

**2017
The 7th
MIDAS
Construction
Seminar**

Global Leader in Providing Engineering Solutions & Services

MIDAS ITは世界の技術者を支援します



世界 構造解析分野市場占有率1位(midas Gen/iGen)
韓国 建築分野/土木分野/地盤分野CAEソフト占有率1位
中国 土木/地盤構造解析分野市場占有率1位 (midas Civil, midas GTS)

建設業界	No.1	現地法人	9
海外代理店	35	使用国	110

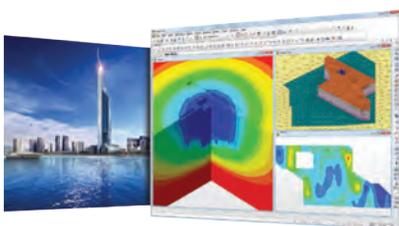
About MIDAS IT

MIDAS ITは、工学技術用ソフトウェア開発および普及、そして構造分野のエンジニアリングサービスとウェブビジネス統合ソリューションを提供する会社です。

2000年9月に設立。現在は約600名のグローバル専門技術者が在籍し、日本、アメリカ、中国、インド、ロシア、イギリス、ドバイ、シンガポール、フィリピンの現地法人や35ヶ国の代理店など、全世界ネットワークを通し、110ヶ国に工学技術用ソフトウェアを販売する世界的な企業として成長しました。

また、技術者の皆様の技術力向上のために各分野別に技術講座を実施しており、今後もこのような技術講座を定期的に関催していきたいと考えております。

このようなセミナーに是非ともご参加頂けますようお願い申し上げます。



Dubai Tower



Palazzo Versace & D1 Tower



Odeon Tower

2017 第 7 回 MIDAS 建設分野 技術講座

橋梁の設計・施工に最適化した新しい CIM ツール 3-18
株式会社マイダスイティジャパン 金 昶 奥

道路橋付属照明柱の振動制御に関する 19-42
解析的検討の事例紹介
関東学院大学 理工学部 教授 北原 武嗣 先生

道路橋示方書改定と信頼性設計法 43-68
長崎大学大学院 工学研究科 教授 中村 聖三 先生

鋼橋設計の構造解析に関する 2、3 の話題 69-115
首都大学東京 客員教授 野上 邦栄 先生

midas CIM 開発現況

橋梁の設計・施工に最適化した新しいCIMツール

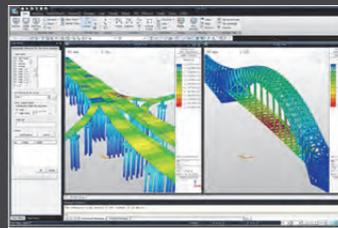
株式会社マイダスイティジャパン 金 晃 奂



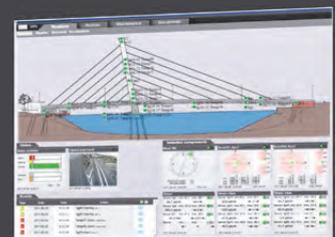
What is CIM??



Civil
Specialized Modeling

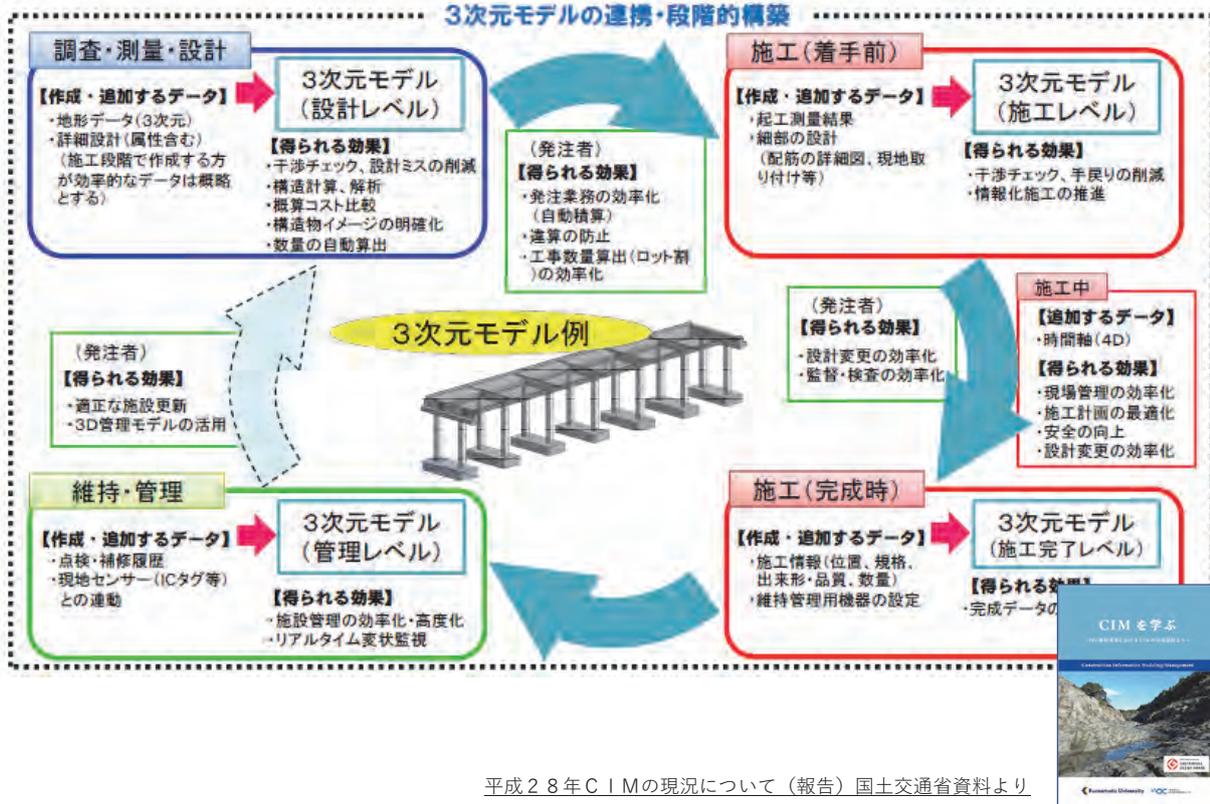


Integrated
Engineering Information

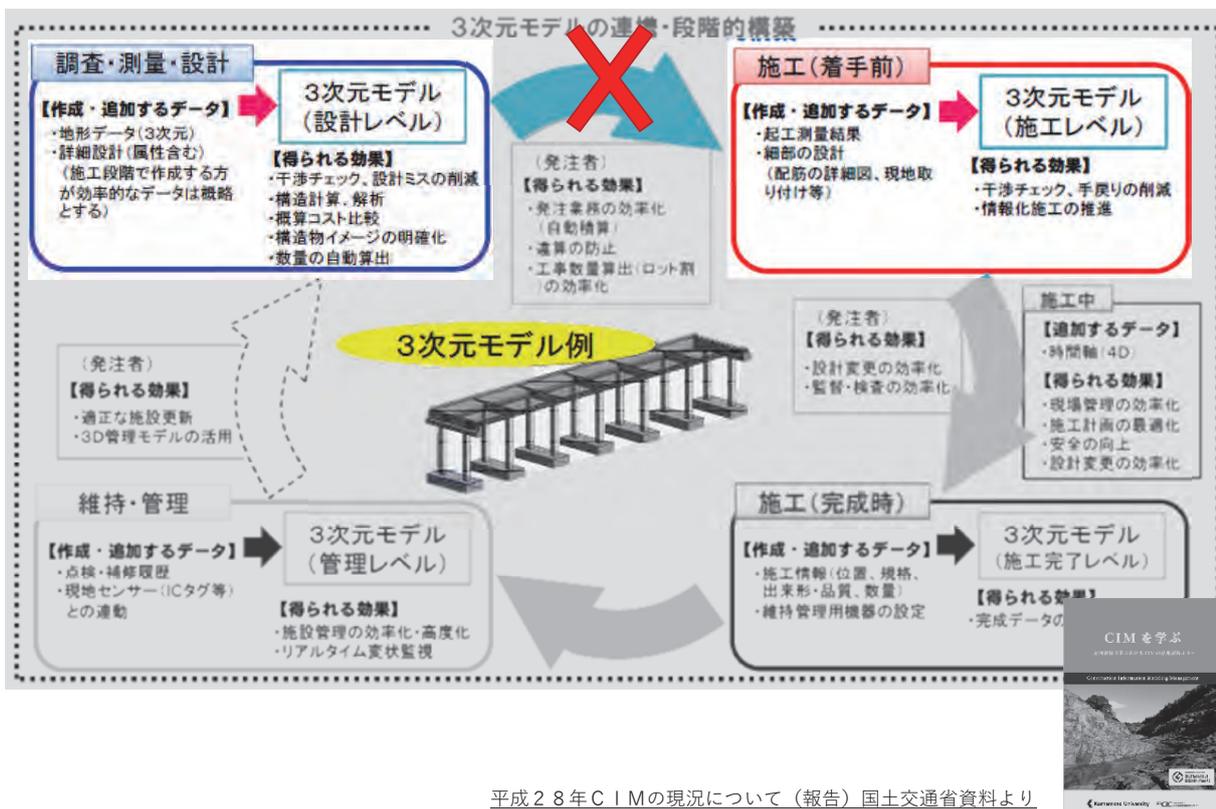


Management
System Interface

CIMとは？



実際には...



