

鋼橋の設計法の変遷（歴史）と 未来への展望について

長井正嗣（長岡技術科学大学名誉教授）

鋼橋の設計法の変遷(歴史)と未来の展望 History of steel bridge design method and future prospect

長井 正嗣
Mssatsugu NAGAI

Abstract This paper deals with history of steel bridge design and future prospect of it. Since many books related to the history on Japanese bridge design method or code has been published, the detailed description of it is omitted in this paper. Performance-based design method (PBD), future design method, is explained, follows Limit State Design Method (LSD), such as AASHTO LRFD and EC. In addition, Japanese code based on Allowable Stress Design Method (ASD) is given and compared to LSD. Several topics such as [non-composite girder is composite girder], [design by FEM] and so on, which are related to the practical design and also the author feels strange, are given. Finally, future direction of design employing nonlinear 3D-FEA is discussed. The importance of inviting PBD is emphasized, and PBD for the maintenance strategy is also discussed.

KEYWORDS : 橋、設計法、歴史、未来、性能照査法、Finite Element Analysis

Bridges, Design method, History, Future, Performance verification method, FEA

1 まえがき

我が国の鋼橋設計は、設計の基本ができたと考えられる 1950 年代より、およそ 60 年間にわたり許容応力度設計法(Allowable Stress Design Method : ASD)にもとづく。骨組モデルを用いた FEA(弾性影響面解析)による作用応力と終局強度(材料の降伏強度や部材、パネルの座屈強度)の間に一定の比率(未知係数あるいは無知係数 = 約 1.7)を設けて断面寸法を決定する。今回のメインの話題の一つである設計法の変遷については、すでに多くの書物が出版¹⁾²⁾されており、講義内で若干触れることし、世界標準となっている、性能照査型設計法、限界状態設計法について概説する。近年、米国基準(AASHTO LRFD)や欧州基準(EC)は限界状態設計法に移行しており、限界を超えたか否かの具体的照査法として、前者は荷重抵抗係数法(LRFD)を、後者は部分係数法(PFD)を採用している。さらに、照査に用いられる部分係数(レベル 1 設計)設定の背景には信頼性理論がある(信頼性指標 β : レベル 2 設計[AASHTO LRFD は $\beta = 3.5$ 、EC は $\beta = 3.8$])。これら方法の区別について、さらに ASD の位置づけを説明する。この過程で、鋼系橋梁の信頼性、競争性の向上のためには性能照査型設計法導入が重要かつ欠かせないことを強調する。次に、著者が日ごろ感じている、橋設計に関わる疑問点などについてコメントする。たとえば、「道路橋示方書は性能照査型設計に移行したのか?」「FEM で設計する?」「非合成桁は合成桁??」などである。最後に、未来、今後の橋設計について、思いを紹介する。なお、耐震設計、解析はここでは対象外とする。

2 設計法の変遷(歴史)

2.1 概説

設計法、主には鋼橋、鋼・コンクリート合成橋梁の設計基準、設計法の変遷、また具体の荷重、鋼材規格、鋼材許容応力度、RC 床版規定の変遷については、これまで幾つかの書物が出版され、詳しく記述されている。ここでは、逐一詳細な歴史、その変遷を記述することを避けており、文献 **1)2)**を参照されたい。

本章では、最初に、よく耳にする幾つかの設計法について説明する。お互いの関連が明確でなく、混同された状況が依然として見られるため、整理する。この内容は、著者の文献 **3)**とほぼ同じであるが、再掲する。

2.2 性能照査型設計法(Performance based Design Method, PBD)

この方法は、設計対象構造物に必要とされる性能(要求性能)をまず定義する。構造物は目的があって建造するもので、その目的にかなった性能を保有、発揮する必要がある。性能設計を謳うのであれば、まず性能項目と要求されるレベルを明確に定義すべきである。一番大事な性能は「安全性能」で、種々の作用下で、供用中の崩壊や大きな損傷は許さない。また、地震作用下では、安全性能のみでなく修復性に関わる性能も議論される。その他、使用時の不具合、使用性を損なうような状態が生じないようにする「使用性能」などが要求性能の項目となる。

土木学会鋼構造委員会、鋼・合成構造標準示方書⁴⁾は、「性能照査型限界状態設計法」で、要求性能を定義し、その性能が満足されるかどうかの限界を、部分係数法を用いた照査式[後出の式(2.3)]で照査する。ただし、照査式は条文ではなく、解説に記述され、「見做し規定」となる。鋼・合成構造標準示方書では、「安全性」「使用性」「回復性」「耐久性」「社会環境適応性」「施工性」が要求性能として定義されている。その他、「疲労に関わる性能」が頭に浮かぶが、「安全性能」に含まれ照査される場合が多い。一方で、性能によっては、どのようにして確認あるいは保証するのかが、不明確な場合も生じる。例えば、「社会環境適用性」などは、性能の定量的な保証方法、評価方法が難しい印象をもたれると思うが、その通りであり、今後どのように定量的評価を行っていくかが課題となる。

性能照査型設計は、本来「要求性能」のみを定義し、設計者は要求性能が満足されていることを証明する。その際、証明の方法は設計者に委ねられる。したがって、設計者の力量が問われる。この方法により、より高い品質を低価格で提案、提供し、競争に勝つための一層の技術開発が促進されることが期待されている。しかし、実態はそのようにうまくいかないことも知られている。例えば、受け取る側、発注者側の多くが、その内容を審査する体制、とくに新しい技術の良し悪しの判断する体制が準備できておらず、また躊躇するのが現状である。そのため、過去の設計手順、安全性の照査方法などが「見做し規定」と称して用いられ、結果的には従前との変化が見られない。そのため、面倒になるだけで何も変わらない、とう指摘を受ける。

2.3 限界状態設計法(Limit State Design Method, LSD)

構造物が本来の目的を達成するために要求される性能を、限界を超えるか否かで照査する方法で、要求性能に対応した、幾つかの限界状態を設定し、その限界を超えているか否かを照査する。限界状態として「終局(安全)限界(ultimate or strength limit state)」「使用限界(serviceability limit state)」「疲

「疲労限界(fatigue limit state)」「極限事象限界状態(extreme event limit state)」などが設定される。性能照査型設計法に類似の設計法と言ってもよいが、アメリカや EC 圏で採用されている限界状態設計法では、限界を超えるか否か、例えば安全性能が保証されているか否かの具体的照査手法が記載されており、後で説明する、荷重係数抵抗設計法、部分係数法が用いられる。

さて、限界状態設計法と言え、アメリカの規準、AASHTO LRFD⁵⁾を思い浮かべる人が多いと思う。この方法は、安全性能や使用性能等の要求性能を保証するための強度限界、使用限界等が規定される。要求性能に関連づけた限界状態を定義し、限界を超えるか否かが、荷重と抵抗それぞれに係数を乗じ、両者の大小を比較する荷重抵抗係数設計法(Load Resistance Factor Design Method, LRFD)で照査される。

以下に、AASHTO LRFD の基本的な照査フォーマットを紹介する。

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \Phi R_n = R_r \text{ ----- (2.1)}$$

ここで、 Q_i は荷重効果、 R_n は公称抵抗値、 R_r は係数倍された抵抗値、 γ_i は信頼性理論をベースに求められる荷重係数、 η_i は、構造物の延性(η_D : ductility)、冗長性(η_R : redundancy)、重要性(η_I : operational importance)に関連する荷重係数に対する補正係数、 Φ は同じく信頼理論をベースに求められる、公称抵抗値に乘じる抵抗係数。

AASHTO も、当初は ASD であったが、1970 年代初めから、荷重に係数を乗じる荷重係数設計法(LFD)を採用し、1994 年から LRFD に移行している。LRFD は、部分係数を規定した[レベル I]の設計法であるが、信頼性理論をベースとした設計法で、スパンに関係なく一定の信頼性指標 β 値を確保している点が特長となっている。世界標準という観点からも、我が国の橋設計で LRFD を謳うのであれば、安全性に対する信頼指標を提示すべきと考える。因みに AASHTO LRFD の設計寿命は 75 年、信頼性指標 $\beta = 3.5$ (橋の上部工)である。以下の EC の場合、設計寿命は 100 年、 $\beta = 3.8$ が設定されている。

限界を超えているか否か、要求性能が保証されているか否かの照査方法として、部分係数法がある。前述の通り、EC⁶⁾に採用されている。また、我が国では、土木学会コンクリート委員会のコンクリート標準示方書⁷⁾、鋼構造委員会の鋼・合成構造標準示方書²⁾などが採用している。

基本的なフォーマットは以下の通りである。

$$\frac{\gamma_a S(\gamma_k F)}{\gamma_i \frac{R(f_y/\gamma_m)}{\gamma_b}} \leq 1.0 \text{ ----- (2.2)}$$

ここで、 S は作用、 R は抵抗を表す。また、5 つの部分係数($\gamma_i, \gamma_a, \gamma_k, \gamma_m, \gamma_b$)のうち、 γ_i は構造物の重要度係数、 γ_a は解析の精度を考慮する解析係数、 γ_k は荷重(F)の大きさのばらつきを考慮する荷重係数、 γ_m は材料強度のばらつきを考慮する材料係数、 γ_b は部材強度のばらつきを考慮する部材係数である。

広い意味では、荷重や抵抗に部分係数を乗じて要求性能が保証されているか否かの照査を行う設計法、AASHRO LRFD も、部分係数設計法と言ってもよい。

2-4 許容応力度設計法(Allowable Stress Design Method)

我が国の橋設計は道路橋示方書(以後、道示という)⁸⁾に則り行われる。道示は、これまで約 40 年にわ

たり、許容応力度設計法を採用しており、我々にはなじみが深い。この方法では、安全性に対する照査、つまり安全性能が保証されているかが、以下の式を用いて照査される。

$$\Sigma f \leq h \cdot f_a = h \cdot f_{ult}/\gamma = h \cdot \min\{f_y, f_{cr}(\leq f_y)\}/\gamma_u \text{ ----- (2.3)}$$

ここで、 Σf は荷重作用下での発生応力の合計、 $h(\geq 1.0)$ は許容応力度(f_a)の割増係数で、複数の荷重が同時に作用する確率を考慮する係数、 f_{ult} は終局強度、 f_y は降伏強度、 $f_{cr}(\leq f_y)$ は座屈強度、 γ_u が基準安全率で、我が国では、 γ_u として約 1.7 が採用されている。また、 $\min\{a, b\}$ は a, b のうち小さい方を採用。なお、上記 1.7 の根拠は不明で、この係数を未知係数あるいは無知係数と呼ぶ場合もある。

道示は、性能や限界状態を明確に謳ってはいないが、橋に要求される安全性能、使用性能等を考慮し、それらが満足されか否かの照査を、たとえば上記の式(2.3)を用いて行っている。また、AASHTO LRFD や EC と同じレベル 1 設計であるが、確率、信頼性の概念はまったく見えない。これでは、世界や Global は謳えない。

3 橋設計に関わる話題

3-1 概説

ここでは、主には筆者が気になる橋設計に関わる話題について紹介する。

3-2 道示は性能照査型設計へのシフトしたのか

道示⁹⁾は、2001 年に、従前の仕様規定型の設計法(許容応力度設計法)から性能照査型設計に移行した。この設計法は、しいていうと性能照査型許容応力度設計法と言える。お気づきの通り、従前の仕様規定がそのまま見做し適合規定となり、実質的な変化は無い。ただ、一つのきっかけを作ったと考えるし、耐久性に関わる規定を充実させている。

このことに関連して、文献 **1)2)** のでの記述内容を紹介するが、現状の問題点と進むべき方向性が示されている。

「従前の仕様規定の制定根拠が要求事項として示されたが、これと構造物の関係は明確でない。今後性能規定を充実するには、構造物の要求性能を適切に表示し、併せて性能の検証方法を適切に提示することが必要である」¹⁾

「・・・従来の仕様規定の制定根拠が要求事項として表示された。・・・道路橋としての要求性能と上述の要求事項との関係が明確になっていない」²⁾

要求性能を明確にし、かつ要求レベルも定義する必要がある。性能の照査法は競争性の観点から自由が好ましいと考えるが、現状の体制では設計が進まないことが想定される。したがって、AASHTO LRFD や EC のように、LRFD または部分係数法による性能照査を行うのが良い。

道示で用いる許容応力度設計法では、安全性能が、前記の式(2.3)で照査される。1.7 は基準安全率であるが、未知な部分(不確定要因)をカバーする未知係数、あるいは無知係数とも呼ばれている。世界レベルで議論されている確率とは無縁の状態にある。一方で、

a) 式(2.4)中の係数(h)は、許容応力度(f_a)に対する割増係数で、荷重作用の同時確率を考慮し、同時に発生する確率が低いことから、許容値を大きくしている。ある意味、複数の荷重係数を用いることに対応

する。

b) 活荷重の値そのものも、スパンで変化させており、確率論的な配慮がなされている。

c) 桁の座屈強度(弾塑性強度)が終局強度となっており、安全性能の照査にあたり、終局、破壊状態が考慮されている。

という話を聞く。つまり、限界状態設計法の一つであるという話である。しかし、係数の設定などに関する明確な根拠は示されていないという問題がある。また、応力表示(最大強度は降伏強度)であり、降伏強度を上回る塑性強度は扱えない。薄板で構成される鋼桁単独では、降伏以降の荷重上昇は小さいため、大きな問題は生じない。そのため、頑として「応力表示で十分、何が不都合なのか」、となる。合成桁では、正曲げを受ける場合に大きな塑性強度が発揮される、現行では、この大きな塑性強度は扱えない。さらに、活荷重合成桁の安全性能照査では、式(2.3)での照査とともに、以下の式での性能照査が行われる。

$$\Sigma f_{1.3D + 2.0(L + I)} \leq f_y \text{ ---- (2.4)}$$

(1.3x 死荷重)と(2.0x 活荷重)作用下での発生応力が、降伏応力を超えない。これは、活荷重合成桁では、前死荷重(床版、鋼桁重量)が鋼桁で、後死荷重(地覆、高欄、舗装など)と活荷重が合成桁で受け持たれる。つまり、2つの耐荷構造(鋼桁と合成桁)で荷重が分担されることを意識したもので、最大の荷重係数を想定した対応(荷重係数法)²⁾と思われる。同じ、示方書内で、2つの照査式を用いて安全性能照査を行うことになる。

以上のような矛盾を解消する意味からも、性能照査タイプ、限界状態設計法への移行が強く推奨される。また、2-2で、「性能照査型限界状態設計法への移行で何も変化が無い」、という指摘を受ける話をしたが、この手法による橋設計でもって、橋の何がかわるかの具体については、文献 **3)**を参照されたい。

3-3 FEM で設計しよう???

最近耳にする話であるが、著者には、まず基本的なところで疑問が生じる。現行の橋設計では、周知の通り、橋構造を骨組にモデル(格子モデルや棒モデル)化して、梁理論(平面保持)をベースとする有限要素法(FEM)の適用、有限要素解析(FEA)で断面力(さらに応力計算)やたわみを計算し、許容応力(f_a)や許容たわみ(δ_a)と比較する。

現行道示では、

$$\Sigma f \leq h \cdot f_a = h \cdot f_{ult}/1.7 = h \cdot \min\{f_y, f_{cr}(\leq f_y)\}/1.7 \text{ ---- (2.3)}$$

$$\delta \leq \delta_a \text{ ---- (2.5)}$$

ここで、

f : 発生応力

h : 許容応力度の割増係数

f_{ult} : 終局強度

f_y : 降伏応力度

f_{cr} : 座屈強度

δ: たわみ

で性能照査する。式(2.3)で安全性能の照査、式(2.5)で使用性能の照査を行っているともみなせる。つまり、これまでも有限要素法(FEM)で設計してきた!!

