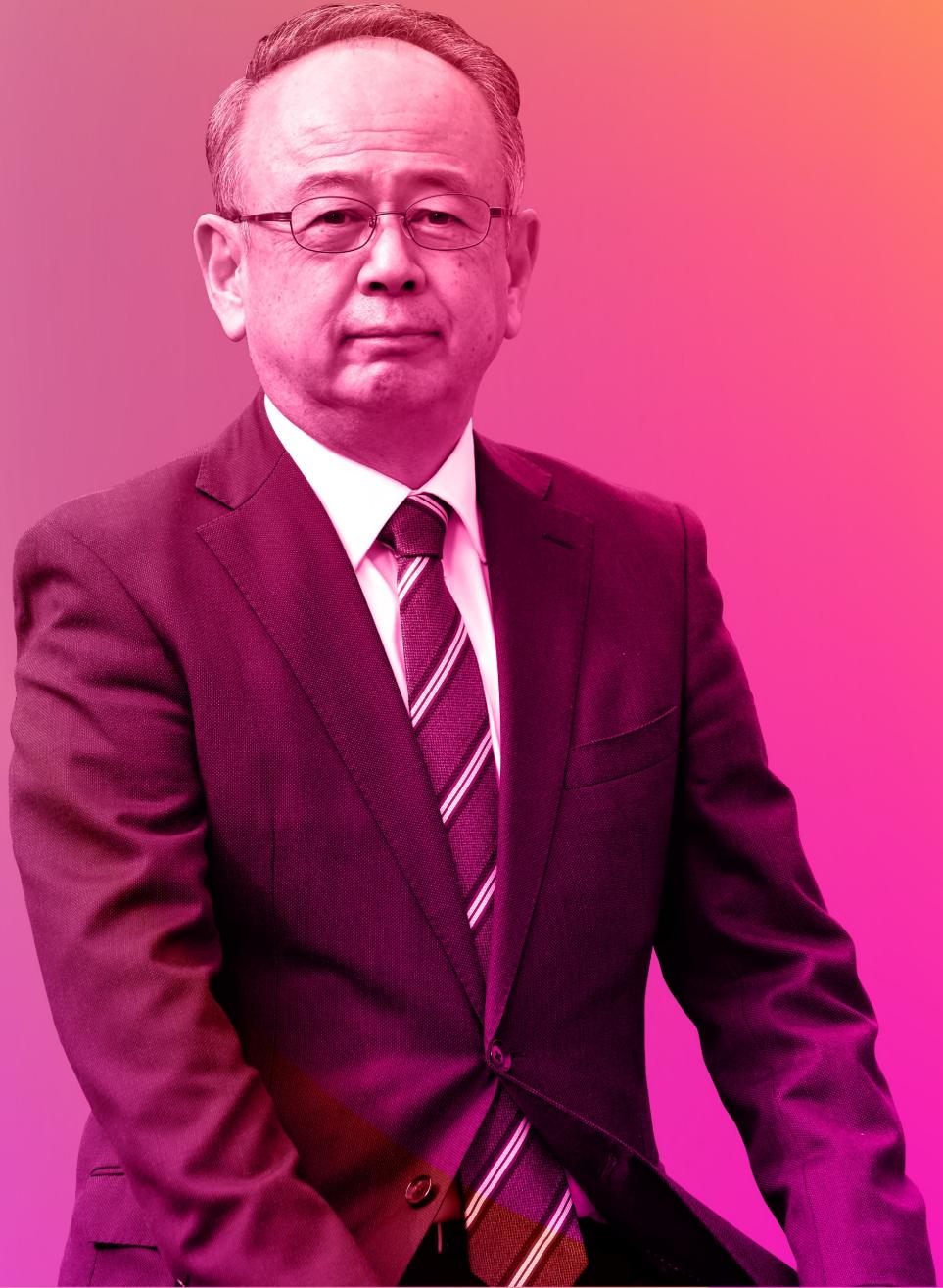




Load ratingを用いた 道路橋維持管理

埼玉大学 教授
奥井 義昭



part. 2

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. 4

システム・リダンダントと Load rating

システム・リダンダントとは？

奥井 義昭 × MIDAS

2種類のリダンダント

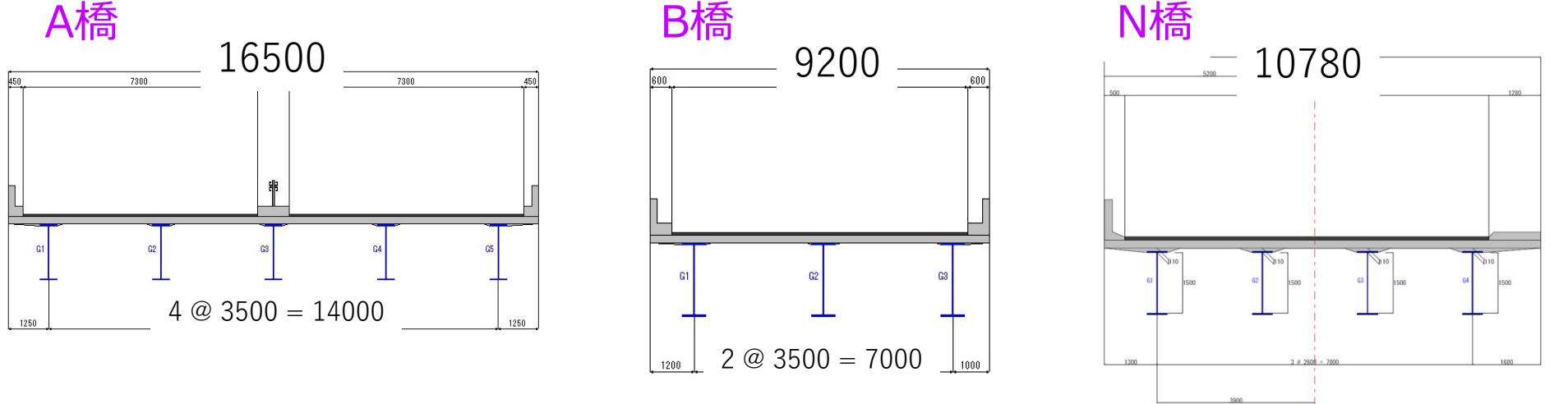
- After-fracture Redundancy → 部材破断後の耐力
- System Redundancy → 部材耐力と橋梁全体系の耐荷力の差

設計では

部材の終局 = 橋梁全体系の終局

としているが…実際には構造システムによっては大きな差がある

部材強度と全体耐荷力の比較



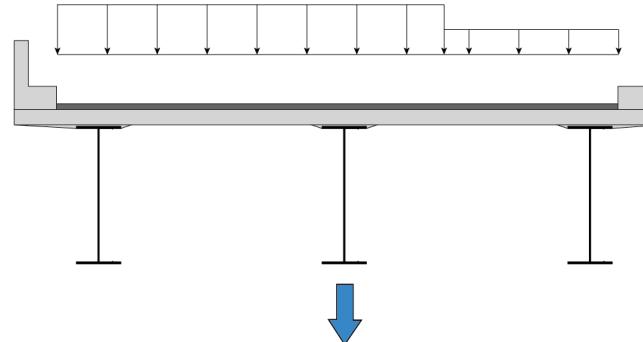
モデル名	A橋	B橋	N橋
形式	合成	合成	非合成
	単純桁	単純桁	連続桁
スパン(m)	34.4	39.3	3 @ 28
竣工年	1971	1983	1975
活荷重	TL-20	TL-20	TL-20

ケーススタディのモデル橋

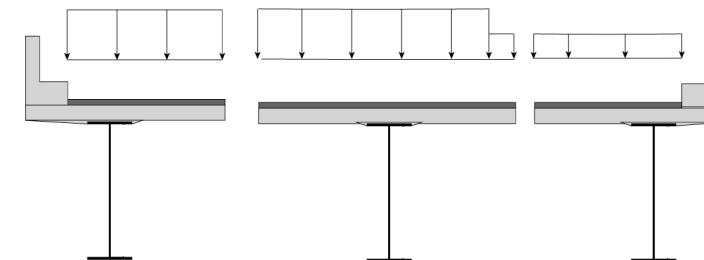
FEMモデル

- 床版：ソリッド要素
- 主桁：シェル要素
- 対傾構など：梁要素
- 材料非線形：考慮
- 幾何学的非線形：非考慮

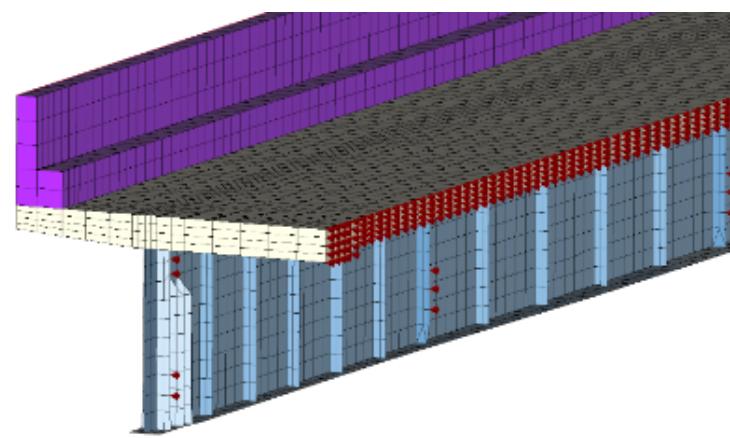
奥井ら：鋼橋のシステムリダンダンシーの評価方法と
Load ratingにおけるシステム係数の提案、構造工学
論文集, Vol.68A, 2022