現場ではどのようにCIMを活用しているか？

日本の企業様へヒアリング調査

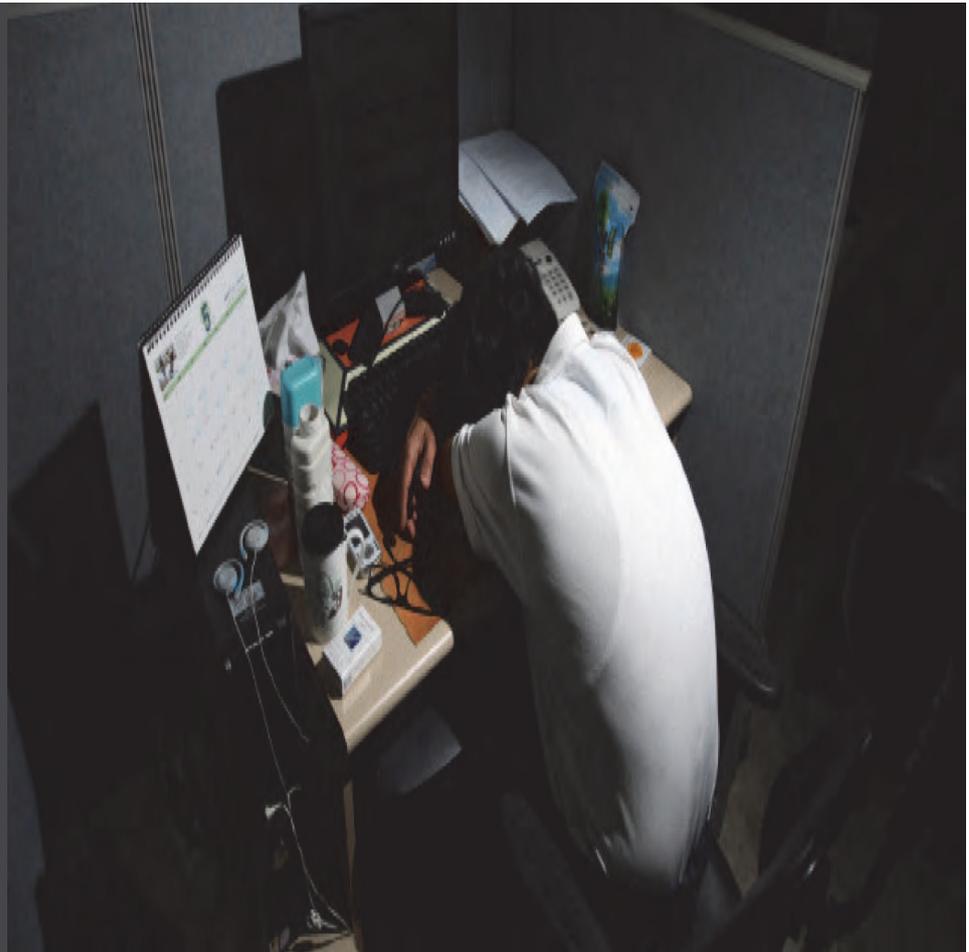
日時：2017年11月11日～25日

訪問会社：15社

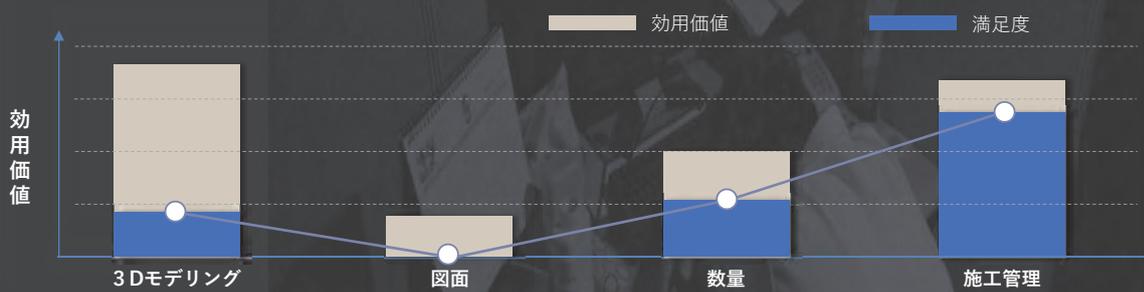


Ideal

Reality

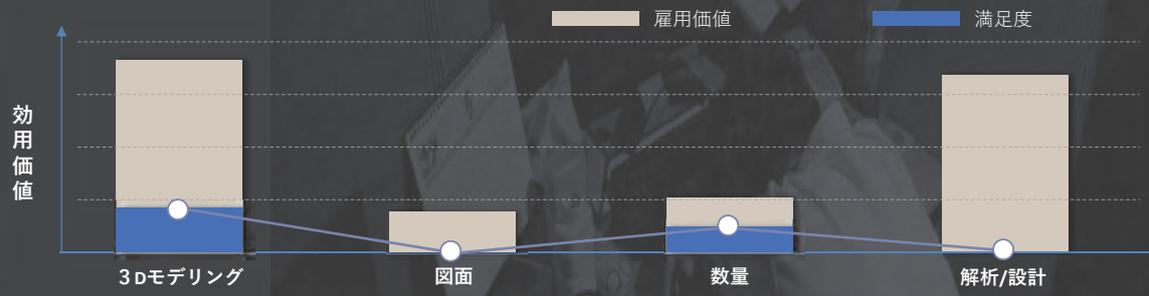


施工会社の現況



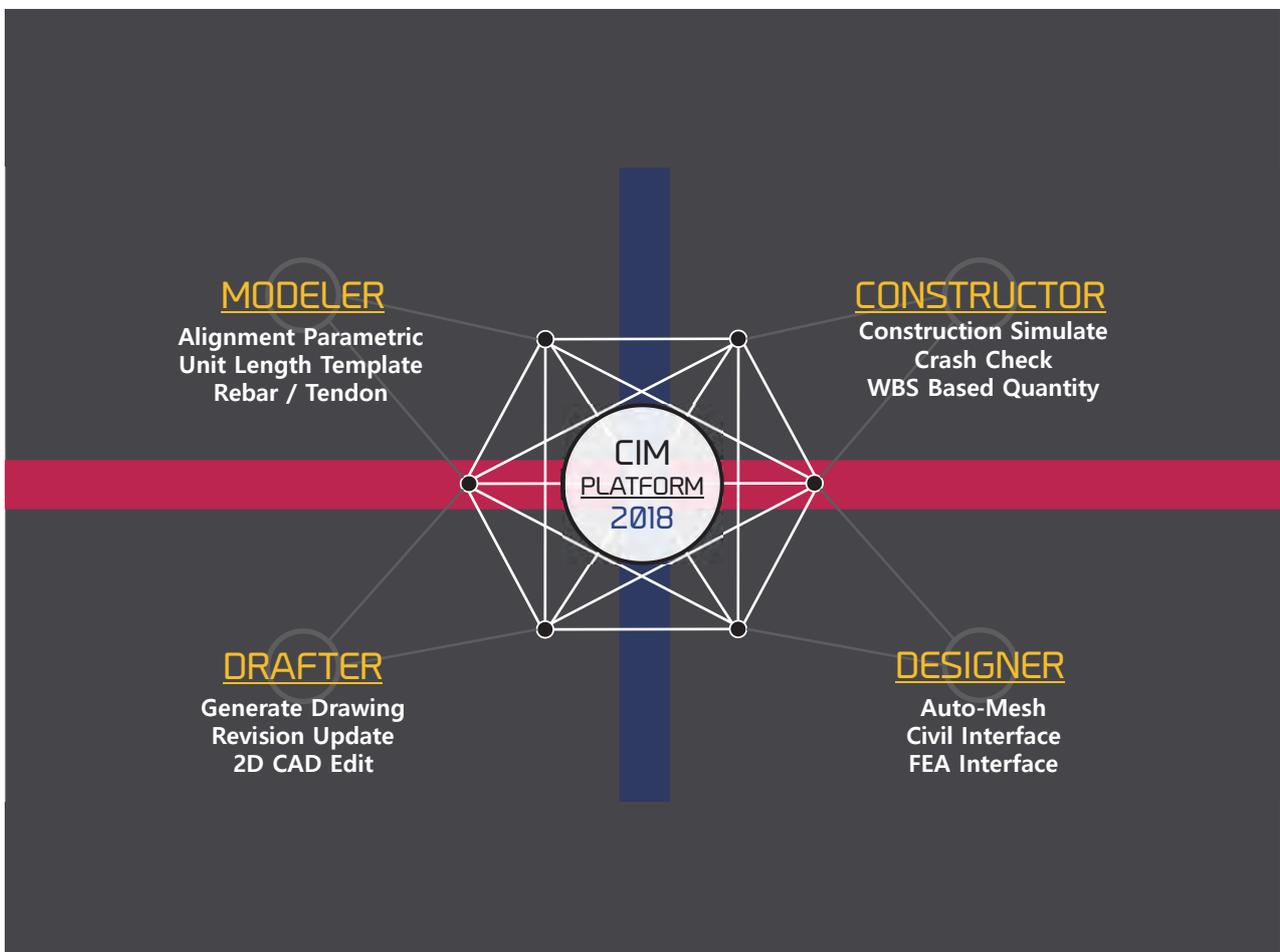
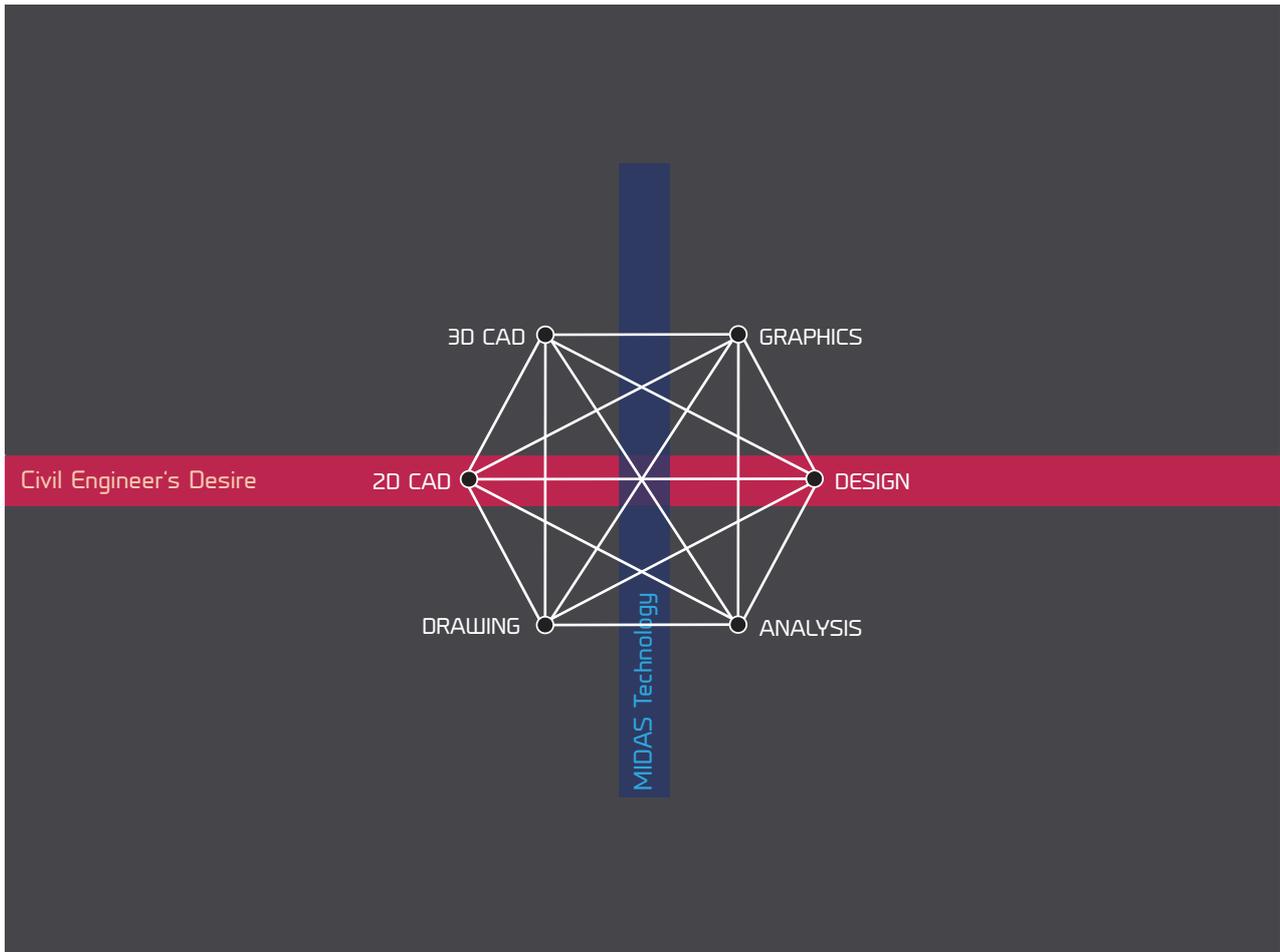
雇用価値	現況
3Dモデリング	<ul style="list-style-type: none"> • 最初から3次元モデルを作っているが、モデリングが難しくして外注を良く利用している。 • 今後は設計段階から3次元モデルを作って、施工会社はモデルを施工用に修正/補完するのが望ましい。
図面	<ul style="list-style-type: none"> • 施工中の設計変更は多いが、設計の時から3次元モデルを活用しないと図面機能の雇用価値は少ない。
数量	<ul style="list-style-type: none"> • 3次元モデルを利用した数量集計は部材ボリュームなど部分的に活用 • 施工時には部材/部品の発注のために詳細な集計が必要で、より3次元モデルも詳細に作る必要がある。
施工管理	<ul style="list-style-type: none"> • 今は主に施工管理の目的でCIMを利用している。

コンサルタントの現況



雇用価値	現況
3Dモデリング	<ul style="list-style-type: none"> 3次元モデルを設計に活用できなければ、3次元モデルは効用価値が少ない。
図面	<ul style="list-style-type: none"> 図面生成は設計にCivilを活用できる時に効用価値がある。図面だけのために3Dモデルを作るのは難しい。 モデリングはCADオペが作業するために、CADオペが使える操作性が必要だ。
数量	<ul style="list-style-type: none"> 数量算出は設計全体で占める割合が大きくないので、効用価値は少ない。 現在は2次元図面を見てEXCELを使って算出している。
解析/設計	<ul style="list-style-type: none"> Civil→CIM→図面生成が実現し、さらに施工時にも利用できれば業務の効率が大きく上がるだろう。





CIM MODELER

土木構造物の特性を考慮した専用モデラー

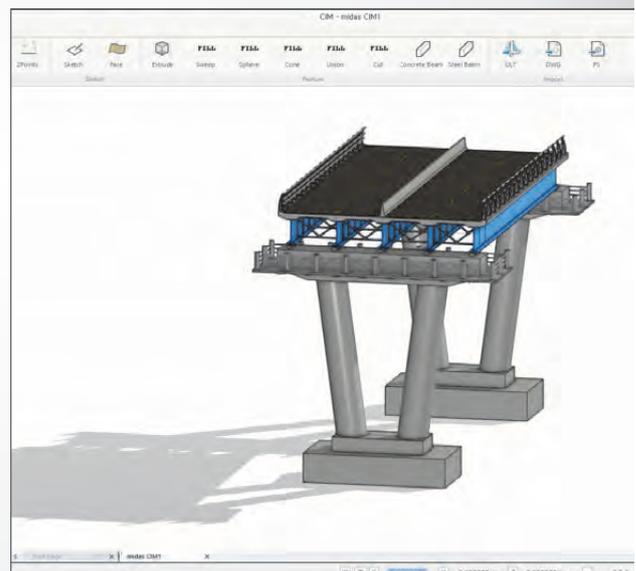
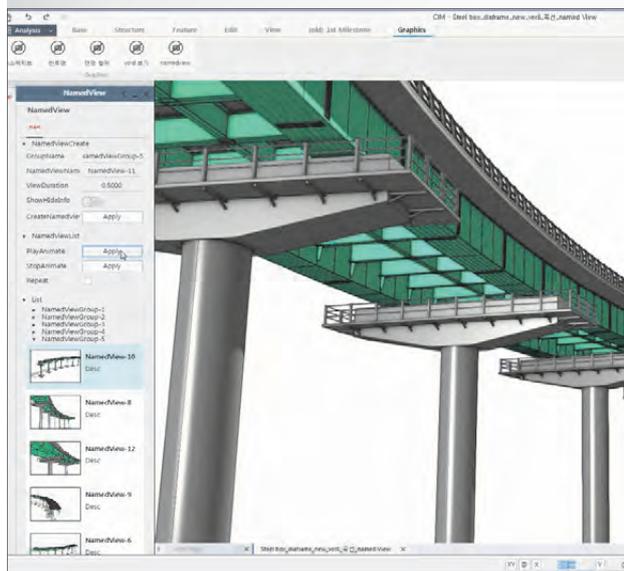


線形ベースのモデリング

- 縦断と平面線形を組合わせた立体線形を構成
- 線形情報に対するグリッド構成
 - 片勾配/ Skew/部材の配置基準線の設定
- 線形情報の変更時に部材情報も自動更新

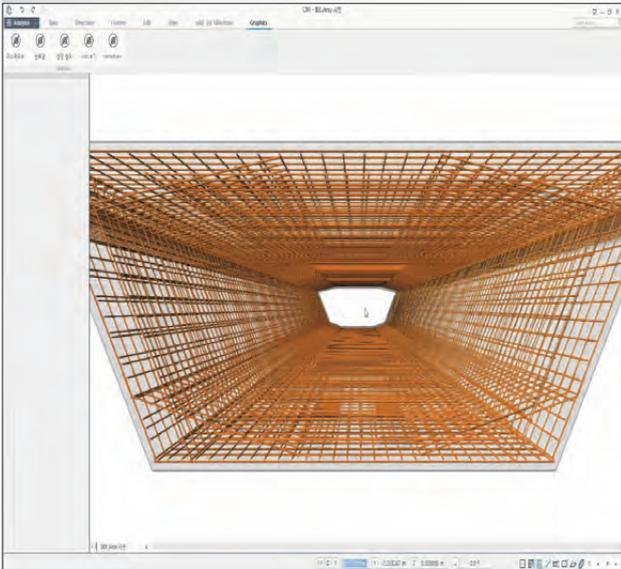
部材ライブラリ

- 頻繁に使用される構造物をライブラリに登録
- ポイントライブラリ
- Linearライブラリ
 - 繰返し/延長する部材の組合せで構成



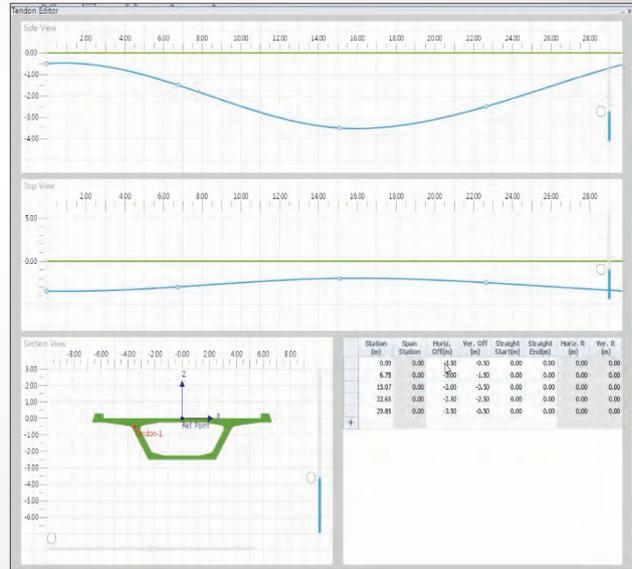
鉄筋モデリング

- 部材断面を基準に配筋情報を定義
- 部材単位以外に独立的な鉄筋作成とグループ化機能
- 部材形状の変更時に、配筋情報の自動更新
- 配筋形状ライブラリをサポート



PC部材モデリング

- 平面ベースのPC鋼材配置
- 部材形状の変更時に、PC座標の自動更新
- 定着口ライブラリをサポート
- 鉄筋との干渉検討



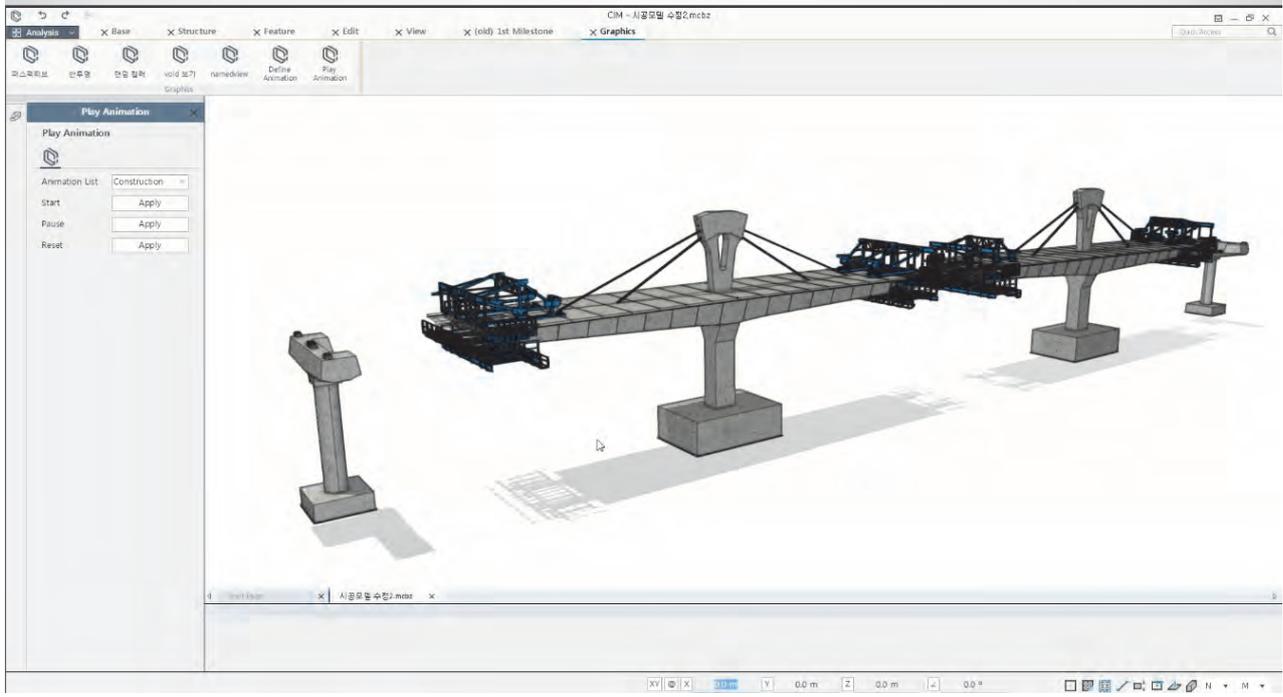
CIM CONSTRUCTOR

施工状況を、誰でも見やすく

Task	Duration	Start	End
▼ 主環部打設	10d	0	10
▼ 主梁打設	10d	0	10
▼ 桁1打設	10d	0	10
★ 1st Segment	2d	11	13
★ 2nd Segment	2d	13	15
★ 3rd Segment	2d	11	13
★ 4th Segment	2d	11	13
★ ケーブル連結	2d	11	13
▶ Key Segment 打設	5d	25	30
▶ 桁2打設	5d	25	30
▶ Key Segment 打設	5d	25	30