恐らくシェル要素やソリッド要素を用いて橋構造を有限要素モデル化して計算、設計するのを「有限要素法で設計」を言っているかと思う。確かに、お金さえあれば、高級な汎用のソフトが購入でき、基本的な原理がわからなくても、あるいは力学がわからなくても、だれでも計算できるようになっている。

また、応力計算を FEA で行い、照査方法は現行通り。つまり、作用側の計算にシェル、ソリッド要素 FEA(板殻理論や 2,3 次元弾性論の近似解)を適用し、右辺の抵抗には、これまでのコード(道示、AASHTO, EC)に記載される強度評価式(ひずみ分布一定を仮定)を用いる。これを「FEM で設計だ」というのだろうか。

さて、そうだとすると、さらに以下の疑問が生じる!!

- 1) 何十、百万節点の(垂直、せん断)応力を対象に影響面解析を行うのか、つまり([節点数]×[節点の自由度])の影響線、影響面解析(影響面を作成して活荷重をもっとも不利になるよう载荷して応力を求める)を行うのか??橋の設計では、活荷重(移動荷重)载荷にあたり、影響面や影響線解析が行われる。これまでに、骨組モデルの断面力やたわみの影響面、影響線を作成し、設計が行われている。これに代わって、節点応力を対象に影響線、影響面解析を行うのか。まさに、エンジニアリングの世界でなく、数値の世界である。また、今日の(現時点での)コンピュータ環境で対応可能なのかも、疑問に感じる。
- 2) シェル、ソリッド要素の FEA では、節点の応力が求まる。これは、近似解で、正解ではない。この節点、1 点の応力(f または τ)と何を比較して、どのように性能照査を行うのか??現行、安全性能を照査しているとみなせる式(2.3)を再掲する。なお、せん断応力の照査は触れない。

$$\Sigma f \leq h \cdot \min\{f_y, f_{cr}(\leq f_y)\}/1.7 \text{ ---- (2.6)}$$

部材のある断面のしかも断面内の 1 点の応力が上式を満足しないとき、安全性能が喪失したと考える。比較的スムーズな断面内の応力分布状態では、現行の設計と近い照査となるが、応力集中をピックアップしている場合もある。それでも、1 点の応力集中が降伏に達して、あるいは座屈強度に達して橋は崩壊する、安全性能が満足できない、安全・強度限界を超えたともみなすのか。

- 3) また、メッシュ分割をどのように行うのか。メッシュ分割次第で、計算される応力は異なる。

さて、桁橋をシェル要素 FEA で設計した例として、文献 **10)**があげられる。格子解析(梁要素)とシェル要素 FEA による設計である。紙面の都合で詳細は割愛するが、結果として、

- a) 着目位置の影響値や影響面の分布に差異が生じる。しかし、
- b) 両者の解析法を用いた設計で得られる鋼重量はわずか、ほぼ変わらない。

たとえば、FEA メッシュ分割のレベル(粗さ)決定のために検討した実橋の 4 径間モデルでの節点数は、格子解析で 1,520、FEA モデルで、107,596 である。また、実際の設計に採用したモデルは 2 径間モデルに縮小されており、影響面解析のため、特殊なプログラムも別途開発していると聞く。このように、はり要素の格子計算とシェル要素 FEA で大きな鋼重の差異が生じないとする、シェル要素による解析のメリットが見えない。

一方で、コンピュータの長足の進歩により、FEA 全体解析が夢ではない。現状では、固定荷重载荷を前提として、

- a) 複雑な構造システムのキャンバー管理
- b) 維持管理に適した補剛システムの導入の可否(立体挙動の解明)判断、
- c) すでに建設され、劣化を伴う構造物の性能評価、

などに積極的な FEA の利用が考えられる。より実体に近い挙動、“reality”をキャッチできる“benefit”、は極めて大きい。これらについては、4 章、未来の設計で説明する。

以上、現状の「FEM で設計しよう」は、「木をみて森を見ないエンジニア、世界で戦えないエンジニア」を育てる最悪の提案といえよう。

性能照査設計法への移行に伴い、「安全性能」「使用性能」「疲労性能」「耐久性能」などが照査項目になると考える。つまり、単に、「安全性能」のみに着目し、しかも、作用のみ着目したシェル、ソリッド要素 FEA(梁理論にかわり弾性論の近似解)の適用による精度アップ達成といった短絡思考でなく、上記性能照査にあたり、FEA の導入を総合的、統一的の考え、取り組むべきである。詳細は、第 4 章で説明する。

3-4 床版の損傷と非合成設計

「非合成桁は合成桁だ」、という主張を最近聞くと、これも筆者にはわかりにくい。

- a) 非合成設計された鋼桁が、活荷重作用レベルで合成挙動を示すことは、古くから知られている。筆者が、橋の設計の世界に入った 30 年以上前から聞いている。これが、新しい知見というのであれば、不思議に感じる。ご存知の方も多いと思うが、橋の大事故の 30 年周期説がある。個々の原因はさまざまであるが、共通事項として、「30 年で技術伝承が途絶える」点が指摘されている。まさに、実感させられる。
- b) さて、「それで、どうするのか」も見えない。ここに、現行許容応力度設計法の問題点、この設計になれたことに問題があると感じている(発想が閉じこもっている)。荷重作用が徐々に増えて、設計荷重レベルに達して、その状態(その状態が弾性状態なのか否かは関係なく)は、破壊(荷重)に対しては、比率でほぼ 1.7 の余裕を有している。おそらく、この状態までの荷重作用では、合成桁としての挙動になっていると考えられる。一方、現行設計では、作用最大応力と終局強度にある一定の比率を設けて設計、安全性能の照査を行っている。つまり、非合成設計された橋の終局強度は合成桁としての強度なのか??これを明確にする必要がある。
- c) たとえば、性能照査型あるいは限界状態設計として、使用性能や安全性能を設定して照査を行う設計体系をとる。使用性能では、設計荷重で塑性変形、残留変改を許容しない性能を持たせる。当然、安全性能では、構造物の破断や崩壊を許さない。たとえば、安全性能は式(2.3)で、また使用性能は、以下の式

$$\Sigma f \leq f_y / \gamma_s \text{ ---- (2.7)}$$

で照査する。 γ_s 値は今後とも議論の余地があるが、1.00~1.20 程度を考える³⁾。

使用性能照査では、合成桁として照査する。その際、クリープ、収縮応力を考慮し、床版の主桁作用を考慮した設計も行う。次に、安全性能照査では、鋼桁単独の強度を耐荷強度、終局強度とみなして照査する。なお、使用性能での非合成桁としての照査は不要である。なぜなら、鋼桁では、(より荷重係数が大きい、または抵抗係数が小さく設定される)安全性能照査(式(2.3))で寸法が支配、決定されるため

ある。どうしても「床版が損傷しても、問題ない橋を設計したい、非合成設計だ」と言うのであれば、このような対応が検討の対象となる。

図-1 に、1960 年代以降の鋼桁橋の変遷を示す。合成桁は、国が貧しい時代、世銀などからの借金で建設する時代、経済性の観点から採用され始めた。しかし、建設後まもなく床版の損傷が目立ち始め、合成桁では、床版が輪荷重を桁に伝達するのみでなく、桁としての耐荷部材であることから、急速に採用が控えられるようになった。当時、恐らく原因究明に勢力を投入せず、避ける方向に移行を選んだと思われる。つまり非合成設計への移行である。このことが、後々、「合成桁は嫌いだ!!」という多くの技術者(主には発注者)を生む原因になったと想像する。とくに 1980 年代では、中間支点で負曲げ作用により、床版に引張が作用する連続合成桁の採用はほとんど見られなくなった。損傷の原因として、薄い床版厚の採用、配力筋の不足、施工の不備などが挙げられている。

その後、新東名建設、コスト縮減対応が大命題、契機となって、1990 年代の始めから、「少数主桁」、「シンプルな横補剛システム」の採用と、「連続合成桁」の復活が試みられ、現在に至っている。これらの“Innovation”を支える技術的な背景として、「シェル、ソリッド要素 3D-FEA による立体挙動に把握」「輪荷重走行試験の開発による床版性能の把握」「疲労設計の充実」「HPS(高い延性、靱性また低余熱鋼など)の開発」などの技術革新あわせて過去を学ぶ姿勢が挙げられる。

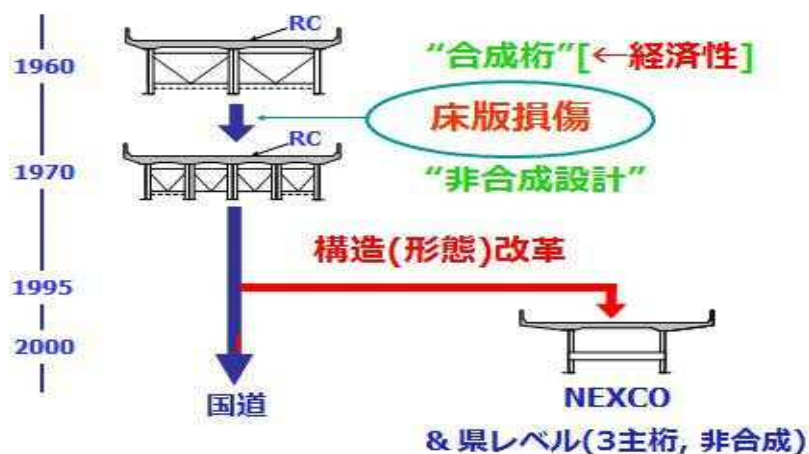


図-1 鋼 I 桁橋設計の変遷

非合成設計された橋は、確かに、その性能がわかりにくい。とくに、床版と鋼桁をつなぐシアーコネクター(多くの場合、床版の浮き上がりを防ぐ、1m ピッチに配置される折り曲げ鉄筋)の役割が、定量的にわかりにくい。元々、浮き上がり防止材で、せん断に関わる力学性能は期待していない。それが、不確実性が高い付着問題をからめて取沙汰される。

さて、性能照査型設計に移行しようとする現状、あわせて維持管理時代の移行する現状において、非合成設計の橋では、

- a)疲労性能照査にあたり、設計計算での応力と実体応力の乖離が生じ、疲労性能照査の精度に大きな影響を与える。
- b)鋼橋の劣化の大きな要因として腐食損傷と疲労が挙げられる。前者は、維持管理を怠った鋼橋に多くみられ、その安全性を検証する必要がある。劣化構造の力学性能を把握する上で、著者はシェル、ソリ

ッド要素の 3D-FEA を提唱している。しかし、非合成設計された桁が、どのような応力状態にあるのか、不明である。設計と実体の大きな違いが想定される橋の維持管理は困難を伴う。モニター、センシング以前の基本的な問題であると考える。

3.5 金谷郷橋梁(連続合成 2 主 I 桁橋)-コンパクト断面設計-

金谷郷橋梁(NEXCO 東日本関東支社、図-2)¹¹⁾は、我が国で初めて、終局曲げ強度(M_{ult})として降伏強度(M_y)を超える強度($1.3M_y$ ⁵⁾)を採用した橋梁である。設計の前提として、要求性能、対応する限界状態を設定し、安全性能の照査にあたり、合成桁が正曲げを受ける領域において、強度として塑性強度が採用されている(合成桁が正曲げを受けるとき、終局強度は塑性強度に達し、断面区分として、コンパクト断面と呼ばれる)。因みに、中間支点領域は、終局時の抵抗断面が[鋼桁+鉄筋]断面、つまり鋼断面(強度がせいぜい降伏強度、それ以下のスレンダー断面)のため、これまでの道示設計と差異が生じない。



図-2 金谷郷橋梁

この設計では、限界状態として、上記の終局限界状態のほか、使用限界状態(使用時、橋の塑性、残留変形を許さない、また、たわみ制限はもとより、走行性や騒音に対する性能を満足する)、疲労限界状態の照査が行われている。たわみ制限以外の使用性能照査を行った、一步、進んだ設計と考えている。

一方、性能照査方法、つまり要求性能レベルの設定にあたり、道示や AASHTO LRFD を参照した部分係数が採用された。たとえば、安全性能照査では、道示の荷重係数が採用された(式(2.4)の荷重係数参照)。性能照査設計、LSD を謳うのであれば、本来、レベル 2(安全指標 β)を意識したレベル 1 設計(照査のための荷重や抵抗係数の設定)を行うべきであるが、大きな課題でもあり、本件では設定にはいたらなかった。著者は、アジア諸国の講演などで、「我が国初の LSD による桁橋設計、建設」と発表、PR を行っているが、この問題を常に意識しており、今後取り組むべき重要課題と考えている。我が国がインフラ輸出の主戦場の一つととらえる東南アジアでは、AASHTO LRFD が優勢で、ベトナム、インドネシアのコードは、AASHTO LRFD が下敷きとなっている。一度、たとえば、ベトナムの橋設計の計算書を見て欲しい。アメリカの計算書と見間違ふ。日本の姿はまったく見えない。対応を急ぐべきである。この手だてとして、著者らは、文献 4)の英語版を作成し、アジアで配布し、かつ一例題として、本橋の紹介(講演)を行っている。しかし、遅きに失したという感がある。我が国のこの分野は、産官あげて意識の低さを感じる。

最近になって、「性能照査法で設計した、限界状態設計法で設計した橋」、という話を耳にするようになった。本質を忘れないで欲しい。

3-6 リダンダンシー設計

橋のリダンダンシーが大きくクローズアップされたのは、ミネソタのトラス橋の落橋事故以降かと感じる。橋の一部材を破断させて、その後の橋全体の挙動をフォローする。計算は必ずしも簡単ではないと聞が、どの部材が FCM(Fracture Critical Member)か、あるいは、どのタイプの橋が“less redundant”か、が議論される。

AASHTO LRFD では、荷重係数として、 η_R が考慮される(式(2.1)参照)。勘違いを恐れるが、荷重を大きくして設計することと、構造システムのリダンダンシー評価を行うことは違うと感じている。一方で、荷重を大きく設定すること、またリダンダンシーの低い橋梁と指定することで、その種の橋を排除することが目的とも聞く。

著者の経験では、ミネソタの事故以前、新東名用の橋プロジェクトとして、2 主桁橋が導入された頃を思い浮かべる。3-4 でも説明したように、この経済的と考えられる橋タイプへの移行にあたっては、多くの技術革新をベース、よりどころにしている。つまり説明責任を果たしていると考えている。今でも覚えているが、議論の末「桁が 2 本では、リダンダンシーがなく、認められない。アメリカでは採用していない」と言われた記憶がある。私は、「トラスはどうですか、2 主構です。アーチしかり、アーチは単弦(1 主構)構造もある」とお話しした記憶がある。実は、ご存じの通り、このタイプの橋はヨーロッパでは一般的である。このタイプでないと、PC 橋梁との競争に勝てないと聞いている。もし、この橋が落橋すれば、市場から撤退することになる。友人は、「アメリカ Boeing の飛行機の翼は何本ですか、日本は翼を 2 本以上にして【絶対、100%落ちないジェット機をセールスポイントにして】世界でセールスするのですか」という。日本や、あるいは韓国でも、2 本のうち、1 本のウェブを意図的にカットし、強度を調査した結果から、問題は生じないという報告も聞く。一方で、ヨーロッパの技術者は、設計にあたり、疲労照査に神経質である。実は、桁の損傷、恐らくリダンダンシーを気にしているようで、今後とも謙虚な姿勢が欠かせないと強く感じる。

さて、本題のリダンダンシーであるが、定義や取り組み法は難しい課題であると感じている。しかし、次世代では、リダンダンシー設計を義務つけるのか否かを含めて検討する必要があると考える。とくに劣化構造がますます増える状況では、落橋に至る可能性の同定と関連づけて重要性を感じている。