全体橋モデル



主桁ごとに分割
主桁単体モデル



主桁単体モデル
B橋 G1桁

荷重載荷方法と終局判定

奥井 義昭 × MIDAS

荷重載荷方法

- (1) 死荷重係数 1.05まで載荷
 - 合成桁では前死：鋼断面に，後死：合成断面
- (2) 活荷重係数λを増加

終局判定

A, B橋（単純合成桁）：

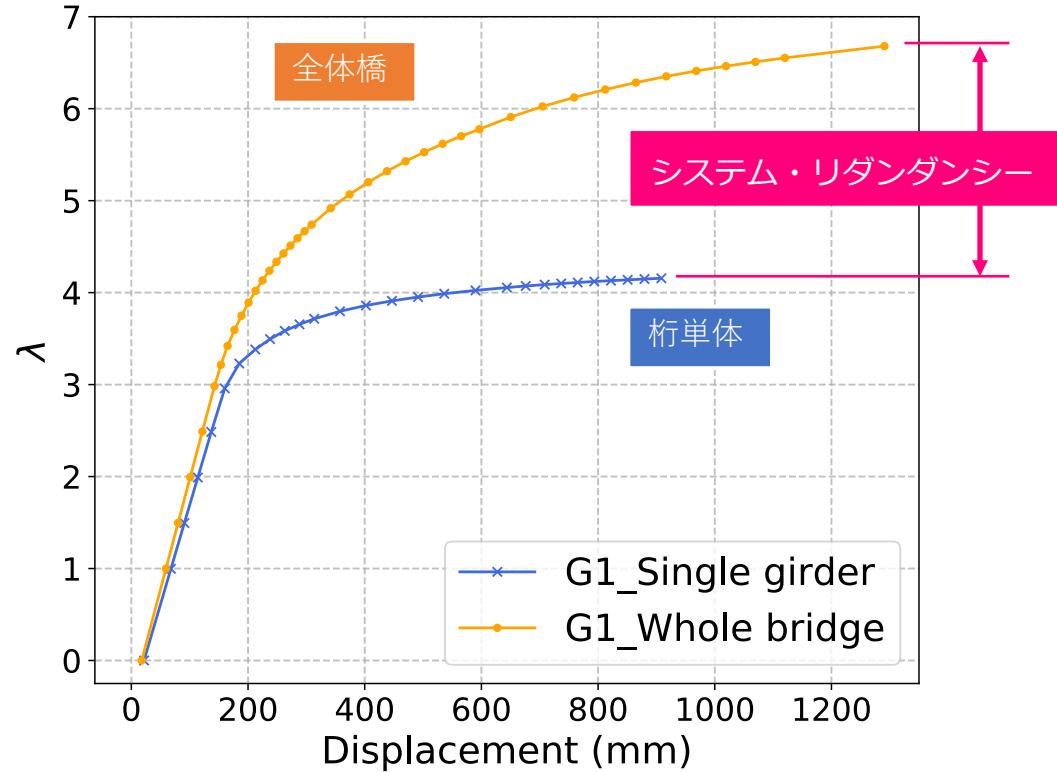
コンクリート床版ひずみ=0.0035が床版幅の30%

N橋（非合成連続桁）：

支間中央：下フランジのひずみ=降伏ひずみの10倍

中間支点上：横倒れ座屈の限界値

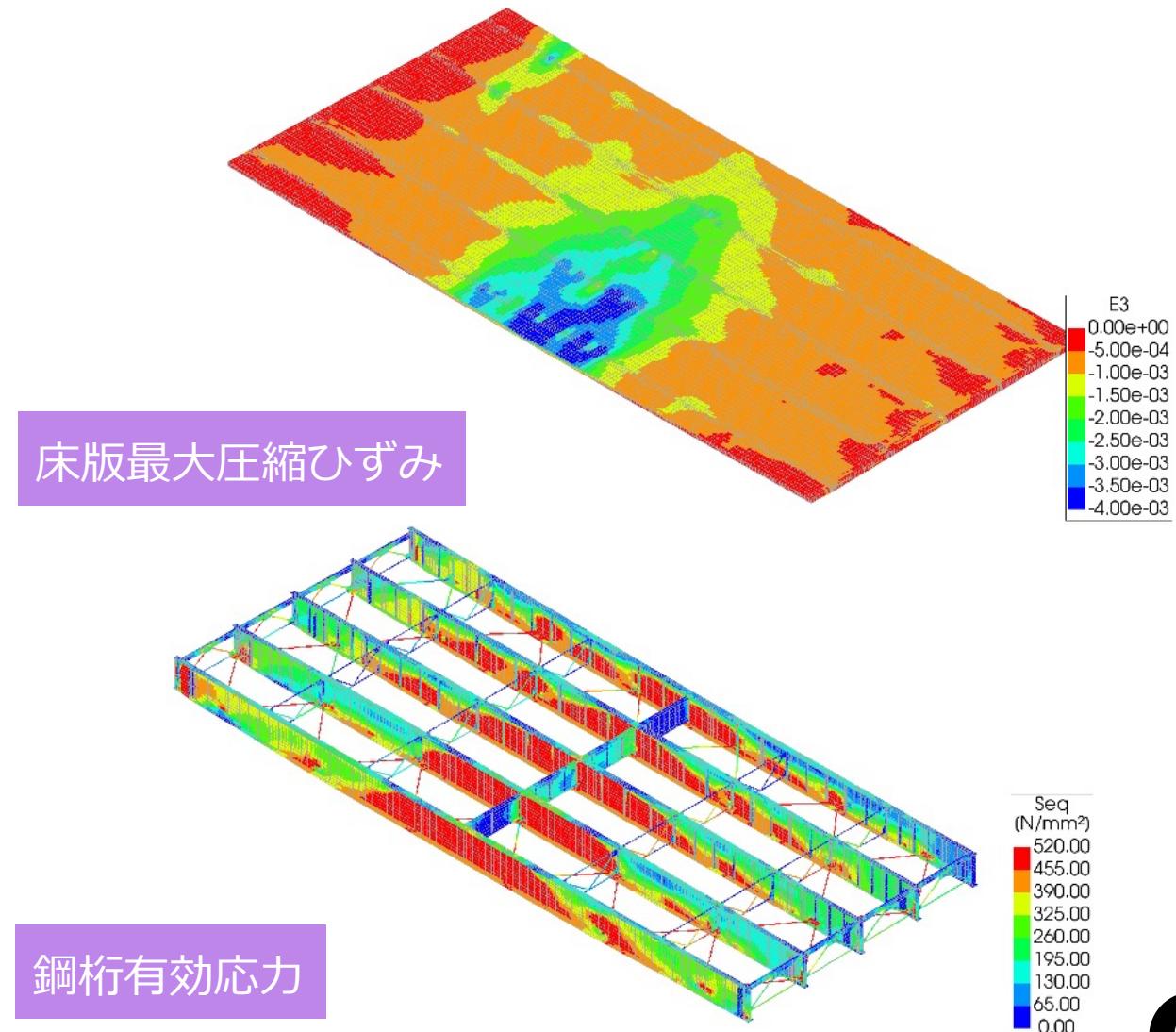
A橋：解析結果



活荷重係数-たわみ関係

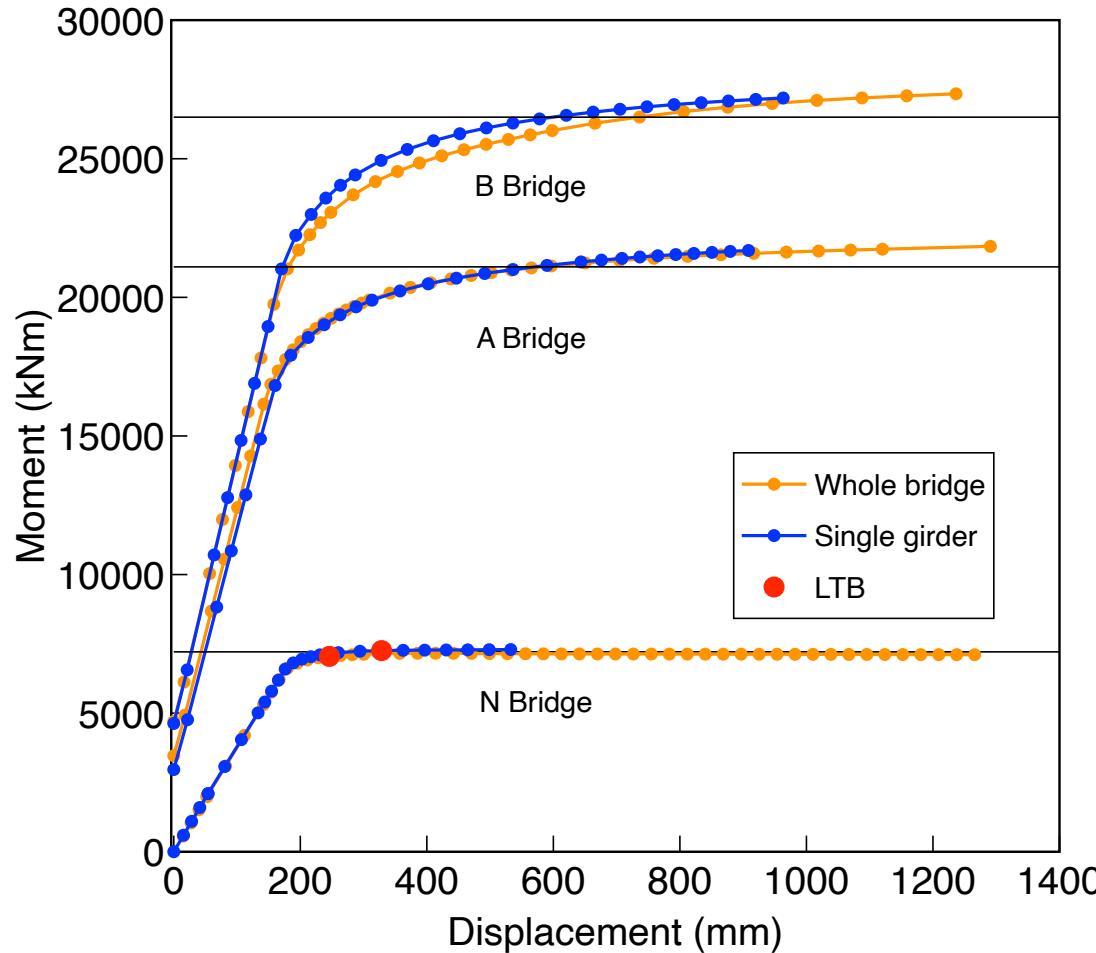
終局時の応力・ひずみ分布

終局時=床版幅の30%が圧縮ひずみ0.0035



鋼桁有効応力

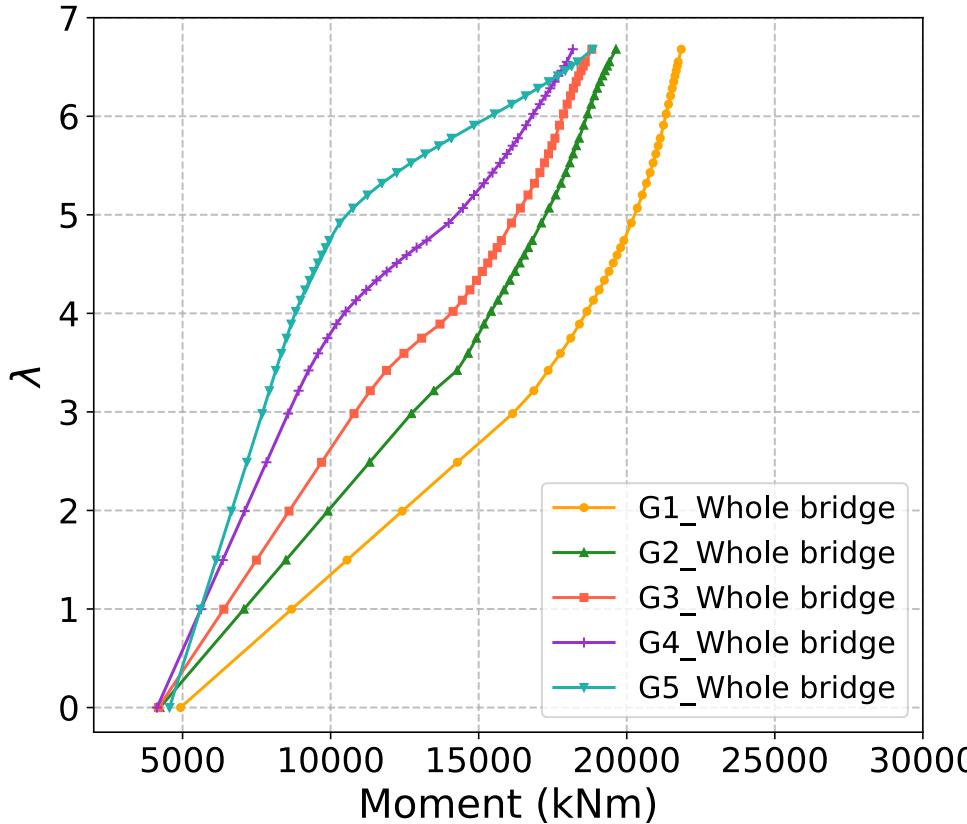
曲げモーメントとたわみの関係



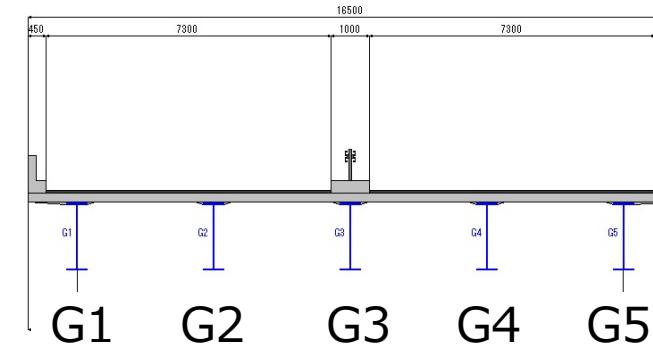
- 曲線の終点が終局点
A, B橋（合成桁）：床版の終局ひずみ 0.0035
N橋（非合成桁）：支間中央下フランジひずみ $10\varepsilon_y$
- 耐荷性能（最大活荷重係数）は異なるが、終局時の曲げモーメントは同じ
- 3橋とも全塑性モーメントに達している（水平な黒線：全塑性モーメント）
- 連続桁では支間中央が終局になる前に中間支点上の横倒れ座屈で終局
(● LTB : 中間支点での横倒れ座屈による終局)

我国の既設橋に対するケーススタディ リダンダンシーのメカニズム

奥井 義昭 × MIDAS



A橋（全橋モデル）の活荷重係数と各主桁の曲げモーメントの関係



G1桁 塑性化 → 剛性低下
→ 曲げモーメント G2 へ移行 → G2 剛性低下
→ 曲げモーメント G3 へ移行 → G3 剛性低下
→ ...

