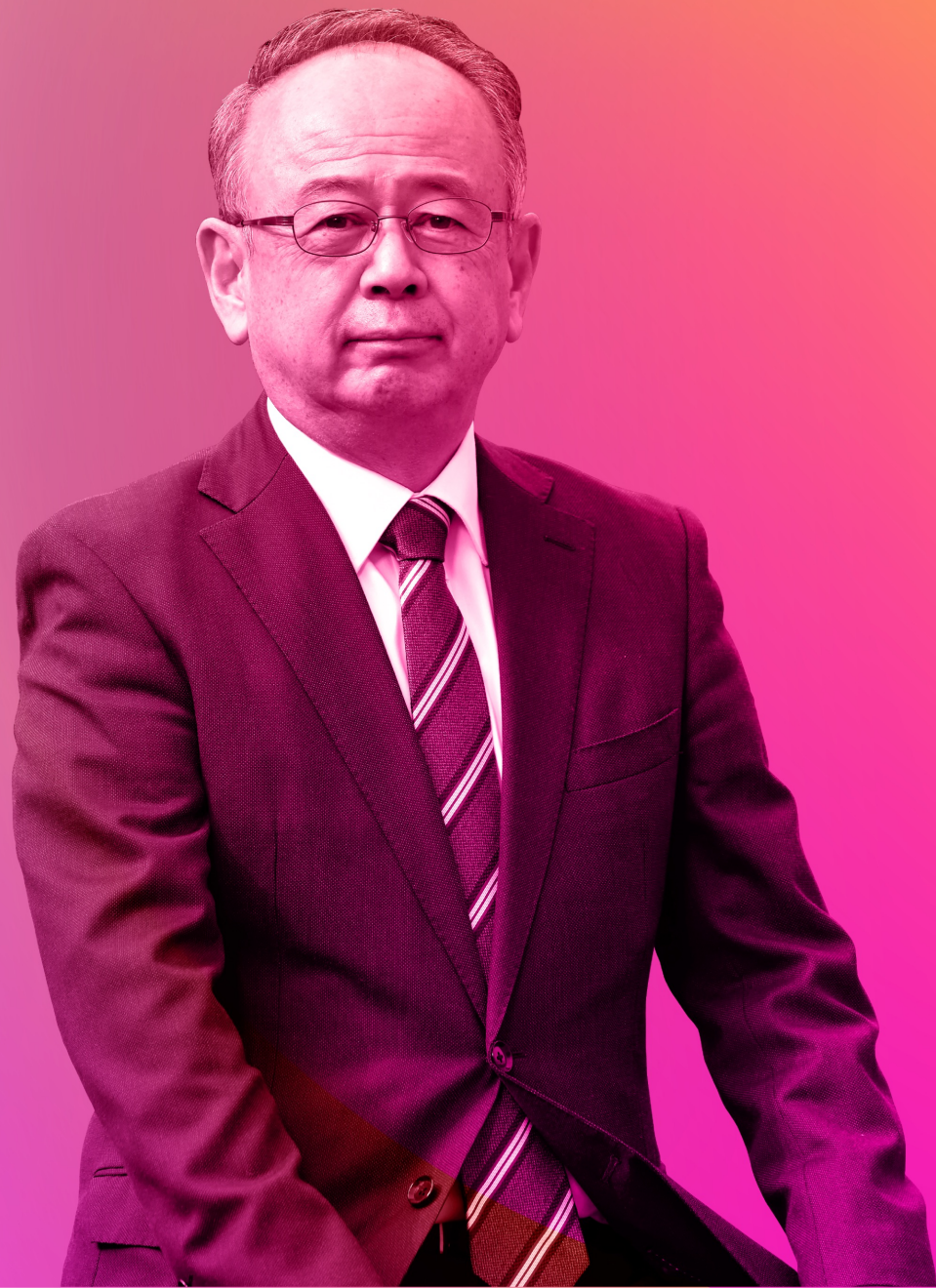


Load ratingを用いた 道路橋維持管理

埼玉大学 教授
奥井 義昭

part. 1



奥井 義昭

Yoshiaki Okui

埼玉大学 教授、埼玉大学院卒、工学博士(東京大学)

兼任研究科・学部:

- 大学院 理工学研究科環境社会基盤専攻
- 工学部 環境社会デザイン学科
- レジリエント社会研究センター

現在の研究課題:

- 鋼橋および合成桁の設計法に関する研究
- 橋梁設計における安全係数の合理的決定法に関する研究
- 橋梁維持管理のためのリダンダンシーやVulnerability assessmentに関する研究
- 結晶性硬岩の超長期劣化問題に対する解析モデルの開発

受賞学術賞:

- 2018, Kurita-Albrecht Best Scientific Paper Award
- 2011, 土木学会田中賞:論文部門, 平成23年5月27日受賞
- 2011, 土木学会論文賞, 平成23年5月27日受賞
- 2010, 土木学会田中賞:論文部門, 平成22年5月28日受賞
- 2007, 土木学会田中賞:論文部門, 平成19年5月25日受賞

奥井 義昭

Yoshiaki Okui

埼玉大学 教授、埼玉大学院卒、工学博士(東京大学)

著書:

- 鋼構造学 (コロナ社 2020.03)
- Handbook of International Bridge Engineering (CRC Press 2013)
- 道路が一番わかる 道路の構造・工法が手に取るように理解できる (技術評 2009)
- 合成桁の限界状態設計法試案 (一般社団法人日本鋼構造協会, JSSCテクニカルレポート 2006)
- A Micromechanics-based Continuum Theory for Microcracking localization of Rocks under Compression
(John Wiley & Sons, Continuum models for materials with microstructure 1995)

論文:

- 縦横比が大きい単リブ補剛板の限界圧縮強度評価 (土木学会論文集A1(構造・地震工学) 2020)
- Seismic response of isolated bridge with high damping rubber bearings : Self-heating effect at subzero temperatures (Steel Construction 2019)
- SM570を使用したコンクリート充填鋼製橋脚の 地震時変形性能に関する実験的研究 (構造工学論文集 2018)
- 自己発熱の影響を考慮した高減衰ゴム支承の温度依存特性 (学会論文集A1 2017)

Load ratingを用いた道路橋維持管理

- 海外基準の動向, ケーススタディ, 関連する研究紹介 -

埼玉大学 奥井 義昭



MIDAS Construction Technical Web Seminar

概要

- Section.1 Load ratingとは？
- Section.2 既設橋評価に関する海外基準の動向
- Section.3 我国の既設橋に対するケーススタディ
- Section.4 システム・リダンダンシーとLoad rating
- Section.5 維持管理用の活荷重係数
- Section.6 橋梁評価マニュアル
- Section.7 既設橋に必要な安全性のレベル

Section. 1

Load rating とは？

Load ratingとは？

アメリカミネソタ州の落橋事故 (2007/8/1)

奥井 義昭 × MIDAS

旧I-35W橋
(1967年建設)



<http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge>

Load ratingとは？

New I-35W Mississippi river bridge

奥井 義昭 × MIDAS



Load ratingとは？

10th Avenue Bridge (1929年完成)

奥井 義昭 × MIDAS



Load ratingとは？

10th Avenue Bridgeの橋脚

奥井 義昭 × MIDAS



鉄筋が錆び、それによって
かぶりが剥落している。

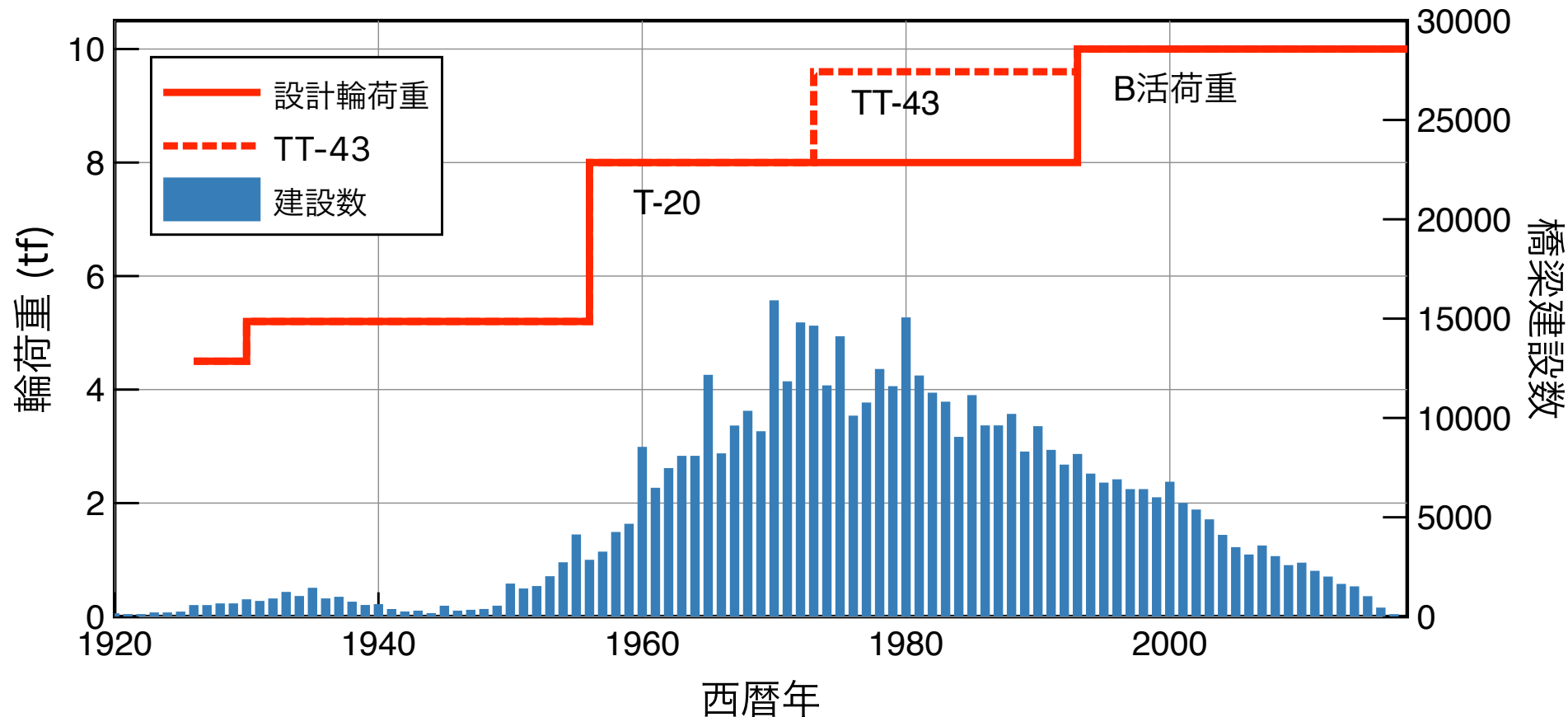
Load ratingとは？

橋梁を下から 見上げたところ

古い橋を使い続けられる
技術があるのでは. . .