4 未来の展望-設計法-

4-1 概説

ここでは、未来に向けての、主には設計手法について著者の考え、思いを紹介する。橋の未来の設計とはいっても、新しい橋の創出については触れない。「美しくしたり」、「アーチ構面を傾けたり、骨組線を複雑にしたり」、「斜張橋の塔を傾けたり、または塔を円形にする、あるいは、ケーブルを桁の下に這わせる」、といった形態に関わる話はなく、硬い話となるが、設計法である。

橋の現地で、その空間で何案かの橋をイメージすると、それだけで代案パースができ、かつ図面までできる。こんな時代が来ないかと、若いときには思った。当時は、現地写真に、橋タイプを貼りつけるのが精一杯だった気がする。

現地の環境解析(気象、塩分飛来)と、その影響が構造性能与える影響を FE モデルで解析、あわせて交通シミュレーションからの荷重予測と、その影響解析を行い、ライフスパンの予測が行える橋、10,20,30,50 あるいは 100 年後の橋の姿がシミュレーションででき、ビジュアルに表示される(動画)。維持管理性に投入した知恵と初期コストに応じて、ライフスパン、未来が見える、予測できる橋設計はできないだろうか。橋は、他の製品と異なり、スパンが長い。新技術ベース、導入によるリニューアルの繰り返しが難しい。それなら、逆に、初期コスト、維持管理コストを含めて、ライフスパンの姿を見せる技術を磨くのが重要かと思う。さて、このくらいにして、現実の話をもどそう。



3

図-3 環境・構造 FEA

4-2 次世代橋梁への思い

橋梁と基礎、2013.2 月号の巻頭言¹²⁾で、「次世代リニューアル橋梁への思い」と題した一文を掲載していただいた。維持管理時代と言われる今こそ、次世代、未来に思いをはせる、準備をする必要がある。約 20 年前、「経済性長寿命化橋梁」をキャッチコピーに「長寿命化技術」の勉強会がスタートした。当時、メーカーからは強いバッシングを受けた記憶がある。いわく、「会社が潰れる」。あれから 20 年、メーカーさんは、各社こぞって「長寿命化技術」をセールスポイントにしている。ビジネスマンなら時代の流れを読まなければならない。一つのヒントはインフラ構築先輩(欧米のパフォーマンス)の背中にある。かつて、業界が好景気に沸いていたころ、多くの関係者が、調査と称して欧米の橋詣でをした。遊びも大事だが、勉強もした方がよい。これは、余計な話、また失礼な話になったかも知れないが、若い人へのメッセージである。著者が言う次世代橋梁コンセプト構築は、15 年、20 年後のための準備と考えている。

巻頭言では橋の基本形態や、設計法について記述している。詳細は巻頭言に譲るが、基本は、過去に学ぶ(過去の不具合を学習した)、ライフスパンの読める橋である。センサーを搭載した、自己診断できるスマートブリッジは、あるいは最近耳にするレジリエンス(ブリッジ)は、まだもっと先(次々世代)のイメージである。今は、個人的にはそのように予想している。なぜなら、我々橋屋は、これまで多くの橋の設計、建設を行ってきたが、いまだ橋の本当の動きをキャッチできていない。当時の技術力、計算環境が主因であるが、別々の平面で物事を考え、立体構造にしたのが現在の橋である。これでは、橋の実挙動が読めていない。したがって、ライフスパンがまったく読めない。元の性能が不明のまま、劣化

した現状の性能は把握できない。次世代は、これを排除した橋梁システムの構築である。その大きな手助けとなるのが、まさにシェル、ソリッド要素 3D-FEA で、出番と考える。また、構造システムとしては、2 次応力の発生を避けた、あわせ疲労の発生をほぼ 100%避けた、排除したシンプル化橋梁システム開発、移行が好ましいと考える。きっと、「リダンダンシーに劣る」、という指摘が必ず出てくる。若い人は、これをサイエンスで打破しなければならない。さもないと、負の遺産を引き継ぐことになる。

4-3 性能照査手法への移行

性能照査型設計法への移行については、すでに、2,3 章で、その必要性を説明し、あわせ強調した。国際性の観点からも、今後ますます必要となる納税者に対する透明性、説明責任のためにも、移行は欠かせない。あわせて、技術革新を促し、その実務、現場への適用、さらなる経済性、耐久性の向上達成のためにも絶対欠かせない。

性能照査型限界状態設計の導入で、何が変わるか、変化の可能性、あるいは、もたらされるであろう“benefit”の具体については、文献 **3)**で詳しく説明している。重ねての話になるが、性能照査法としてレベル 1 設計は避けられないと考えるが、その係数の背景にある、信頼性に関わる議論を欠かしてはならない。特定の橋プロジェクトで、勝手に部分係数を引用し、「LSD, LRFD と称し、経済設計を達成した」、などという話は絶対に避けなければならない。

さて、性能照査型の限界状態設計法では、安全性能、使用性能、疲労性能あわせて、将来的には耐久性能などが照査される。ここでは、個々について説明を続けるが、3D-FEA の導入を念頭に話を進める。

4-3-1 安全性能照査

安全性能の照査にあたり、応力照査か断面力照査のどちらがよいかが議論されることになる。現行設計での照査法で表示すると、

$$\sum f \leq f_{ult}(\leq f_y)/\gamma \text{ ----- (4.1)}$$

$$\sum S \leq S_{ult}/\gamma \text{ ----- (4.2)}$$

のいずれかである。ここで、 f は応力、 S は断面力である。 f_y は降伏応力、 f_{ult} は、終局強度を意味する。我が国は前者の応力照査で、2 次応力を考慮した一点応力を降伏強度や座屈強度と比較して性能を照査する。一方、AASHTO LRFD や EC は後者である。後者では、シェル要素 FEA を用いると、計算された応力から断面力への変換に困難を伴い、性能照査ができなくなる。

さて、本文 3-3 で、シェルやソリッド要素を用いた FEA による応力計算をベースにした設計を紹介し、あわせ、格子解析(梁要素)と FEA を用いた設計で、鋼重に大きな差異が生じなかったことを紹介した。では、FEA による設計の道は途絶えるのか??

コンピュータの計算能力は長足の進歩を遂げており、10 年後、20 年後、維持管理はもとより、リニューアル時代の設計では、FEA 適用の期待は膨らむ。では、どのような設計を行うのか。筆者の思いは、シェル、ソリッド要素 FEA で終局強度解析と断面変更、最適化設計を行い、あわせ維持管理への受け渡し、劣化が生じた場合、突発事故が生じた場合の性能評価を行う、つまり一貫設計の構築である。

以下に、安全性能照査法の今後について、計算手法を中心に説明する。まず現状は以下の通りである。

1)骨組モデル(梁要素)をベースの設計←従前設計法、安全性能照査法

$$S^*(\text{影響線載荷}) \leq R^*(\text{道示などのコード規定の耐力}) \text{ ---- (4.4)}$$

2) 次に、応力の乱れが予想される部位を含む構造を対象とする場合、また全橋シェル、ソリッド要素でモデル化した影響面解析が大きな負担となる場合を対象とする。

現在、シェル、ソリッド要素 3D-FEA は、いったん梁要素を用いた格子モデルの解析、棒モデルの解析により寸法決定した橋(上記の 1))を対象に、応力の乱れ、流れが十分把握できないと判断した箇所に適用され、乱れた応力を把握する。この適用を行うか否かはエンジニアリングジャッジメントである。たとえば、ラーメン橋や橋脚などの隅角部、アーチの弦材と桁の交差部、トラス格点部や、斜張橋などでは、ケーブル定着部などが検討対象となる。この場合、応力の乱れが予想される領域のみに、シェル、ソリッド要素の 3D-FEA を適用するのではなく、一般部(梁モデルで現象がほぼ再現できていると考えられる領域)に梁要素を用い、シェル要素でのモデル化部分を含む橋全体モデルの作成も考えられる。このようなモデル化による計算は、固定荷重では既にみられる。以下に、このようなモデルを使った一設計手法を紹介する。

棒モデル、格子モデルで、従来通りの設計を行い部材、断面寸法を決定する。次に、応力の乱れが予想される領域をシェル要素でモデル化する。以後の解析は、シェル要素でモデルした領域の主要ポイントにのみ着目した終局強度解析(弾塑性有限変位)を行い、橋システム強度の同定による構造最適化を目指す。本手法は、橋全体の強度解析を用いた、FEA 一貫設計への移行前の最初のステップ、トライと位置付ける。なお、以下にステップを整理するが、(*)は今後の検討課題となる。

骨組+シェル要素(隅角部など)モデルをベースの設計(FE 終局強度解析を行う)

STEP-1 : まず、上記 1)での詳細設計を完了

STEP-2 : STEP-1 を初期値とした[骨組+シェル]モデルの作成*

STEP-3 : 影響面は、STEP-1 の骨組モデルの結果を保持し**、終局強度解析の実施***

↓ ↑ (繰り返し計算)

STEP-4 : 断面変更****

*初期不整の設定と入力の検討

**将来的には、モデル変更に伴う、影響面の再計算も要検討

***初期不整設定とあわせ、荷重(漸増)のパターンの決定

****断面変更の方向性、何をどう変更して最適値に近づけるか(未経験)

3) 維持管理設計への引継ぎ(4-2-4 参照)

STEP-1 : 上記で設計された橋を対象に、シェル、ソリッド要素ベースの全橋 FE モデルを作成(初期状態を可能な限り再現*)

STEP-2 : 劣化と強度低下推定に利用、突発事故時の安全性能照査に利用

*完成時の動特性計測や、(完成状態)反力の計測が課題となる

4-3-2 使用性能照査

現行道示では、たわみに関する照査(式(2.5)参照)が行われ、これが使用性能の照査に対応すると考えられる。設計最大作用と終局強度との比(約 1.7)で、安全性能を照査し、たわみの照査で使用性能を照査する。AASHTO LRFD, EC では、使用時の要求性能の一つとして、設計最大荷重下で、弾性性能を要求している。この時の照査では、両者の比率に 1.0~1.2 を設定する。見方を変えると、構造物の $P-\delta$ 関係において、設計最大荷重作用までは、ほぼ線形関係を要求していること、性能保証することになる。

今後の設計では、設計最大作用下での弾性性能の保証を行うべきと考える。また、その際、2 次応力を含む発生応力をより正確に把握する必要がある。2 次応力を含めて、構造は弾性状態にある。その意味で、橋の立体構造をシェル要素でモデル化した FEA の適用が望まれる。

4-3-3 疲労性能照査

現在、1 次応力、公称応力を用いた疲労照査が行われている。そのため、橋の立体挙動(1 次応力レベル)をより正しく把握するとともに、強度(疲労等級)が予測できる構造詳細を増やすことが望まれる。また、2 次応力が発生する構造詳細を避け、排除した構造システムを採用する。

1 次応力をより正しく把握する上では、橋の立体構造をシェル要素でモデル化した FEA の適用が望まれる。

使用性能、疲労性能ともに、3D-FEA の援用による照査が欠かせない。しかし、使用性能照査には、応力集中をキャッチする必要がある、また影響面解析が必要になる。これは、依然やっかいである。

安全性能照査に関わる FEA 適用を 4-2-1 で触れた。設計では、安全性能照査のみでなく、ここで議論している使用性能、疲労性能、さらに、後述の耐久性能の照査が行われるであろう。これら性能別の照査法としての 3D-FEA の位置づけを、総合的、統一的に検討すべきであり、今後の重要な課題と言えよう。

4-3-4 既存構造物の耐久性能照査

すでに説明したように、複雑な橋システムほど、設計は簡単に、かつ安全側に行っていることから、設計値と実体の値には乖離が生じる。非合成設計された橋が、交通荷重下では合成作用を示すのも、設計と実体の差異と言える。現行設計では、最大作用と強度の間に未知係数、無知係数 1.7 を設定しているので、設計と実体、すなわち reality との乖離が安全性能に与える影響は少ないと思われる。事実、このことによる大事故の例は聞いていない。

しかし、現存する橋構造の本当の力学性能がどの程度であるか、具体的には、残存耐力はどの程度であるかを知ることは重要と考える。なぜなら、劣化し始めた構造の耐荷性能、安全性能を正しく知ることが維持管理戦略上極めて重要となるためである。一方で、現状では、戦略のベースとなる構造性能評価ランキングは、定性的である。このような基幹技術をないがしろにしたソフトの構築は信頼性に大きな疑問が生じる。

対应手だてには、難しいものを感じるが、3D-FEA の援用だと思っている。ここでは、まとまりがないが、少し、感じている点を紹介する。

維持管理にあたり、劣化に伴う構造の強度低下の度合いが、劣化のスピード同定とともに欠かせない。劣化スピードの数値シミュレーションは、流石に困難と思われる。継続的な点検から、そのスピードを予測することになる。一方、強度低下の予測であるが、各種コードで与えられる部材強度を、構造劣化に対応させる方法が考えられる(一部の腐食でも、腐食欠損箇所を対称とみして断面性能を計算して強度を評価する)。これは、安全すぎるくらいがあるものの、より簡単で、現場で利用できるレベルのものを、

安全性の照査に当たり、作用側として、「設計荷重下の作用」「実荷重(計測、モニター)下の作用」を対象に、一方、劣化に伴う強度評価、同定法として「設計抵抗値の減肉に伴う低減」「3D-FEA による抵抗値の評価」の組み合わせ、を検討する必要がある。たとえば、「設計荷重下の作用」と、「設計抵抗値の低減」をセットとする場合、断面設計に余裕があれば別であるが、通常は基準安全係数 1.7 が満足できない。多少の抵触は問題ないと思われるが、オーナーサイドでは、そのような判断が難しい。安全係数の低下に代り、実荷重の使用、3D-FEA で実強度を同定し対応する方法が考えらえる。

スタート
Original

[観測部材の劣化]
observation member

(年)

降伏
yield of member

X
橋の崩壊
(failure of br)

displacement of bridge

[橋システムの性能]

断面図 ファイバーモデル
鋼鉄筋 繊維強化コンクリートモデル
解析モデル

固定端定

設計耐力 実測耐力
70t/10m間隔 60t/10m間隔

ひずみセンサー配列

計測値範囲
設計値範囲
許容値範囲
許容値範囲

経年解析結果例

経年解析結果例

4-4 性能照査型設計型維持管理設計法の構築

建造物は、オープンされた時点から、早晩、その性能低下が始まる。その時点で、安全性能は満足できていないことになる。実設計が部材単位の安全性能照査のため、構造システムとしては、想定より高い性能を有している可能性があり、いきなり性能が不足するケースは少ないと想像できる。問題は、その評価、判定が定量的でない点にある。

劣化した構造の安全性能や、使用性能を定義し、あわせて、そのレベル、信頼性指標を示すことは、重要である。次世代では、新設設計における信頼性指標はもとより、現存構造物の信頼性指標の提示も重要と考える。リニューアルの説明を考えた場合、劣化した状況をセンセーショナルに示すだけでなく、どの程度安全なのか、どの程度安全レベルが低下しているのかの説明責任が生じると考える。つまり、安全限界を超える確率、破壊の危険が迫っていることの提示である。あわせて、部分リニューアルでOK か、大規模リニューアルが必要か、コスト、コストパフォーマンスの提示である。簡単な話でないのは承知している。しかし取り組まねばならない課題だと思う。納税者は、いずれ、なぜ??と問いかけてくる。確率や信頼性指標に無縁の現行道示では、もはや説明責任が果たせない。このことから、ま