線形解析：

モーメント再配分考慮出来ない

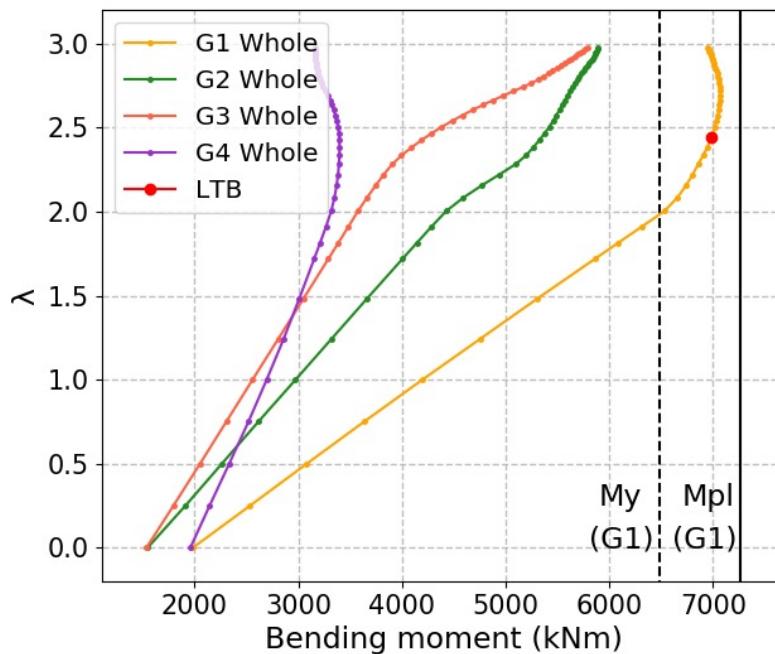
非線形解析：

剛性低下によるモーメント再配分考慮

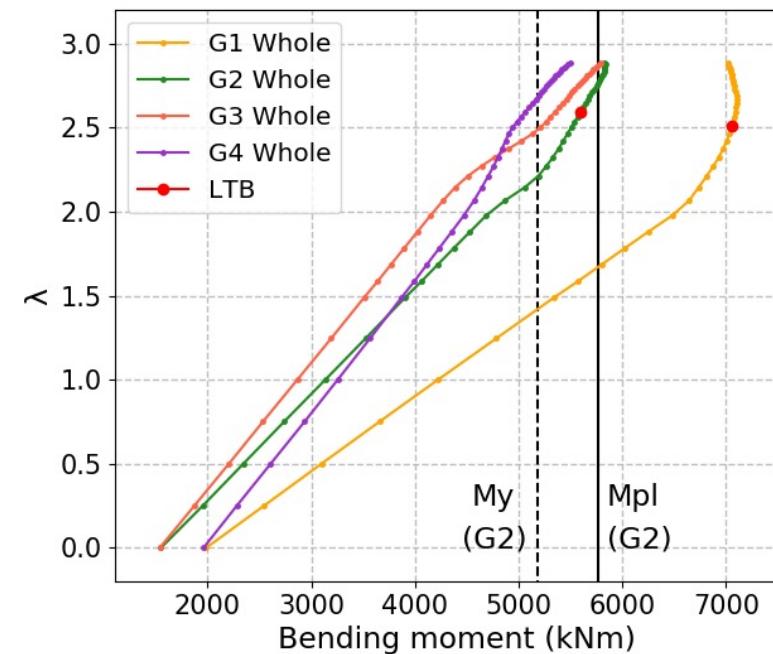
連続桁の場合：正曲げMax

活荷重載荷パターン：支間中央のMをMax

G1-Mmax



G2-Mmax



連続桁の場合、

桁間の曲げモーメントの再分配
+
支間中央と中間支点の
曲げモーメントの再分配

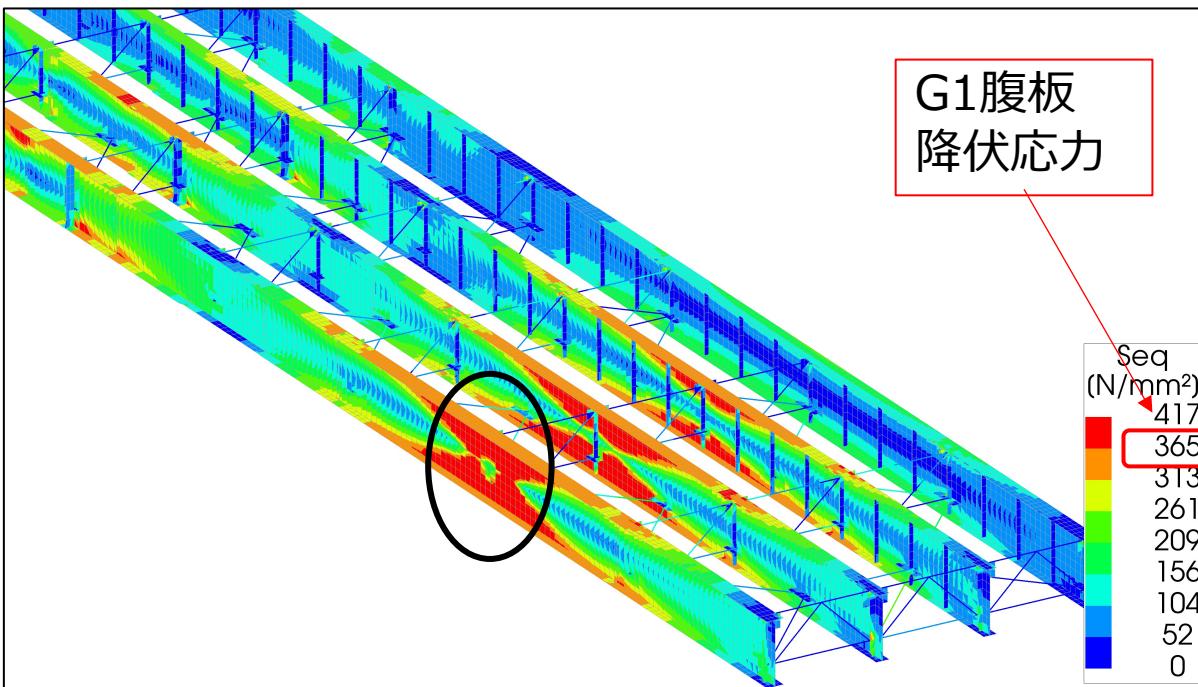
支間中央の塑性化によって
中間支点上の負曲げが増大

正曲げMaxの時でも中間支点上
が先に終局

曲げモーメントと活荷重係数の関係

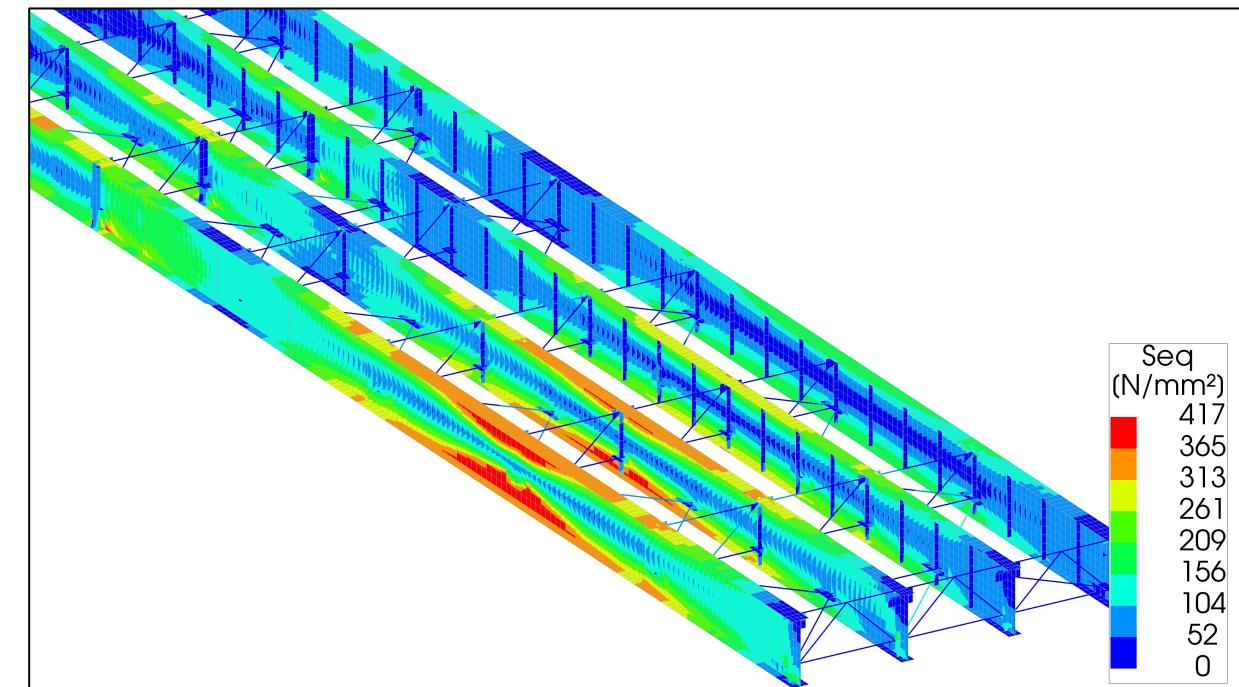
終局時の応力分布 G1-Mmax

G1桁 全塑性状態による終局状態



解析終了時、桁は全塑性状態

G1桁 横座屈による終局状態