奥井 義昭 × MIDAS





非常に多くの橋梁がB活荷重より小さい荷重で設計されている！

既設橋

- ✓古い設計荷重 (TL-20：20%耐力不足)
- ✓損傷・劣化 (例えば5%耐力減)
- ✓設計基準の改定 (H29道示では安全率が変更)

既存不適格＋損傷・劣化

放置して何か事故があれば責任追及必死

全ての既設橋を補修・補強or交通制限？

どの橋が本当に耐力不足なのか？

目視だけでは分からない！

Load Ratingとは？

点検結果に基づき設計活荷重に対する
余裕度をRF値で数値化

Rating Factor

$$RF = \frac{C - DL}{LL}$$

RF = Rating factor

C = 部材耐力 ← 点検結果に応じて減じる

DL = 死荷重効果

LL = 活荷重効果

C-DL = 活荷重に利用できる耐力

Section. 2

海外基準の動向

- 新設・既設両方を扱うのが世界的な今後の方向性
- カナダ：CHBDC Sec.14
- オーストラリア：AS 5100.7 Rating of Existing Bridges
- AASHTO

新設設計：LRFD, Load and Resistance Factored Design

既設橋評価：MBE, Manual for Bridge Evaluation

点検基準：NBIS, National Bridge Inspection Standards

AASHTOは3つに分かれているが、一体で運用されている

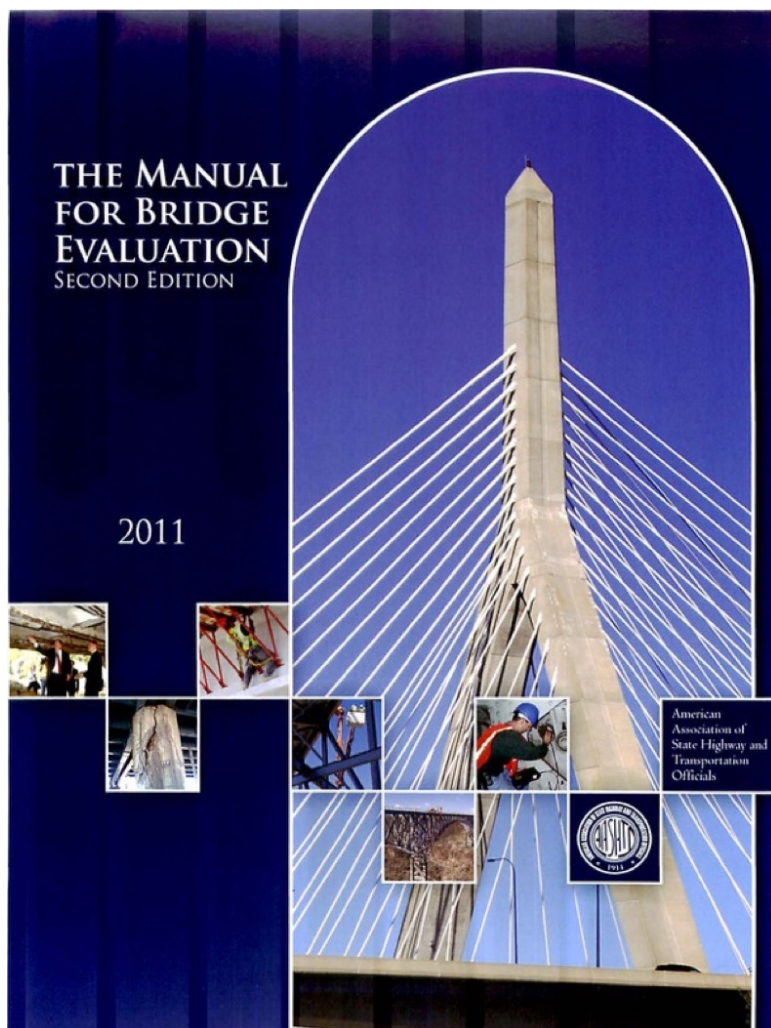
USA, カナダ, UK, オーストラリア, デンマーク, スイスでは既に既設橋の耐力評価基準が開発済み.

Eurocode for Bridge Safety Assessment検討中

- 信頼性理論に基づく
- システムリダンダンシーを考慮
- Site-specific loadの考慮
- 現地計測結果の利用
- Proof loading testの利用

Ref: Wisniewski, D.F., Codes for safety assessment of existing bridges--Current state and future development, Struct. Eng. Int., 22(4) 2012

AASHTO: Manual for Bridge Evaluation



ABBREVIATED TABLE OF CONTENTS

SECTION 1: INTRODUCTION.....	
SECTION 2: BRIDGE FILES (RECORDS)	
SECTION 3: BRIDGE MANAGEMENT SYSTEMS	
SECTION 4: INSPECTION	
SECTION 5: MATERIAL TESTING.....	
SECTION 6: LOAD RATING.....	
SECTION 7: FATIGUE EVALUATION OF STEEL BRIDGES.....	
SECTION 8: NONDESTRUCTIVE LOAD TESTING	
APPENDIX A: ILLUSTRATIVE EXAMPLES.....	

National Bridge Inspection Standards (NBIS)

- 1967年のシルバー橋落橋事故の翌年に制定
- 2年に1回検査と安全性の評価(rating)を義務化
- 橋の耐荷力を評価し、耐荷力不足の場合は、補強、閉鎖、もしくは荷重制限を表示しなければならない

Load Rating Methods

AASHTOでは設計基準の変更に伴い3つの方法が開発

■ 1970年 許容応力度法 (ASR)

- 現在で木橋とmasonry橋のみに適用

■ 1978年 荷重係数法 (LFR)

- 荷重係数によって安全性を評価

■ 2003年 荷重抵抗係数法 (LRFR)

- LFRと比較的似ているが、確率論に基づく
- 安全性のレベルが比較的一定
- FHWAはLRFRを推奨

- 耐荷力は橋梁の現況の状態に基づく
- このため、橋梁は十分な確度の検査を必要な時に受けていることが前提
- 耐力評価のための有効断面は腐食や他の劣化の影響を考慮

Load Ratingのタイプ

- 竣工時の計画に基づくload rating (As-built LR)

ベースライン load rating

- 検査に基づくload rating (As-inspected LR)

直近の検査結果に基づくload rating

2つのレベル

□ Inventory Rating (設計時のrating)

活荷重は通常状態の設計荷重を近似

供用期間 75年

目標信頼性指標 $\beta = 3.5$

□ Operating Rating (供用時のrating)

次の検査期間（5年 or 2年）までの最大許容荷重

目標信頼性指標 $\beta = 2.5$

AASHTO LRFR rating式：荷重側の係数

$$RF = \frac{\phi_c \phi_s \phi R - \gamma_{DC} DC - \gamma_{DW} DW}{\gamma_L (LL + IM)}$$