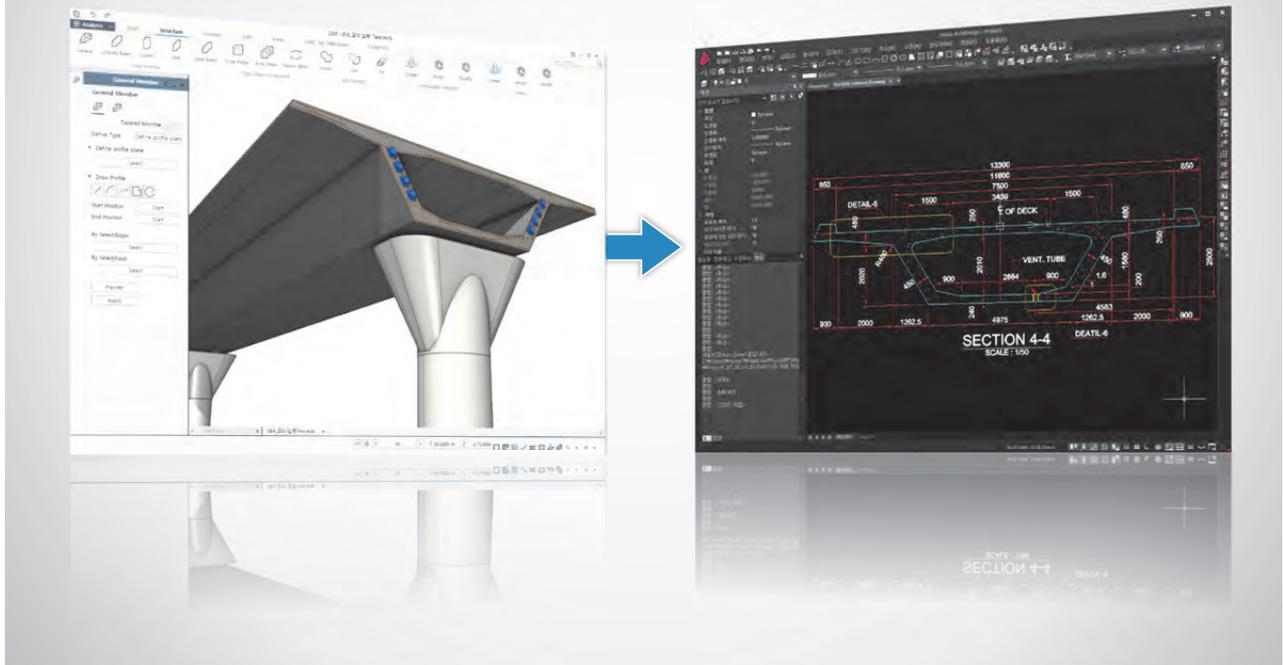


部材打設段階と型枠の定義	施工段階の設定とGantt Chart構成	施工段階別の数量集計	部材及び配筋の干渉チェック
<ul style="list-style-type: none"> 部材間の接合を考慮した形状モード 部材の打設段階区分 型枠面の定義 部材別の工程グループ設定 	<ul style="list-style-type: none"> 工程グループ別の施工段階設定 時間属性定義 施工段階のシミュレーション 	<ul style="list-style-type: none"> 部材別の数量集計 使用者数量情報の追加 全体/施工段階別の数量情報算出 	<ul style="list-style-type: none"> 施工段階別の部材間や配筋との干渉チェック 単純干渉と領域干渉レビュー 干渉位置のグラフィック表示

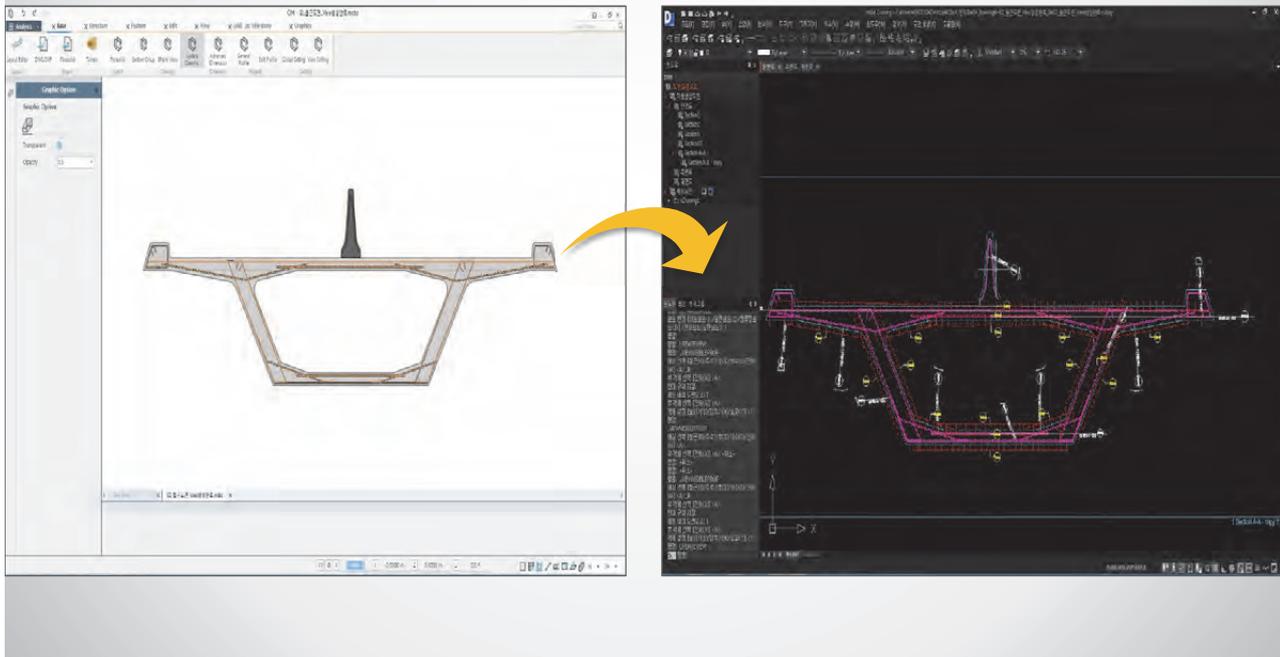


CIM DRAFTER

図面、切断面の指定だけで

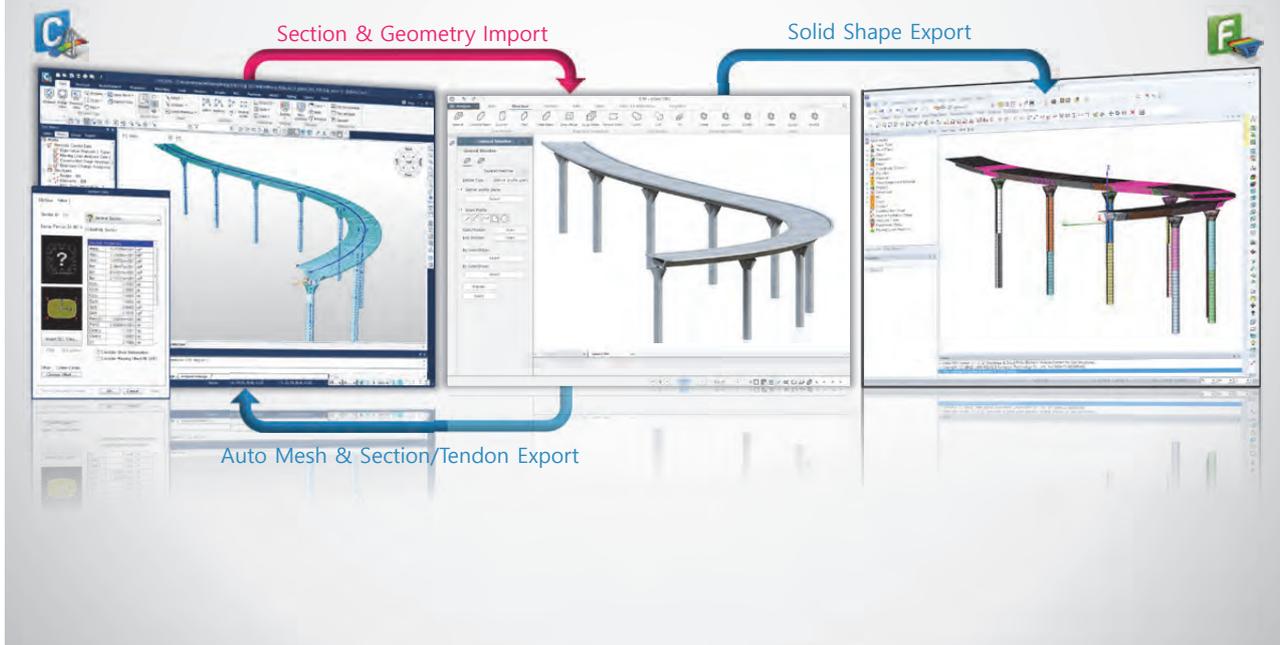


図面作成領域の定義	図面編集モード	図面のリビジョン	使用者図面テンプレート
<ul style="list-style-type: none"> 図面を作成する切断面位置の定義 曲面の切断面も定義可能 図面情報管理 <ul style="list-style-type: none"> - 作成とリビジョン管理 	<ul style="list-style-type: none"> 使用者テンプレート定義 部材及び鉄筋の情報タグ 鉄筋の材料表の自動生成 2次元CAD機能提供 	<ul style="list-style-type: none"> モデル変更に伴う図面の自動更新 図面変更に伴う寸法線の更新 変更位置のリビジョンマーク表示 	<ul style="list-style-type: none"> 配筋図作成テンプレート 使用者スタイルの図面定義



CIM DESIGNER

構造解析ソフト(midas Civil, FEA)との連携

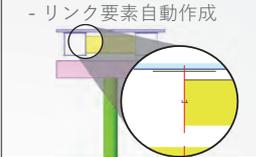


解析要素の自動生成

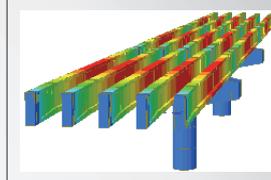
- 解析モード：自動生成された要素を確認し、荷重/境界を編集
- 部材別に設定された解析要素タイプに応じて、構造要素を生成
- 荷重/境界部材の解析条件を自動置換
 - 防護壁部材の自重条件がBeam Loadに置換
- PC鋼材はCivilのPCプロファイルへ置換
- 配筋はCivilの配筋情報へ置換

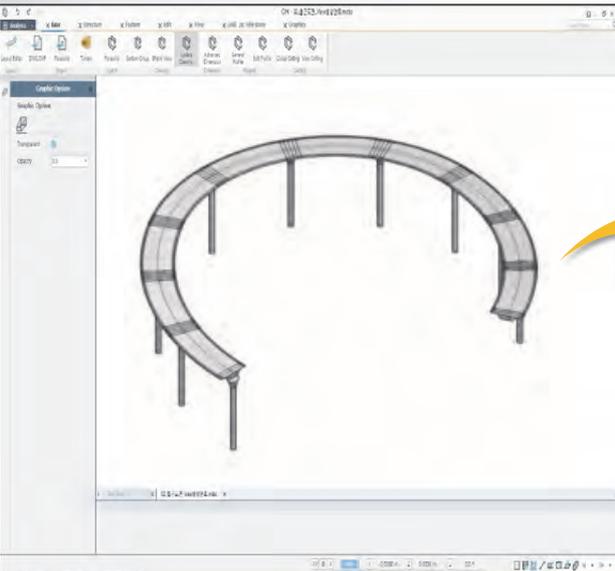
基本荷重と境界条件の定義

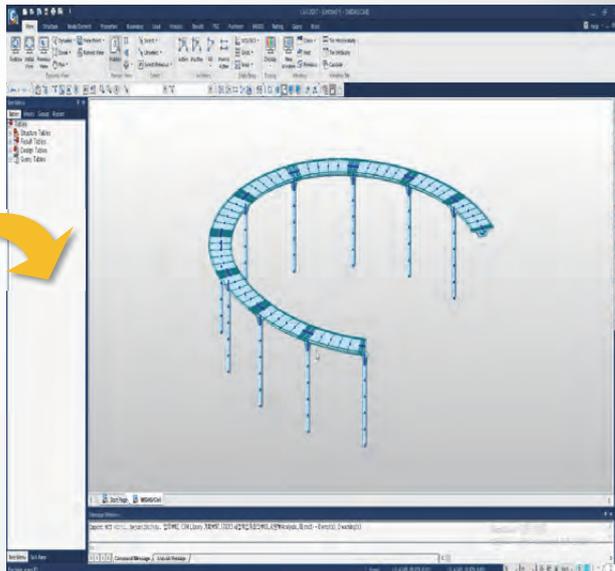
- 荷重と境界条件の定義
- 部材接合の接続関係を判断
 - リンク要素自動作成



Civil Export







□ 橋梁の詳細設計業務における 3Dモデル活用効果

- 橋梁構造形式の検討
 - 詳細構造の検討
 - 施工計画/仮設工法検討

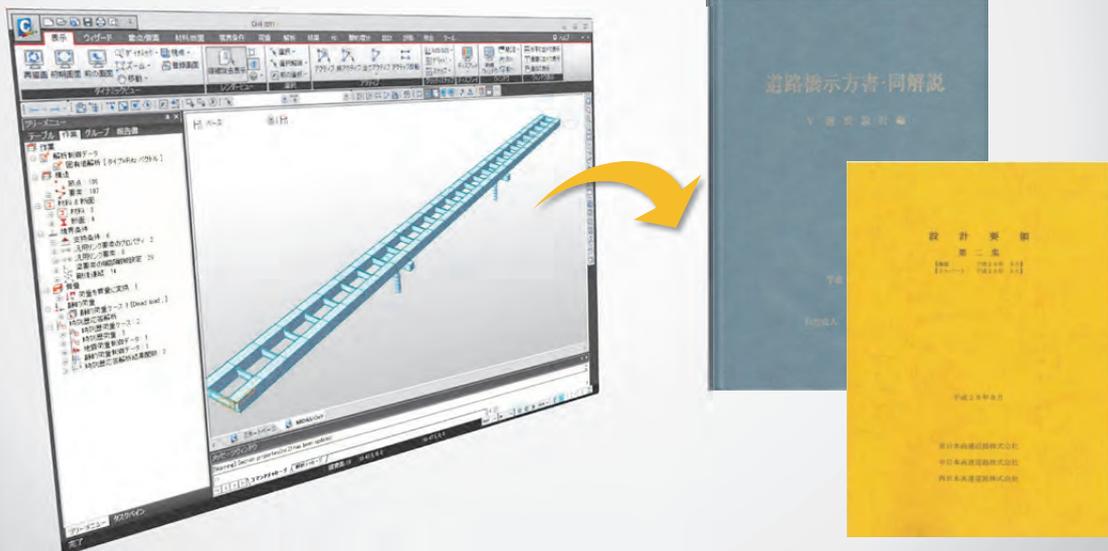
- 上部工設計
 - 下部工設計
 - 耐震照査/設計
 - 付属物設計
 - 仮設構造物設計

- 構造一般図
 - 構造詳細図
 - RC橋梁：2次元CADから作成
 - S橋梁：設計ソフトから生成図面利用



midas Civil

日本の耐震設計への対応



midas Civil 耐震設計機能

部材 M-φ 機能強化

専用性・操作性向上

日本の耐震規準対応

多様な橋脚タイプへ対応

- ・ SC(REED工法) 部材
- ・ NEXCO対応
- ・ RC橋脚塑性ヒンジ部
- ・ 鋼管・コンクリート複合部材

RC橋脚の耐震補強へ対応

- ・ RC巻立て補強
- ・ 鋼板巻立て
- ・ 繊維巻立て
- ・ 曲げ補強/せん断補強/じん性補強

その他便宜機能

- ・ せん断補強筋断面積の直接入力
- ・ 限界状態ひずみの評価位置指定

Civil 耐震設計メニュー

- ・ 耐震設計専用のリボンメニュー
- ・ 一連の作業ができるメニュー構成
- ・ 耐震設計専用の結果ツリー

耐震設計専用の結果ツリー

- ・ Pushover解析/動的解析の結果一覧

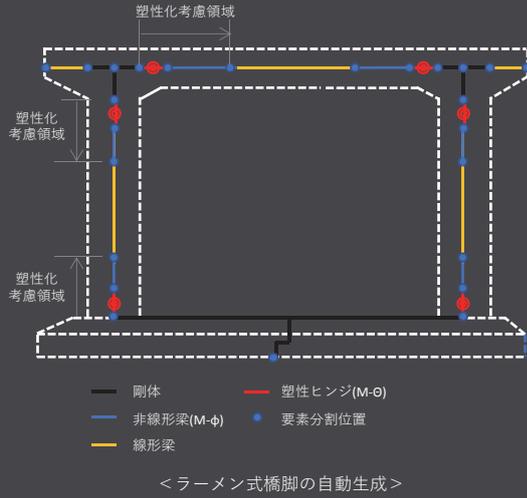
日本の耐震設計へ対応

- ・ 対応規準
 - 道路橋示方書(H24, H29)
 - 設計要領第2集(H28)
- ・ レベル2の静的照査法/動的照査法
- ・ 橋梁種類
 - 桁橋(単柱式、ラーメン式)
 - ラーメン橋、免震橋、アーチ橋
- ・ 部材照査
 - 上部工、支承部、下部工