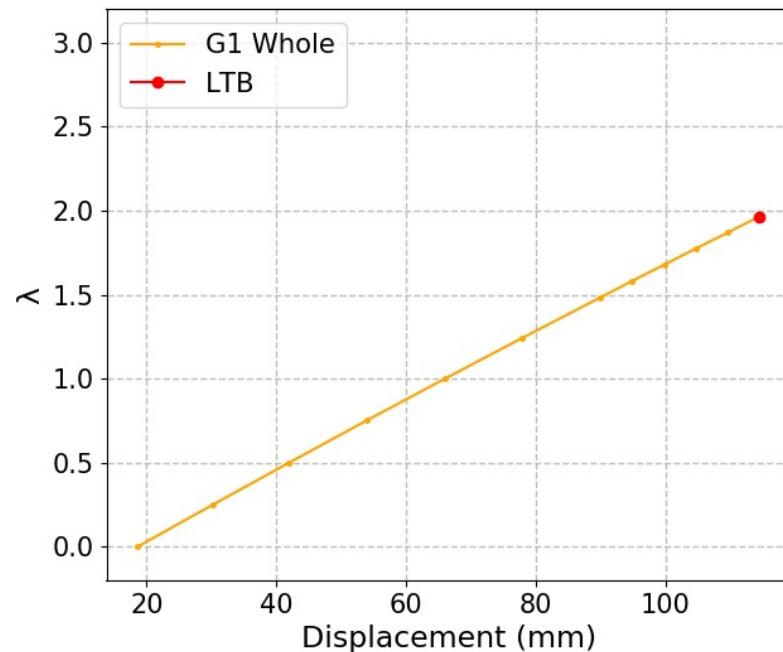


降伏はしているものの、耐力に余裕あり

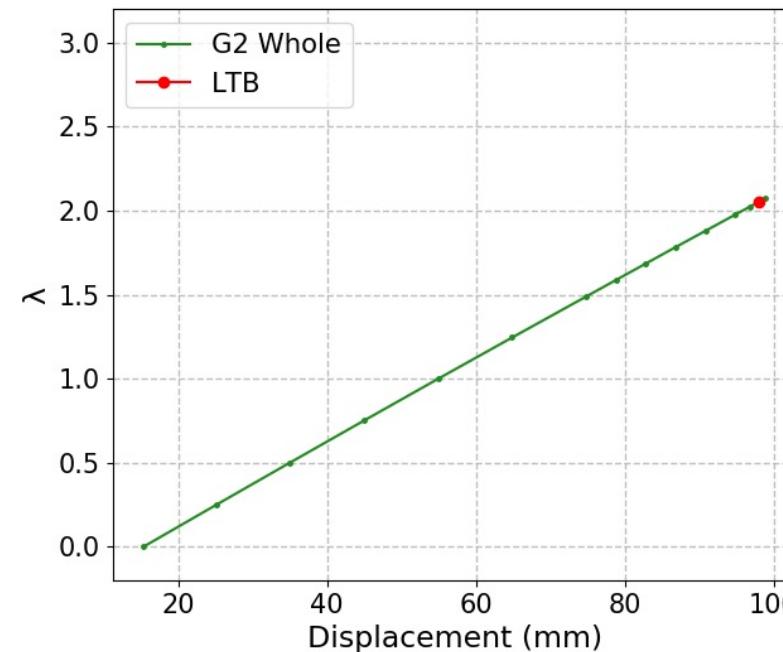
連続桁の場合：負曲げMax

活荷重載荷パターン：支間中央の負曲げをMax

G1-Mmin



G2-Mmin



座屈応力度： σ_{cr}

中間支点下フランジの
降伏応力以下

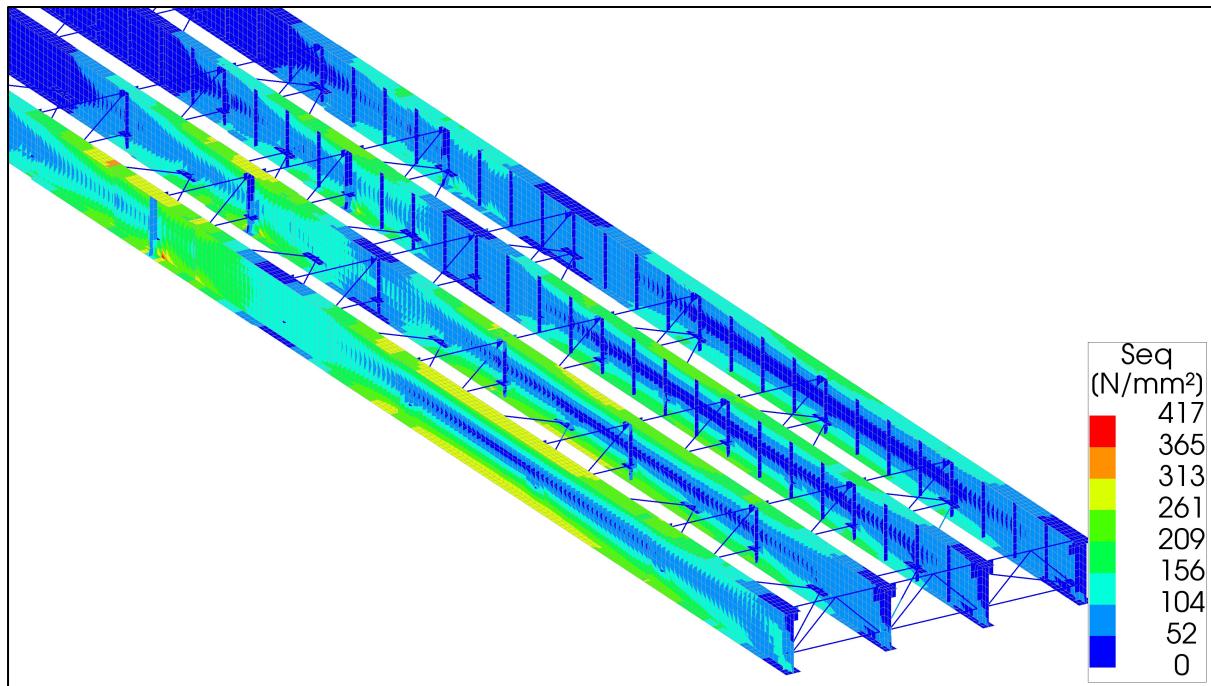
$$\sigma_{cr} \approx 0.8\sigma_y$$

桁の降伏は生じず、
荷重とたわみ関係は線形

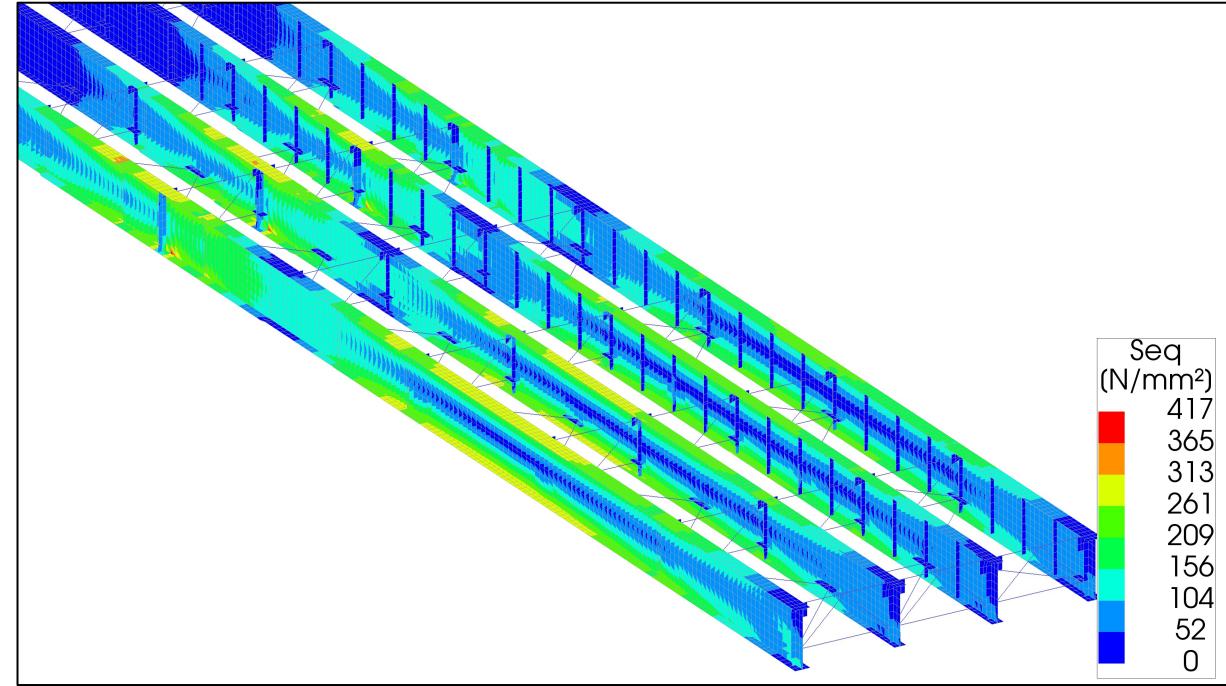
負曲げに対して
システム・リダンダント
ほとんど見込めない

終局時の応力分布

G1-Mmin



G2-Mmin



横倒れ座屈による終局状態に至るまで、曲げモーメントの分担は変化しない

➡ システムリダンダシ－はない

システム係数の提案

システム係数の定義 :