荷重側

DC 死荷重効果（主部材他） $\gamma_{DC} = 1.25$

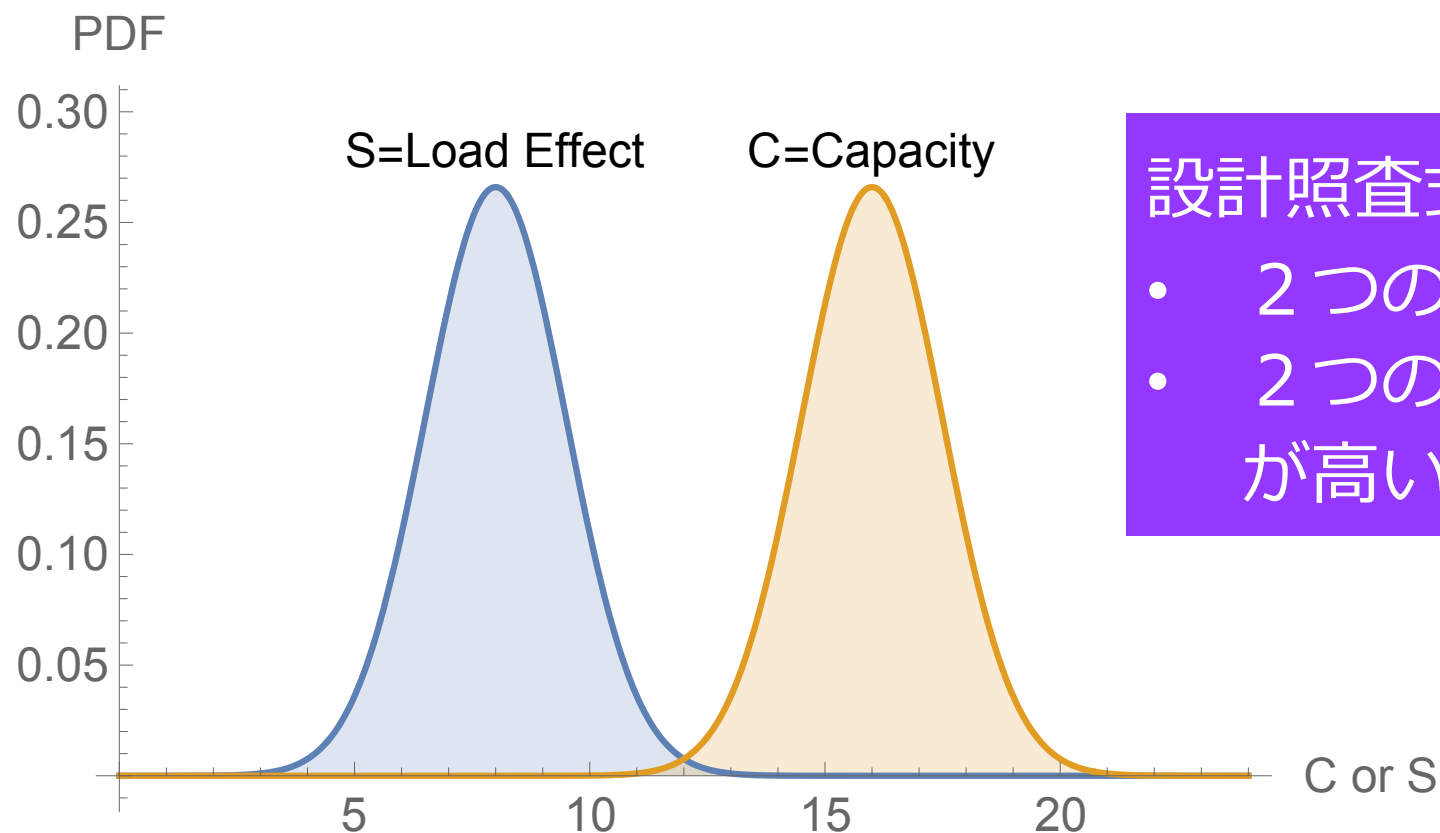
DW 死荷重効果（舗装等） $\gamma_{DW} = 1.50$

LL 活荷重効果

IM 衝撃

γ_L 活荷重係数(1.75:設計時, 1.35:供用時)

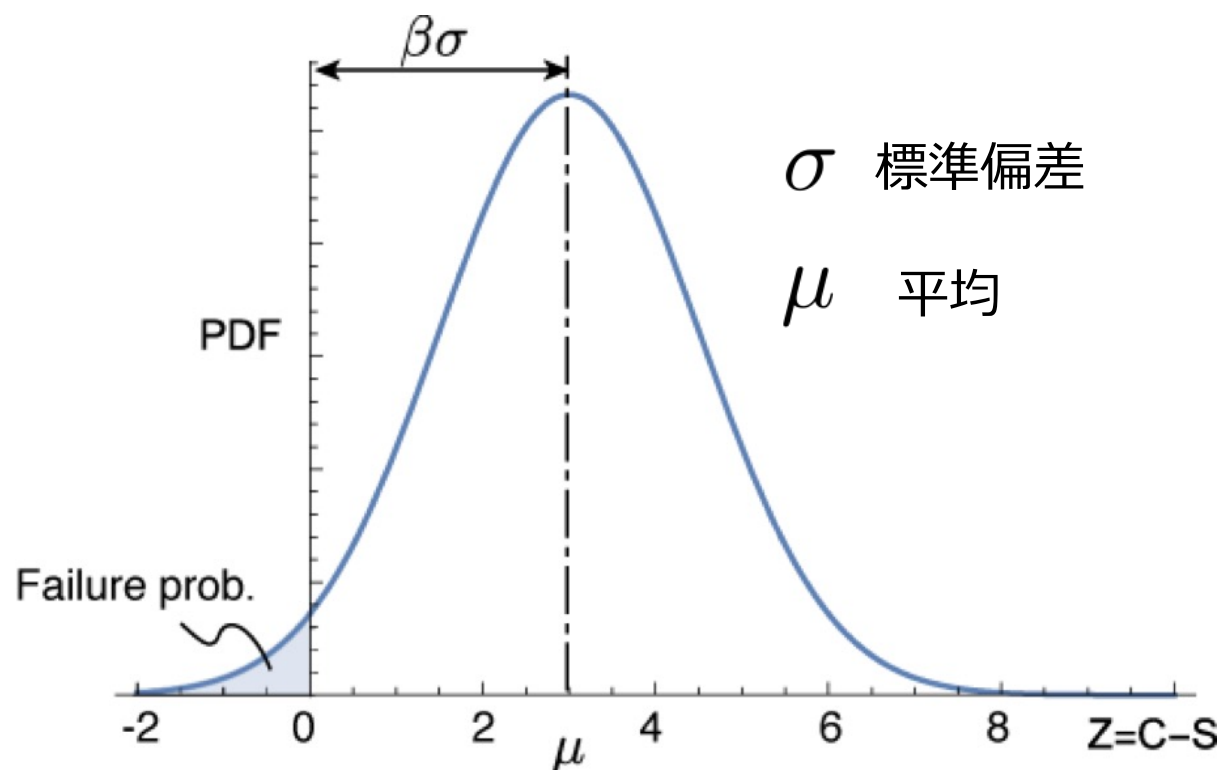
強度C, 荷重効果Sとも確率変数 → 安全係数の決定



設計照査式： $S < C$

- 2つの山の重なル部分が破壊
- 2つの山の距離が遠いほど安全性が高い

$Z = C - S$ の確率密度関数



C = 強度
 S = 荷重効果

β は平均値が限界値 $Z=0$
よりどれだけ離れているかを
表すパラメータ

$$RF = \frac{\phi_c \phi_s \phi R - \gamma_{DC} DC - \gamma_{DW} DW}{\gamma_L (LL + IM)}$$

抵抗側

R = 部材の強度

ϕ_c = システム係数 (リダンダンシー)

ϕ_s = 部材の状態係数 (検査結果より)

点検結果とのリンク

$$RF = \frac{\phi_c \phi_s \phi R - \gamma_{DC} DC - \gamma_{DW} DW}{\gamma_L (LL + IM)}$$

荷重側

DC, DW = 死荷重効果 (主部材他1.25, 舗装等1.5)

LL = 活荷重効果 IM = 衝撃

γ_L = 活荷重係数 (1.75 : 初期設計時, 1.35 : 供用時)

信頼性理論の利用

AASHTOの枠組み：調和的な構成

設計基準 LRFD

検査基準 NBIS

評価基準 MBE (LRFR)

AASHTO Ware Bridge

= Design + Management + Rating

個々の内容が単純でも
枠組みをうまく作ると
合理的で無駄がなくなる

AASHTOWare: 統合化

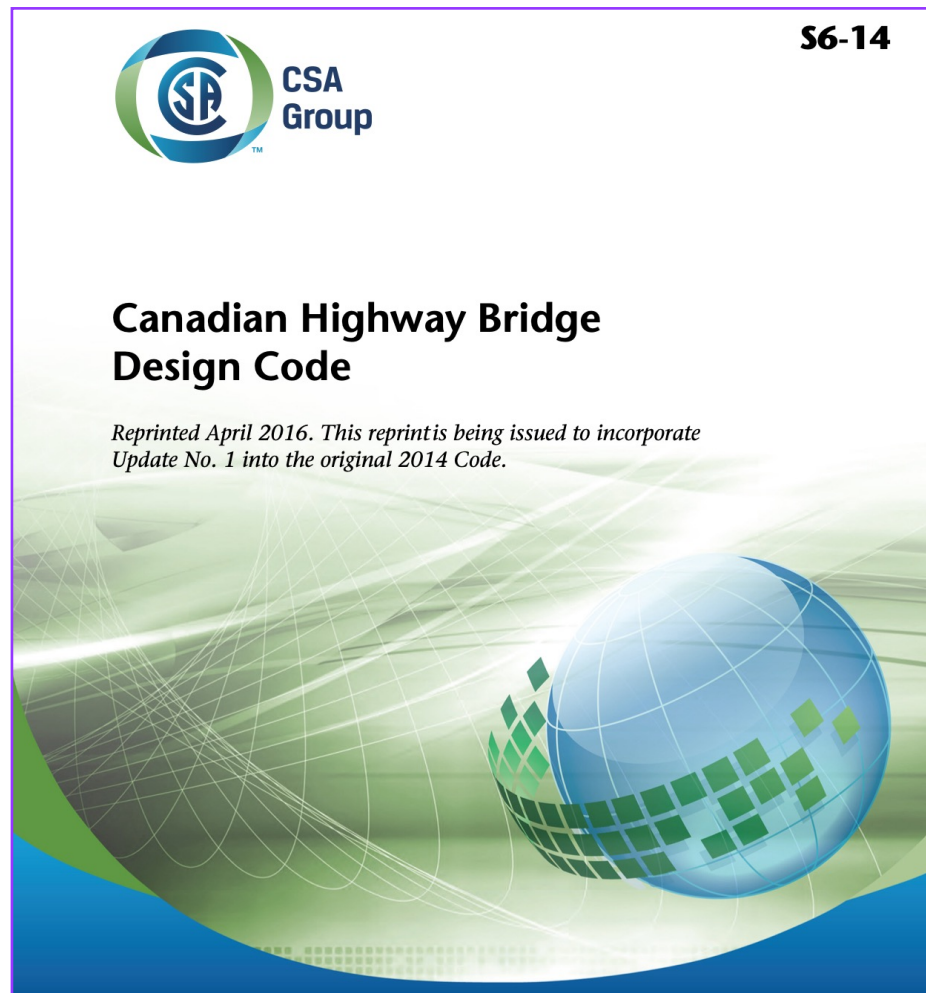
AASHTOWare Bridge

Inventory, inspect, rate and design

Aging bridges—and the shortage of funds needed to repair or replace them—are urgent concerns. Soaring construction costs and tight budgets have made safety, performance, reliability and preservation objectives harder to achieve.