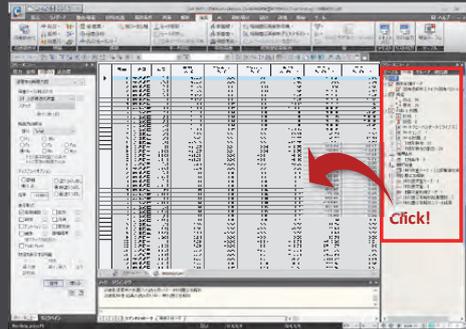
□ Civil 耐震設計専用メニュー

								耐震設計	
下部工	要素 ▼ リンク ▼ 部材グループ / タイプ	支持条件 節点バネ	質量 ▼ 減衰 ▼	静的荷重 ▼ Pushover荷重 ▼ 地震荷重 ▼	固有値解析制御 解析実行	設計条件 設計照査 ▼	計算書出力	アクション	チェック
ウィザード	部材タイプ	境界条件	節点&質量	荷重	解析	設計一般	設計照査		

□ ウィザードによる非線形モデル自動生成



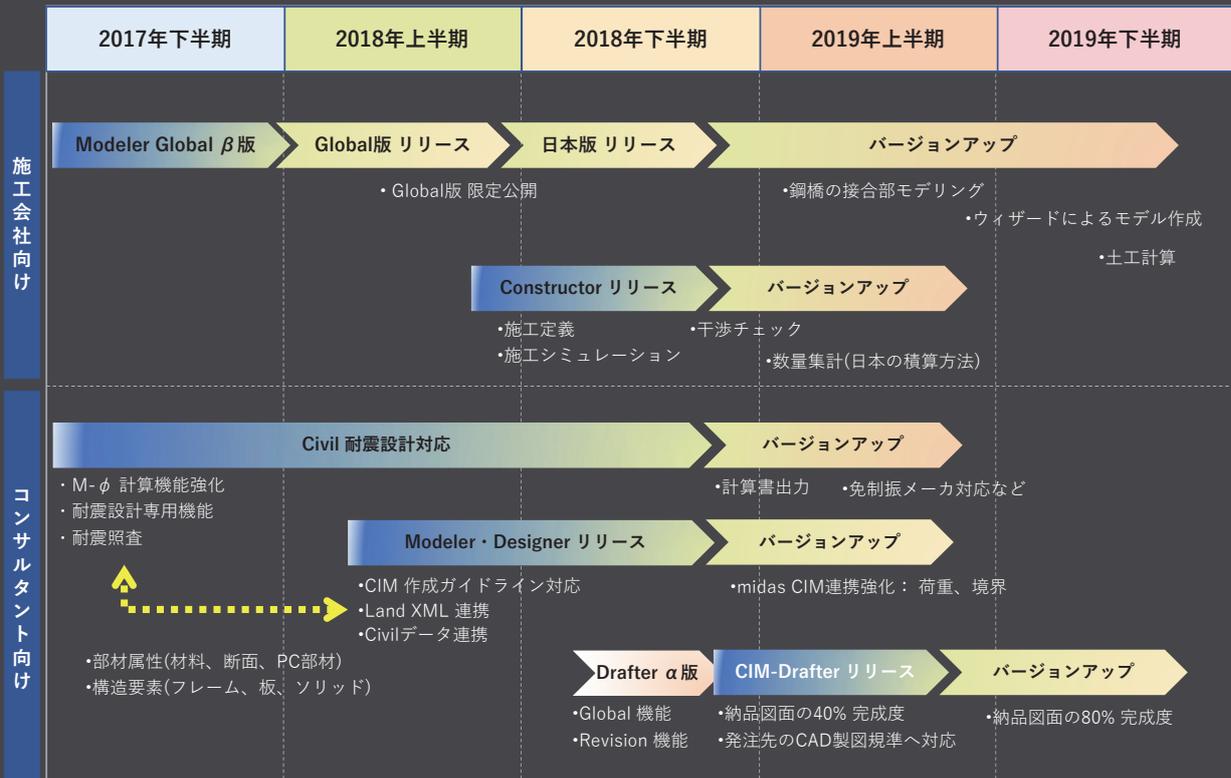
□ 耐震設計専用の結果ツリー



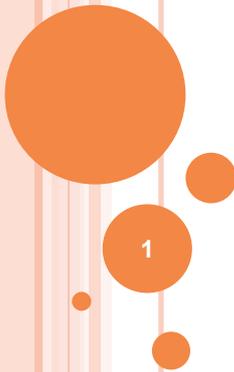
- 初期荷重結果
 - 断面力結果
 - 断面力分布
- 固有値結果
 - モード結果
- 静的照査
 - 解析結果
 - 照査結果
- 動的照査
 - 解析結果
 - 照査結果

< 耐震設計専用の結果ツリー >

□ 開発ロードマップ



道路付属照明柱の振動抑制に関する解析的検討の事例紹介



関東学院大学
理工学部土木学系
北原武嗣

検討背景

- 交通量の増加
- 車両の大型化・重量化



その際発生する
交通振動により

橋梁および照明柱などに影響

影響

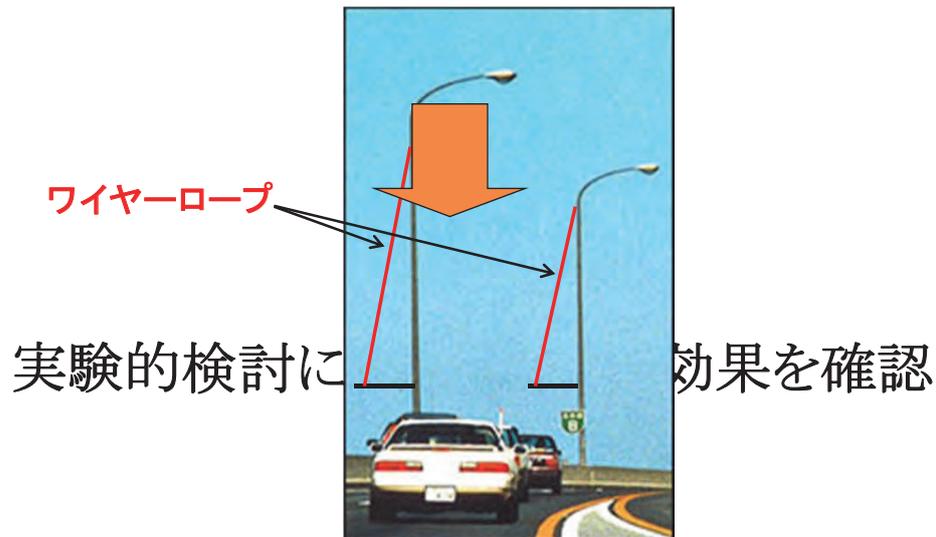
- 寿命低下
- 金属疲労による損傷の発生



検討背景

○簡易的な対策方法

→ワイヤーロープによる振動対策



3

既往実験

鋼構造論文集
第17巻第66号 (2010年6月)

報 告

橋梁上柱状鋼構造物のワイヤーロープによる制振技術に関する実験的研究

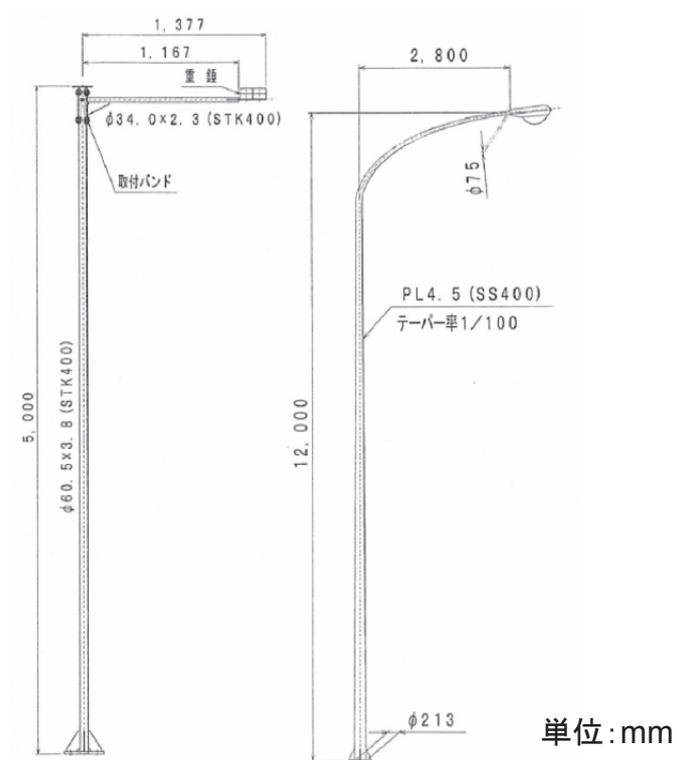
Experimental Study on Vibration Control of Pole Type Steel Structures on Bridges
by Using Wire Ropes

石橋 知彦*, 山口 隆司**, 岡崎 大輔***

Tomohiko ISHIBASHI, Takashi YAMAGUCHI, Daisuke OKAZAKI

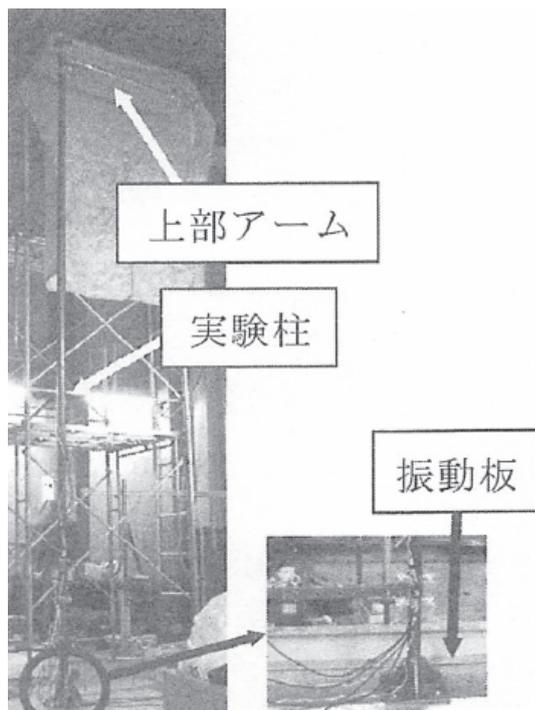
4

対象照明柱と実験モデル



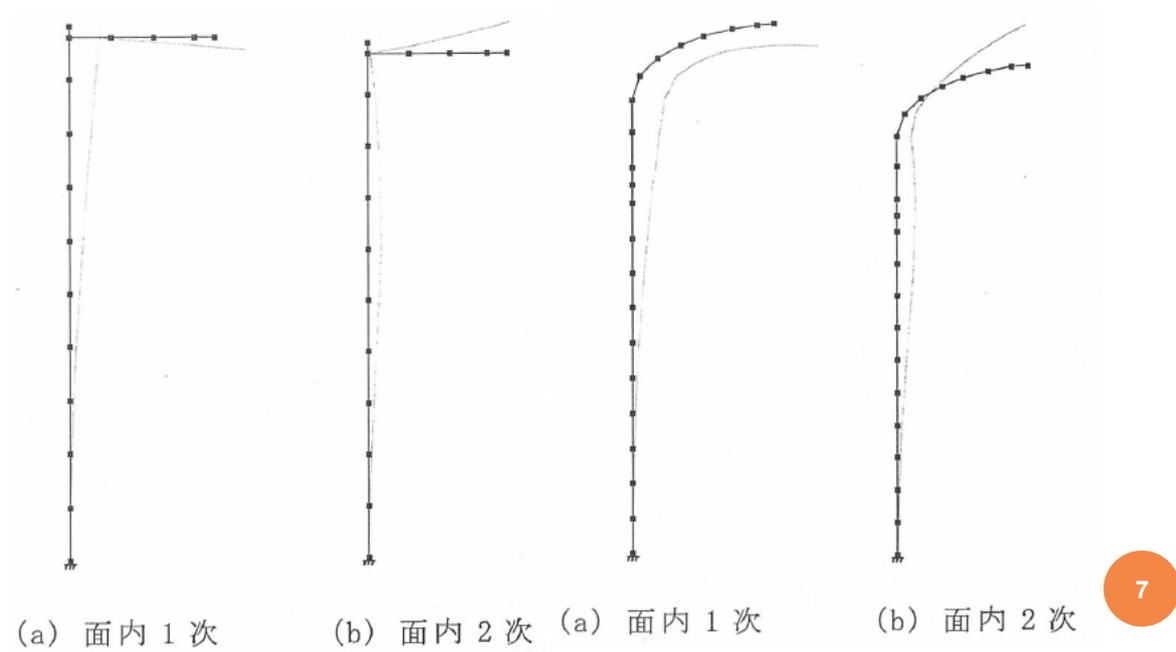
5

実験概要



6

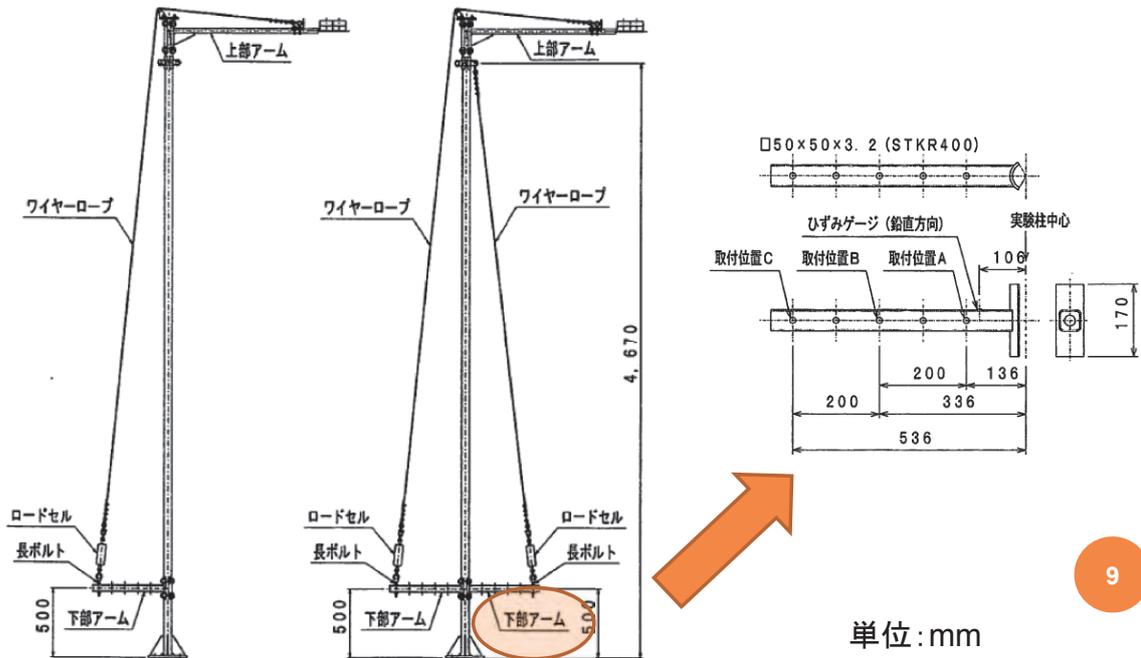
実験モデルと対象中のモード形状



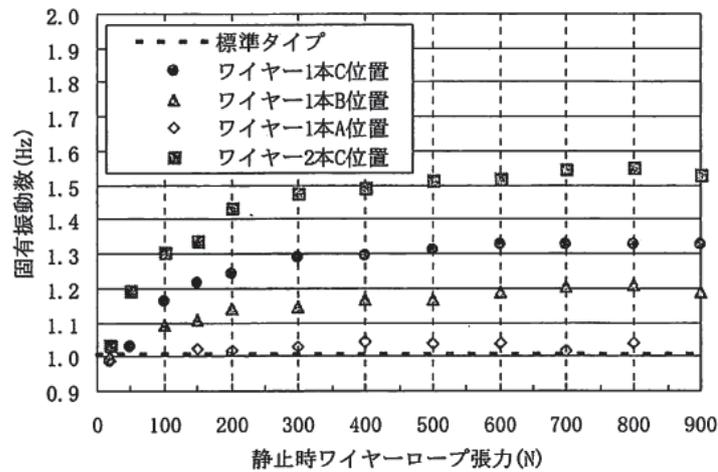
振動特性

モード	柱の種類	固有振動数 (Hz)	等価振動重量 (N)
面内1次	実験柱	1.04	276
	対象柱	1.00	584
	実験柱/対象柱	(1.04)	(0.47)
面内2次	実験柱	3.48	126
	対象柱	3.15	422
	実験柱/対象柱	(1.10)	(0.30)

ワイヤーロープ設置状況

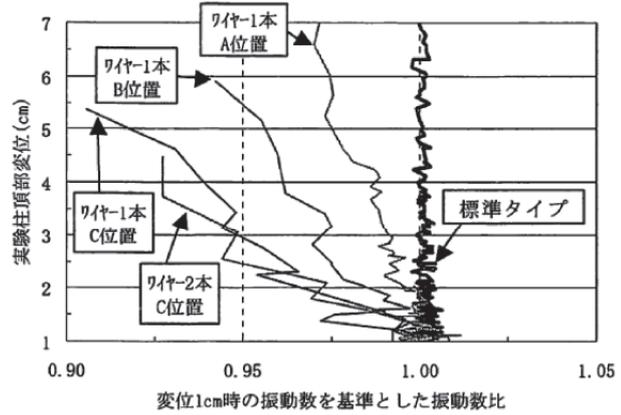


実験結果 (ワイヤー張力と固有振動数)

