R$$

$\bar{\alpha}$: 初期不整係数(初期たわみと残留応力の関数) 文献参照
 R_0 : $\sigma_u / \sigma_y = 1.0$ となる R

両縁支持板の耐荷力曲線



初期たわみとして道示の製作精度の許容値($b/150$)にすれば、耐荷力は残留応力の大きさにほぼ無関係。

まとめ

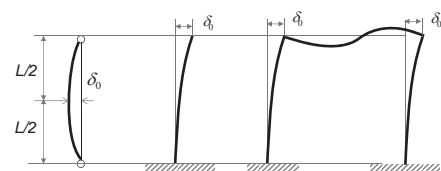
1. 部材の等価初期たわみ δ_0/L の推奨値

- (a) 両縁支持柱(中央): 1/400
- (b) 片持柱(自由端): 1/200
- (c) 門型ラーメン(頂部): 1/200 = ECCSの推奨値

2. 板要素の初期たわみ δ_0/b の推奨値

- ・両縁支持板: 製作精度の許容値(1/150)と同一
- ・片持板: 1/50

Note: 板要素の初期たわみは局部座屈を含む解析の時のみ必要。



話題 3

初期たわみの合理的導入方法は？

- 初期たわみの導入方法
 - 1) 経験によって定められた初期たわみモードを導入する
 - 2) 線形座屈固有値解析によって求められた座屈モードに相似な形状を導入する
- 複雑な構造物の場合、初期たわみの導入は手間が掛かるが、2)の方法は、ある程度機械的に導入可能である。
- はり要素(ファイバー要素)を用いる解析では、部材の等価初期たわみのみ考慮。
- シェル要素を用いる解析では、部材および板要素の等価初期たわみの両方を考慮。

経験によって定められた初期たわみモードの例(1)

| 構造物種別 | 用いる初期たわみ形状 | 初期たわみの大きさ |
|-------|------------|---------------------|
| 桁 | 内 | $\delta_0 = H/1000$ |
| | 外 | $\delta_1 = H/1000$ |
| 梁 | 内 | $\delta_0 = H/1000$ |
| | 外 | $\delta_1 = L/1000$ |
| 柱 | 内 | $\delta_0 = H/3000$ |
| | 外 | $\delta_1 = L/1000$ |
| 壁 | 内 | $\delta_0 = H/1000$ |
| | 外 | $\delta_1 = L/1000$ |
| 床 | 内 | $\delta_0 = H/1000$ |
| | 外 | $\delta_1 = L/1000$ |

初期たわみの大きさは、初期たわみと残留応力を考慮する場合の値。

残留応力を考慮しない場合は初期たわみを、等価初期たわみに置き換える

土木学会:鋼構造物の終局強度と設計, 鋼構造シリーズ 6, pp. 266-267, 1994

経験によって定められた初期たわみモードの例(2)

詳細に用いる初期たわみ形状の例(橋脚構造物の場合「つづき」)

| 構造物種別 | 用いる初期たわみ形状 | 初期たわみの大きさ |
|-------|------------|--|
| 桁 | 内 | $\delta_0 = H/1000$ |
| | 外 | $\delta_0 = H/1000$ $\delta_1 = L/1000$ |
| ラーメン | 内 | $\delta_1 = L/1000$ |
| | 外 | $\delta_0 = H/1000$ |
| ラーメン | 内 | $\delta_0 = H/1000$ |
| | 外 | $\delta_1 = L/1000$ |
| 橋脚 | 外 | $\delta_0 = H/1000$ |

座屈固有値解析の利用による初期たわみの導入方法

1. 各部材断面を仮定する。
2. 荷重状態を設定する。
3. 微小変位解析により各部材の軸力Nを算定する。
4. 剛性マトリクス $[K_E]$ 、幾何剛性マトリクス $[K_G(N)]$ を作成し、
$$[[K_E] + \Lambda[K_G(N)]] = 0$$
より、最小の固有値(座屈荷重) Λ_{min} から数次の固有値 λ^i を求める。
5. 各固有値に対応する固有モード(座屈モード)の最大変位を等価初期たわみに置き換えて、数次の固有値に対応する初期たわみモードを決定する。
6. 各初期たわみモードを構造物の初期状態として数値解析を実施して応答値を算定する²⁾。構造物の耐力はその内の最小値を採用する。

- 1) 固有値(座屈荷重)が接近している場合があるので、数次の固有値についてその後の数値解析を実施する。
- 2) 2.の荷重を漸増させた比例荷重を用いる。

実例は講演当日説明します。

話題 4

レベル2地震時に鋼上部構造に発生する $2.0\epsilon_y$ の応答ひずみは許容できないのか？

道路橋示方書では、鋼上部構造の塑性化は認められていない。しかし、土木学会の鋼・合成構造標準示方書[耐震設計編]では、修復性(使用性)照査で一部塑性化を許容しており、限界値は $2.0\epsilon_y$ としている。

限界値 $2.0\epsilon_y$ はどの程度の損傷に対応するか、純圧縮両縁支持板を取り上げて検討してみる。

検討方法と結果

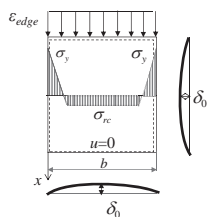
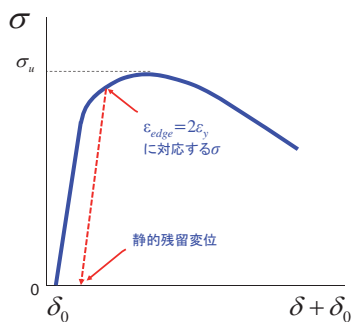
検討方法

純圧縮両縁支持板を平均ひずみ $2.0\epsilon_y$ まで載荷後、除荷したときの静的残留ひずみ・残留変位を調べて損傷度を検討する。

検討結果

- 1) $2.0\epsilon_y$ の応答ひずみは、構造物に致命的な損傷を与えるわけではなく、レベル1およびレベル2地震で上部構造に発生することが暗黙の内に許容されている損傷程度の損傷しか与えない。
- 2) 地震後の残留変位は、地震による揺れ戻し効果の影響で、鋼製橋脚の例では、静的残留変形の0.4倍以下になる。
- 3) 従ってレベル2地震時に鋼上部構造に発生する $2.0\epsilon_y$ 程度のひずみは本当に許容できないか、技術的のみならず経済性の視点からも十分検討すべきである。

板要素の圧縮挙動



初期たわみ: $\delta_0 = b/150$
 圧縮残留応力: $\sigma_{rc} = 0.25\sigma_y$

終わりにあたって

- (1) **話題1**は多くの技術者/研究者が持っている誤った既成概念を解消するためにまとめたものです。しかしながら、真の目的は**話題4**を提示するところがありました。これについては、講演当日少しだけ触れることができました。
- (2) **話題3**については、実例を十分説明できませんでした。この課題については、現在、鋭意検討中です。
- (3) 上級技術者においては、示方書の背景をよく理解した上で設計あるいは技術の高度化に携わることが肝要かと思います。
この講演がそのためのヒントになれば幸いです。

ご静聴ありがとうございました。