線形解析で求まるRF値を非線形解析で求まるRF値に変換する係数

$$\phi_s = 1.0 + \frac{L + I}{C} (\lambda - \lambda^*)$$

終局時の活荷重係数

λ = 非線形解析

λ^* = 線形解析

$$RF = \frac{\phi_c \phi_s C - \gamma_D D}{\gamma_L (L + I)}$$

$\phi_s > 1.0 \rightarrow$ リダンダンシーあり
 $\phi_s < 1.0 \rightarrow$ リダンダンシーなし

D = 死荷重効果 γ_D = 死荷重係数

L = 活荷重効果 γ_L = 活荷重係数

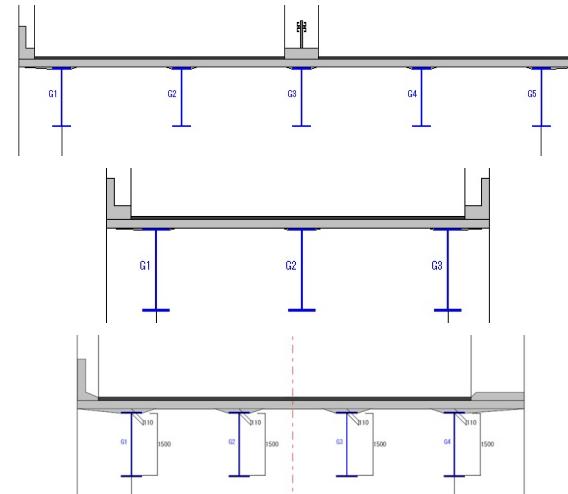
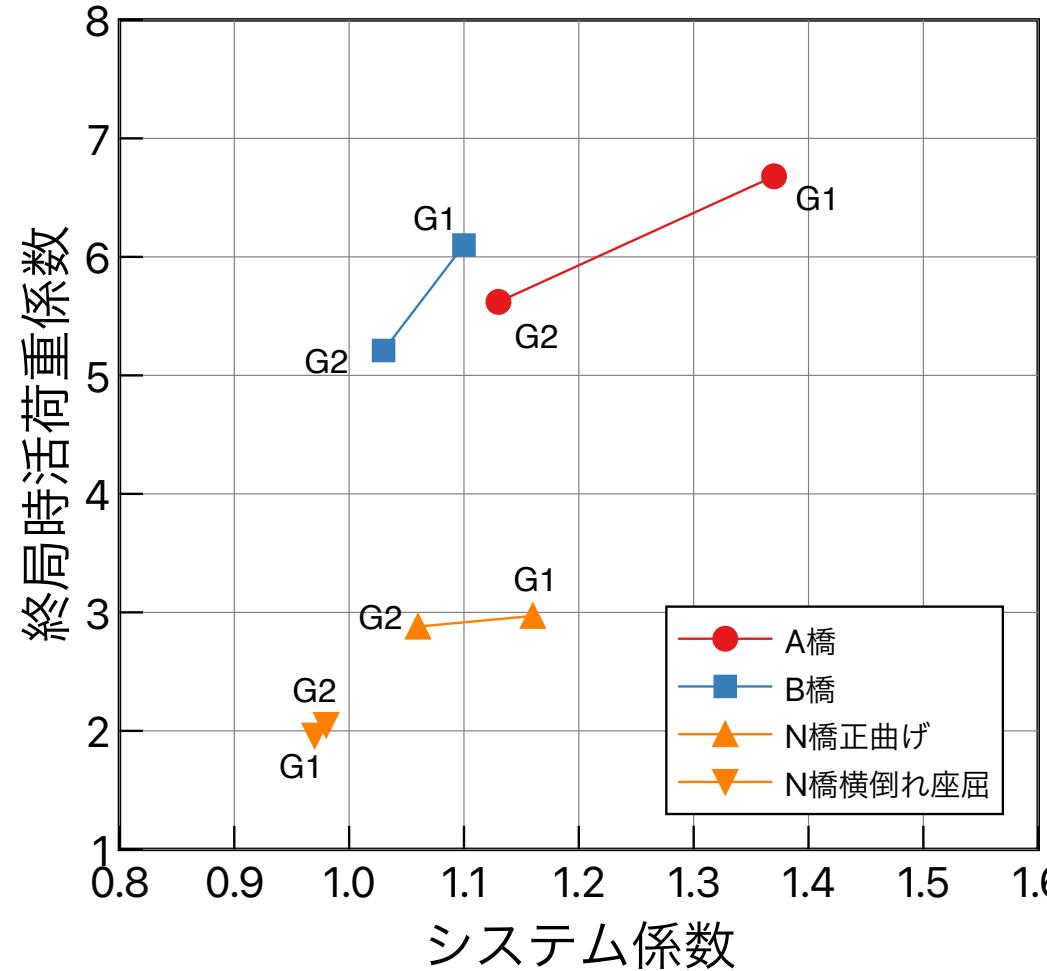
I = 衝撃 C = 部材耐力

ϕ_c = 状態係数 (点検結果より)

ϕ_s = システム係数 (リダンダンシーの考慮)

奥井ら : 鋼橋のシステムリダンダンシーの評価方法とLoad ratingにおけるシステム係数の提案, 構造工学論文集, Vol.68A, 2022

システム係数のまとめ



A橋：単純合成桁

B橋：単純合成桁

N橋：非合成連続桁

- 主桁本数が増えるとシステム係数増加
- 外桁と内桁では外桁システム係数大
- 連続桁では支間中央 M_{max} の活荷重載荷でも
中間支点上の横倒れ座屈で終局。システム係数ほぼ1.0

まとめ

奥井 義昭 × 

- ・ システム・リダンダンシーのメカニズムを説明
- ・ システム・リダンダンシーを数値化したものとして、システム係数を提案
- ・ 主桁本数が多いとシステム係数は大
- ・ 単純桁と連続桁では一般に連続桁の方がリダンダンシー大と考えられているが、必ずしもそうでもない

Section. 5

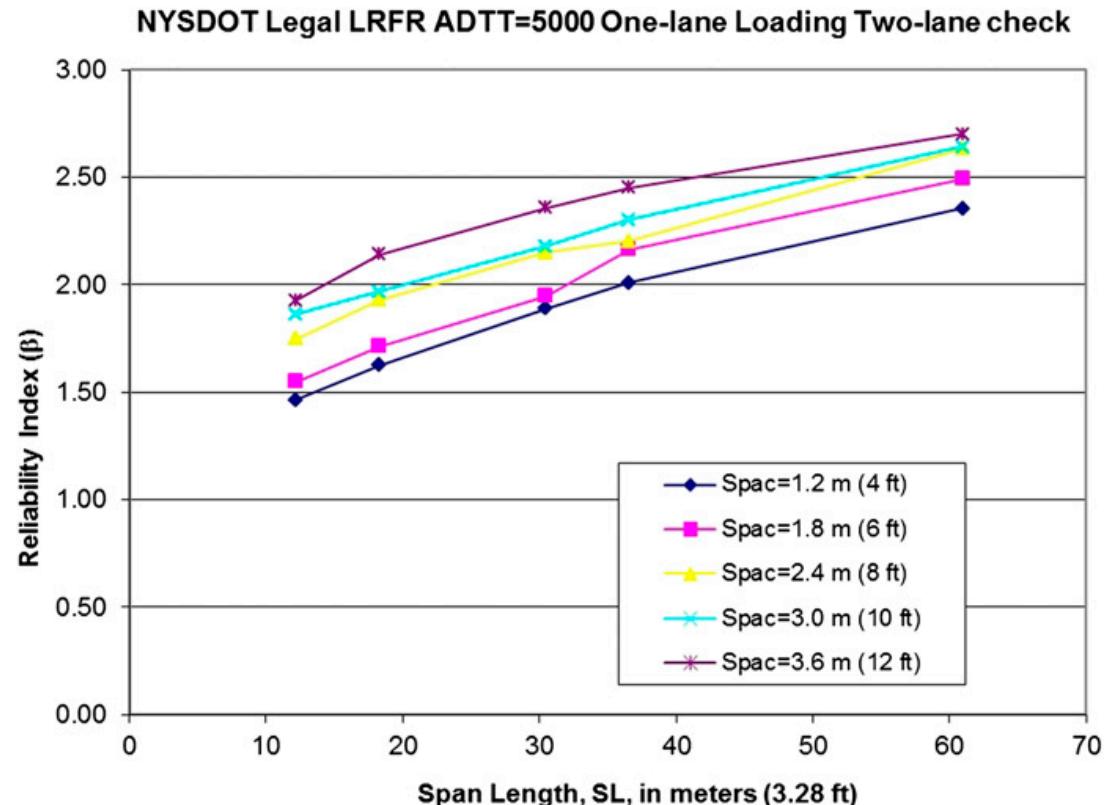
維持管理用の 活荷重係数

New YorkのSite-Specific Loadの研究

Ghosn, et al, Development of State-Specific Load and Resistance Factor Rating Method, J. of Bridge Eng., Vol. 18, No. 5, 2013

- WIM計測から再現期間5年の最大曲げモーメントを算出 (点検期間2年)

スパン長と信頼性指標の関係



研究目的

実体交通荷重に基づく既設橋の維持管理用活荷重係数の提案

前提

既設橋：5年に1度の定期点検 → 次回の定期点検までの性能保証

料金所によって極端な過積載は制限されている高速道路

定期点検結果に基づきLoad ratingを行いRF値を算定

RF値の計算式

$$RF = \frac{\phi_s \phi_c R - \gamma_D D}{\gamma_L L (1.0 + i)}$$

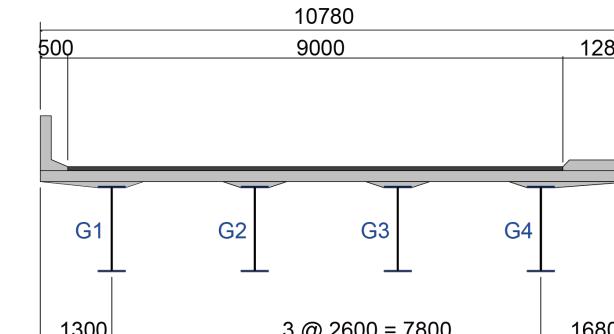
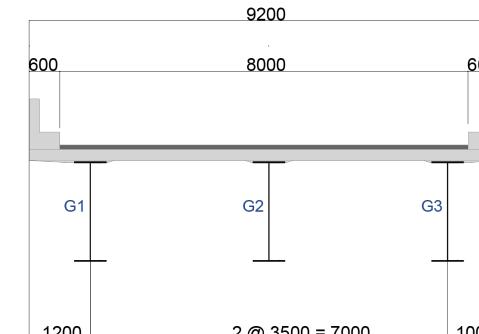
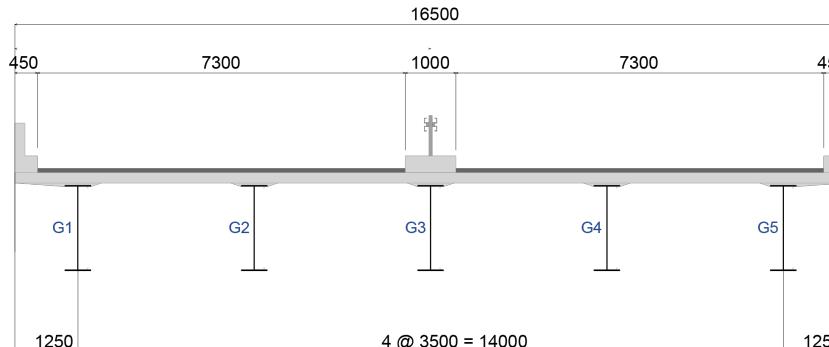
交通荷重シミュレーション