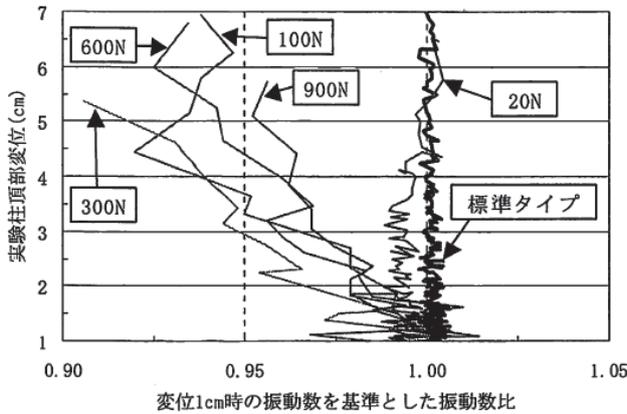


(a) 面内 1 次モード

実験結果 (頂部変位と振動数比)



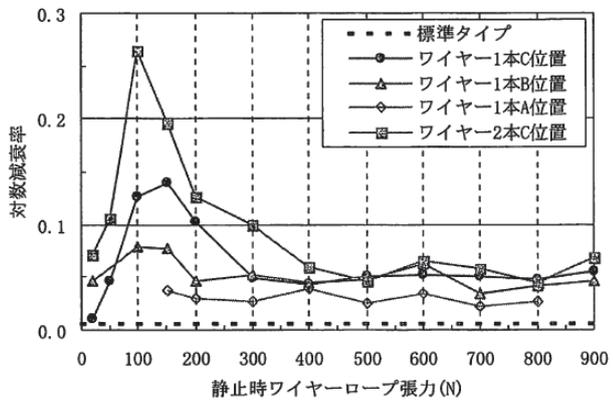
(a) ワイヤーロープ張力 300N



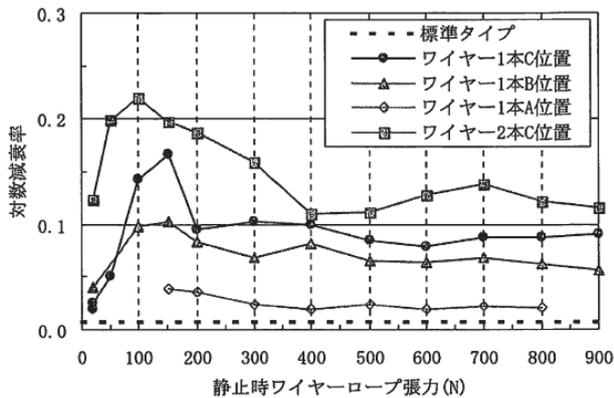
(b) ワイヤーロープ 1本取付位置 C

11

実験結果 (対数減衰率)



(a) 面内 1次モード (頂部変位 1cm)



(b) 面内 1次モード (頂部変位 2cm)

12

実験まとめ

- (1) 柱状構造物にワイヤーロープを 1 本または 2 本張ることにより, 柱の応答を大幅に低減できることがわかった. 応答低減の割合は 1 次モードについては, ワイヤーロープ 1 本の最も効果の高いパターンで 1/38, ワイヤーロープ 2 本の最も効果の高いパターンで 1/55 であった. 2 次モードについてはワイヤーロープ 1 本の最も効果の高いパターンで 1/2.9 であった.
- (2) ワイヤーロープは柱から離して設置した方が大きな制振効果が得られることがわかった.
- (3) 静止時の張力により制振効果が変わり, 最適値があることが分かった. ワイヤーロープ 1 本と 2 本の場合では, 2 本の場合の方が張力変動に対して制振効果が安定していることがわかった.
- (4) 振動の低減効果はワイヤーロープを張ることにより, 実験柱の剛性を動的に変化させて得られており, 初期張力の値には最適値が存在することがわかった. これは初期張力が小さすぎると無張力の標準タイプに近い状態が多くなり, 大きすぎるとワイヤーロープが弛んだ状態がなくなってしまうためと考えられる.

13

解析的検討

14

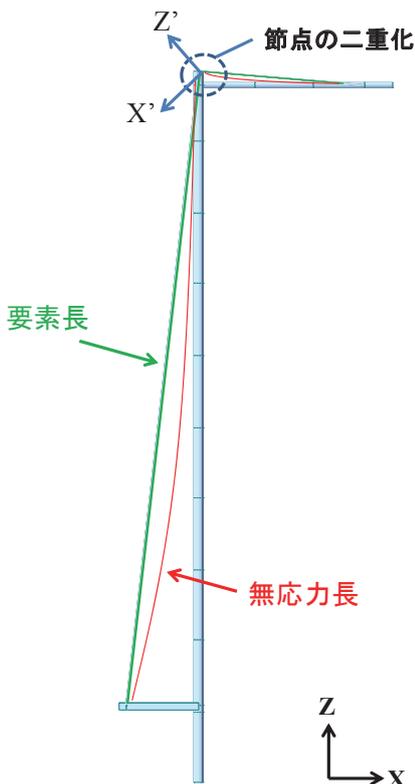
本検討の目的・概要

- ① 静解析により、構造全体系としての荷重－変位関係からワイヤーロープの効果を検討。
- ↓
- ② 自由振動解析を行い、ワイヤーロープに導入する初期張力と振動抑制効果の関係を定量的に把握。
- ↓
- ③ 強制加振解析を行い、振動を与えた際の応答倍率と振動数比の関係を把握。

振動抑制効果が生じるメカニズム
 <解析で追認>

15

解析モデル



汎用骨組み解析ソフトMidas CIVIL

- 柱, 上部, 下部アーム→**梁要素**
- ワイヤーロープ→**ケーブル要素**
 (トラス要素)
 ワイヤーロープのたわみ
 上部・側部ワイヤーの一本化
- 材料特性は弾性
 ただし、ワイヤーロープは、
引張のみ抵抗, 圧縮負担なし
- 柱基部完全固定

16

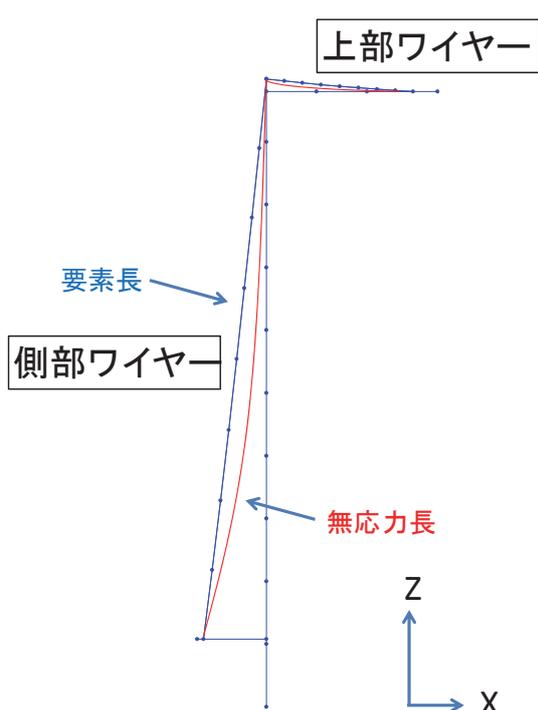
解析モデルの構造諸元

	柱	上部アーム	下部アーム
長さ(mm)	5000	1361	550
径(mm)	60.5	34	
板厚(mm)	3.8	2.3	
鋼材	STK400		STKR400
弾性係数 (N/mm ²)	2.0 × 10 ⁵		
ポアソン比	0.3		

	上部ワイヤー	側部ワイヤー
長さ(mm)	1171.40	4488.05
直径(mm)	5.56	
弾性係数(N/mm ²)	2.0 × 10 ⁵	
ポアソン比	0.3	
比重(kg/cm ³)	7.77 × 10 ⁻³	

17

ワイヤーロープのたわみ



ワイヤーロープ
自重によりたわむことを考慮

要素長と無応力長と変える
ことで模擬する。

上部ワイヤー

要素長: 1171.28mm

無応力長: 1171.40mm

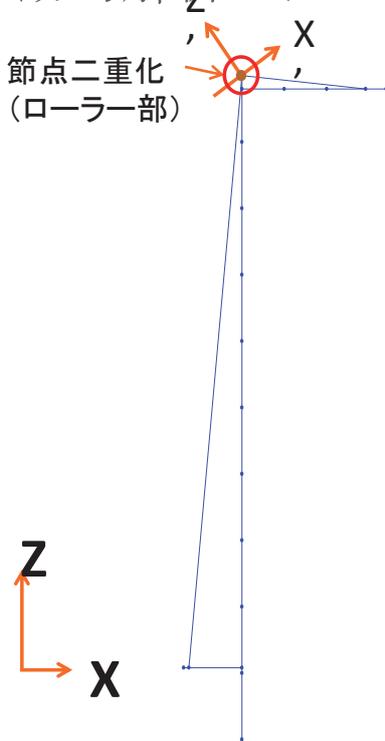
側部ワイヤー

要素長: 4487.94mm

無応力長: 4488.05mm

18

動的解析モデル



◎動的解析では、カテナリーを導入できない。

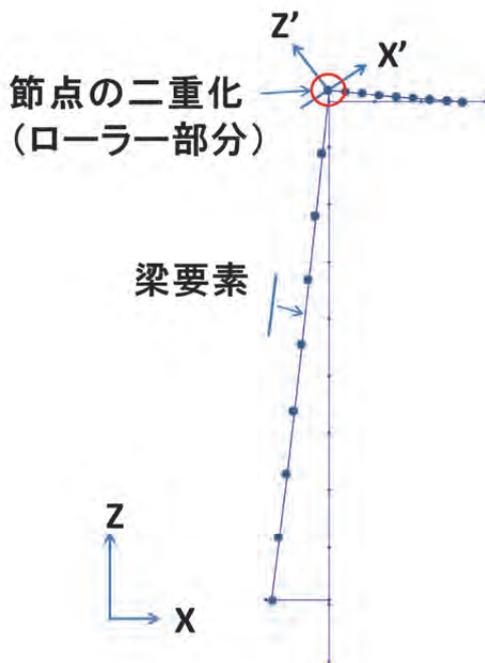


トラス要素(引張専用)で検討

19

解析モデル

<0N, 20N>



- 柱, 上部, 下部アーム→梁要素
- ワイヤロープ→トラス要素
- 材料特性は弾性
ワイヤロープに関しては,
引張のみ抵抗, 圧縮は負担なし.
- 上部ワイヤ, 側部ワイヤともに要素を8分割
- ワイヤロープのたわみ
- 梁要素の付加
- 節点の二重化

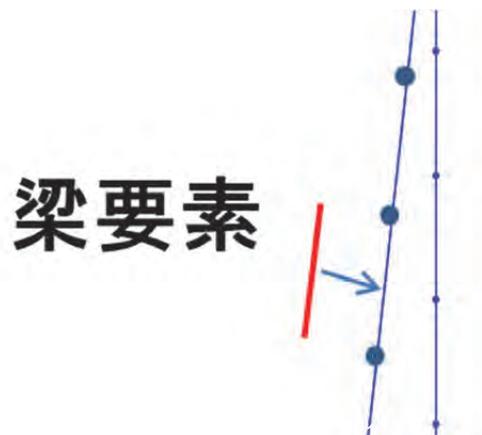
20

梁要素の付加

トラス要素は要素間ピン結合

→本来のワイヤーではあり得ない回転変形

節点部での回転を防ぐ⇒剛性の小さい梁要素 付加

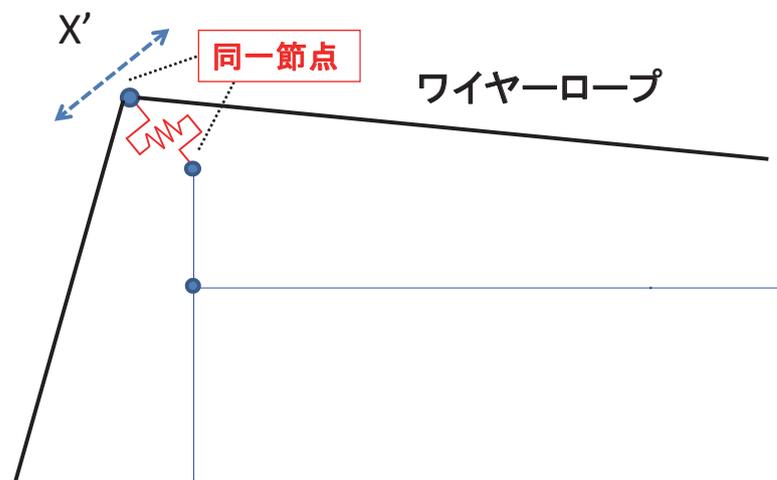


21

節点の二重化

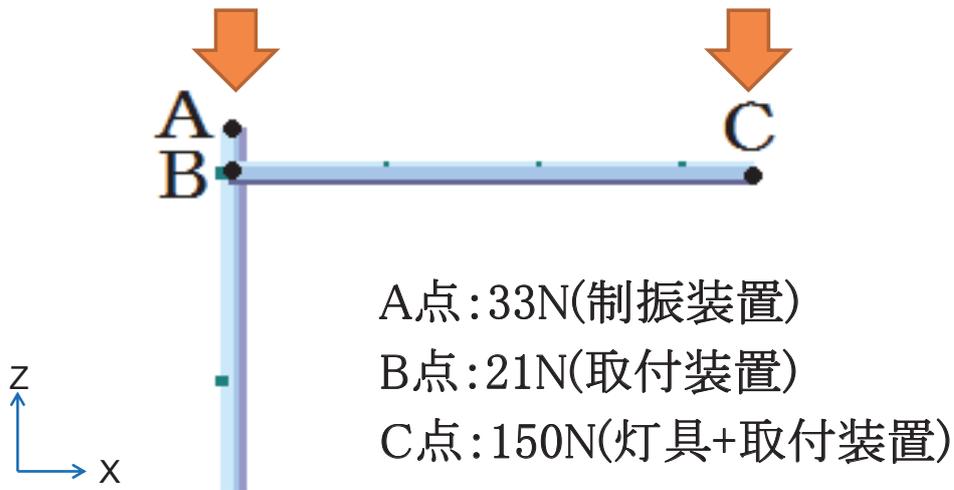
上部ワイヤーと側部ワイヤーの軸力が同じになるよう
⇒ローラー部分の節点を二重化している。

二重化した節点を剛性の弱いバネ要素でつなぎ
X' 方向のみ拘束を解放している。



22

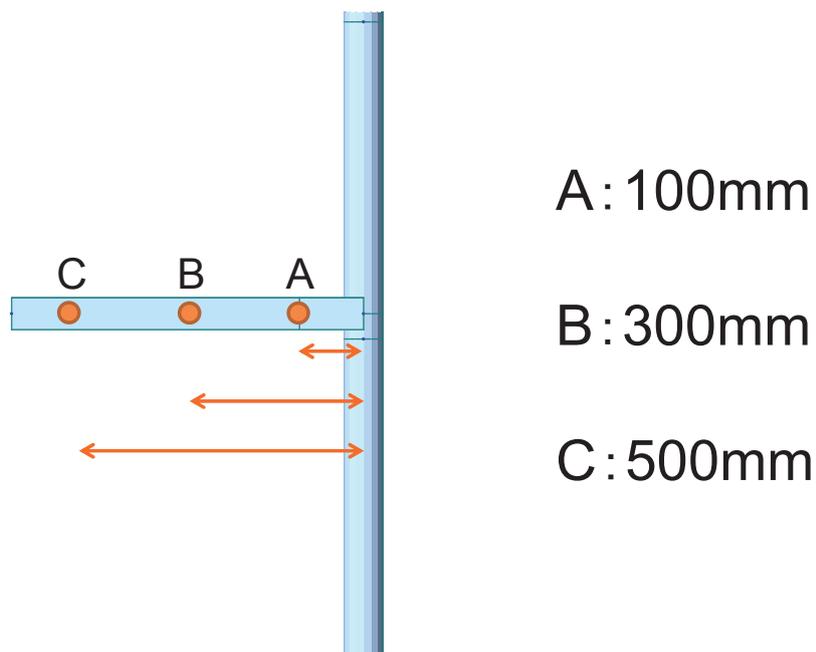
荷重条件



ワイヤーロープの初期張力は11ケースを設定
(20N, 100N, 150N, 200N~900N)