To conquer current challenges, AASHTOWare offers three Bridge software tools linked by a single database. These are the result of more than 20 years of extensive research and feedback from DOT professionals nationwide. Bridge developers' ongoing commitment to advance the software platform assures its currency with the latest technology.

"The Oregon Department of Transportation uses AASHTOWare Bridge Management as an integral part of our integrated bridge management process. The software is an efficient data management solution while also providing tools for maintenance planning and identification of



Section 14 — Evaluation 665

- 14.1 Scope 665
- 14.2 Definitions 665
- 14.3 Symbols 665
- 14.4 General requirements 668
 - 14.4.1 Exclusions 668
 - 14.4.2 Expertise 668
 - 14.4.3 Future growth of traffic or future
 - 14.4.4 Scope of evaluation 669
- 14.5 Evaluation procedures 669

Live load capacity factor

$$F = \frac{UR_r - \Sigma\alpha_D D - \Sigma\alpha_A A}{\alpha_L L (1 + I)}$$

F値はAASHTOのRFとほぼ同じ定義

U = 抵抗係数, R_r = 部材耐力, D = 死荷重効果,

A = 風, クリープなどの副次的な荷重効果,

L = 活荷重効果, I = 衝撃係数,

$\alpha_D, \alpha_A, \alpha_L$ = 各荷重に関する荷重係数

目標信頼性指標がまず定義されて
それに応じて荷重係数が決定される

供用時 (Load rating) の目標信頼性指標

リダンダンシー

延性

点検レベル

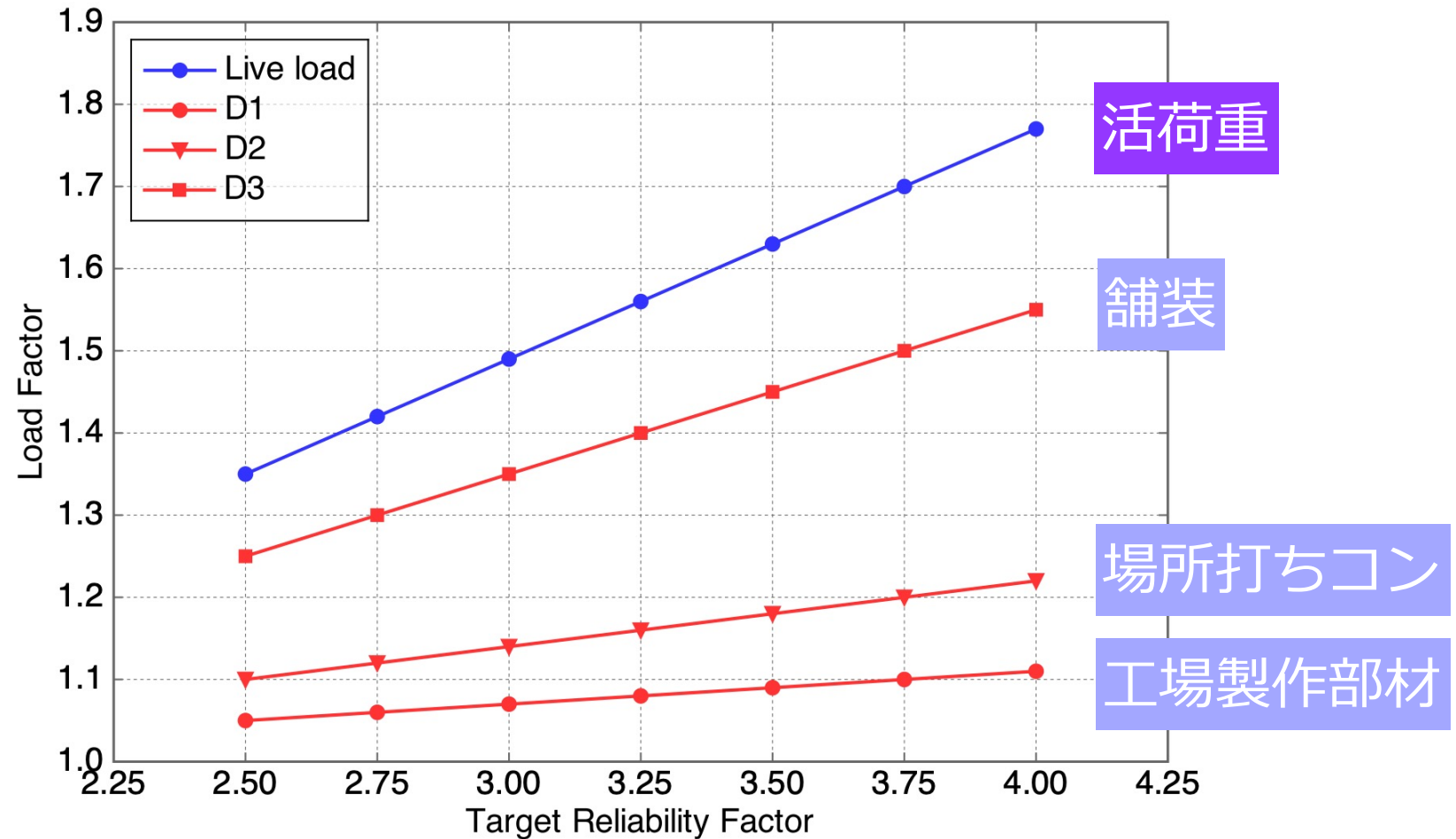
FCM

NonFCM

System behaviour category	Element behaviour category	Inspection level		
		INSP1	INSP2	INSP3
S1	E1	4.00	3.75	3.75
	E2	3.75	3.50	3.25
	E3	3.50	3.25	3.00
S2	E1	3.75	3.50	3.50
	E2	3.50	3.25	3.00
	E3	3.25	3.00	2.75
S3	E1	3.50	3.25	3.25
	E2	3.25	3.00	2.75
	E3	3.00	2.75	2.50

注記：新設時の信頼性指標=3.75

目標信頼性と荷重係数の関係



カナダ基準: Inspection Level

Evaluation shall not be undertaken without inspection. Inspection levels shall be classified as follows:

- (a) **Inspection Level INSP1**, where a component is **not inspectable**. This can include hidden members not accessible for inspection.
- (b) **Inspection Level INSP2**, where inspection is to **the satisfaction of the evaluator**, with the results of each inspection recorded and available to the evaluator.
- (c) **Inspection Level INSP3**, where **the evaluator has directed** the inspection of all critical and substandard components and final evaluation calculations account for all information obtained during this inspection.

現場主義：評価者の判断が重視されている



Bridge design

Part 7: Bridge assessment



AS 5100.7 Rating of Existing Bridges
オーストラリアの橋梁設計基準AS5100の
Part 7が既設橋の評価

オーストラリアの既設橋評価の基準は当初
HB77.7というコード名で1996年に出版

その後, 2003年と2004 年に改定

現在の最新版は2017年のAS5100.7-201

目次

	<i>Page</i>
1 SCOPE AND APPLICATION	4
2 NORMATIVE REFERENCES	5
3 DEFINITIONS.....	5
4 NOTATION AND ABBREVIATIONS	7
5 MATTERS FOR RESOLUTION BEFORE DESIGN COMMENCES	8
6 GENERAL.....	10
7 FUTURE GROWTH OF TRAFFIC OR FUTURE STRUCTURAL DETERIORATION	10
8 RATING—LIMIT STATES	11
9 BRIDGE ASSESSMENT AND LOAD RATING.....	11
10 STRUCTURAL CAPACITY	12
11 LOADS	18
12 LOAD FACTORS.....	24
13 FATIGUE	26
14 LOAD RATING FACTOR.....	27
15 LOAD TESTING.....	29
16 STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM).....	32
17 OTHER TEST METHODS.....	34

AS5100.7は道路橋と鉄道橋も対象

終局限界状態，使用限界状態，疲労終局状態についてrating

$$RF \leq \frac{\phi R_u - (\gamma_g S_g^* + \gamma_{gs} S_{gs}^* + S_p^* + S_s^* + S_t^*)}{\gamma_L (1 + \alpha) W S_L^*}$$

ϕ は耐力係数， R_u は極限耐力， W は車線の同時載荷係数， α は衝撃係数、

$\gamma_g, \gamma_{gs}, \gamma_L$ = 死荷重， 後死荷重， 活荷重に対する荷重係数

S_g^*, S_{gs}^*, S_L^* = 死荷重効果， 後死荷重効果， 活荷重効果

S_p^*, S_s^*, S_t^* = プレストレスを含む他の荷重効果， 不等沈下， 温度差による荷重効果

- 米国，カナダ，オーストラリアのLoad ratingの紹介
- 新設橋設計と既設橋評価を同時に扱える設計基準が世界的趨勢
- 実態交通荷重に応じた既設橋評価のための荷重係数が必要
- 今後の課題：既設橋の必要な安全性のレベルの検討