2つの実態交通荷重

- ・東名高速用賀本線料金所でのデータ（大型車混入率22%）
- ・名神高速道路安威川橋のデータ（大型車混入率33%）

3つの橋梁形式

- ・A橋 単純桁（4車線，上限線一体，支間35m，5本I桁）
- ・B橋 単純桁（2車線，支間39.2m，3本I桁）
- ・N橋 3径間連続桁（2車線，3@28.0m，4本I桁）



自動車列の作成と年最大曲げモーメント

確率変数

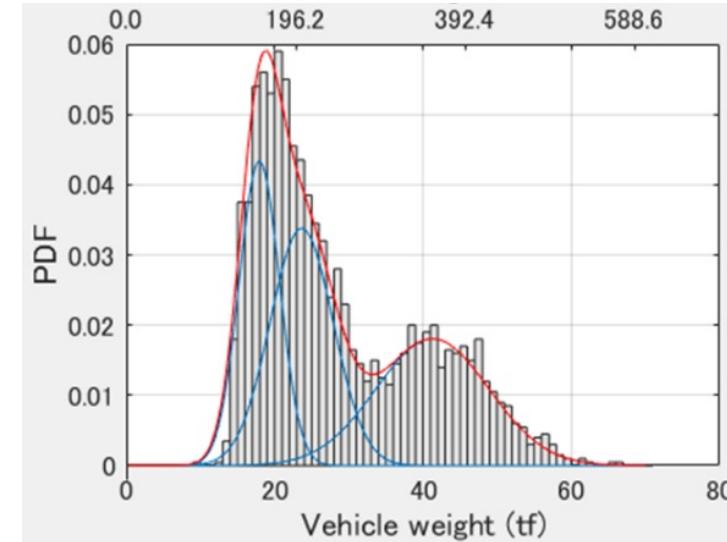
- 車両重量
- 車両間隔（渋滞時を想定）
- 車種（車種構成比率は実測値の平均）

確定値

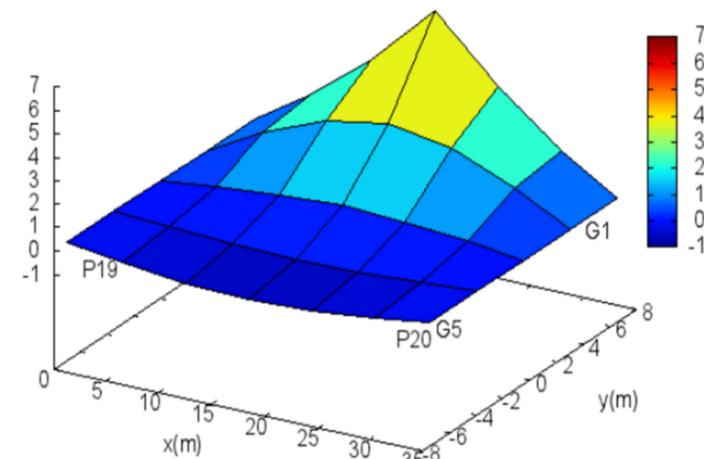
- 渋滞時の車両速度 (6km/h)
- 非渋滞車線の速度[A橋のみ] (60 km/h)
- 渋滞時間 (7, 10, 13 h/day)
- 車両のレーン内の位置（中央）

年最大活荷重モーメントの算定

- 影響線を利用

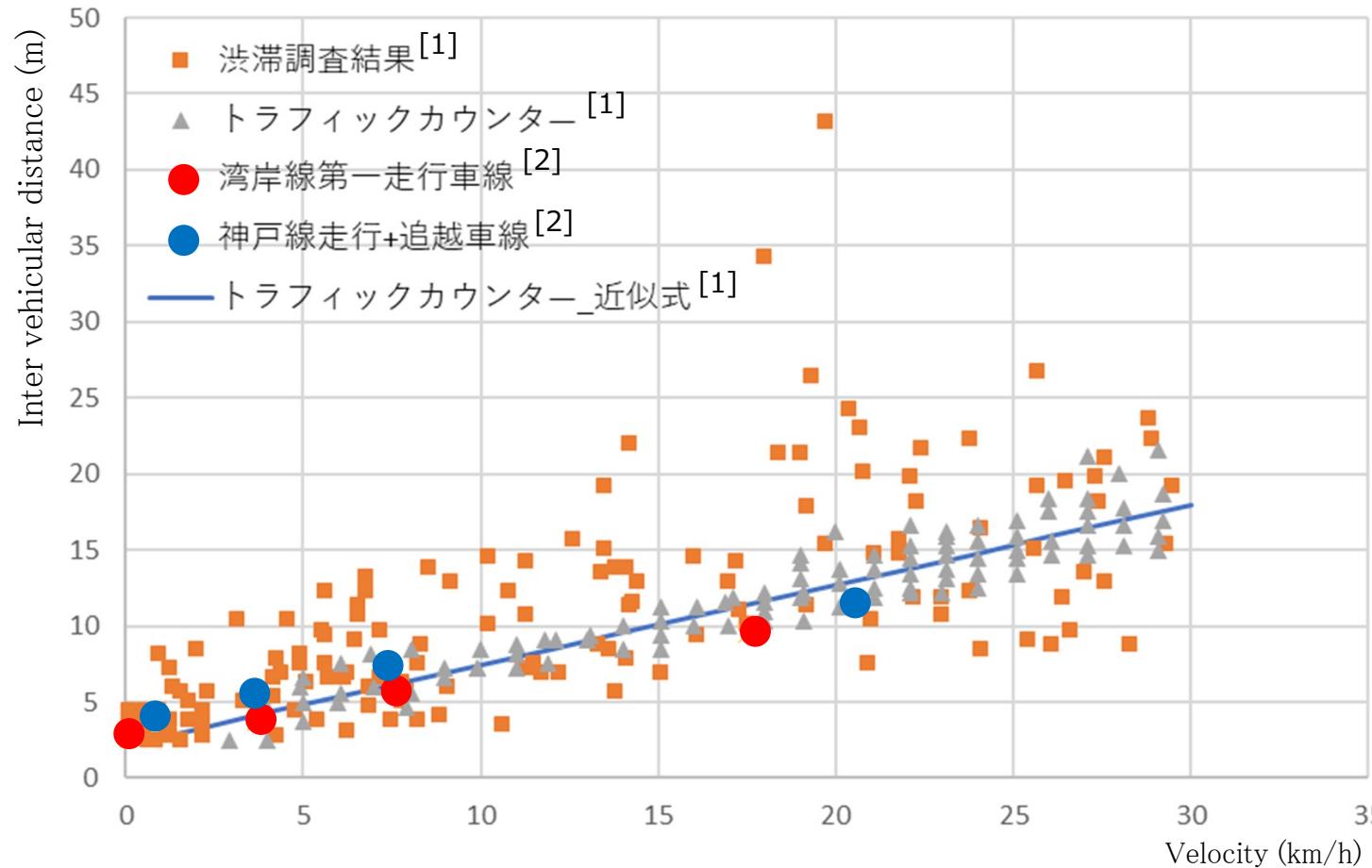


5軸車車重の
確率密度



A橋の影響面

車間距離の検討



文献[1]の回帰式(図中の青線)
は妥当と判断

$$y = 0.5255x + 2.1914$$

y: 車間距離 (m)
x: 車両速度 (km/h)

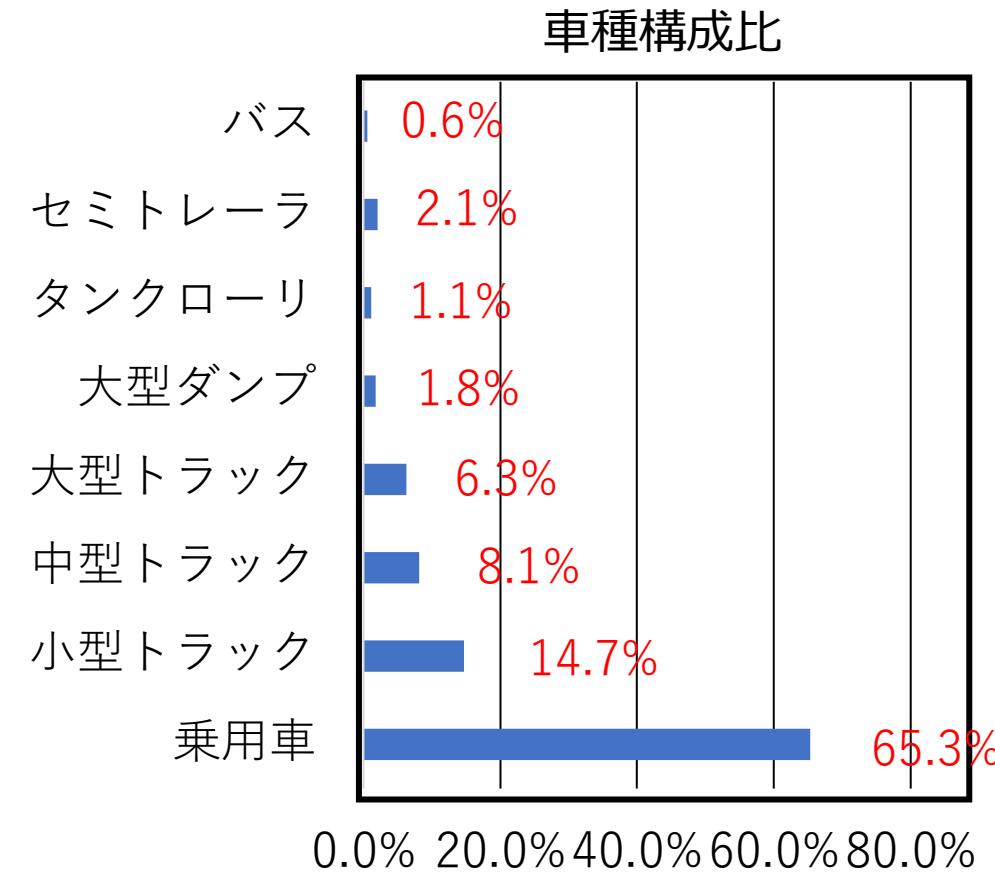
文献[1][2]から変動係
数は概ね0.4程度

[1]閑上直浩・杉山裕樹・薄井王尚・菊池正庸:阪神高速道路の渋滞時における車間距離調査、
土木学会第66回年次学術講演会I-117 pp.233-234、2011年