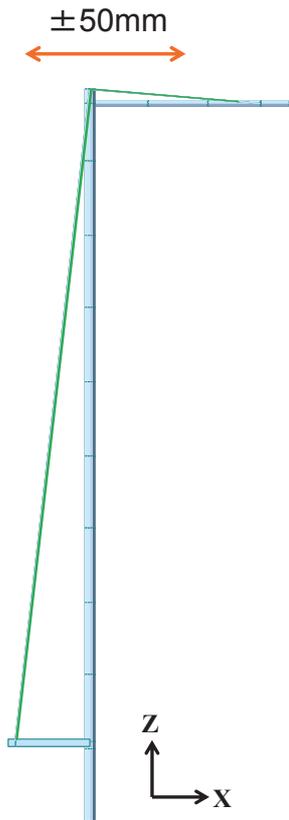
23

下部アーム取付位置

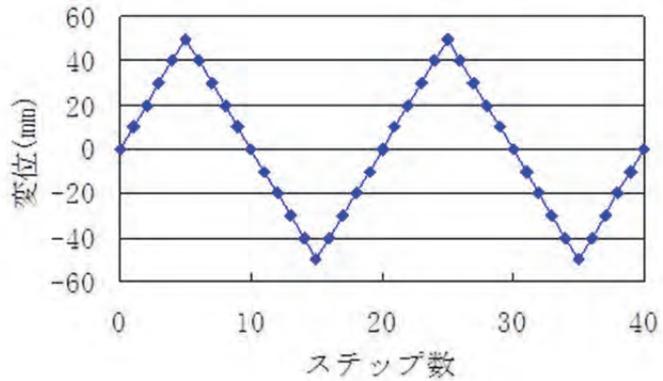


24

静解析



- 柱頂部を±50mm強制変位

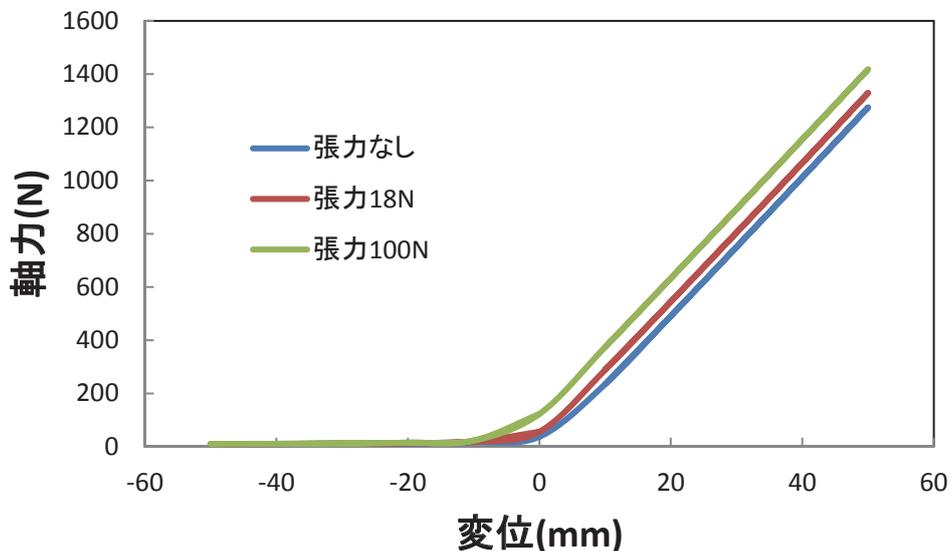


- 柱基部反力を出力
→ 柱頂部変位との関係を算出

25

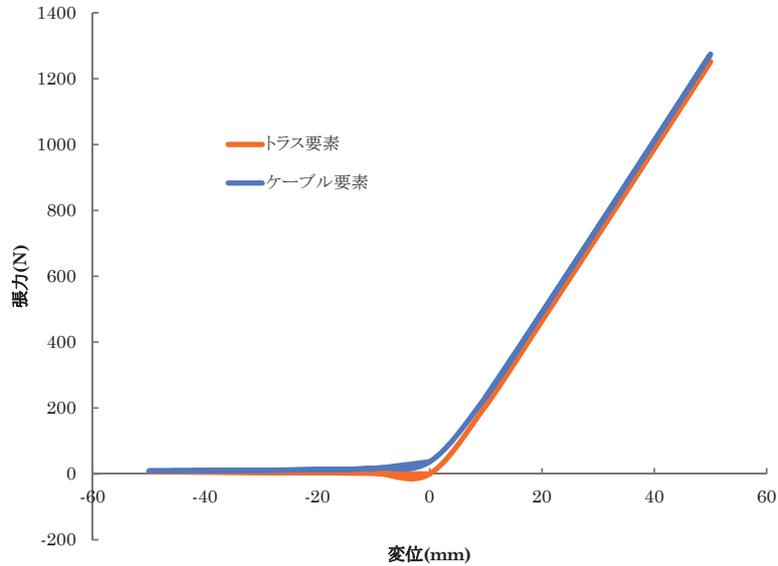
ワイヤーロープの軸力－変位関係

この図より、ワイヤーロープは引張にのみ抵抗し、圧縮には抵抗しないことがわかる。



26

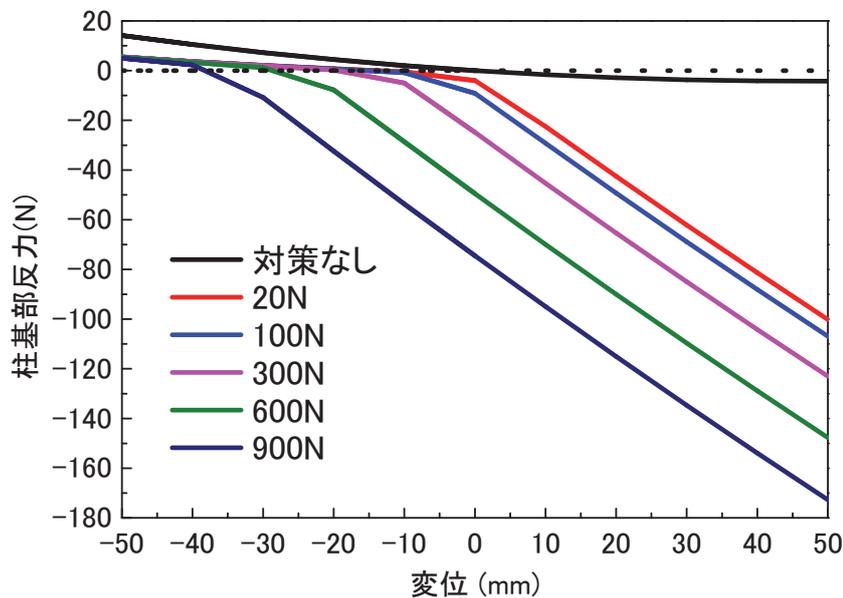
ケーブル要素とトラス要素の比較



27

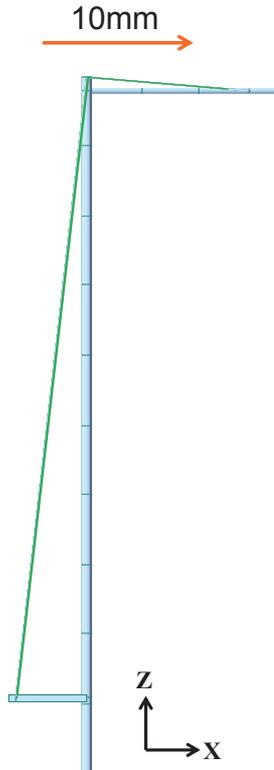
構造全体系の荷重—変位関係

各部材は弾性状態であるにもかかわらず、ワイヤーロープが圧縮に抵抗しないため、構造全体系としては非線形を示す。



28

自由振動解析

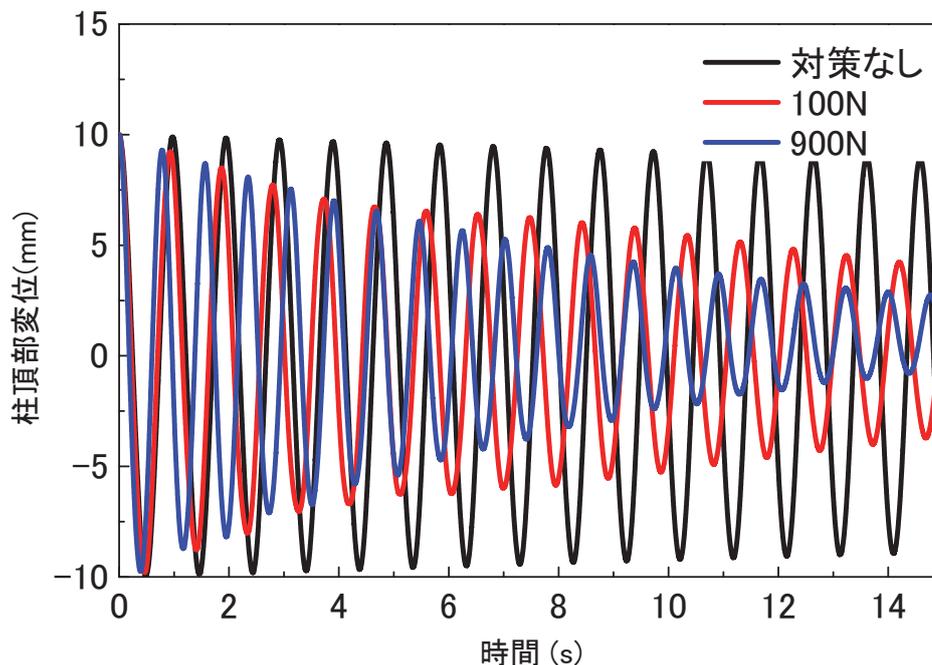


- 柱頂部を10mm変位させ、15秒間（1ステップ0.001秒）自由振動.
- 減衰の設定
要素別レーリー減衰
柱:0.0009
ワイヤーロープ:0.005 0.002 0.0009
- 柱頂部変位とワイヤーロープ張力の時刻歴波形を算出.

29

柱頂部の時刻歴変位波形

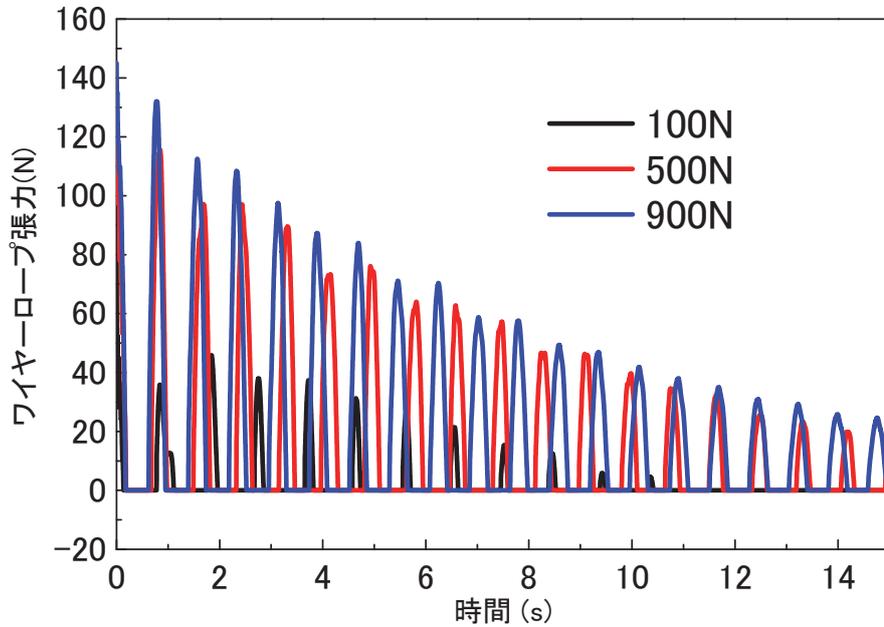
自由振動解析により算出した変位波形より、対数減衰率、固有周期を計算する。



30

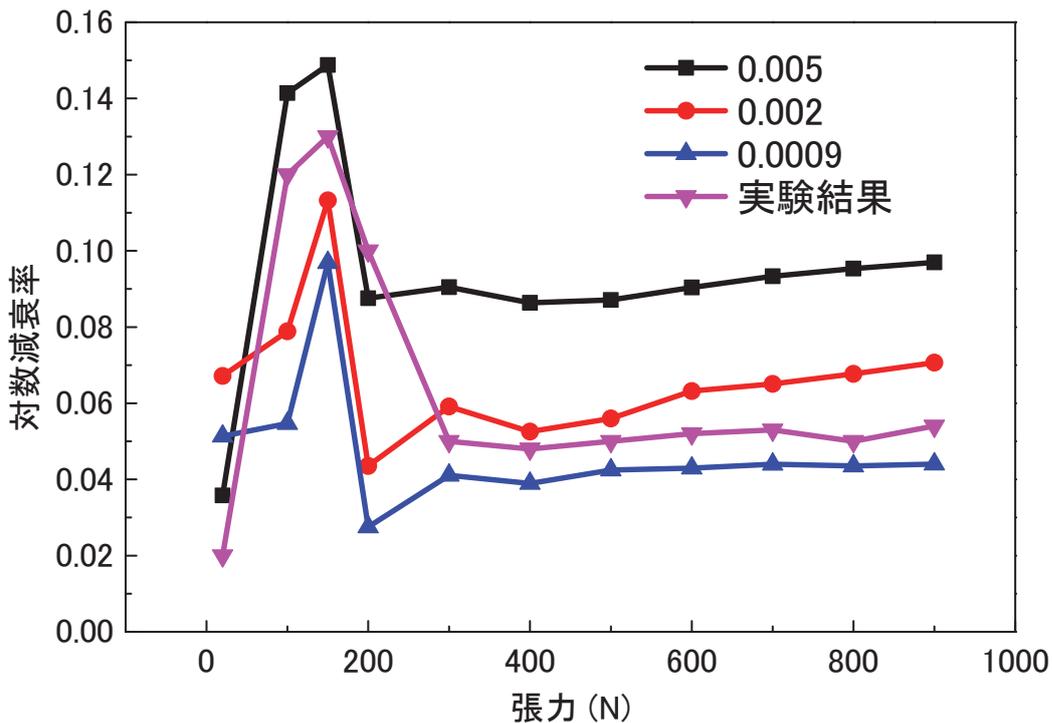
ワイヤーロープ張力の時刻歴波形

引張のみワイヤーロープに張力が働き、圧縮では張力が作用していないことが確認できる。



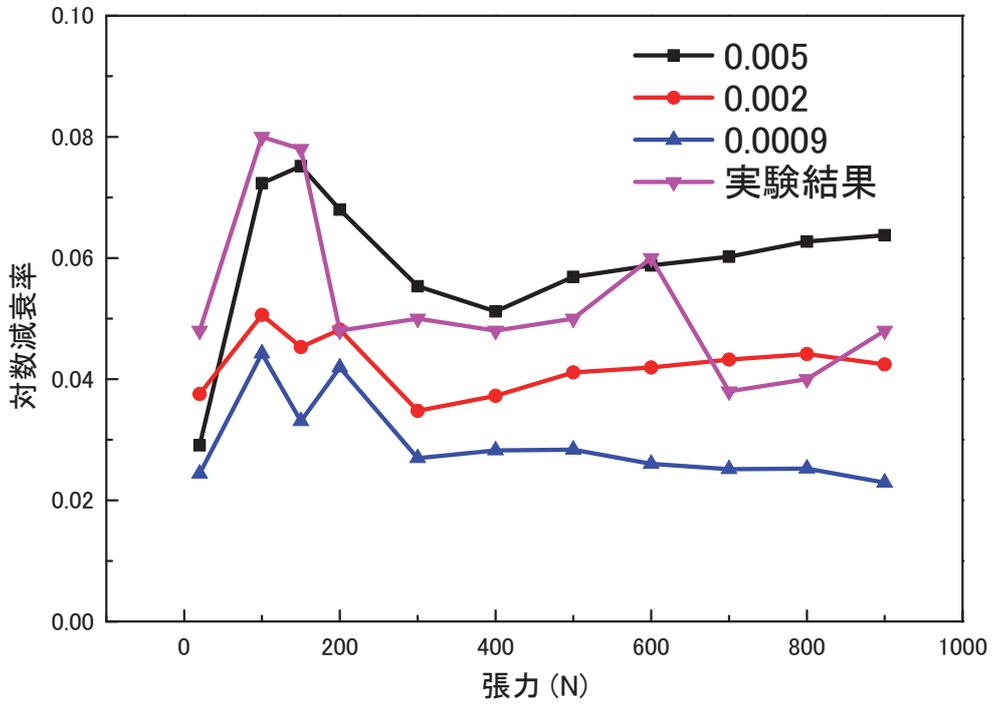
31

対数減衰率と張力の関係 (C位置)