Section. 3

我国の既設橋に対する ケーススタディ

我国の既設橋に対するケーススタディ

対象橋梁

奥井 義昭 × MIDAS

橋梁諸元	断面図
A橋 鋼単純合成鈑桁 L=34.4m S39鋼道示（TL-20） * 竣工後追加荷重 有 * オーバーレイ荷重 未考慮	
B橋 鋼単純合成鈑桁 L=39.250m S55道示（TL-20） * 竣工後追加荷重 無 * オーバーレイ荷重 考慮	
C橋 PC単純ポステン合成桁橋 L=29.1m S43PC道示（TL-20） * 竣工後追加荷重 有 * オーバーレイ荷重 未考慮	

D橋 鋼3径間連続非合成箱桁橋 L=46.65+65.05+49.71m S55道示（TL-20） * 竣工後追加荷重 無 * オーバーレイ荷重 考慮	
E橋 鋼3径間連続鋼床版箱桁橋 L=54.00+65.00+49.50m S48鋼道示（TL-20） * 竣工後追加荷重 有 * オーバーレイ荷重 考慮	
N橋 鋼3径間連続非合成鈑桁 L=3@28.0m S55道示（TL-20） * 竣工後追加荷重 有 * オーバーレイ荷重 未考慮	

各基準におけるRF値の計算方法

$$RF = \frac{C - \gamma_d D}{\gamma_L (L + IM)}$$

D = 死荷重効果

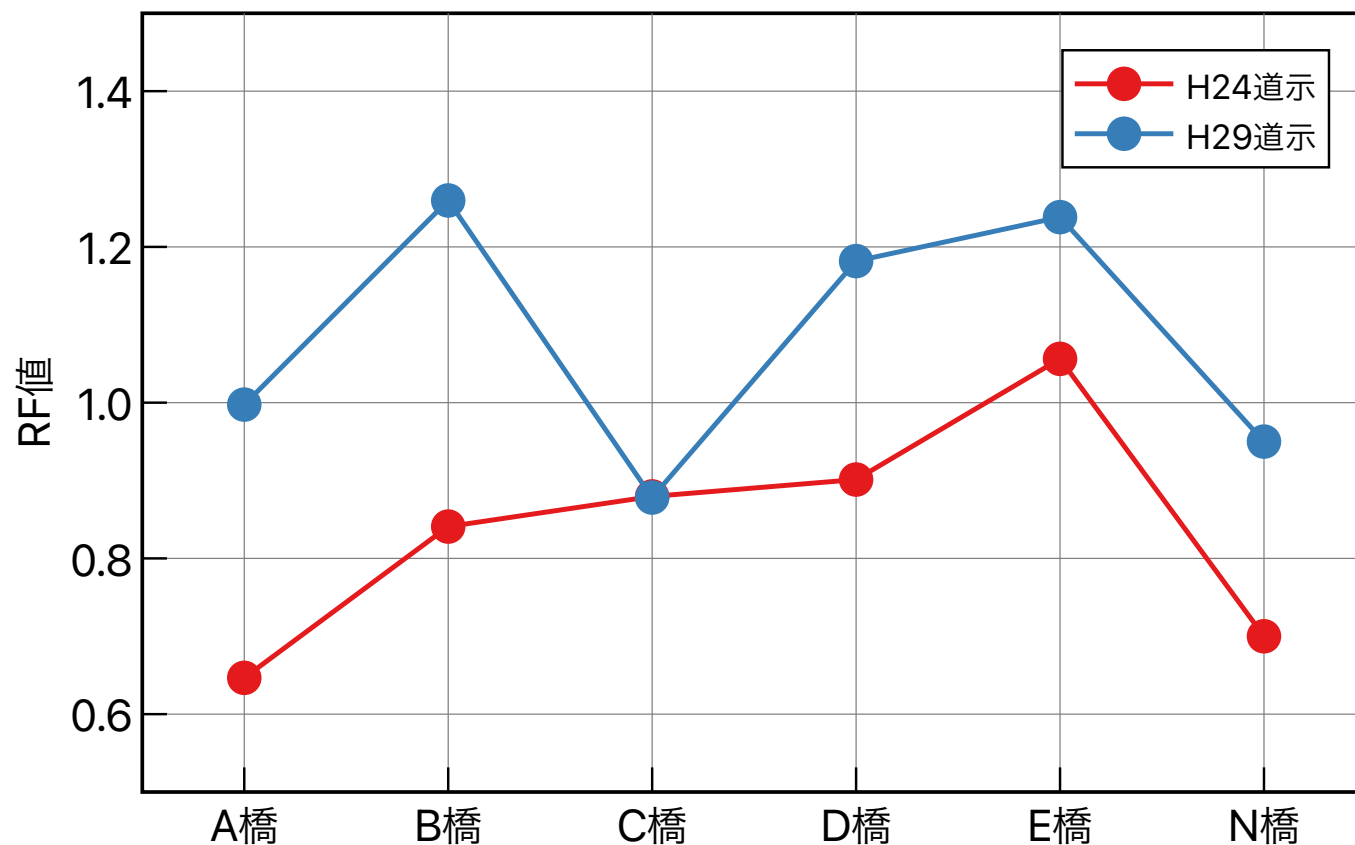
L = 活荷重効果（国内：B活荷重, AASHTO: HL-93）

IM = 衝撃

無損傷でシステム係数は1.0と仮定

基準	耐力 C	死荷重係数 γ_d	活荷重係数 γ_L
旧道示(H24)	許容応力 σ_a	1.00	1.00
新道示(H29)	応力制限値 $\sigma_{tud/cud}$	1.05	1.25
JSCE 標準示方書	設計曲げ耐力 M_{rd}	1.70	1.70
AASHTO MBE	公称曲げ耐力 M_n	1.50（舗装） 1.25（その他）	1.75 設計時レベル

新旧道示によるRF値（曲げ）



B活荷重

新旧道示の比較

→ 新道示RF値上昇(PC橋の除く)