[2]杉山裕樹・閑上直浩・広野邦彦・薄井王尚: 阪神高速道路における実態活荷重の把握とその評価、
土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.74 (1) pp.158-172、2018年

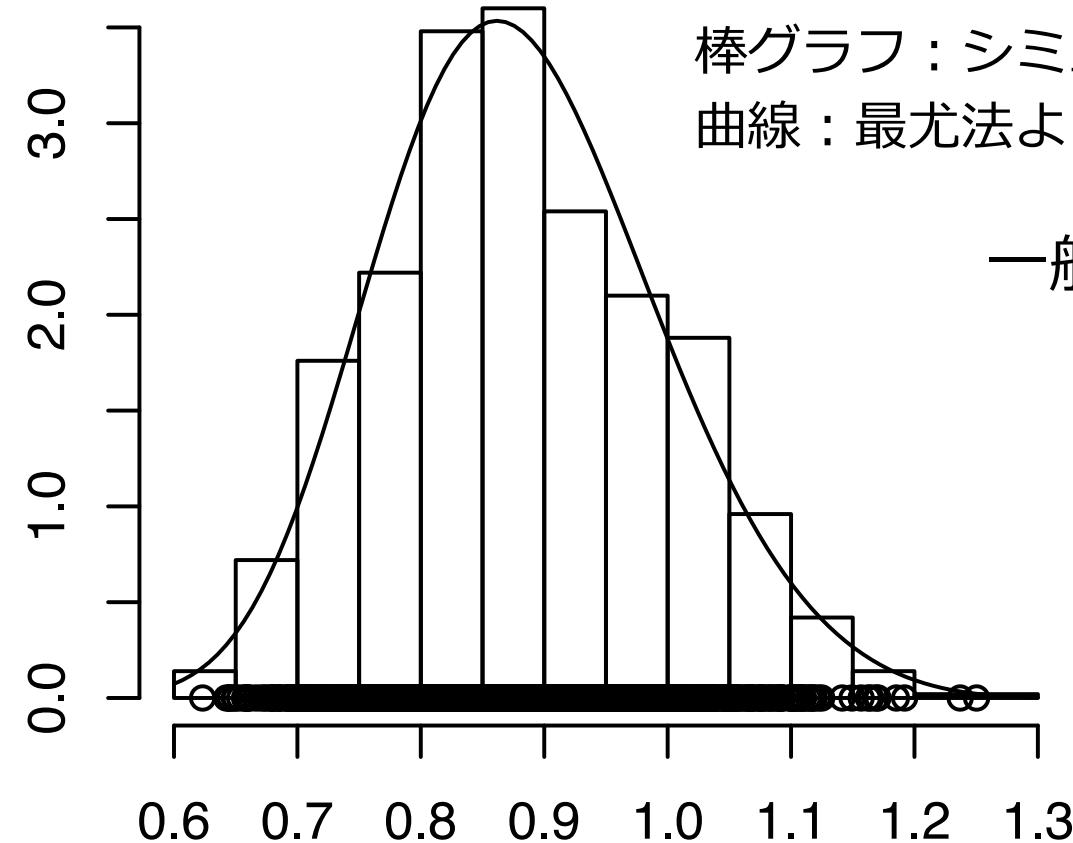
路線特性

A橋		
走行状態	突発渋滞	
	通常渋滞	
大型車混入率		20%
車両列		2km
走行速度	通常渋滞	30km/h
	突発渋滞	2km/s
車間距離	通常渋滞	平均 8.05m
		標準偏差 3.93m
	突発渋滞	平均 2.71m
		標準偏差 1.49m
発生頻度	13回/年	
設計値	3839kN・m	



西岡ら、都市高速道路の交通特性に基づく連続桁橋の活荷重に関する研究,
構造工学論文集, Vol.57A, pp.195-208, 2011

シミュレーション結果：年最大値のPDF



棒グラフ：シミュレーションより頻度分布
曲線：最尤法より求めたGEVモデル

一般極値分布(GEVモデル)の累積分布関数

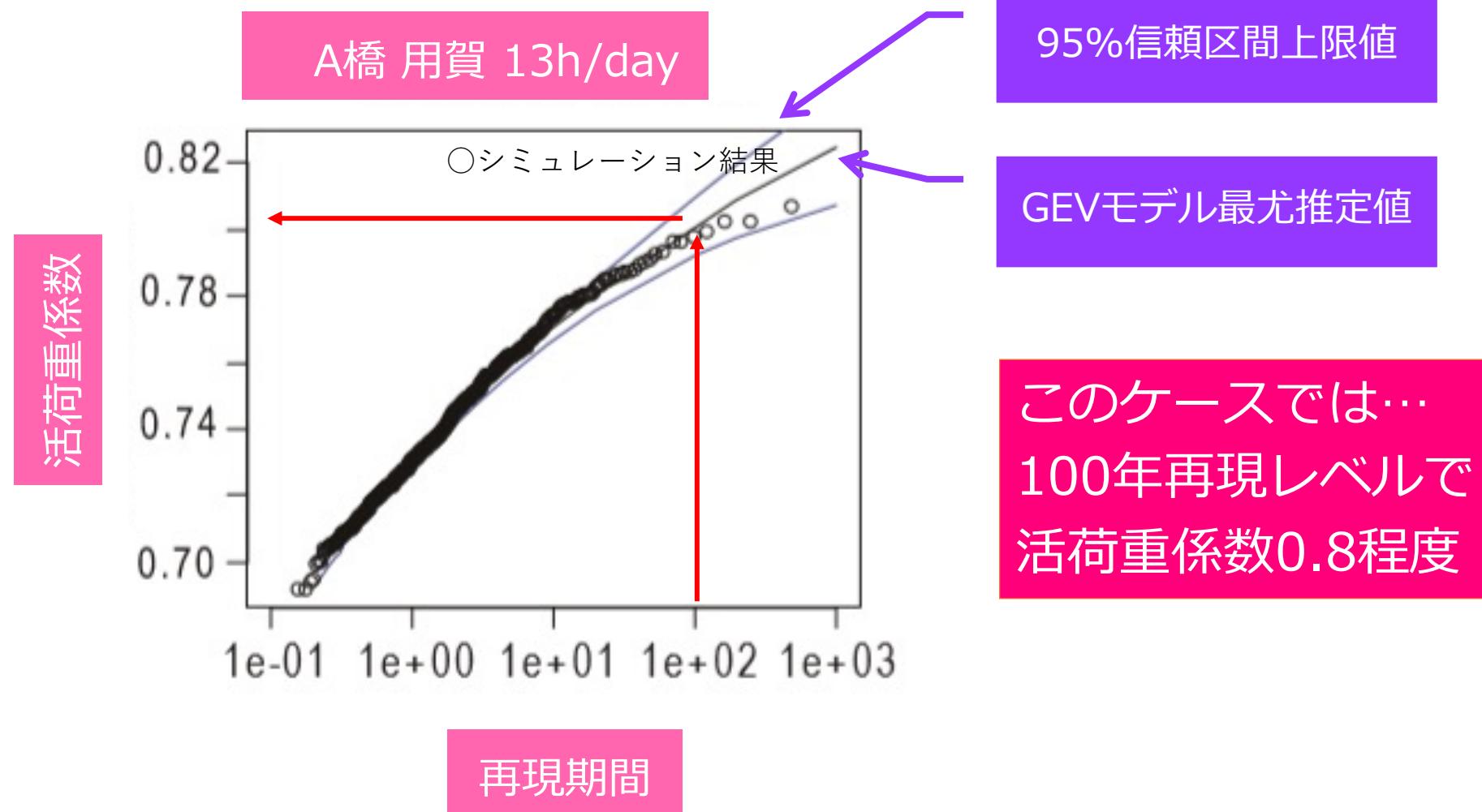
$$F(\bar{M}) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{\bar{M} - \mu}{\sigma} \right) \right]_+^{-1/\xi} \right\}$$

GEVモデルで年最大曲げモーメント
表現できる！

活荷重係数

$$\bar{M} = M_{max}/M_D$$

極値分布とシミュレーション結果



既設橋の活荷重係数と発生確率

新設橋

- 道路橋示方書：
橋梁の供用期間100年
非超過確率95%

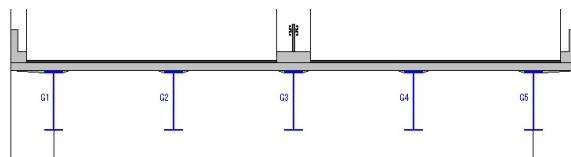
既設橋

- 点検期間5年
さすがに次回の点検期間ギリギリは怖いので…
- 提案
再現期間10年, 非超過確率95% → 200年再現レベル

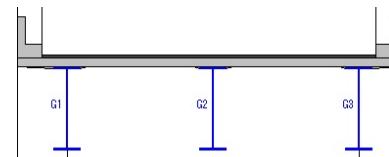
活荷重係数のまとめ

200年再現レベルの95%信頼区間の上限値

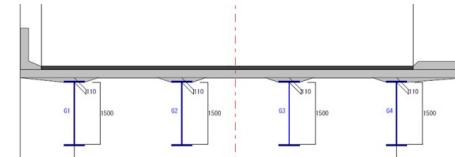
渋滞時間 (h/day)	A橋 単純桁 35m 2方向4車線		B橋 単純桁 39.2m 1方向2車線		N橋 3径間連続桁 3@28m 1方向2車線	
	名神安居川	東名用賀	名神安居川	東名用賀	名神安居川	東名用賀
7	-	0.832	1.063	0.793	0.980	0.736
10	-	0.824	1.028	0.785	1.030	0.729
13	-	0.818	1.054	0.795	1.010	0.774



A橋：単純桁、4車線



B橋：単純桁、2車線



N橋：連続桁、2車線

まとめ

- 定期点検を前提に安全を保証する期間を定期点検2回分に設定
(5年×2回=10年)
- 維持管理用活荷重係数として200年再現レベル
(200年再現レベル) = (10年間で非超過確率95%)
- さらに安全余裕をみて200年再現レベルの95%信頼区間の
上限値を維持管理用の荷重係数として提案