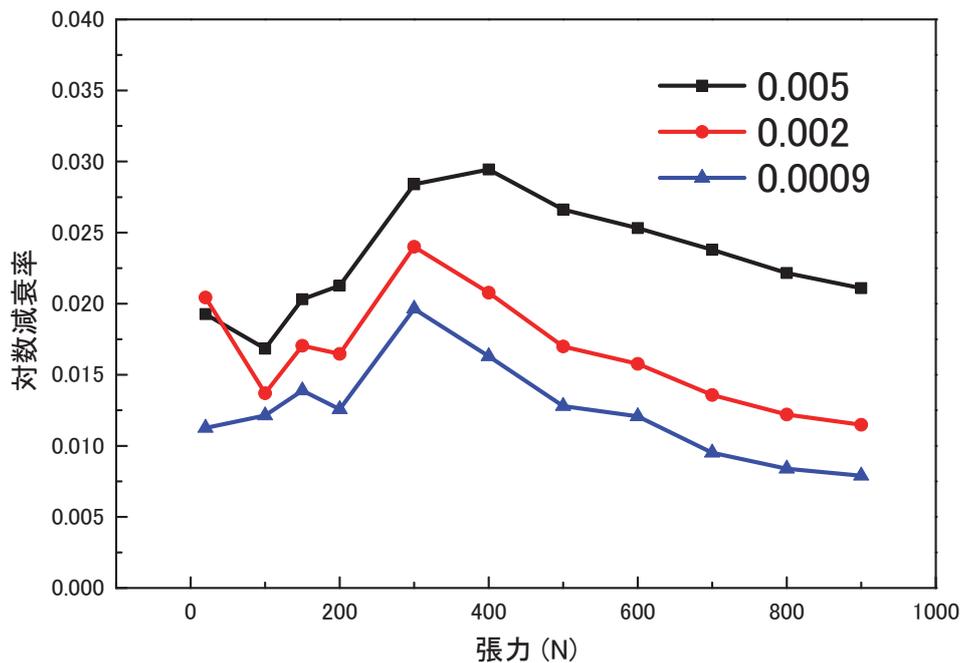
32

対数減衰率と張力の関係 (B位置)



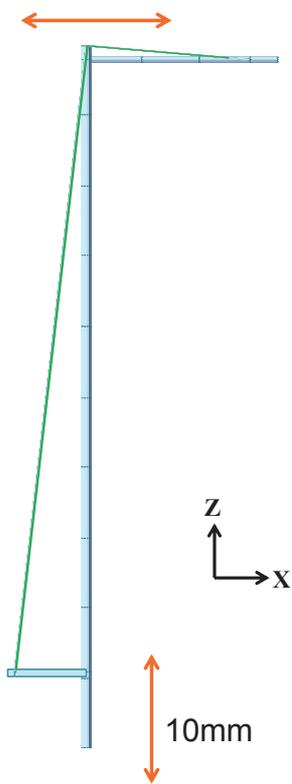
33

対数減衰率と張力の関係 (A位置)



34

強制加振解析



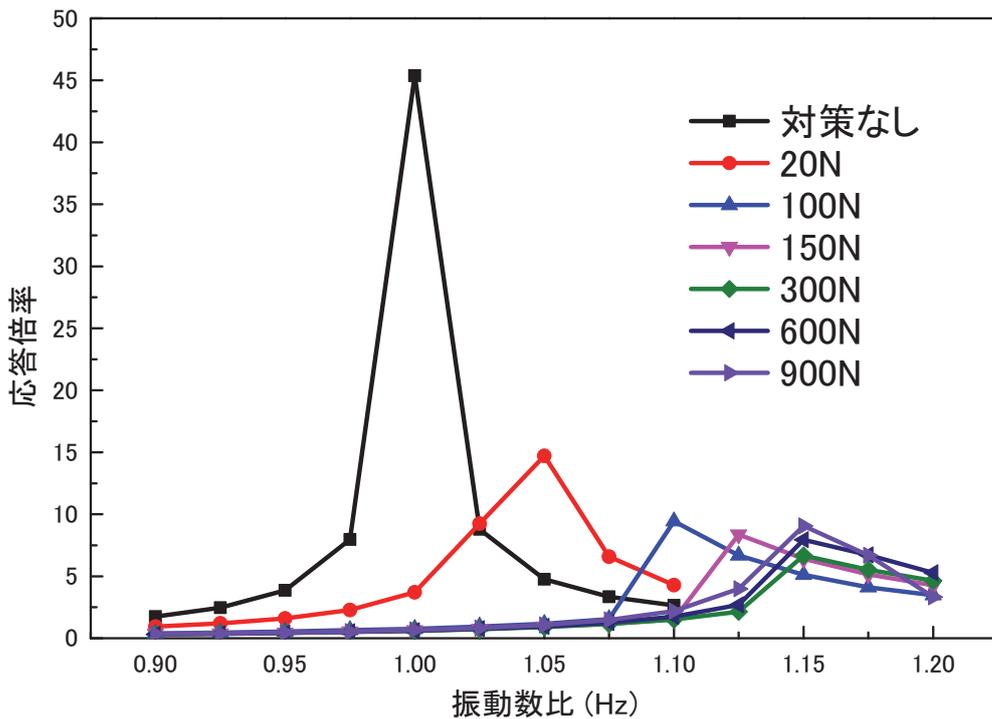
- 柱基部を上下方向に振動
固有振動数を±10%の範囲で変化
加振振幅10mm

- 減衰の設定
要素別レーリー減衰
柱:0.0009
ワイヤーロープ:0.002

- 応答倍率と振動数比との関係を算出

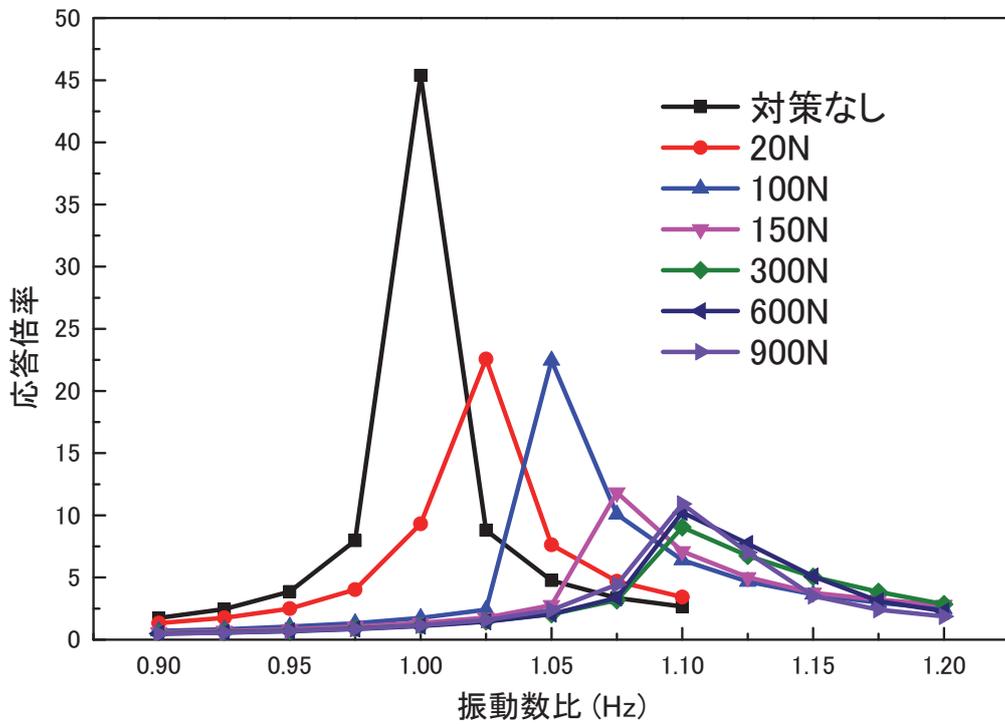
35

応答倍率と振動数比の関係 (C位置)



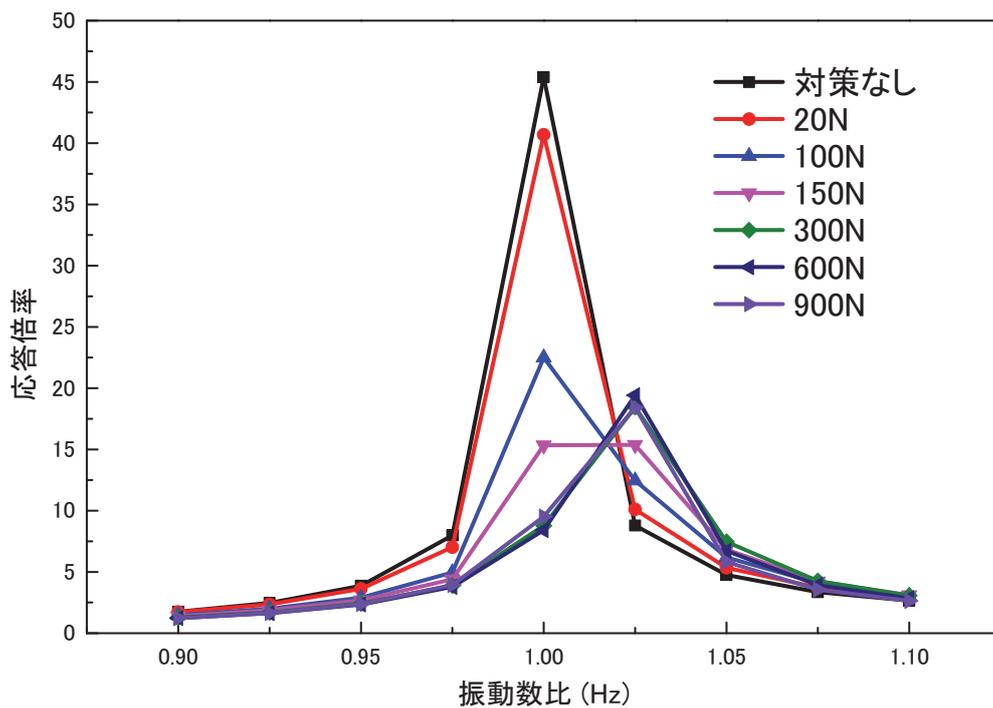
36

応答倍率と振動数比の関係 (B位置)



37

応答倍率と振動数比の関係 (A位置)



38

まとめ

- ① 静解析により、各部材は材料的に弾性であるにもかかわらず、構造物全体系の荷重-変位関係が非線形となることを確認（減衰効果の一因）
- ② ワイヤロープに導入する初期張力
⇒100～150N程度で対数減衰率は最大
- ③ 導入する張力を大きくすると振動抑制効果が落ちる傾向
⇒ワイヤロープの無張力状態になる領域が減少するため
- ④ ワイヤロープは柱から離れた方が振動抑制効果が高くなること
導入する初期張力には最適値が存在するものと考えられる。

<解析的に、実験結果を補追した一事例>

39

今後の課題

- ① 面外方向の振動に対しての設置効果の検討。
- ② 加振振幅を変えての解析。
- ③ 実構造物への適用。

40

ご清聴ありがとうございました

道路橋示方書改定 と信頼性設計法



長崎大学
大学院工学研究科
中村 聖三

Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Japan

信頼性設計法概論

CONTENTS

1. 構造設計と不確実性
2. 設計法の分類と変遷
3. 許容応力度法と部分係数設計法
4. 信頼性設計法

3

構造設計とは…

- ▶ 構造物が供用期間中に、所要の性能を損なう可能性をある許容値以下に抑える思考過程



より具体的には

- ▶ 様々な作用に対し、構造物が所要の性能を(経済的に)満足するように、構造形式、使用材料、部材の形状・寸法等を決定する思考過程

4

所要の性能とは・・・

一般に以下のようなものが考えられる。

- ▶ 安全性
 - 使用者や周辺の人々の生命や財産を脅かさない性能
- ▶ 使用性
 - 使用者や周辺の人々が快適に構造物を使用できる性能
- ▶ 復旧性
 - 機能低下に対する対応の難易度を表す性能
- ▶ 環境適合性
 - 周辺環境への影響度を表す性能
- ▶ 耐久性
 - 以上列挙した性能の経時変化に対する抵抗性を表す性能

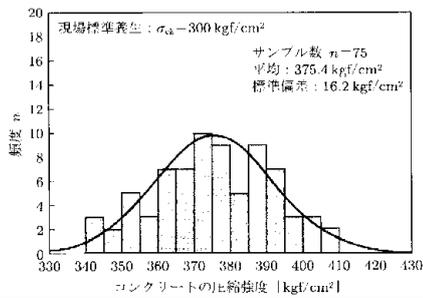
5

構造設計における不確実性①

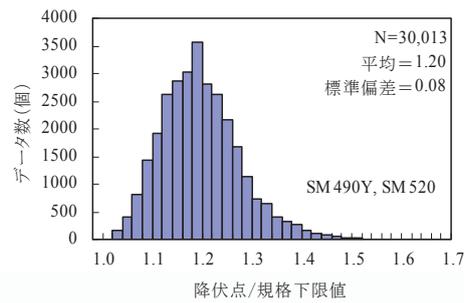
- ▶ 耐力(強度)評価に関連する不確実性
 - 材料強度のばらつき
 - ・ 鋼材の降伏点や引張強度, コンクリートの圧縮強度等
 - 製作精度のばらつき
 - ・ 部材や断面の寸法, 鉄筋の配置位置等
 - 強度解析上の不確定要因
 - ・ 材料の応力-ひずみ関係や構造物の単純化等

6

強度分布の例



コンクリートの圧縮強度



鋼材の降伏点

7

平均

▶ 算術平均

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{1}{N} (x_1 + x_2 + \dots + x_N)$$

▶ 幾何平均

$$\bar{x}_G = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N x_i} = \sqrt[N]{x_1 x_2 \dots x_N}$$

▶ 調和平均

$$\bar{x}_H = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{x_i}} = \frac{N}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_N}}$$

8

標準偏差，分散，変動係数

▶ 標準偏差

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

- 標準偏差の2乗が分散

▶ 不偏分散

$$u^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

▶ 変動係数

$$CV = \frac{s}{\bar{x}}$$

確率変数のばらつきを表す

9

製作精度の規定例（道路橋示方書）

▶ コンクリート部材に対する許容誤差の例

- 長さ寸法：Min(設計寸法の±1%，±30mm)
- 断面寸法：Min(設計寸法の±2%，±20mm)
- 鉄筋配置(有効高さ)：Min(設計寸法の±3%，±30mm)

▶ 鋼部材に対する許容誤差の例

- 部材長：±3mm(長さ10m以下)，±4mm(長さ10m超)
- 板の平坦度：腹板高/250(鋼げた・トラス等の部材の腹板)
- 圧縮材の曲り：部材長/1,000

10

構造設計における不確実性②

- ▶ 荷重(作用)評価に関連する不確実性
 - 設計値超過の可能性
 - ・ 想定を超える巨大地震, 過積載等
 - 設計荷重・実際の外力作用間のずれ
 - ・ 自動車・列車荷重のモデル化, 衝撃係数, 震度等
 - 解析の過程で用いられる種々の仮定や近似
 - ・ 構造解析における近似, 偏心や初期たわみの無視等
 - 荷重の組み合わせ
 - ・ 同時に作用する荷重の種類と大きさ, 許容応力度の割増係数等

11

構造設計における不確実性③

- ▶ その他の不確実性
 - 構造物の重要度
 - ・ 使用目的・頻度, 社会的要請度, 緊急時の必要性に基づき設定するが, 基準が曖昧
 - 部材や構造物の破壊過程
 - ・ 脆性的 or 延性(韌性)的
 - 人為的過誤
 - ・ 計算ミス, 入力ミス, 施工ミス等

12

不確実性の分類

- ▶ 設計変数の変動による不確実性
 - 部材寸法, 材料強度, 荷重等
 - データを数多く収集することで, 確率分布として記述可能
- ▶ 統計的不確実性
 - 設計変数の確率分布を推定する際の誤差
 - サンプルサイズや情報量の多寡に依存
- ▶ モデルの不確実性
 - 構造モデルの単純化, 境界条件の不明確さ等
- ▶ 効用評価の不確実性
 - 評価者や時代の違いによって生じる経済的・社会的影響評価の不確実性

13

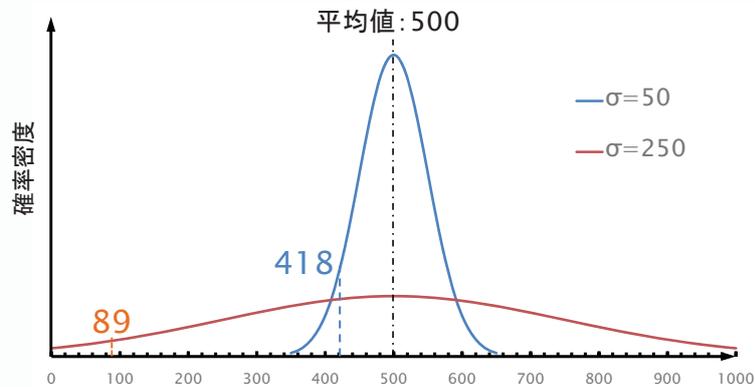
構造安全性の照査

- ▶ 強度(Resistance) > 作用(Action)であることが確認されればよい
 - どのような荷重を設定?
 - 強度, 作用をどのように算定?
 - 強度, 作用のばらつきをどのように考慮?