旧道示

→ 鋼床版箱桁を除いてRF<1.0

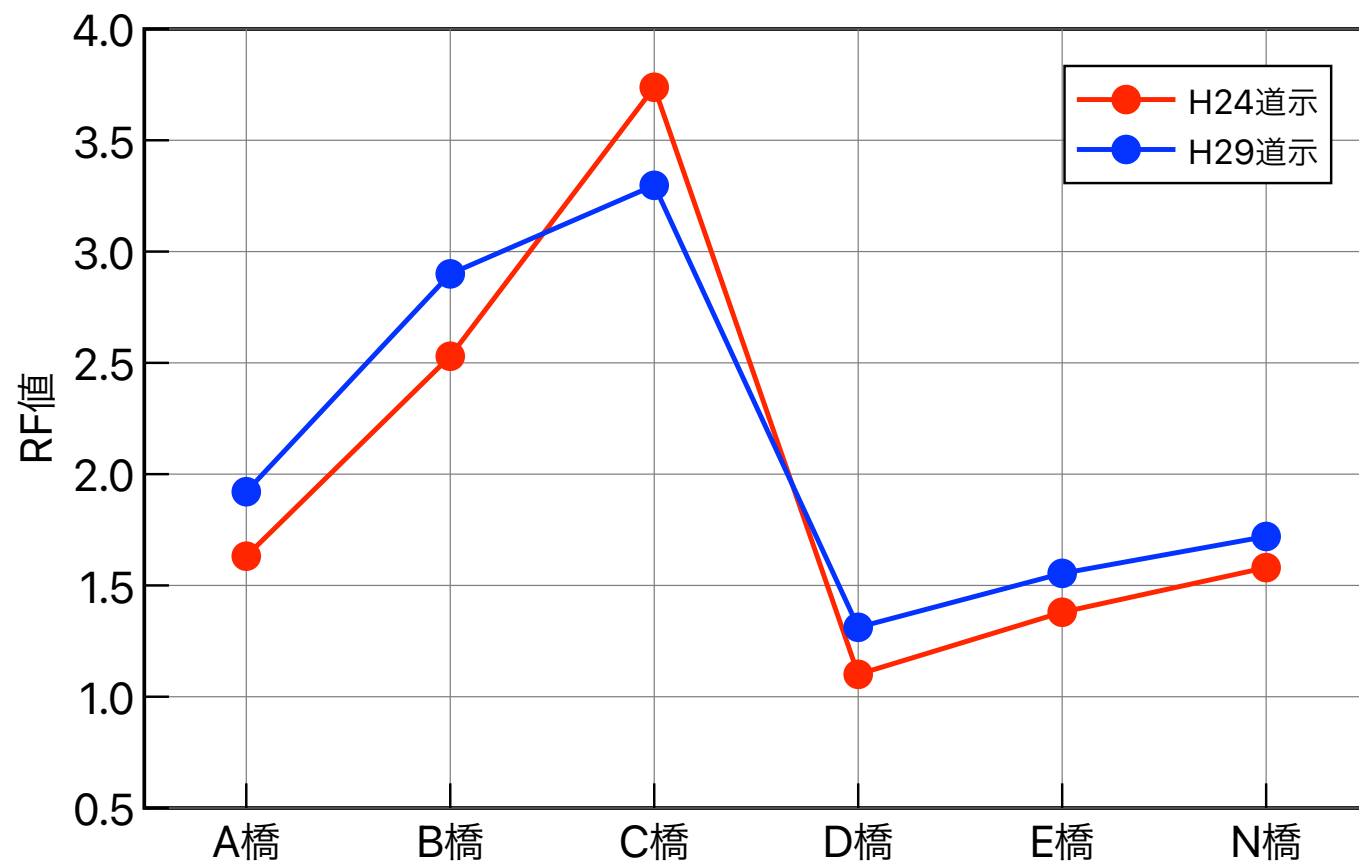
新道示

→ PC橋と非合成鈹桁を除いて
RF>1.0

同じ橋梁形式でもRF値異なる

→ A橋 vs B橋
オーバーレイの有無

新旧道示によるRF値（せん断）

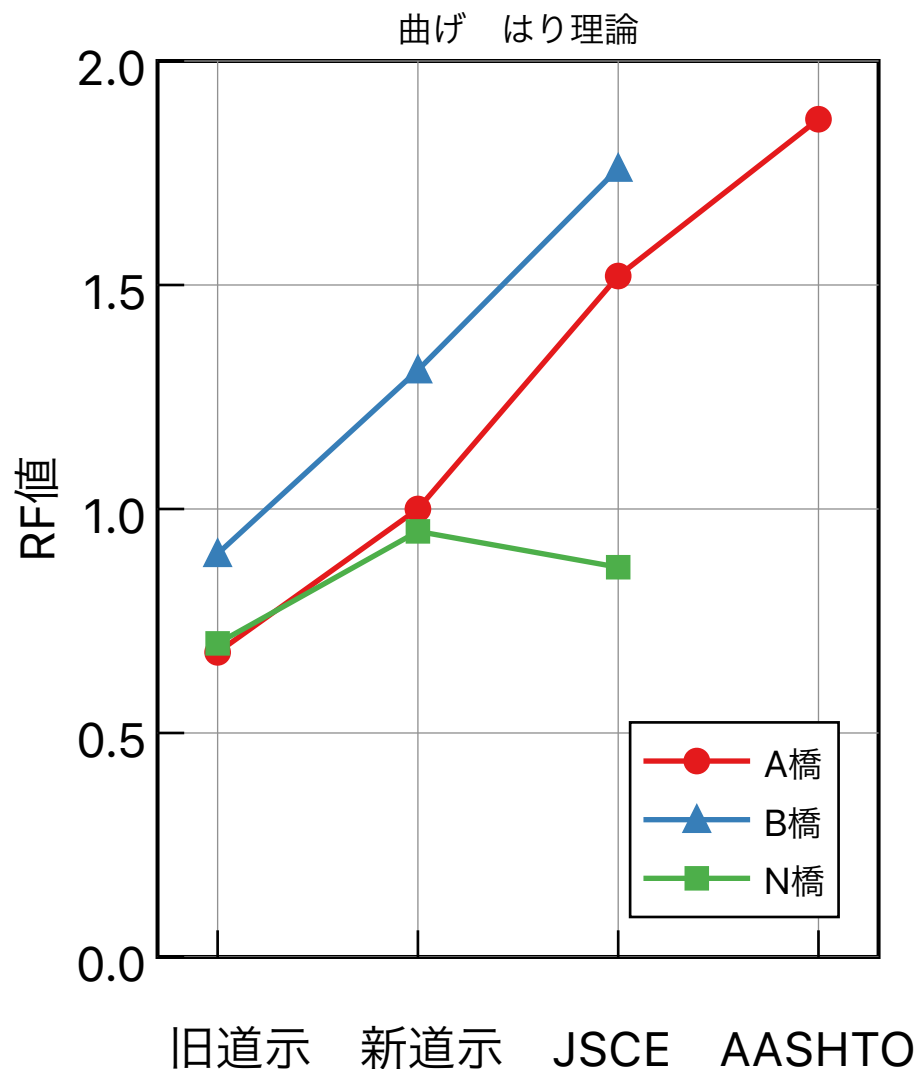


B活荷重

新旧道示の比較

→ 全てのケースで $RF > 1.0$
せん断は問題にならない

土木学会標準示方書，米国基準との比較（曲げ）



AASHTO = MBE

設計時レベル $\gamma_L = 1.75$ として計算
基準交通荷重 HL-93

A, B橋：合成桁（コンパクト断面）

終局耐力 = 全塑性モーメント
JSCE, AASHTOで耐力増加
合成桁のため $M_{pl} / M_y = 1.36$

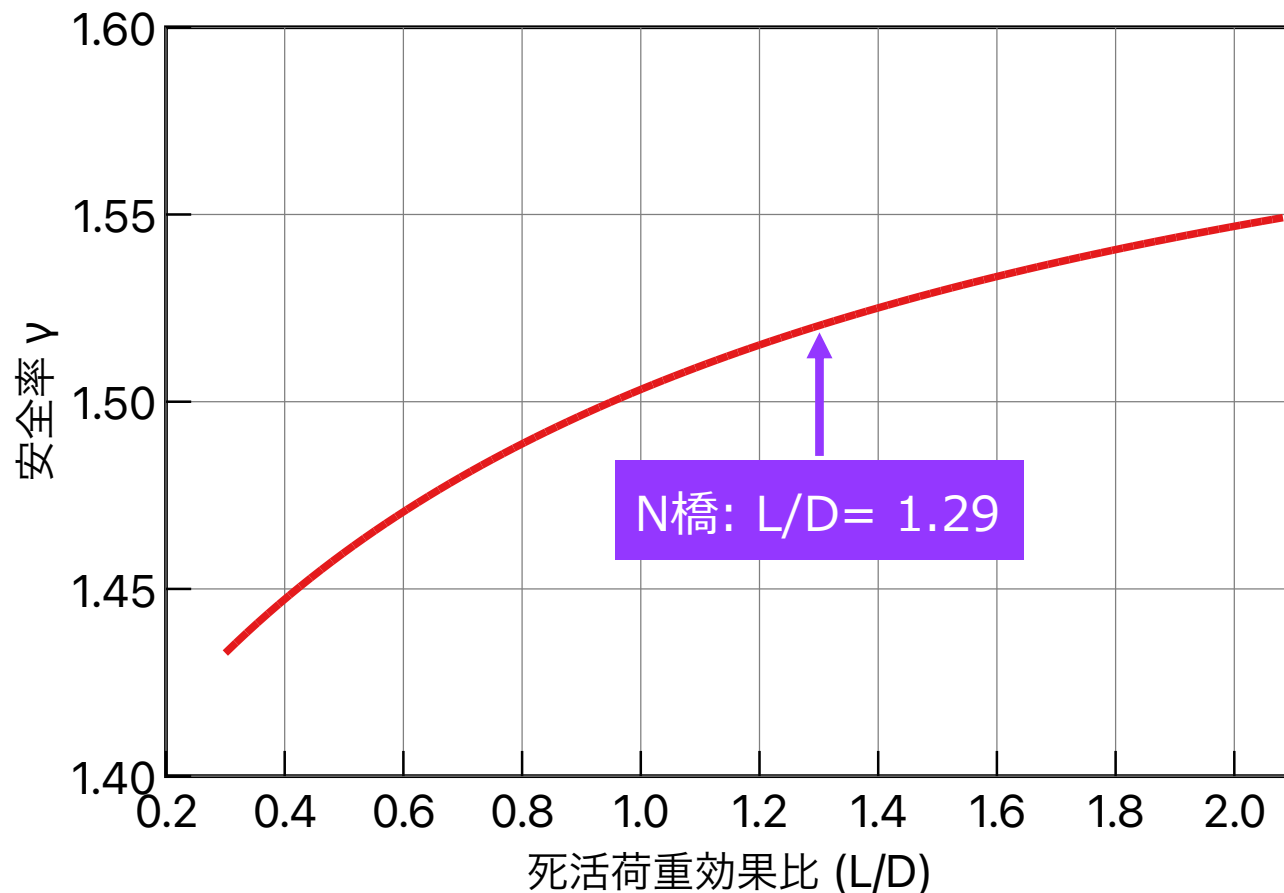
N橋：非合成桁（コンパクト断面）

終局耐力 = 全塑性モーメント
鋼断面のため $M_{pl} / M_y = 1.12$

我国の既設橋に対するケーススタディ

新道示と旧道示の安全率

奥井 義昭 × MIDAS



N橋の場合 $\gamma = 1.52$ となり、新道示では旧道示より $1.52/1.7=0.89$ だけ安全率が小さくなる

新道示照査式

$$\gamma_D D + \gamma_L L < \xi_1 \xi_2 \Phi_{Ut} \sigma_{yk}$$

$$\rightarrow D + L < \frac{\sigma_{yk}}{\gamma}$$