ずは性能照査設計に移行すべきである。

4-5 新材料

コンクリートの世界で話題となる「自己治癒できる」鋼は可能だろうか。著者は材料が専門ではないが、少し今後について考えてみる。1990年代の初め、日本鋼材倶楽部(現在の日本鉄鋼連盟)がスポンサーとなり土木学会に委託した、「新しい性能を有する橋梁用鋼材の開発」勉強会が発足している。本四の長大橋をターゲットに、普通鋼に代わり高強度鋼 HT700, HT800 が開発され、明石海峡大橋(吊橋、1991m)、また港大橋(トラス、510m)に使用されたものの、その後の新鋼材の開発要求が、建築部門に比べて少ない、というのが一つの理由であったと記憶している。全体の勉強会では、橋に適用する鋼への新性能、新しい要求性能について議論した記憶がある。このとき、学サイドからの意見、要望として、「さびない鋼」「音のしない鋼」「ヤング係数の高い鋼」の開発があった。また、S-S 特性について、降伏以降の性能をコントロールする鋼材開発の必要性も議論されたが、当時は、阪神大震災以前であり、議論が進まなかった記憶がある。

現在では、鋼の製造工程も進化を遂げ、連続鋳造(CC)から Thermo Mechanical Control Process(TMCP)が導入され、一層の高性能化が実現されている。「高靱性」「高延性」「低余熱(溶接時)」「降伏点一定(板厚保依存しない)」「耐候性」鋼などの High Performance Steel (HPS)が開発されている。なお、HPS 開発プロジェクトは、1990年代初め、AISI(American Iron and Steel Institution), U.S NAVY, FHWA, 学の共同研究、産官学の共同研究から始まる。

橋と高強度鋼については、著者は以下のように考えている。現在、ケーブル用の高強度材(1600~2000MPa)を除いて、橋梁用の構造鋼材として、SM570-TMCP(降伏強度 450MPa 程度)が入手可能である。また、最もコストパフォーマンスに優れる鋼材として SM490Y 材が挙げられており、事実多用されている。鋼系橋梁の橋梁用鋼材として、SM570 材を超える強度が必要なケースは、

- ・スパン 2000m 級の吊橋補剛桁(風荷重対策)
- ・長大吊橋、斜張橋の鋼製塔(レベル 2 地震時弾性設計対応)

であると思われる。斜張橋は 1000m を超える領域に使用され始めたが、その補剛桁は、SM490Y, SM570 材で設計可能である。そのため、これ以上の高強度の必要性は、特殊なプロジェクト(スパン 2000m クラスの超長大橋梁、何らかの制約で経済性を無視した橋タイプ)を除いて、あまり高くないと言える。とくに、高強度鋼を必要とする港大橋クラス、スパン 400,500m クラスの大型トラス橋は、現在では、斜張橋が経済的代案とされ建設の機会を失っている。強度を追い求めるより、耐震性能を向上させた、あるいは環境に優しい鋼材開発が望まれる。

さて、新素材であるが、著者も、CFRP を腐食鋼桁の補修材料として適用している¹⁷⁾。言うまでもなく、CFRP はコンクリート系の部材補修・補強、コンクリート橋脚の耐震補修に多用されている。一方、新設では、航空機(Boeing 787 ドリームライナー)などのようにはいかない。CFRP が、高強度、軽量を武器に、種々の製品への適用を広げる中、橋梁分野での適用は少ない。かつて、新設用に採用を目指して研究会、勉強会が盛んだった時期もあると聞くと、現状は維持管理部門への適用にとまっているようである。著者には、CFRP では思い出がある。会社に勤務していた 1970 年代後半だったと思うが、ケーブルに新素材を提供できないかと、「東レ(株)」と打ち合わせたことがある。当時、電線への適用を考えていた「東レ」と打ち合わせの席で、「低い弾性係数(現在は高弾性タイプがある)」「折れる、せん断に極めて弱い」が問題となった。後者は致命的と思われた。すなわち、クランプできない。この問題を解

決して、絵に描いた餅になる。重量、ヤング係数、強度を変えた論文は書けても、これを乗り越える基盤技術が確立されないと実現はおぼつかない。そのため、断念した記憶がある。あれから 40 年弱、最近、日経新聞で見かけたが、「50 年先を見据える東レ」さん、“Innovation”には、個人的であるが敬意を評している。

さて、新素材の適用であるが、最近の話として、検査路に適用する話を聞く。多少高価でも、長期耐久性が期待されるケースにおいて、このようなトライをスタートさせ、今後の活用の道を考えていくのがよいと思われる。付属部はもとより、主桁や横桁など、可能なところから徐々に“substitute”を考えていくとよいと思われる。現状、橋の主部材への適用、鋼やコンクリートの代用は困難と感じているが、複合構造としての適用などの可能性があるのかと感じる。

5 まとめ

本文では、まず性能照査型設計法、限界状態設計法の説明を行った後、現行設計において、著者が気になる話題「道示は性能照査型設計に移行したのか」「床版の損傷と非合成設計」「FEM で設計しよう??」「金谷郷橋梁-コンパクト断面設計-」「リダンダンシー設計」を取り上げ、私見を述べた。最後に未来の設計について、著者の考えを紹介した。

著者は、橋設計を始めた頃、1970 年代の半ばから、橋の本当の、実際の動きを明らかにすること、それを実設計に反映することに強い関心を持った。当時は、ブロック有限要素法の開発¹⁸⁾である。ここでは、シアラグ(設計では有効幅の概念を導入)や断面変形(中間ダイアフラム、対傾構の設計)の影響を考慮した計算を目指した。その後、1980 年代には境界要素法(BEM)とブロック有限要素法の混用解析¹⁹⁾などにトライした。支点位置での応力集中、斜角箱桁の反力分配(骨組モデルでは把握できない)を設計計算に取り込む狙いであった。しかしながら、当時、だれもが使用できる汎用化への努力不足もあり、いずれも実務への適用にはいたらなかった。また、1990 年代には、橋の詳細解析に FEA(汎用ソフト)適用を試みてきた²⁰⁾。当時、多主 I 桁橋では、ウェブギャップに疲労損傷が出始めていた。橋の本当の動きは何か??reality は??格子解析(連続体である床版を切り離れたモデル)で reality がどのくらい再現できているのか??を求めて、橋全体をシェル、ソリッド要素でモデル化した計算を試みた。しかし、当時の計算環境では、複雑な補剛システムをもつ橋構造(現在の多主 I 桁橋)への適用は、固定荷重の载荷でも限界があった。

2000 年に入って、実際の 2 径間の 4 主桁モデルを対象に、シェル要素 FE 影響面解析による設計が行われた¹⁰⁾。結果、格子解析との比較から、シェル要素 FEA で設計した鋼重量とはほとんど差異が生じないことが示された。この結果には多少の驚きを覚えたが、現状の格子解析による設計で、橋の安全性は保証できていることが確認できた。これまで長く気になっていた一つの疑念が晴れた思いである。

一方、コンピュータの進歩は日進月歩であり、今後の設計に恩恵をもたらすことは明らかである。格子解析をシェル要素 FEA に置き換えるといった短絡的な発想ではなく、FEA を念頭においた、新しい設計スキームの構築を、若い人には期待したい。とくに、直近の維持管理時代では、「劣化をサイエンスする」ことが重要である。ここにも FEA が力を発揮してくれると信じている。重ねて、短絡思考を避けて、設計体系、その中での数値解析法の位置づけなどを、常にグローバルに考えて欲しい。全体を俯瞰する力、考える力を是非鍛えて欲しい。

本文が、橋設計の高性能化、また今後の、未来の橋設計のための一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 多田宏行編：保全技術者のための橋梁構造の基礎知識、鹿島出版会、2005
- 2) 藤原稔：道路橋技術基準の変遷：技報堂出版、2009
- 3) 長井正嗣：性能照査限界状態設計法と合理化桁の性能照査技術、第 16 回鋼構造と橋に関するシンジウム、土木学会鋼構造委員会、pp.1-18, 2013
- 4) 土木学会鋼構造委員会、鋼・合成構造標準示方書小委員会：2007 年制定鋼・合成構造標準示方書[総則編][構造計画編][設計編]、丸善、2007
- 5) AASHTO：AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 3rd edition, 2004
- 6) CEN：Eurocode3, Design of Steel Structures, Part2, General rules and rules for bridges, 2004
- 7) 土木学会コンクリート委員会、コンクリート指示方書改定小委員会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]、丸善、2002
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅰ 共通編、Ⅱ 鋼橋編、丸善、2012
- 9) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅰ 共通編、Ⅱ 鋼橋編、丸善、2001
- 10) 村越潤、高橋実、吉岡勉、野中哲也、加藤修：FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化の検討、鋼構造論文集、第 11 巻第 43 号、pp.131-145, 2004
- 11) 高久英彰、藤野和雄：コンパクト断面を導入した鋼連続合成 2 主 I 桁橋の設計と整合照査について、第 16 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集、土木学会鋼構造委員会、pp.19-30, 2013
- 12) 長井正嗣：次世代リニューアル対応橋梁への思い、橋梁と基礎(巻頭言)、Vol.47, No.2, pp.1, 2013
- 13) K.Sugiola, H.kanaji, S.Matsumoto, K.Magoshi and M.Nagai：Redundancy analysis of a cable-stayed bridge using fiber model, Proc. of IABMAS2010, (full paper enclosed on CD-ROM), USA, 2010
- 14) ISO13822 Bases for design of structures – assessment of existing structures - , 2001
- 15) ISO2394 General principles on reliability for structures, 1998
- 16) (財)電力研究所：ダムゲートの性能照査型維持管理マニュアル-電中研・北海道電力・北陸電力・電ガン開発共同研究の成果-総合研究:N10, 2010
- 17) 奥山雄介、宮下剛、若林大、小出宣央、秀熊祐哉、堀本歴、長井正嗣：鋼桁端部腹板の腐食に対する CFRP を用いた補修工法の実験的研究、構造工学論文集、Vo.58A, pp.710-720, 2012
- 18) 坂井藤一、長井正嗣、佐野信一郎：ブロック有限要素法による薄肉箱桁の立体解析、土木学会論文報告集、No.255, pp.17-29, 1976
- 19) 小松定夫、長井正嗣、西牧世博：境界要素法とブロック要素法の混用解析による薄肉箱桁の立体解析、土木学会論文集、No.334, pp.13-14, 1983
- 20) 黒田充紀、長井正嗣、藤野陽三、柄川伸一、川井豊：並列 I 桁橋の有限要素モデル化に関する検討、構造工学論文集、Vol.42A, pp.1073-1080, 1996

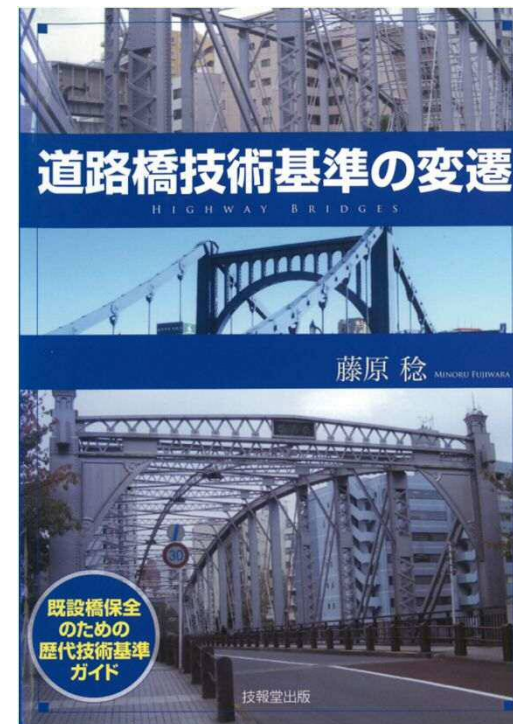
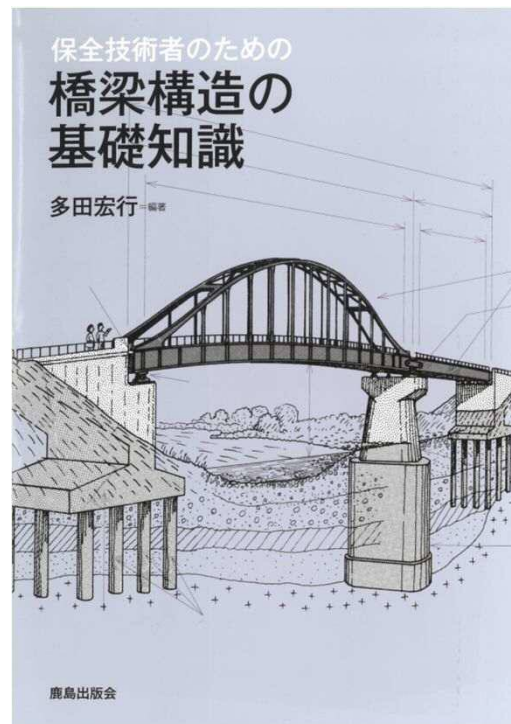
鋼橋の設計法の変遷と 未来の展望

History of design method and its future prospect

2013年12月18日

長岡技術科学大学名誉教授
長井 正嗣

- ・ 設計法の変遷
- ・ 荷重, 鋼材規格,
鋼材許容応力度, 床版規定他の変遷



- ・ 多田宏行(編) : 保全技術者のための
橋梁構造の基礎知識, 鹿島出版会, 2005
- ・ 藤原稔 : 道路橋技術基準の変遷, 技報堂出版, 2009

AA：設計法

世界トップを意識して欲しい

【設計法】

- 性能照査設計法(PBD)
- (性能照査型)限界状態設計法(LSD)

【性能の照査法】

- 荷重抵抗係数法(LRFD)
- 部分係数法(PFD)
- 許容応力度設計法(ASD)

性能照査型設計法

(Performance-based Design Method)

- ・ 構造物が目的を達成するために必要な,要求される性能を定義する.性能の照査法は設計者に任せられる.
 - 自由競争, 技術開発を促す[期待]

限界状態設計法

(Limit State Design Method)

- ・ 要求性能に対応づけた限界状態を設定し, 限界を超えるか否かを照査する.
 - 一般に照査方法が与えられる.

いずれも確率論(性能レベルや限界を超える確率)がベースにある!!