Section. 6

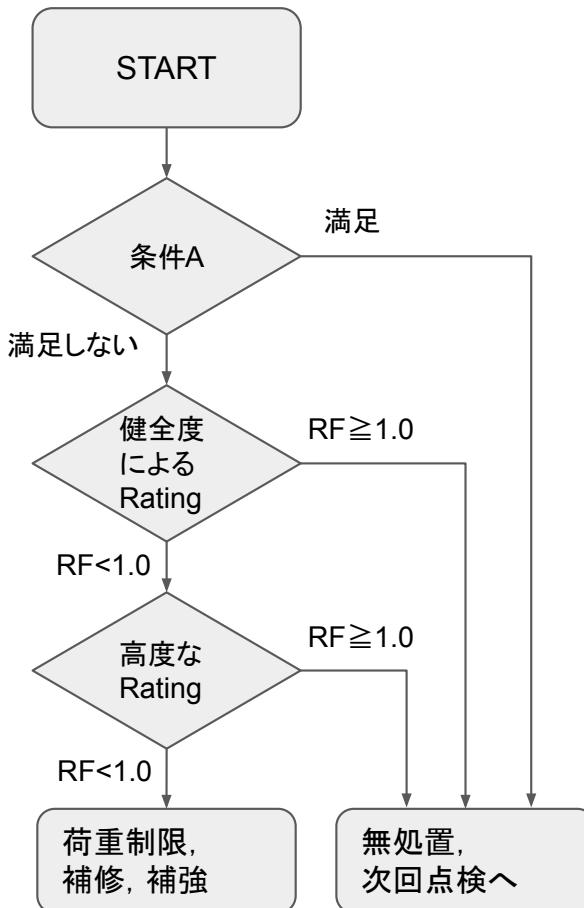
橋梁評価 マニュアル

橋梁評価マニュアル

「橋梁評価マニュアル」(案) を作成

条件A
・損傷無し
・B活荷重もしくはTT-43で設計
・竣工後の荷重増加無し

高度なRating
・3D FEMによるRating
・活荷重係数の見直し
・システム・リダンダンシーの考慮
・限界状態設計法による耐力評価



目次

1 はじめに

2 評価手順

2.1 RF値評価式

2.2 限界状態

2.3 状態係数による点検結果の考慮

2.4 システム・リダンダンシー

2.5 点検不可部材の取り扱い

3 材料強度

4 荷重

4.1 死荷重と荷重係数

4.2 活荷重と荷重係数

4.3 その他の荷重

5 抵抗値

5.1 主桁の曲げ

5.2 主桁のせん断

5.3 合成応力度

5.4 支点上補剛材

6 構造解析

6.1 格子解析による方法

6.2 高度な構造解析による方法

橋梁評価マニュアル（案）ですが、以下のレポートの付録に収録されています。

- ・ 鋼橋の強靭化・長寿命化研究委員会、鋼橋の設計・評価技術の高度化、JSSC テクニカルレポート No.119, 2020

研究レベルのものなので、実務への適用は慎重に！

Section. 7

既設橋に必要な
安全性のレベル

既設橋に必要な安全性のレベル

既設橋維持管理の基本？

奥井 義昭 × MIDAS

安全性のレベル

(新設設計時) = (既設橋) は必須か？

海外基準

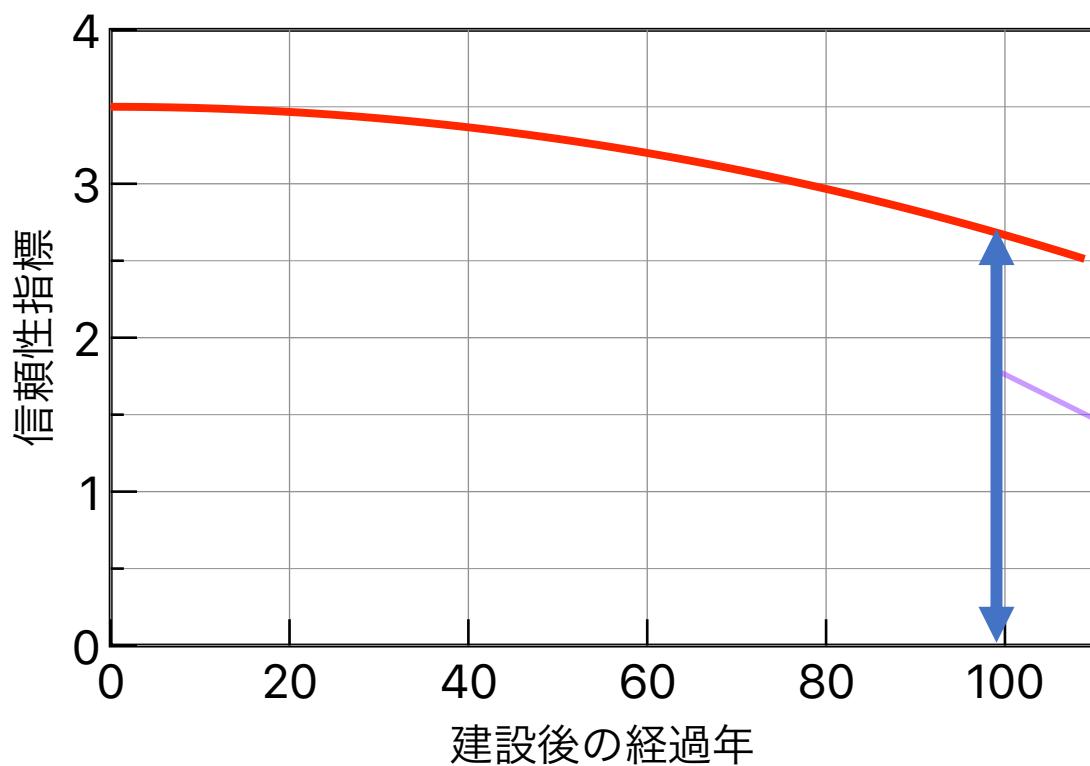
(新設設計時) > (既設橋)

ただし、既設橋では定期点検とLoad ratingを前提

皆さんはどう考えますか？

最低限必要な安全性のレベル:海外基準のロジック

供用時の安全性レベルの低減 (定期点検を前提として)



信頼性指標 β

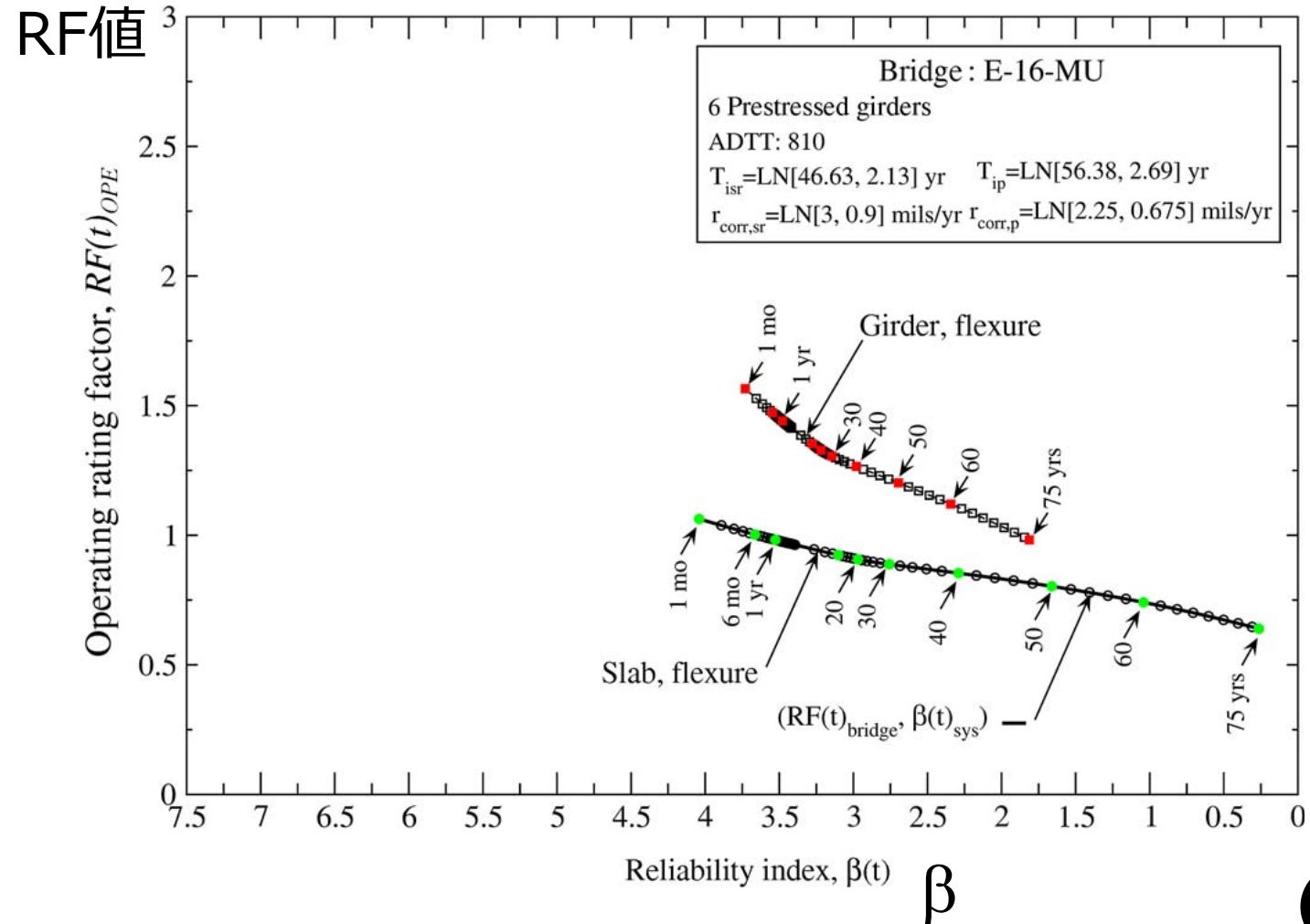
	新設	供用時
AASHTO	3.5	2.5
ドイツ RiL805	3.8	3.2

供用期間終了時の安全性レベル
= 最低限必要な安全性レベル

RF値とβの経時変化に関する研究

Akgul, Frangopol, Time-dependent interaction between load rating and reliability of deteriorating bridges, Engineering Struct., 26, pp.1751-1765, 2004

活荷重増加と腐食による劣化を考慮



既設橋に必要は安全性のレベルの議論

奥井 義昭 × MIDAS

様々な議論

劣化曲線：環境などにより大きく振れる，よく分からない

定期点検：定期点検の品質のレベル？

安全性指標：そもそも日本では新設の目標値が明示されていない

シミュレーションなどの研究をすれば決まる？

議論を始めるとき



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