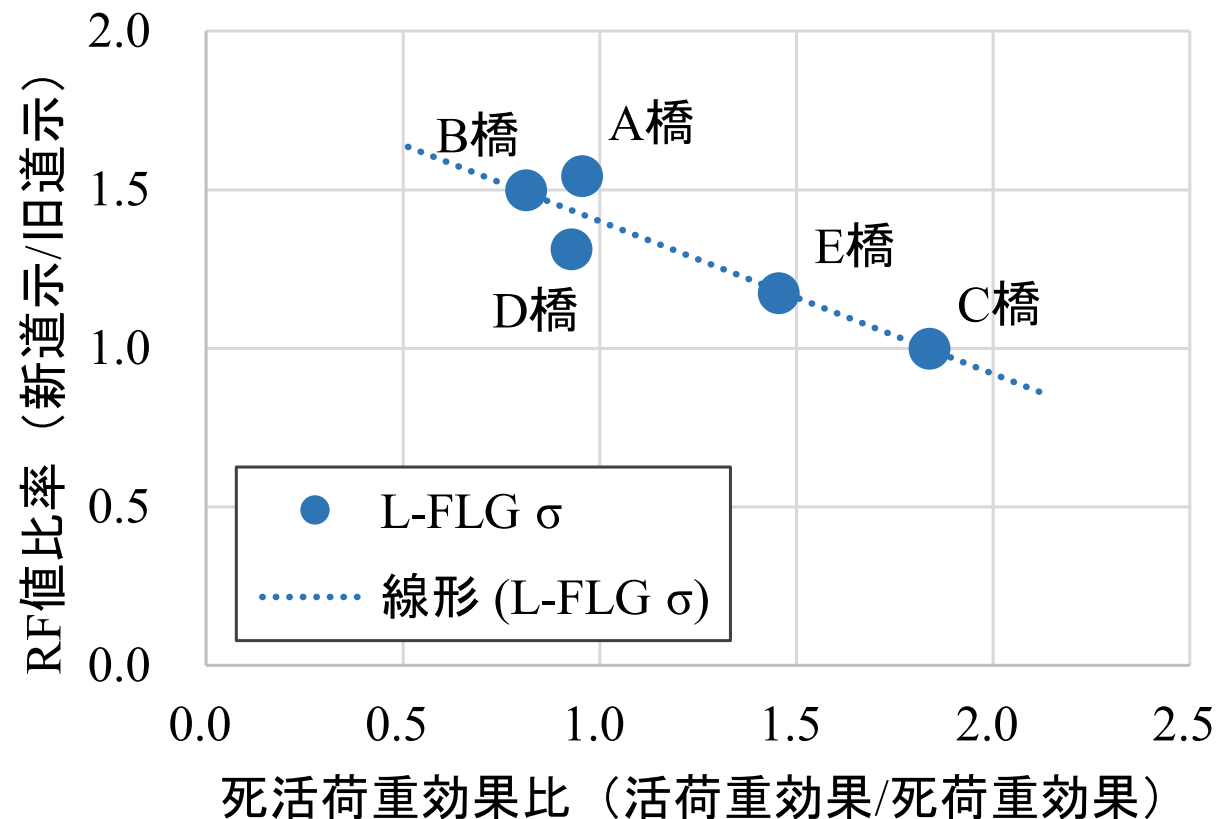
ここで

$$\gamma = \frac{1.05 + 1.25\omega}{1.0 + \omega} \frac{1.0}{\xi_1 \xi_2 \Phi_{Ut}}$$

$$\omega = L/D$$

L, D = 活荷重効果, 死荷重効果

RF値比率(新/旧道示)と死活荷重効果比(L/D)



L/Dが大きなPC橋(C橋)では
鋼橋に較べて、新道示でも助からない

→ TL-20設計のスパンの短い橋梁では
新道示でもRF値1.0を下回る可能性大

笠松ら：Load Ratingを用いた既設橋梁の耐荷性能評価に関する一検討，
土木学会論文集A1（構造・地震工学） 77(3), 418-426, 2021

Section. 3

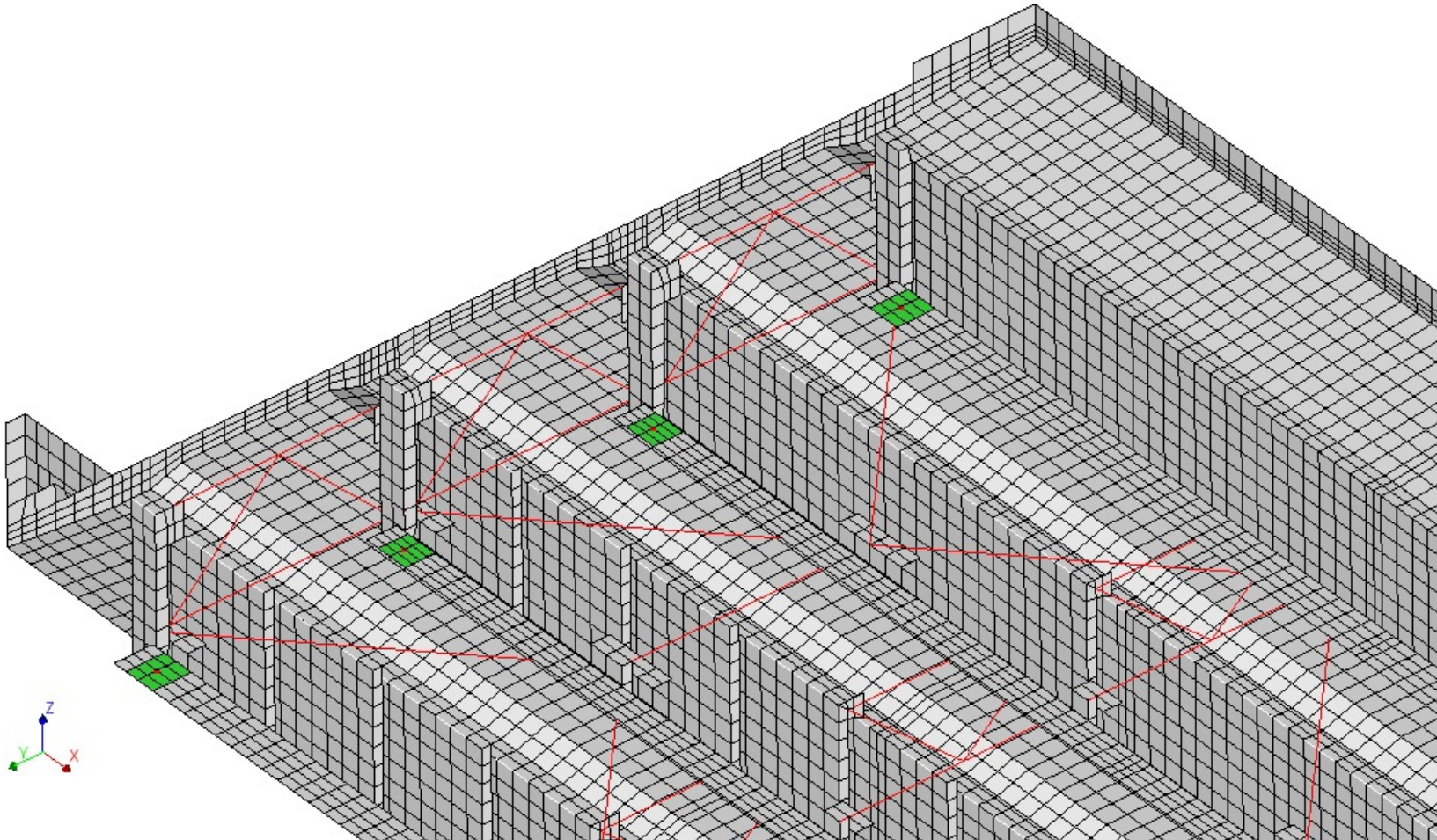
我国の既設橋に対する ケーススタディ

FEMによる Load rating

我国の既設橋に対するケーススタディ

メッシュ図（P2部分拡大図）

奥井 義昭 × MIDAS



使用要素

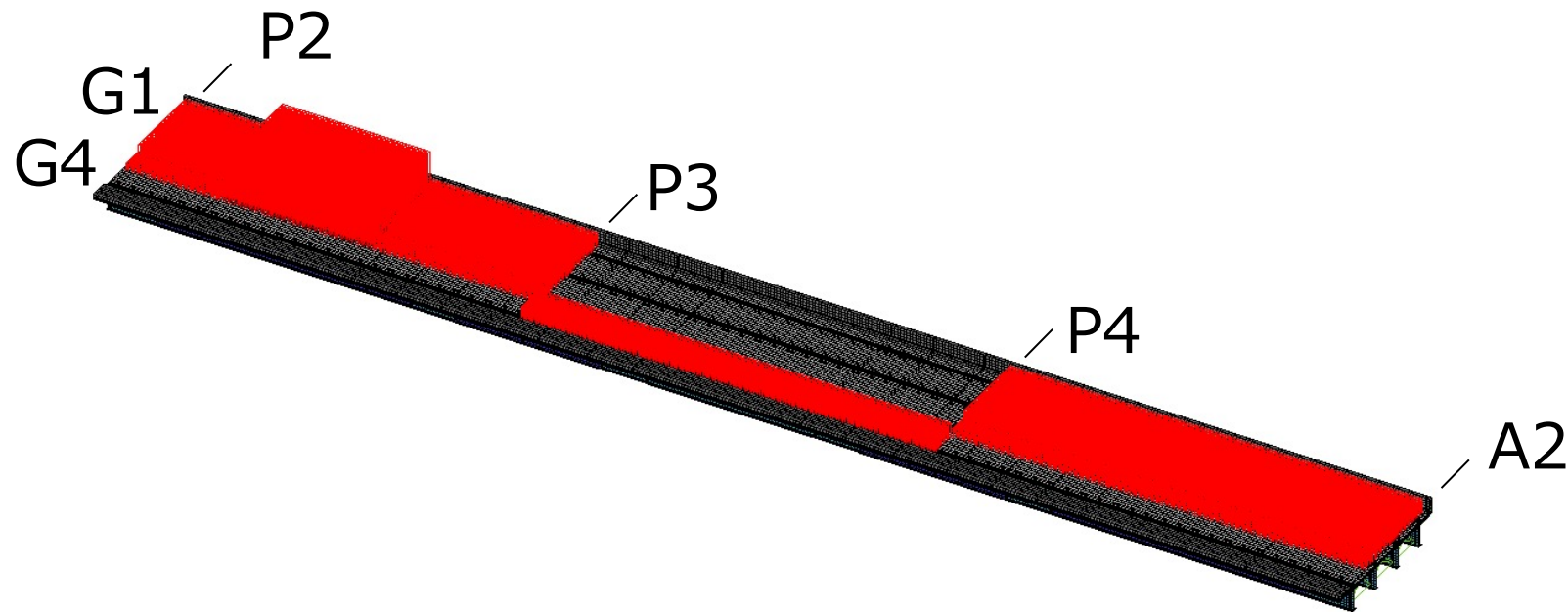
床版	コンクリート	ソリッド要素 板厚方向3分割程度 弾性体
床版-コンクリート間	鋼材-コンクリート間	界面要素 (鉛直:剛結合,水平:すべり)
	ずれ止め孔	横桁上に水平2方向ばね
鋼材	主桁	シェル要素 桁高を8分割程度 フランジ4分割程度 弾性体
	対傾構	梁要素 弾性体
	横構	梁要素 弾性体
	水平補剛材	モデル化しない
	垂直補剛材	シェル要素 弾性体