[要求性能]

- ・ 安全性
- ・ 使用性
- ・ 施工性
- ・ 環境適合性

・ ・ ・ ・ ・

[限界状態(性能が保証されるか否か)]

- ・ 終局(強度)限界
- ・ 使用限界
- ・ 疲労限界

・ ・ ・ ・ ・

性能設計, LSDを謳うのであれば,

1) 要求性能, 対応する限界状態を定義

2) 性能(限界)レベルの設定

[照査法, レベル1] (部分係数法)



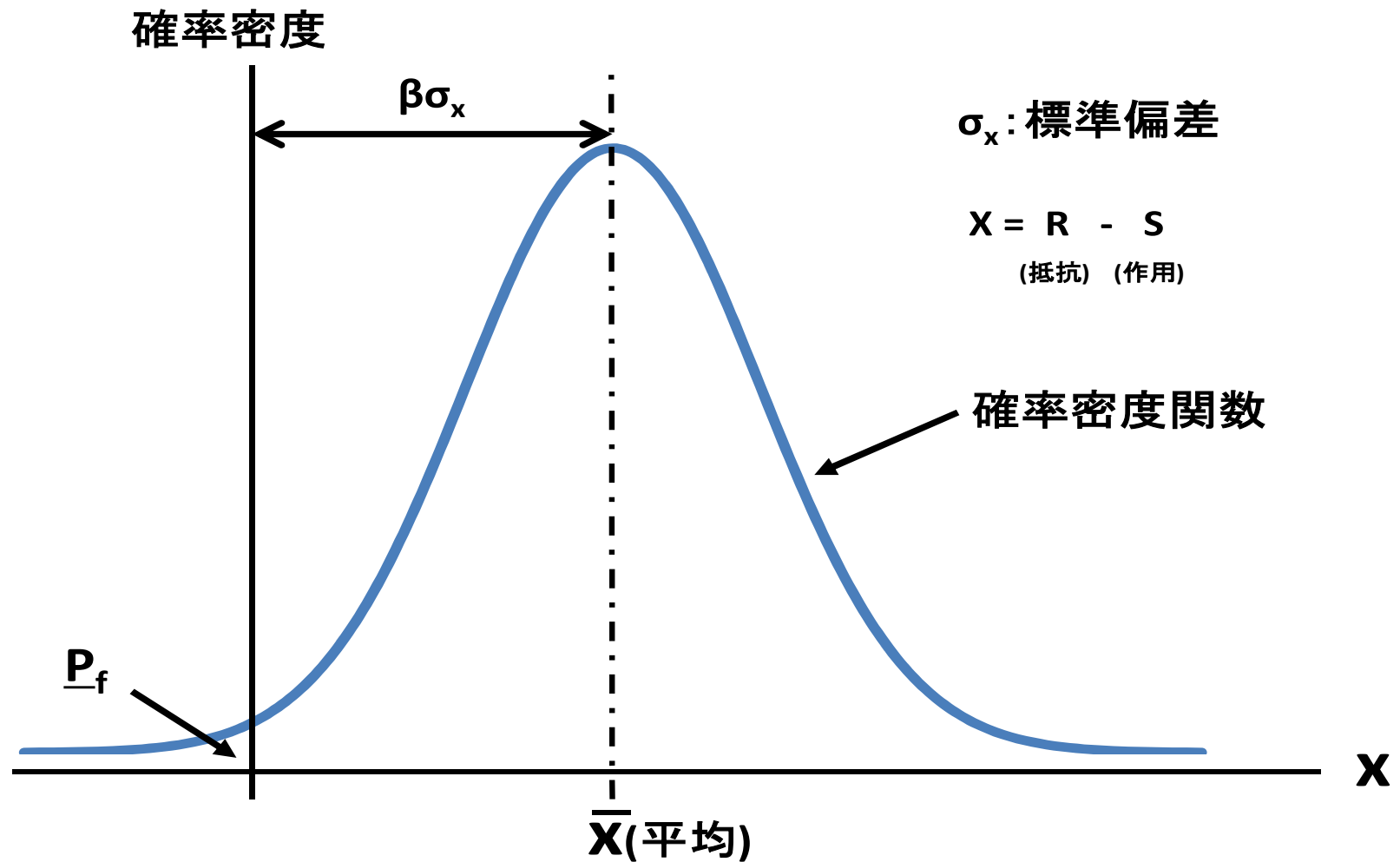
3) 信頼性ベース(信頼性指標 β の提示)

勝手に, 都合よく部分係数を引用しないこと!!

設計のレベル

(信頼性理論の適用レベル)

- レベル-I
部分係数を用いる設計
- レベル-II
安全指標(β)を用いる設計
- レベル-III
破壊確率を用いる設計(橋での適用は難しい)



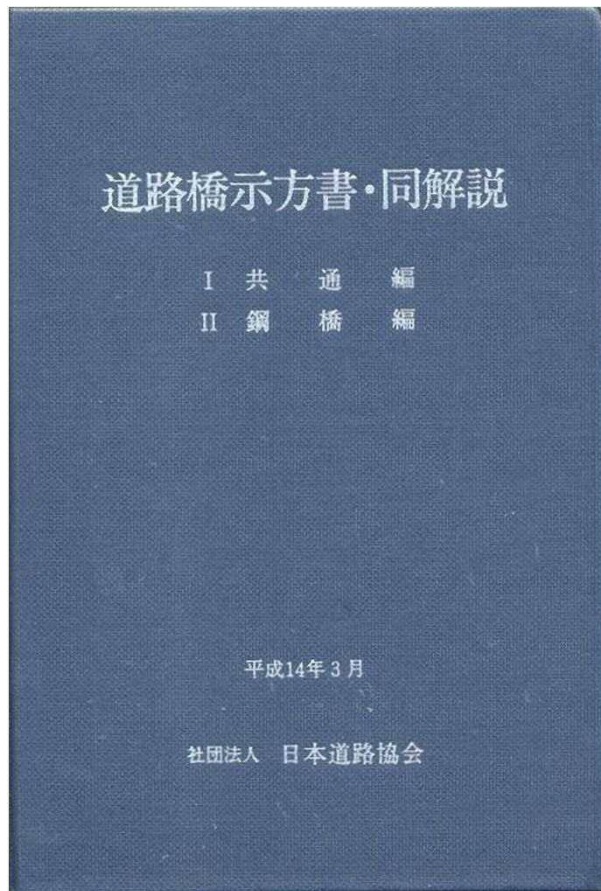
$$\underline{P}_f = p (X \leq 0)$$

AASHTO LRFD ($\beta = 3.5$, 75年)

EC

($\beta = 3.7$, 100年)

Japan Highway Bridge Specifications (JHBS)



$$\Sigma f \leq h \cdot \min\{f_y, f_{cr}(\leq f_y)\} / 1.7$$

h : 割増係数(許容応力度に対する)

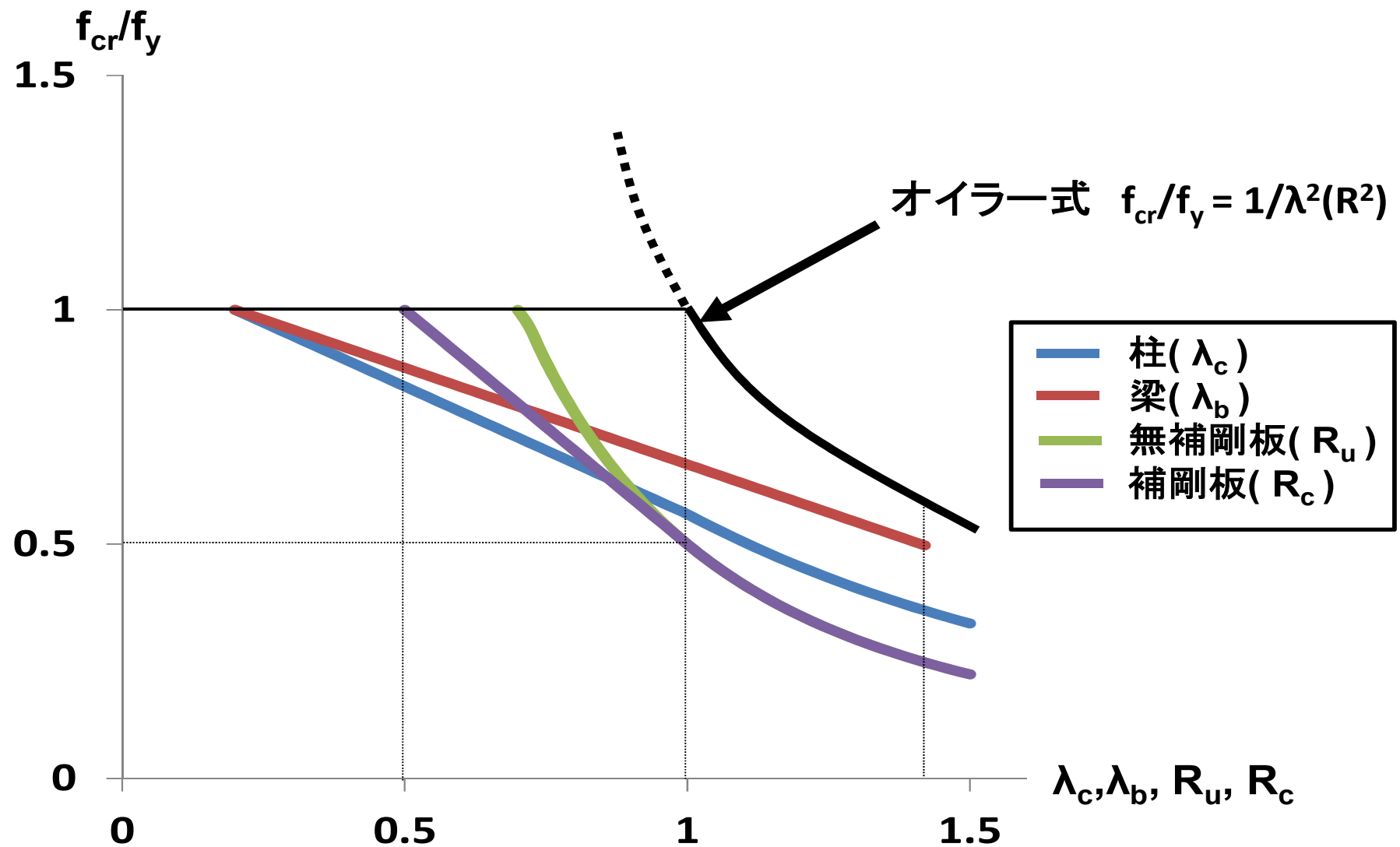
f_y : 降伏応力

f_{cr} : 座屈強度($\leq f_y$)

1.7 : 未知係数(無知係数)

許容応力度設計法 (ASD)

⇒ LRFDに変更中



$$\lambda_c, \lambda_b, R_u, R_c = \sqrt{f_y/f_E}$$

f_y : 降伏応力 f_E : 弾性座屈応力

道示の強度式 : f_{cr}/f_y

USA Code

AASHTO LRFD

ASD

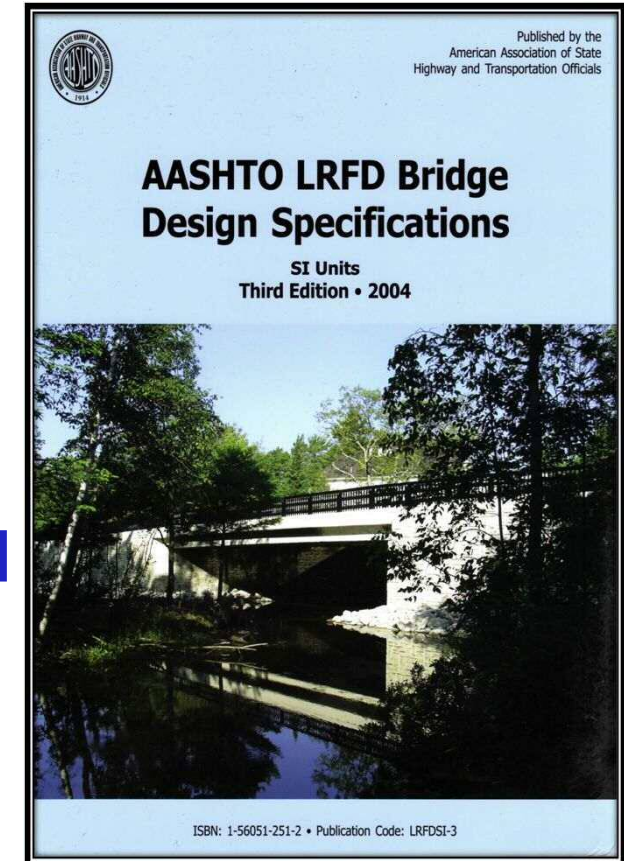
LFD(1970~)

LRFD(1994~) 2007 : shift finished

LSD(限界状態設計法)

Load Resistance Factored

(荷重抵抗係数設計)



照査フォーマット

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \Phi R_n = R_r$$

γ_i : 荷重係数(確率論に基づく)

Φ : 抵抗係数(確率論に基づく)

η_i : 荷重の補正係数 (= $\eta_D \eta_R \eta_I$)

[η_D :延性, η_R :冗長性, η_I :重要性]

Q : 荷重効果

R_n : 公称抵抗値

R_r : 係数倍された抵抗値

Euro Code [EC]

EC3 (鋼橋)

EC4-2 (鋼・コンクリート合成橋梁)

2010 : 移行が完了!!

LSD (限界状態設計法)

Partial factor(部分係数法)

$$\underline{\gamma_i}(S_d/R_d) \leq 1.0$$

$$S_d = \sum \gamma_a S(\gamma_f F_k)$$

$$R_d = R(f_k/\gamma_m)/\gamma_b$$

S_d : 作用(設計値)

R_d : 抵抗(設計値)

F_k : 荷重

f_k : 材料強度

γ_i : 構造係数

γ_f : 荷重係数

.....

東南アジア & (オセアニア)

- ・ベトナム, インドネシア, フリィピン

⇒ AASHTO LRFD

【多くの国 ⇒ AASHTO LRFD】

- ・マレーシア, シンガポール

⇒ EC, AASHTO LRFD

- ・オーストラリア, ニュージーランド

⇒ EC (or) own code

BB : 設計, 気になる話!!

(常に)疑問を持つこと!!

[1]道示は性能照査型設計に移行したのか??

[2]FEAで設計??

[3]非合成桁は合成桁??

[4]金谷郷高架橋{コンパクト断面設計}

[5]リダンダンシー設計??

**[1]道示は性能照査型設計
に移行したのか???**

????

要求性能を定義したか??

性能レベルは??

信頼性は??

- 安全性能(弾性応力 $\leq$ {降伏 or 座屈強度}/係数)

$$\Sigma f(\underline{P}) \leq \underline{h} \cdot \min.\{f_y, \underline{f}_{cr}(\leq f_y)\} / 1.7$$

P, h ← 確率的要素が入っている, f_{cr} ← 終局強度

- 使用性能(たわみ照査)

$$\delta \leq \delta_a$$

- 耐久性性能(防食, 疲労照査 ← 現在, ver.UP中)



確率論, 信頼性指標が見えない!!

[2]FEAで設計しよう???

(基本的疑問)これまでも,
FEAで設計してきた!!

$$\underline{S^*(作用)} \leq R^*(抵抗)$$

↑ 梁要素のFEA(影響面解析)

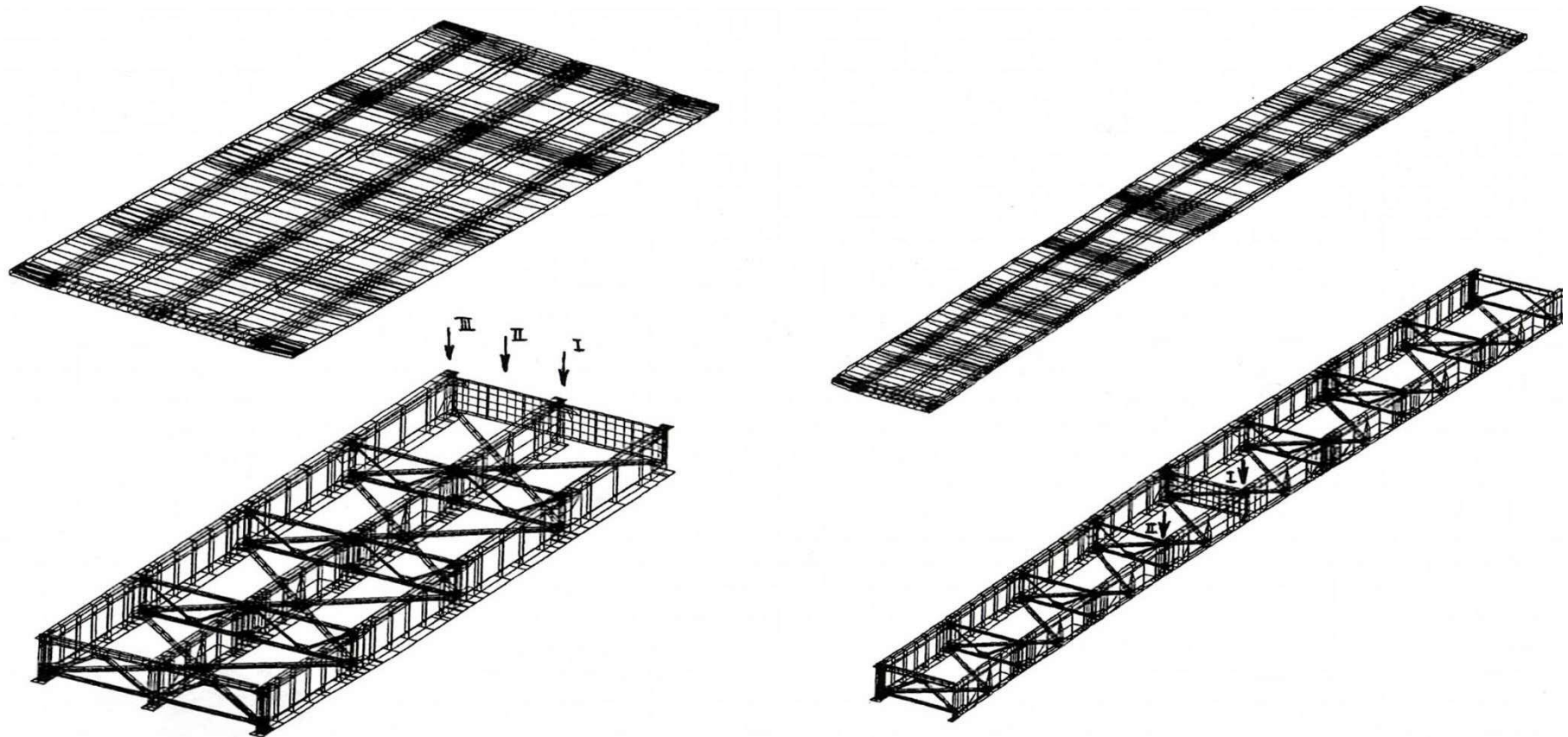
[恐らく, シェル要素のFEA適用かと思われる]

*印は, (部分)係数倍された設計作用や設計抵抗値

橋の本当の動き (reality)は??