活荷重載荷ケース

G1曲げ最大, 最小

G2曲げ最大, 最小 の計4ケース ← 影響線解析より決定

載荷パターン例：G1曲げモーメント最大時

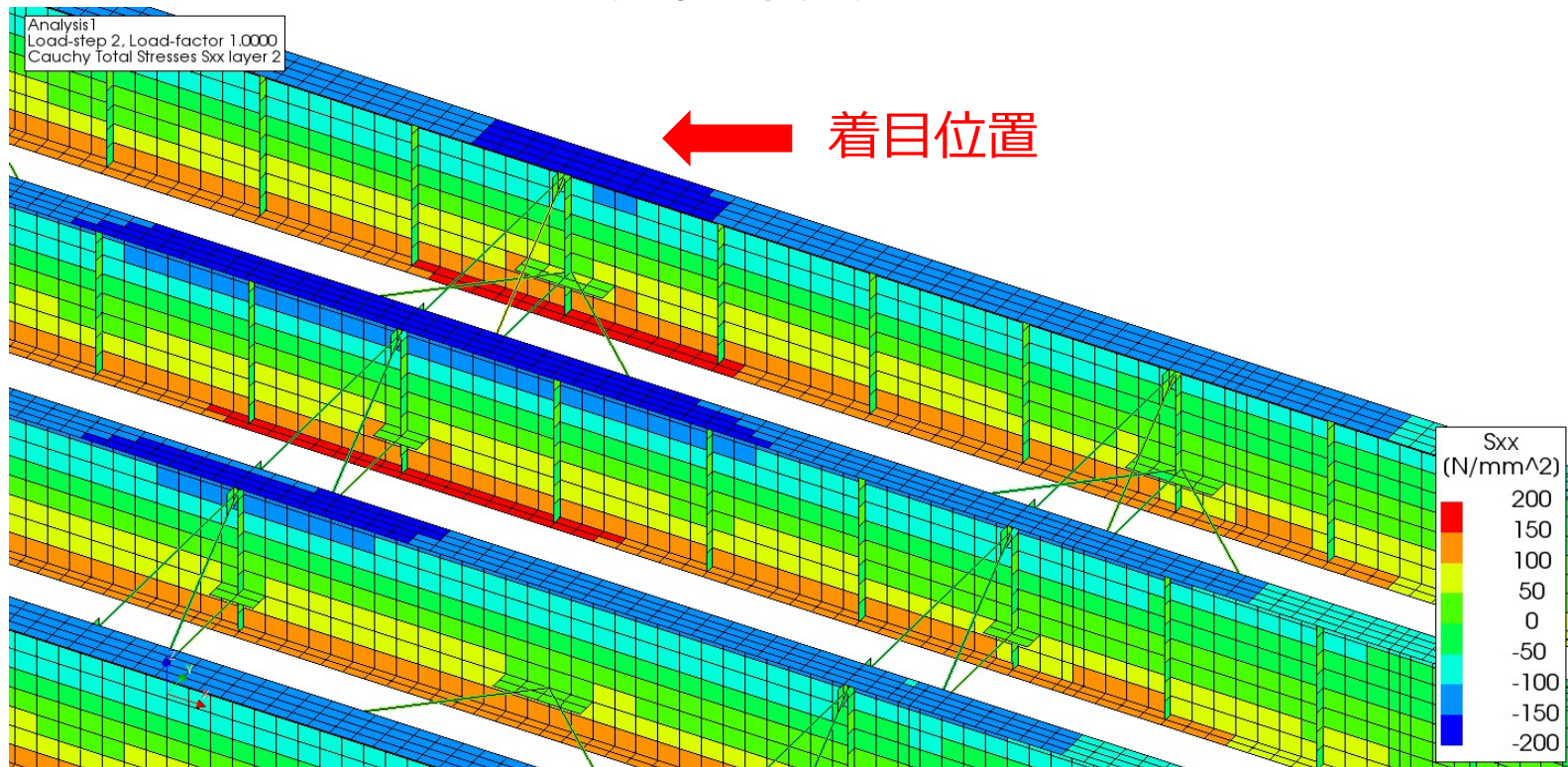


我国の既設橋に対するケーススタディ

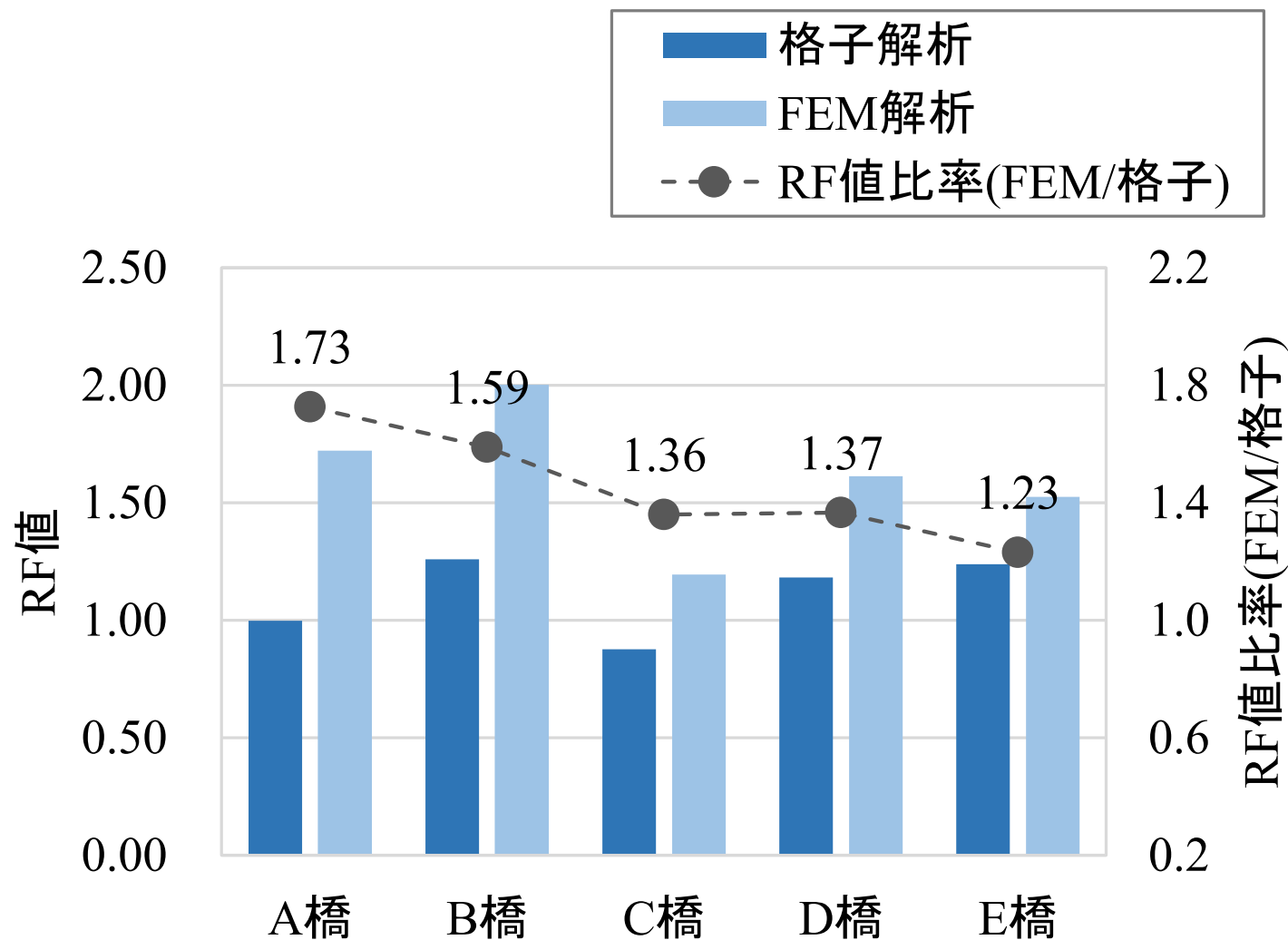
計算結果例（G1曲げ最大）

奥井 義昭 × MIDAS

橋軸方向応力コンター図
支間中央部



RF値：格子解析とFEMの比較（曲げ）



旧道示TL-20で設計された橋でも、
新道示B活荷重でFEM解析すると
全てのケースで $RF > 1.0$

橋梁によってかなりRF値は異なる

笠松ら：Load Ratingを用いた既設橋梁の
耐荷性能評価に関する一検討、
土木学会論文集A1（構造・地震工学）
77(3), 418-426, 2021

- 日本の既設橋でLoad ratingのケーススタディを紹介
- 橋梁形式，橋の個別の条件（設計時の荷重，竣工後の荷重増加）などによりRF値かなり異なる.
- 橋梁形式（鋼，コンクリート，床版形式）等に関わらずRF値を用いれば横並びで安全余裕度を議論出来る.
- 桁橋は曲げが一番危ない(RF値が低い).
- 次に危ないのが，今回説明していないが鋼桁の場合支点上の補剛材

**ご清聴、
ありがとうございました。**

Load ratingを用いた道路橋維持管理
埼玉大学 奥井 義昭