橋の全体解析(シェル要素FEA)実施 (1990年代),

[3 本主桁短径間モデル]←大変(計算の制約)!!



(a) 橋軸方向1/2 モデル

(b) 幅員方向1/2 モデル

ガセットやガセットと対傾構の接合部のモデル化など

忠実なモデル化は大変!!

30年前から,

棒モデル, 格子モデル(梁要素FEA)で
把握できない, 再現できない領域

シェル, ソリッド要素3D-FEAを
適用してきた!!

[板・殻理論, 2,3次元弾性論の近似解]

⇒ 設計(板厚決定)に反映!!

そもそも, シェル要素FEAによる設計では

AA : 節点の応力(垂直[f], せん断[τ])の
影響面を求めるのか??

BB : 照査は以下でOKか??

Σf (鋼板内のある1点応力by シェル要素FEA)

$$\leq \min\{f_y, f_{cr}(\leq f_y)\}/1.7$$

f_{cr} : 座屈強度(応力)

↑ 応力, 出れば出るほど板厚アップ(おかしい!!)

CC : メッシュ分割はどうするのか??

個人的な思い(疑問)!!

格子解析でOK(正確)か, 安全性能照査はOKか??

2004年, 2径間連続鋼I桁橋モデル (村越他)

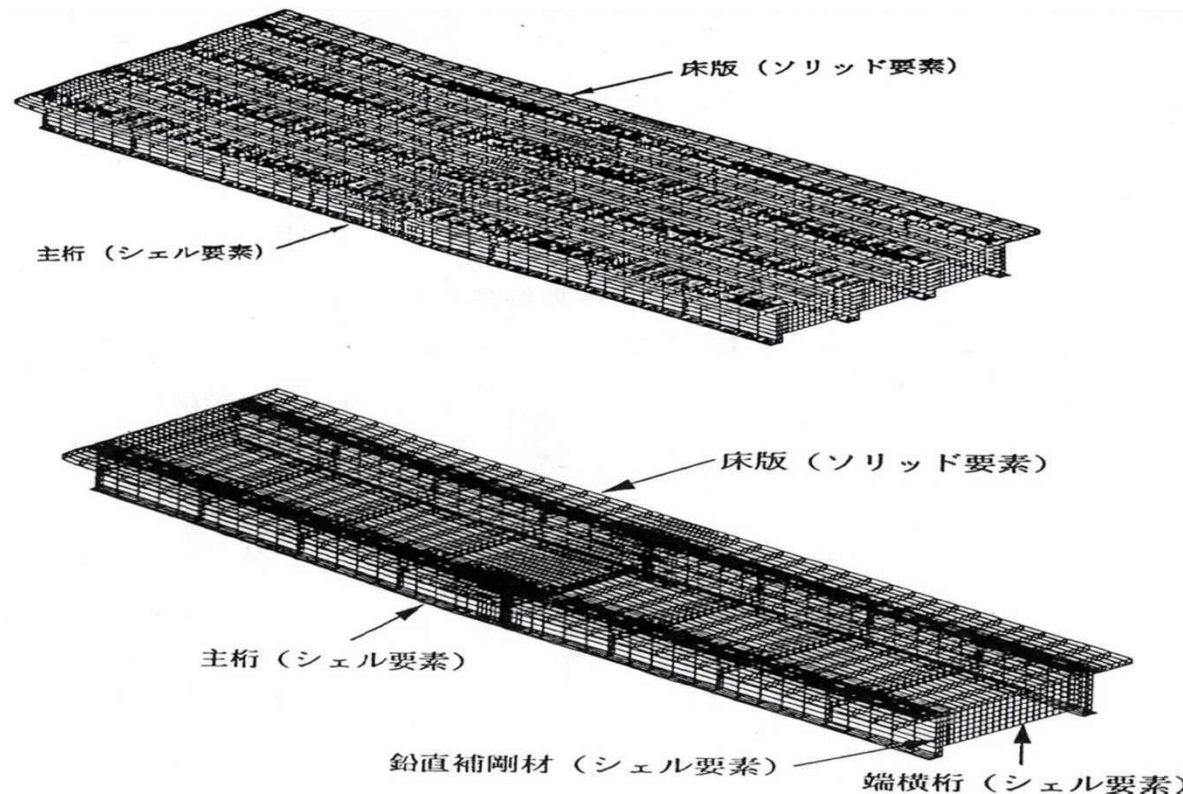
- ・ **格子解析(1,520節点)による設計**
- ・ **シェル要素FEA(107,596節点)による設計**

- 比較結果 -

両者で, 鋼重の差異は無い!!

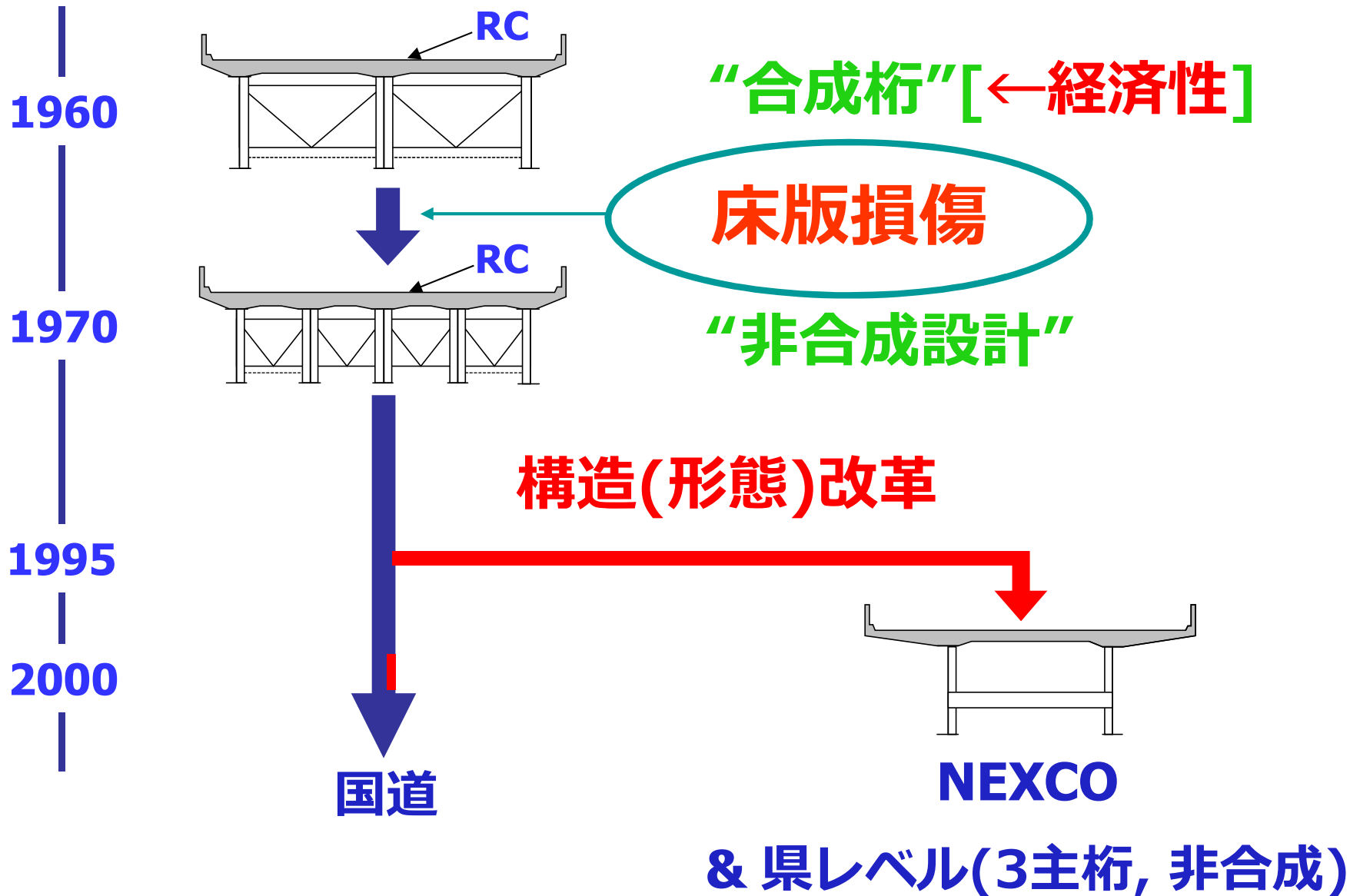
何を目的に, FEA設計を主張するのか????

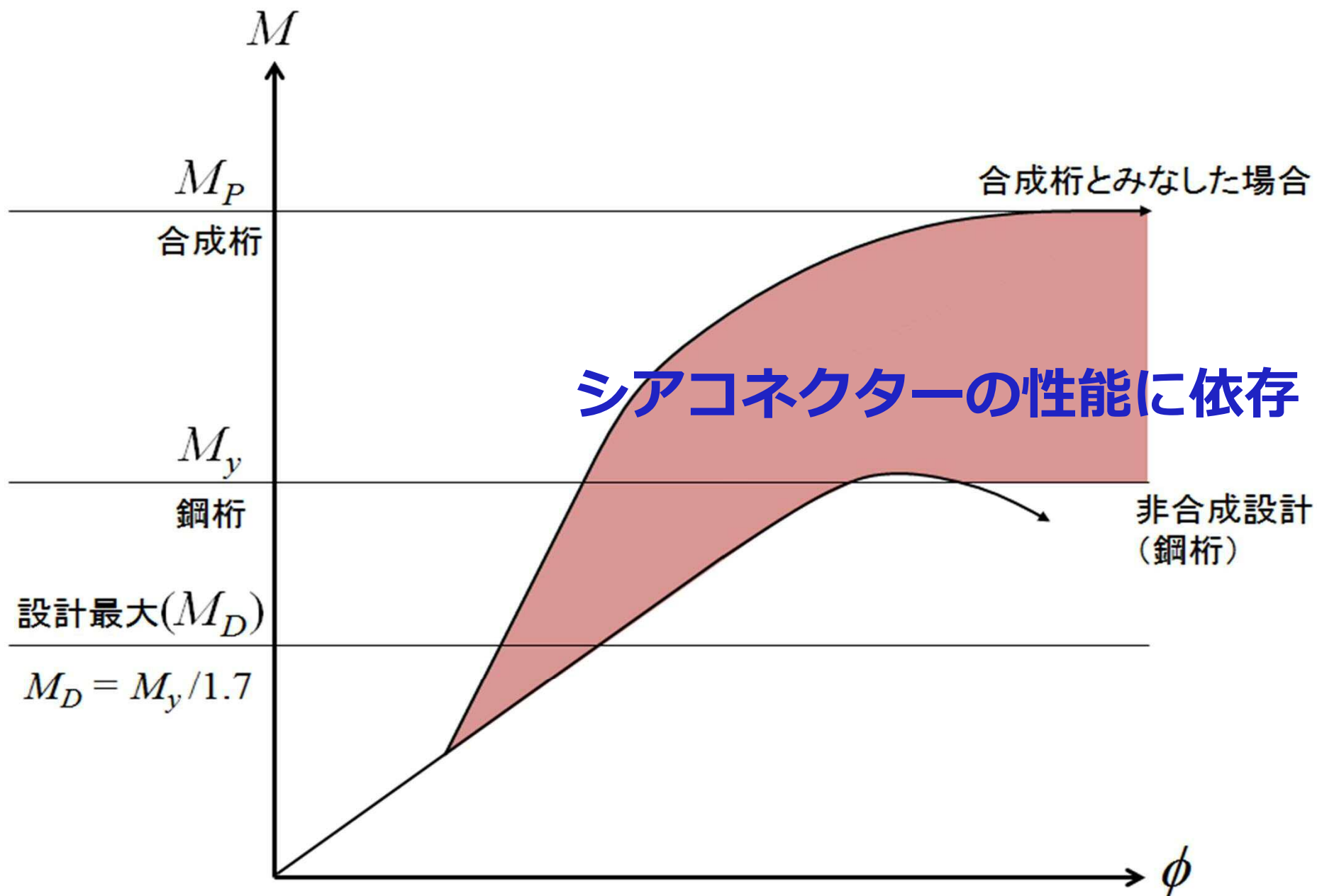
短絡的な思考から離れ,
未来設計では
(適切な)活用を考えるべき!!



**[3]非合成(設計)の桁は
合成桁???**

鋼I桁橋の変遷





鋼桁と合成桁(とした場合)のM- ϕ

何が言いたいのか???

[不確実な付着]

+ [1mピッチのスラブアンカー]で,

合成桁設計をしたいたいのか???

一方で、既設橋梁では、

耐震評価にあたり

- ・ レベル-1作用：合成桁??
- ・ レベル-2作用：非合成桁(床版は外れる)??

劣化構造の性能(余耐力)評価にあたり

- ・ 非合成挙動か合成挙動か??

わかりにくい、扱いにくい!!

将来的には(今からでも)

- ・ 合成桁設計を行う!!

[床版(取替る場合), 取替え設計を行う]

- ・ どうしても床版取り換える⇒非合成設計だ!!

↑ 性能設計を導入, レベルなどの説明!!

- ・ 安全性能(鋼桁単独の強度)
- ・ 使用性能(合成桁として照査)
- ・ 疲労性能(合成桁として照査)
- ・ 耐震性能(レベル1,2時の耐荷構造システムは??)
- ・ 耐久性能

・ ・ ・ ・ ・

[4]金谷郷高架橋(東日高速道路(株))



日本初のコンパクト断面設計による合成I桁橋梁

安全性能照査にあたり,

- ・ 正曲げ部[合成桁]断面 - コンパクト断面設計

曲げ強度 : $M_{ult.} = \underline{M_P} (\geq M_y)$

↑ (実際, $M_{ult.} \leq 1.3M_y$)

照査の具体 : $M_{1.3D} + 2.0[L + I] \leq M_{ult.}$

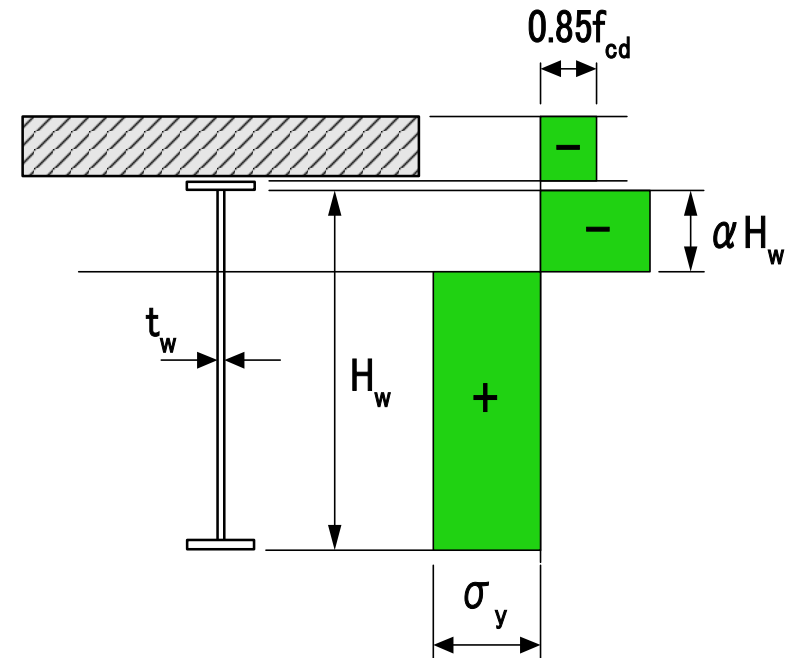
- ・ 負曲げ部[鋼桁+鉄筋]断面 - スレンダー断面設計

曲げ強度 : $M_{ult.} \leq M_y$

(↑ 現行道示と同じ : $M_{1.3D} + 2.0[L + I] \leq M_y$)

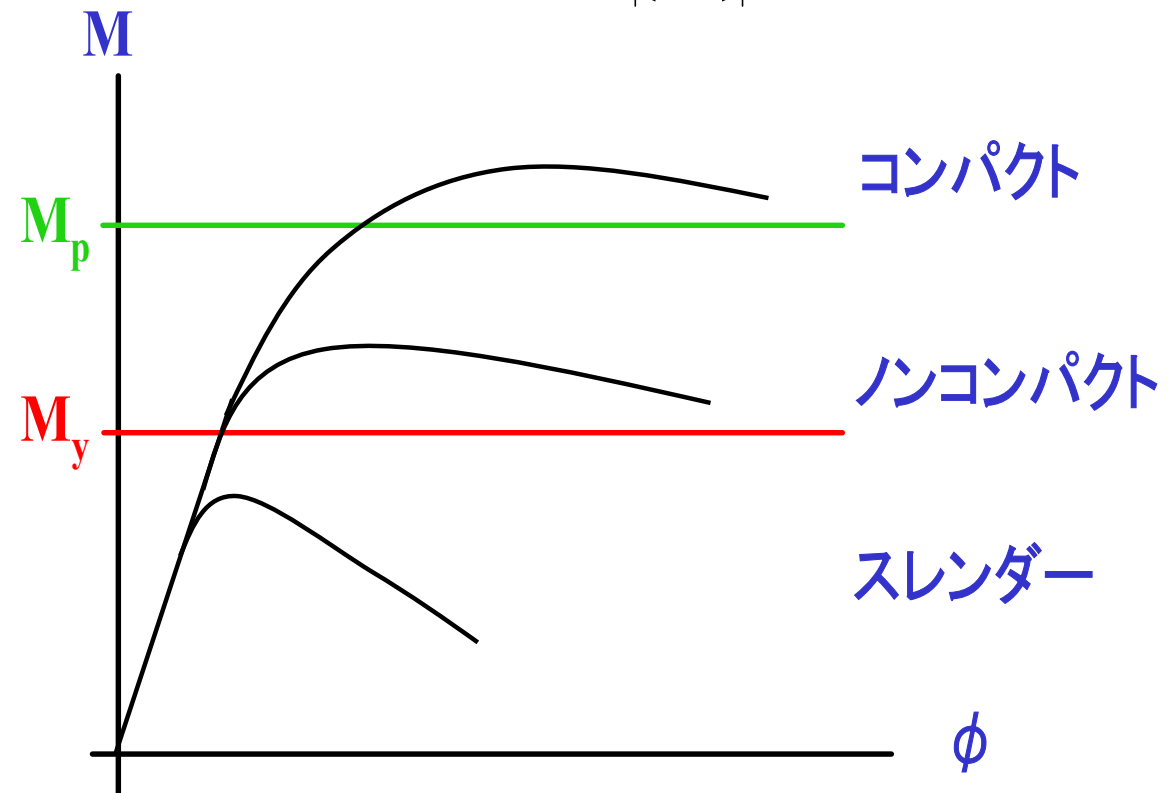
コンパクト断面の判定

$$\frac{H_w}{t_w} \leq \frac{2.00}{\alpha} \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (\alpha < 0.4)$$

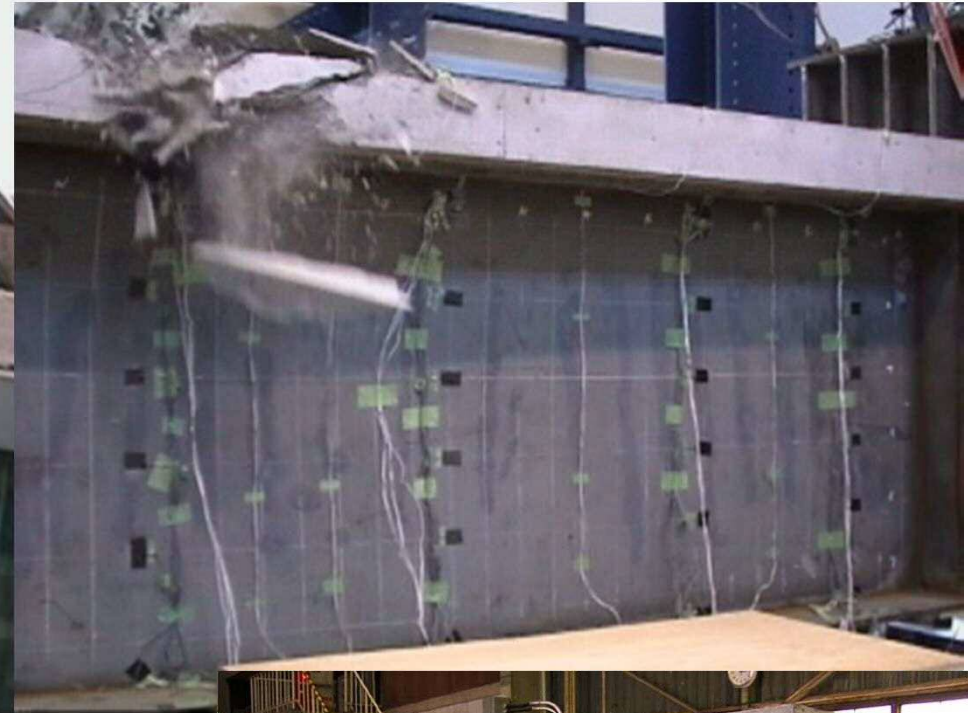


AASHTO LRFD : 1.88

EC (Class 2) : 1.42

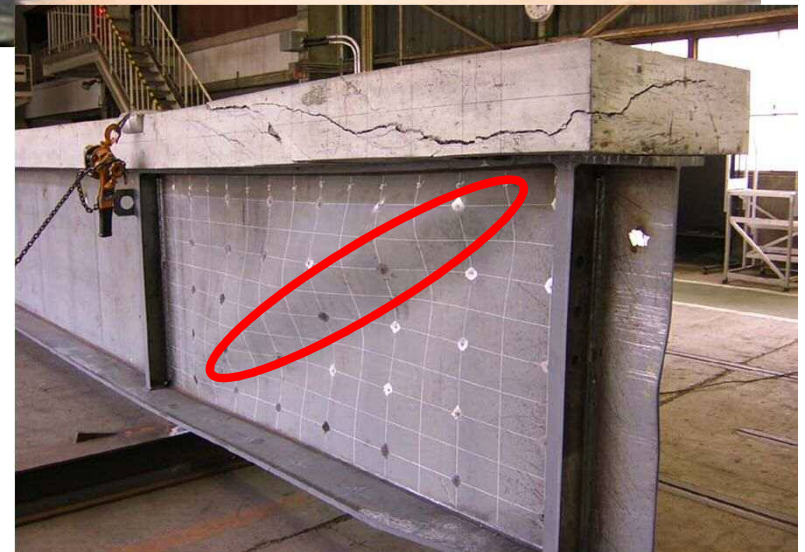


曲げ破壊(正曲げモーメント)



↑コンパクト断面
 $M_{ult.} \geq M_P$ (塑性モーメント)

せん断破壊→



2)使用性能照査

2-1 弾性性能 (←道示に規定されていない照査)

$$\Sigma f_D + [L + I] \leq f_y(\text{降伏})/1.15$$

$$\Sigma f_D + [L + I] \leq f_E(\text{弾性座屈})/1.15$$

2-2 たわみ制限

2-3 振動,騒音性能

3)疲労性能照査

1次応力ベース(疲労等級, レインフロー)

4)耐風性能照査

今回、信頼性(数値)の検討が不十分

β 指標(安全指標)が提示できていない!!

→ LSDを謳わなかった(NEXCO東)

今後の課題となった!!

CC：未来の設計

つくる(強度同定、高度な施工技術)



まもる(現有性能を知る技術)



リニューアル(新しいコンセプト)と
予知する(災害リスクに備える)

若いとき(30年以上前)!!

- ・ (at) 橋の計画現地
 - ・ 橋を数案イメージ(画面にポンチ絵),
ビジュアルに画面に出てくる!!
- ↓ **[送信(officeへ)]**
- ・ 概略の鋼重,コストが出てくる**[返信,受信]**
 - ・ 現地で議論する!!

残念ながら, 実現していない!!

今は, 以上が維持管理対応で実現しないか???

[劣化状況を送信→性能レベル(FEAベース)が返信

橋の基本形態のコンセプト!!

次世代の橋：ライフスパンのよめる橋

[シンプル化形態の橋構造 {疲労排除}]

[easyアクセス]

[高耐久性床版]

[桁端処理&高耐久性付属物]

[重防食or耐候性鋼]

*苦勞したことを排除, または定量化する!!

次(々)世代の橋：スマートブリッジ

[自己申告, 自己治癒]

“早く安く”[←時代が要請した

(経験やFEAの無い時代, 力学や数学の時代で限界)]

- ↓ 損傷(の原因究明しない)
- ↓ 排除する
- ↓ 負の遺産を残して, 逃げる

“つぎはぎ”[現状(真の性能を把握せず)]

- ↓ 一方, シンプル化した橋[←批判対象]

??次世代(皆さん)はどうする??

負の遺産(lessons from past)の排除

- ・ 平面で考えた構造で立体を構成!!

←設計と実体が乖離

(安全性：未知係数1.7がある)が、維持管理ができない!!

- ・ 疲労!!

←予測できない構造は排除

↑シンプル化構造(設計通りの動きをする)へ!!

- ・ 移動輪荷重(→高耐久性床版)
- ・ 疲労設計
- ・ 3D-FEA援用
- ・ HPS[高性能鋼]開発など

[技術革新をベースにしたシフト]

設計法

性能照査型限界状態設計法への移行!!

- ・ 国際性(Global top)#
- ・ 透明性(Transparency)
- ・ 説明責任(Accountability)
- ・ 技術開発, 革新の促進と導入
(Promotion of Innovation)

#世界トップを目指せ!!

(アジアを席巻, 遅きに失したが, まだ維持管理設計法がある!!

↑ 世界は模索している) 45

安全性能照査

(1) 断面力(S) or 応力(f)照査??

$$\Sigma S^* \leq R(S)^* \quad \leftarrow \text{AASHTO LRFD, EC}$$

平面保持　ひずみ線形分布

一方, 2次応力の処置は?? → 「使用性能」で照査

$$\Sigma f^* \leq R(f)^* \quad \leftarrow \text{道示[塑性強度扱わない]}$$

↑　ひずみ線形分布

シェルFEAで細かい応力を拾う ← これを高度設計だと勘違いしている!!

バランスが取れない!!

(2)FEAの導入-1

シェル, ソリッド要素FEAで一気通貫の設計

{↑古くから思いをはせていたが!!}

Σf^* (by linear FEA)

$\leq R^*$ (by non-linear FEA)

影響面(線)解析の壁!!

【問題】

- ・ 初期不整のパターンと大きさ??
- ・ 強度解析の荷重体系??
- ・ 断面変更ごと, 逐一, 影響面解析実施(可能)??
- ・ 断面寸法の変更・最適化の方向??

(3)FEAの導入-2

(一歩進んだ現実的対応,トライとして)

梁FEAとシェルFEA(隅角部など)モデル

の構築と設計

STEP-1 : 梁モデルで現行通りの設計(寸法決定)

STEP-2 : 梁+シェルFEAモデル作成

STEP-3 : プッシュオーバー解析#

↓ 繰返し ↓

STEP-4 : 断面変更(シェルFEAモデル領域のみ)

#FEA導入-1と同様の問題を検討

シェルFEA設計には

- ・ 検討, 解決すべき事項が多い → 検討事項
(気軽な「FEAで設計」論???)
 - ・ FE耐力解析併用で, どの程度のメリットが出るのか
 - ・ まずは、応力の乱れる箇所(隅角部など)の終局強度を知るべき!!(2次応力と終局強度の関係の同定!!)
- 今後の設計, 経済性に影響を与える要因となる!!

「弾性設計なので, 強度は関係ない, 降伏以降は意味ない」は間違い!!
現状は, 設計作用と設計強度に一定比(未知係数)を設けた設計

使用性能照査

(要求)性能照査事項に、弾性性能を設ける!!

$$\underline{\Sigma f^*} \leq \underline{(f_y^* \ \& \ f_E^*)}$$

↑

↑ 降伏強度, 弾性座屈強度

使用時最大応力

P-Δ関係, 設計最大荷重で線形状態保証
(リバーシブル)

疲労性能照査

- ・ 公称(1次)応力を正確に ← シェル要素FEA
- ・ 構造詳細への配慮
(2次応力, 応力集中←予測困難箇所)を避ける

FEA支援の設計体系シフト!!

- ・ 安全性能(←非線形FEA{強度解明}を含む)
- ・ 使用性能(←応力集中をピックアップ)
- ・ 疲労性能(← 1次応力を正確に!!)
- ・ ・ ・ 性能

etc.別の

性能照査に応じた3D-FEAの適用を構築

設計における(性能照査別)

統合的なFEA適用の構築を目指す!!

維持管理(性能)

センサー,ロボットの前に,

[100%アクセス可能, easyアクセス]

[あわせ, 2次部材の撤去]など

橋構造システムについて,直ちに!!

ミニ・リニューアル[投資]

を先行して欲しい!!

↑ 提案・希望!!

点検と性能評価の課題

(1)点検

- ・ 点検と実体(性能)関係??
- ・ 点検の効率, メリハリ(長大橋ほど)

(2)劣化した橋の性能評価, センシング

- ・ 劣化した橋のサインが[掴めない]??



- ・ どの、何をセンシング,何のために??
- ・ 現有性能不明でBMSは可能か??

[第1ステップ] 腐食減肉部材を対象に、
簡単に強度を同定する手法(簡易評価法)を準備
↑ 簡単な手順, 指標が欲しい!!

大幅に低下していると判定!! (←設計許容値を満足しない)

[第2ステップ]

- ・ 実荷重の測定 (← 実荷重強度ベース)
- ・ シェル要素3D-FEAによる耐力計算

(↑ 実際に近い強度, 余耐力算定)



管理限界値の設定(架け替え??, 改修??)

対応策の提案!!

設計した橋は,

シェル・ソリッド要素3D-FEAモデル
をもつこと, 準備すること!!

維持管理(突発事故も含め)に利用する!!

依然として, 影響面解析, 弾塑性解析の繰り返し計算に基づくシェルFEAベースの一貫設計は厳しいが, モデル作成, 固定荷重解析は簡単に対応できる. 将来(新設対応)のためにも!!

最適(効率的, メリハリ) 点検戦略!!

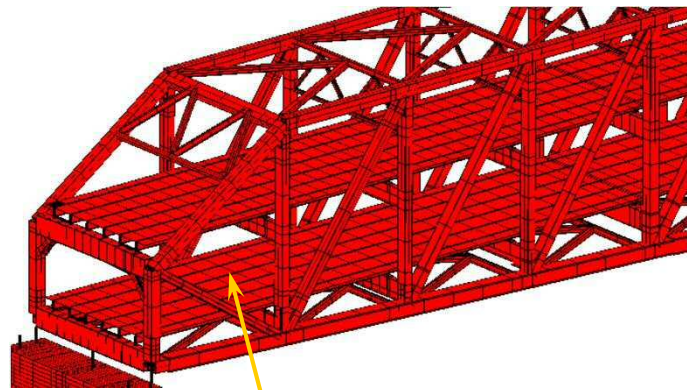


港大橋
(阪神高速道路(株))

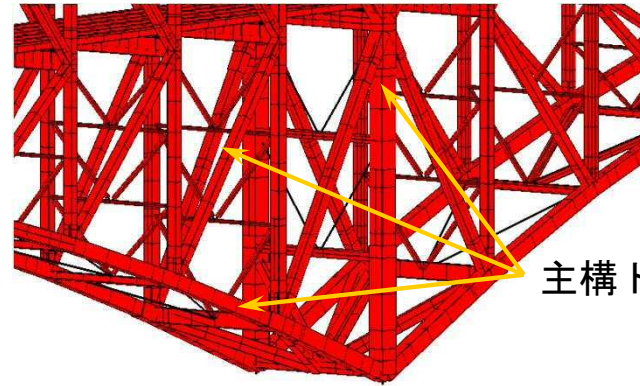


**Aging & Redundancy analyses
by nonlinear 3D-FEA**

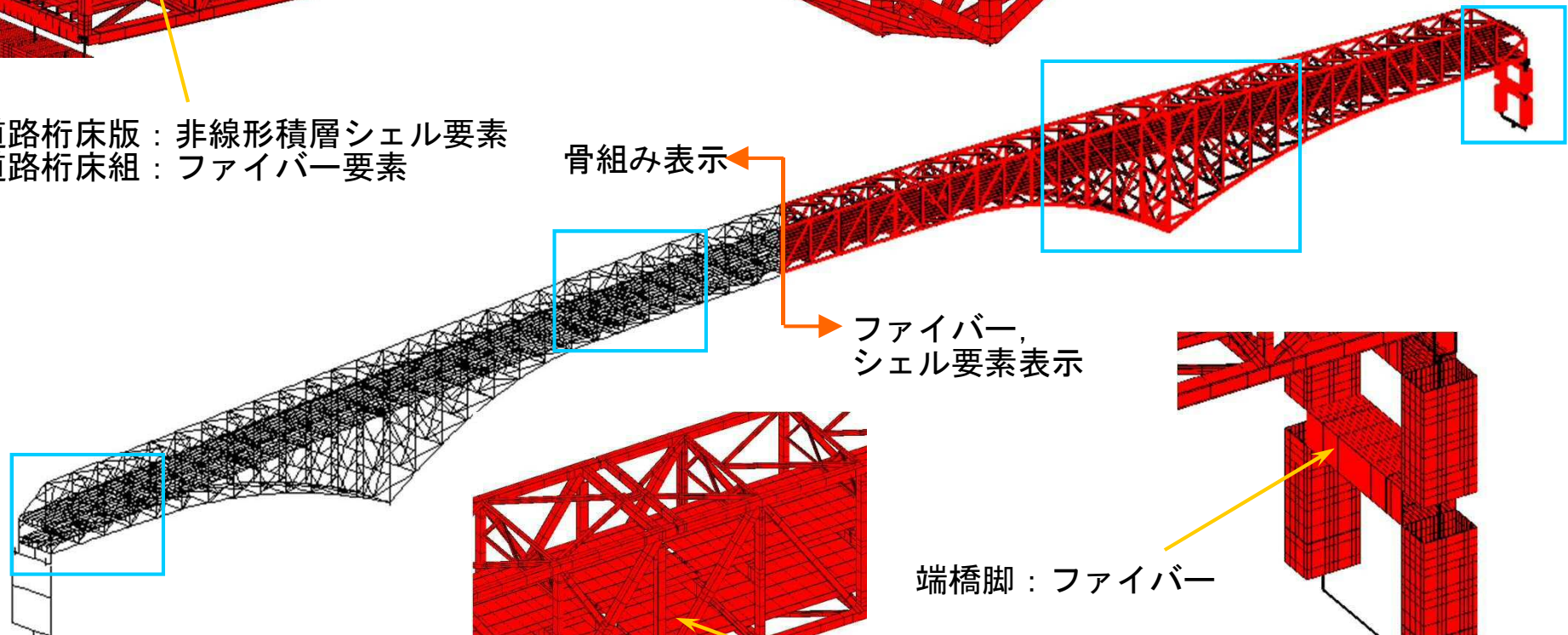
FEA(要素分割&使用要素)



道路桁床版：非線形積層シェル要素
道路桁床組：ファイバー要素



主構トラス：ファイバー要素



骨組み表示

ファイバー,
シェル要素表示

端橋脚：ファイバー

ゲルバー部
アイバー：ファイバー

阪神高速道路(株)より

Aging(経年劣化)解析

[観測部材の劣化]

Corrosion rate of observation member

(年)

スタート
Original

降伏

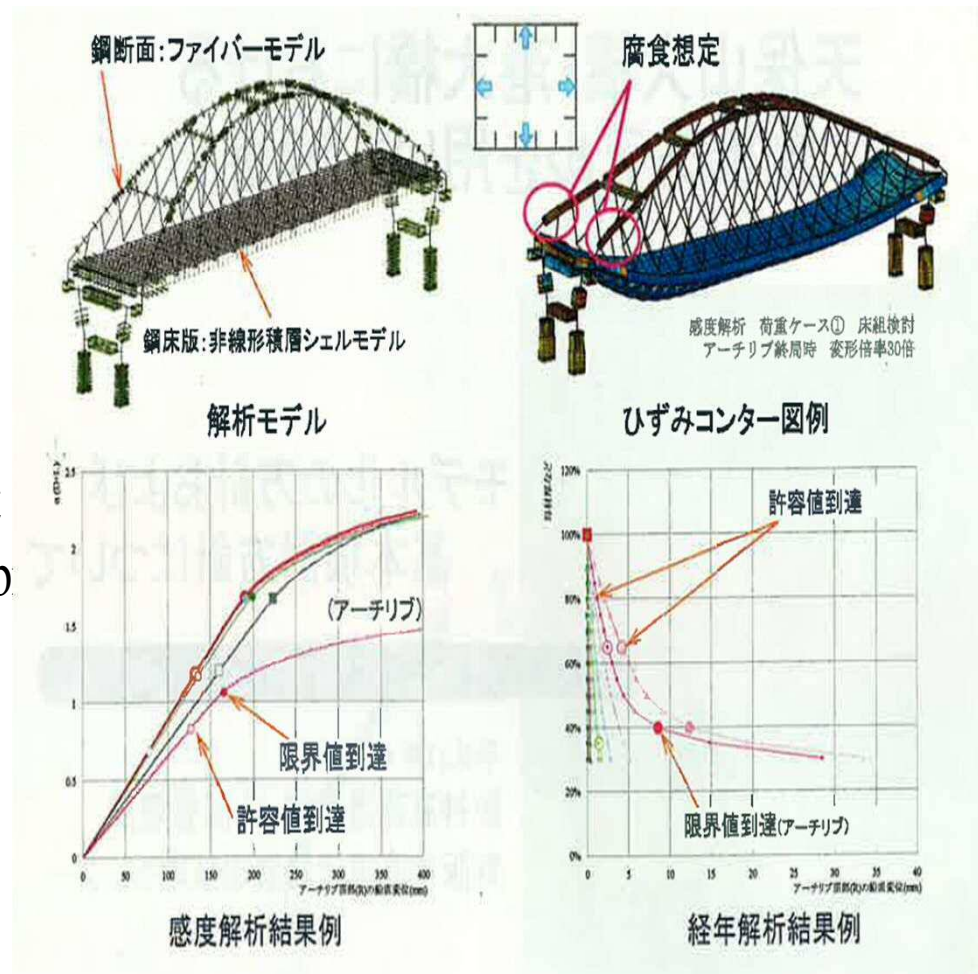
yield of member

X

橋の崩壊
limit
(failure of b

[橋システムの性能]
displacement of bridge

阪神高速道路(株)より



設計した橋を対象にFEモデル構築

【Path-1】



≪腐食パターン, 腐食量(現地実績)の入力≫



FE余耐力解析→性能, 寿命予測(維持管理戦略)

{& 突発事故対応!!}

【Path-2】



全体FE耐荷力解析



更なる合理化(断面構成の見直し)

性能照査技術, これからは!!

現在(有)の構造性能を知る,

照査する技術開発

鍵は, 3D-FEA & センシング技術

[marriage(順 + 逆解析)]

劣化した構造物は

どのようなサインを発しているのか,

どのように掴むのか, 掴めるのか????

性能(変化状況)の

[定量化, 見える化]

- redundancy analysis
- aging analysis

の支援の元!!

Agingを科学する!!

耐久性[疲労, 腐食]に関わる性能評価技術

あわせ未来予測技術の確立

性能照査型 維持管理設計法の構築

[守るとき]の性能照査法

*劣化状況のビデオだけでなく、
安全性に関わる信頼性指標(β)や
コストパフォーマンスの提示!!

維持管理における性能照査

終局限界状態とは, また性能照査法は??

要求性能 : 橋の落橋を防ぐ

性能照査 : 要検討

使用限界状態とは, また性能照査法は??

・ ・ ・ ・ ・

海外 : ISO, AASHTO[Load Rating ・ ・]

国内 : ゲート(電力)の取り組み

Life-span Design by 3D-FEA

環境(飛来塩分etc.)

↓ ←[環境・構造の連関FEA]

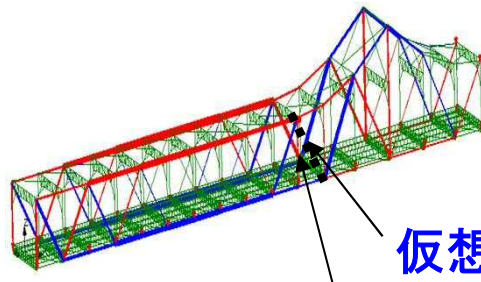
構造の状態劣化予測

↓ ←[Aging FEA]

構造性能(現状と将来[危険度])予測

↓ [redundancy FEA]

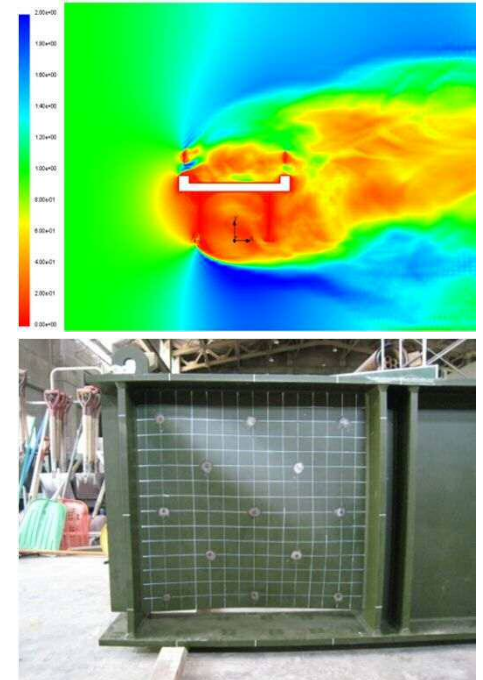
対策とBMSへの反映, 構築



仮想破断: 斜材

鉛直部材

R=1.973



これからの20年

- ・ 既存橋梁の現有性能と未来性能を
同定する技術(解析, センサー, ロボット)
と維持管理への反映
- ・ 性能照査型維持管理設計法の構築
- ・ リニューアル時代の備え, その必要性和
新しい橋の基本コンセプト構築

今から20年前, 「長寿命化技術」の重要性を主張した!!

↑ 当時, メーカーからバッシング受けたが, 今でしょ!! 66

小手先でない, パフォーマンスのみでない,

大局観が望まれる!!

世界を意識して,

設計(計画, 設計, 製作, 施工, 維持管理)
をどうするか, その中で, FEA, センシン
グ, ロボットをどう組み込むか, 大局的に
考えて欲しい!!

新材料

鋼材

- ・ 1990年初め[(現)鉄鋼連盟と学との懇談会]

[学からの新鋼材の開発リクエスト]

「さびない鋼」 ← 耐候性鋼(さびを遅らせる)

「疲労しない鋼」

「音のしない鋼」

「ヤング係数の高い鋼」

*背景：(土木分野)HT700,800以降のリクエストが無い

↑ 弾性設計の影響を強く受けているため!!

(建築分野)S-S改善, 制御の要求が多い、活発

High Performance Steel

開発プロジェクト in USA

1990年初めからスタート

USA[AISI, the U.S. Navy, FHWA, 学]

【特徴：産, 官, 学の共同開発】

- ・ **高強度鋼(HPS-485W)[降伏点485MPa]**
- ・ **高靱性(fracture toughness)**
- ・ **溶接性**
- ・ **耐候性鋼他**

橋用の鋼材(HPS)

- ・ SM490Y

(最も効率[コストパフォーマンス]がよい)

- ・ SM570-TMCP

「高延性・靱性」, 「低余熱」,
「降伏点一定」, 「耐候性」 etc.

では, 高強度鋼(HSS)は???

橋設計に高強度鋼(HT700, HT800)

は必要か???

- ・ 明石海峡大橋(超長大吊橋)

↑ 次期PJがみえない!!

- ・ 港大橋(長大トラス橋)

↑ 斜張橋#に置き換わっている!!

[#スパン1,000mの桁でもSM490Y, SM570で設計可能]

今, 必要性は, どこに!!

吊橋, 斜張橋の塔 - レベル2弾性設計対応

課題(なぜ広く使用しないか??)

スパン70m以上はPC系橋梁が競争的!!

今後

- ・ 強度を求める古い発想
 - 環境に易しい鋼は???
 - 災害を低減できる鋼???
- ・ コストパフォーマンスの良い鋼は???

CFRP

- ・当初[過去], 主要構造材としての適用トライ[x]

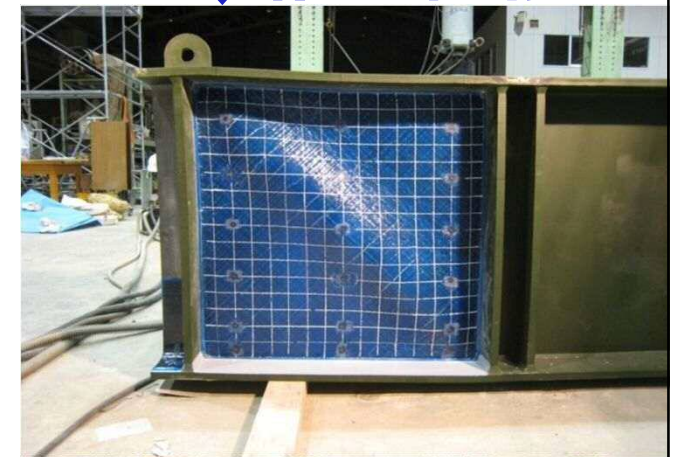


- ・耐震補修・補強 (コンクリート橋脚)
- ・維持管理(床版, 鋼部材)

↓ 桁端補修



鋼トラス橋補修例



将来的に!!

What's merit??

- 検査路, 付属物に適用
[↑これまで取り替えが前提部材への適用性]
- 構造2次部材そして主部材へ(??)

[徐々に移行??]



ご清聴ありがとうございました