14

安全率の必要性

正規分布(σ は標準偏差)



その値を上回る確率が95%となる値は？

15

設計法の種類

- ▶ 強度理論による分類
 - 弾性設計法と塑性設計法
- ▶ 照査フォーマットによる分類
 - 許容応力度設計法 (ASD: Allowable Stress Design) と部分係数設計法 (Partial Factor Design). 後者には荷重・抵抗係数設計法 (LRFD: Load and Resistance Factor Design) も含まれる
- ▶ 確定論的手法と確率論的手法
- ▶ 仕様規定に基づく設計 (Regulation-based Design) と性能照査型設計 (Performance-based Design)

16

許容応力度法

▶ 安全性の照査フォーマット(応力表示)

$$\sigma \leq \sigma_a$$

ここに, σ : 部材の発生応力度

σ_a : 許容応力度 (allowable stress) (= σ_u / ν)

σ_u : 降伏応力 (引張) or 座屈応力 (圧縮)

ν : 安全率 (日本の道路橋の基準では約1.7)

▶ 問題点

- 安全率の値をどう決めるか.
- 荷重のばらつきをどう考慮するか.

17

許容応力度 (道路橋示方書)

許容軸方向引張応力度の例

鋼種	SS400 SM400 SMA400W		SM490		SM490Y SM520 SMA490W			SM570 SMA570W		
	≤ 40	40<t ≤100	≤ 40	40<t ≤100	≤ 40	40<t ≤75	75<t ≤100	≤ 40	40<t ≤75	75<t ≤100
鋼材の板厚 (mm)	≤ 40	40<t ≤100	≤ 40	40<t ≤100	≤ 40	40<t ≤75	75<t ≤100	≤ 40	40<t ≤75	75<t ≤100
基準降伏点 (N/mm ²)	235	215	315	295	355	335	325	450	430	420
許容軸方向 引張応力度 (N/mm ²)	140	125	185	175	210	195	190	255	245	240
安全率	1.68	1.72	1.70	1.69	1.69	1.72	1.71	1.76	1.76	1.75

18

部分係数設計法

- ▶ 荷重・抵抗係数設計法 (LRFD) も含まれる.
- ▶ 安全性の照査フォーマット (一般に断面力表示)

$$\eta \sum \gamma_i \cdot Q_i \leq \phi R_n \text{ (LRFDの例)}$$

ここに, Q_i : 荷重効果

γ_i : 荷重効果 Q_i に対する部分係数 (荷重係数)

R_n : 部材の公称抵抗

ϕ : 特定の限界状態に対する部分係数 (抵抗係数)

- ▶ 長所と短所
 - 荷重, 抵抗両者のばらつきを考慮できる.
 - 異なる限界状態に対して同程度の安全性レベルを確保できる.
 - 設計思想の変更が必要.
 - 確率統計に関する基礎的な知識, 十分な統計データ等が必要

19

各種基準の部分係数設計法への移行状況

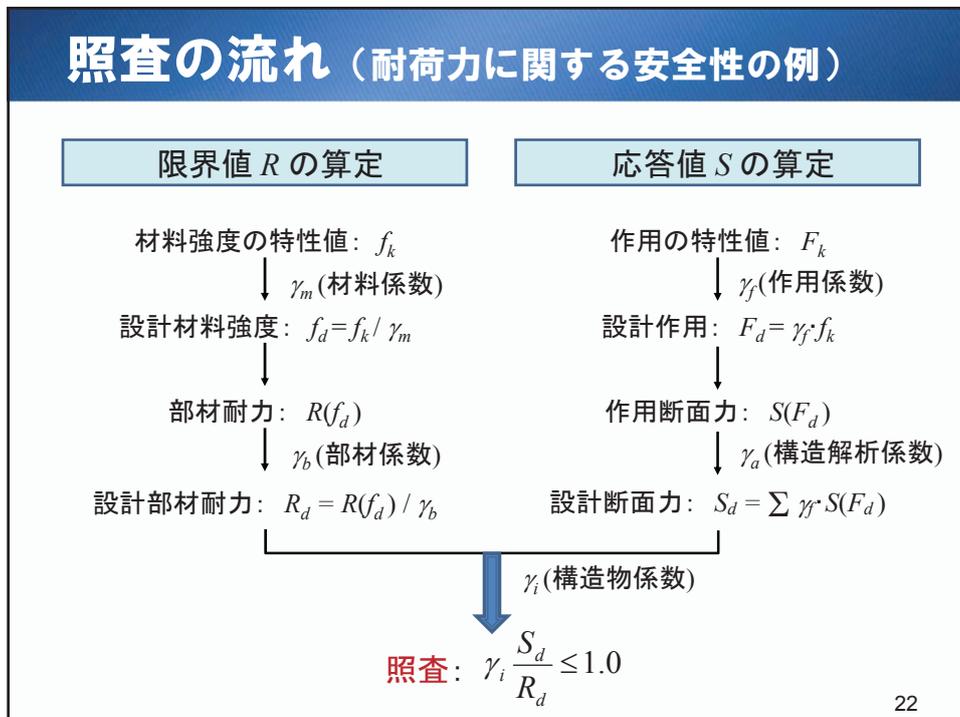
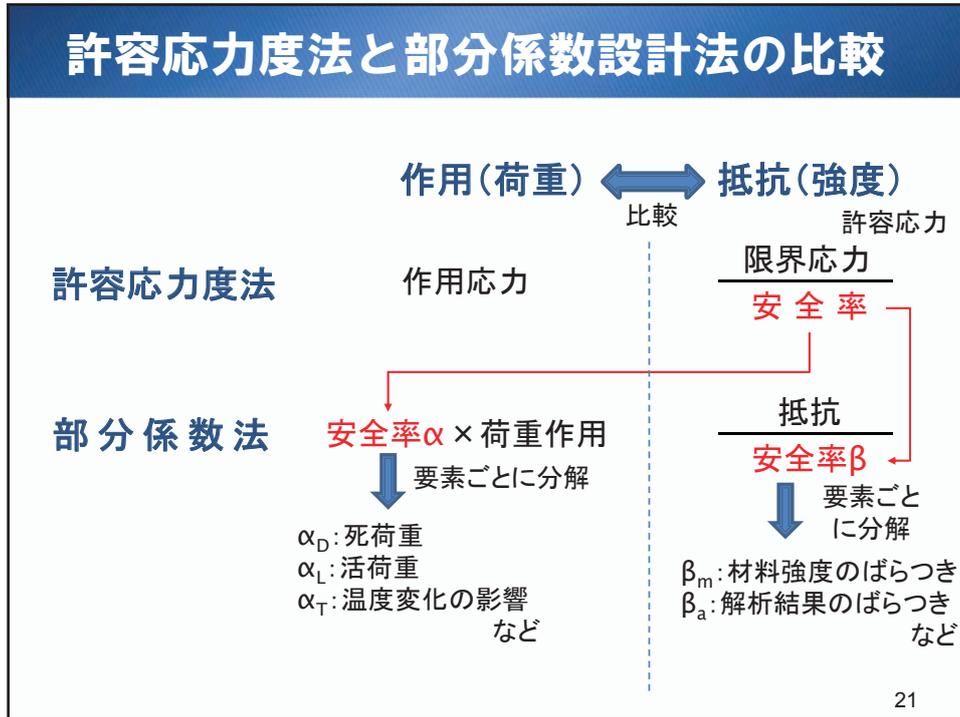
- ▶ 国内 (道路橋以外)

	建築	港湾	鉄道
基準名	日本建築学会 「建築物の限界 状態設計指針」	港湾の施設の 技術上の基準	鉄道構造物等 設計標準
導入年	2002	2007	1992

- ▶ 海外 (橋梁)

	ISO	アメリカ	ヨーロッパ
基準名	ISO 2394	AASHTO LRFD Bridge Design Specifications	Eurocode
導入年	1986	1994	2007

20



部分係数の標準的な値

要求性能	作用係数	構造解析係数	材料係数	部材係数	構造物係数
安全性	1.0~1.7	1.0~1.1	1.0~1.05	1.0~1.3	1.0~1.2
使用性	1.0	1.0	1.0~1.05	1.0	1.0
耐久性	1.0~1.1	1.0	1.0	1.0~1.1	1.0

土木学会鋼構造委員会
「鋼・合成構造標準示方書[設計編]」による

23

限界状態設計法

- ▶ 限界状態とは？
 - 構造物がある一定の性能を維持できる極限の状態
 - 「構造物が設定した各限界状態に至らないように設計することを目指す」のが限界状態設計法
- ▶ 許容応力度法とは異なる？
 - 「発生応力=許容応力」であることを一つの限界状態だと考えれば、限界状態設計法の一つということも可能
- ▶ 部分係数法と同じ意味？
 - 限界状態設計法は設計理念、部分係数法は照査フォーマットに基づく名称

24

性能照査型設計法

- ▶ 構造物の**目的**(objective)とそれに適合する**機能**(function)を明示し, 機能を備えるために必要とされる**性能**(performance)を規定し, 規定された性能を構造物の**設計供用期間**(design working life)中確保することにより機能を満足させる設計方法



仕様規定に基づく設計(Regulation-based Design)

25

性能照査型設計法の長所

- ▶ 新材料や新工法, 新構造解析手法の導入など設計者の創意工夫を活かすことができる
- ▶ 工期短縮・建設コスト縮減が期待できる
- ▶ 構造物が保有している性能を 設計者, 発注者, 利用者が知ることができる
- ▶ 発注者は, 構造物のライフサイクルを通してどのような性能を確保するのが最適かを, LCC等の観点から選択することができる

26

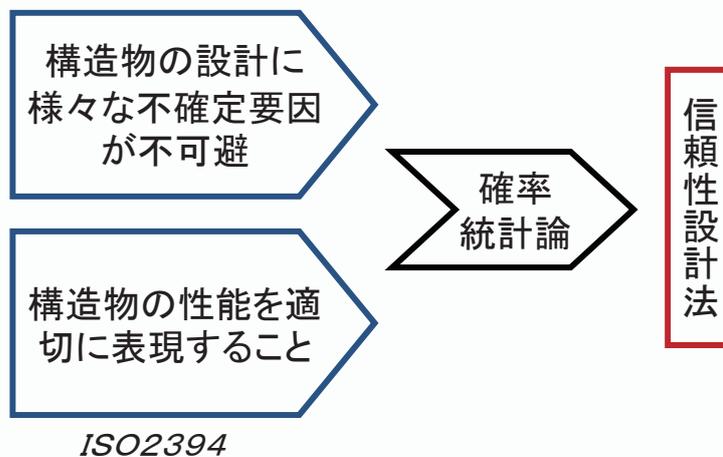
性能設計の課題

- ▶ 要求性能水準 (e.g. 安全係数) の算定方法
- ▶ 設計された構造物が保有する性能の検証方法
- ▶ LCCの算定方法. 特にリスク費用の算定.
- ▶ 検証・認証を行う(第三者)機関
- ▶ 性能設計を受け入れることのできる社会体制(入札・契約制度, リスク管理・情報公開制度, 保険制度等)の整備に関する社会的なコンセンサス

27

信頼性設計法とその必要性

- ▶ 信頼性設計法とは...
 - 部材の挙動や応答がある限界状態に達する可能性(確率)をある許容値以下に抑える設計法



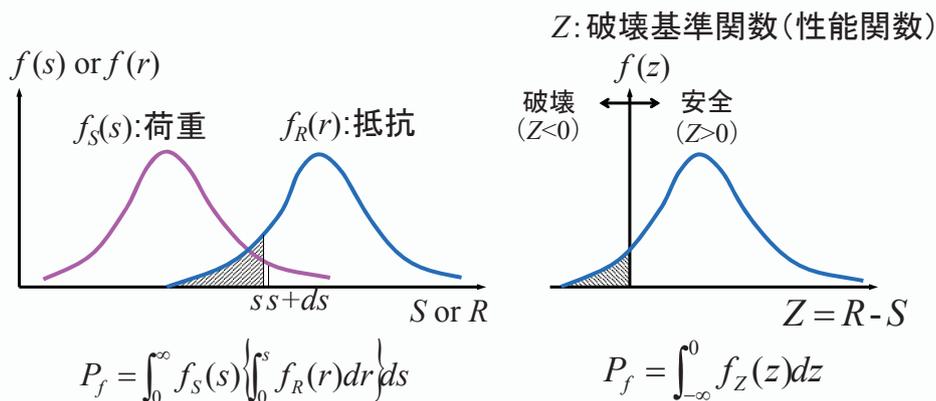
28

ISO2394:1998 (General principle on reliability for structures)

- 信頼性とは設計供用期間を通じて構造物の性能に関して考慮されるもの
 - 各国の構造設計基準の基礎となる規格
- | | |
|----------------|----------------------|
| 1. 範囲 | 付録A 品質管理と品質保証 |
| 2. 定義 | 付録B 永久作用, 変動作用, 偶発作用 |
| 3. 記号 | 付録C 疲労のモデル |
| 4. 要求条件および概念 | 付録D 経験モデルに基づく方法 |
| 5. 限界状態設計の原則 | 付録E 信頼性に基づく設計の原則 |
| 6. 基本変数 | 付録F 作用の組合せと作用値の評価 |
| 7. 解析モデル | 付録G 荷重組合せの例 |
| 8. 確率に基づく設計の原則 | 付録H 索引 |
| 9. 部分係数による設計法 | |
| 10. 既存構造物の評価 | |

29

信頼性設計法レベルIII



照査フォーマット	説明
$P_f \leq P_{fT}$	確率論的にもっとも厳密な安全性照査法. 設計変数の確率分布が既知であることが前提.

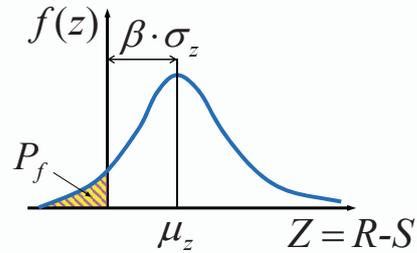
30

信頼性設計法レベルⅡ

信頼性指標 $\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$

信頼性指標と破壊確率の関係
(正規分布)

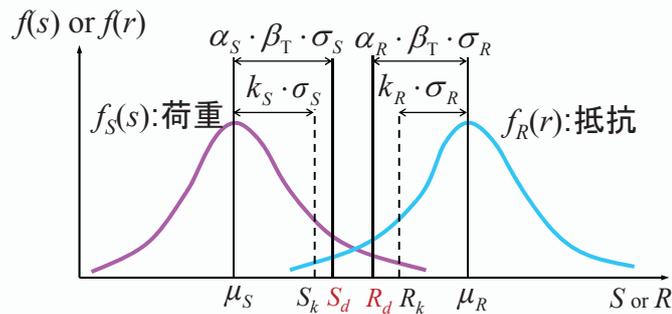
P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
β	1.3	2.3	3.1	3.7	4.2



照査フォーマット	説明
$\beta \leq \beta_T$	確率論的な取り扱いに1次近似を行う。信頼性は破壊確率に対応する信頼性指標 β (平均値と標準偏差のみで表わされる)により照査。

31

信頼性設計法レベルⅠ



$$\gamma_i = \frac{\mu_i \pm \alpha_i \beta_T \sigma_i}{\mu_i \pm k_i \sigma_i} = \frac{1 \pm \alpha_i \beta_T V_i}{1 \pm k_i V_i}, \quad V_i = \frac{\sigma_i}{m_i}$$

照査フォーマット	説明
$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} = \gamma_i \cdot \frac{\gamma_F \cdot S_k}{R_k / \gamma_m} \leq 1$	部分係数設計法。 確率との対応がレベルⅡ、Ⅲに比べて不明確。

32

道路橋示方書改定

CONTENTS

1. 道路橋示方書の位置づけ
2. 近年の改定経緯
3. 今回の改定内容
 - ① 主な改定項目とその効果
 - ② 部分係数設計法と限界状態設計法の導入

道路橋示方書の位置づけ

- ▶ 道路構造令(政令)
 - 橋・高架の道路等に関して, 構造及び設計自動車荷重を規定(必要事項は省令で定める旨, 規定)

- ▶ 道路構造令施工規則(省令)
 - 構造上の必要事項を明示

- ▶ 橋・高架の道路等の技術基準(局長通知)
 - いわゆる道路橋示方書. 省令に準じた基準として運用

35

近年の改定経緯

- H6
 - ・車両大型化対応(設計自動車荷重25トン)
 - ・大型車の交通状況に応じた2種類の活荷重を導入(A活荷重、B活荷重)

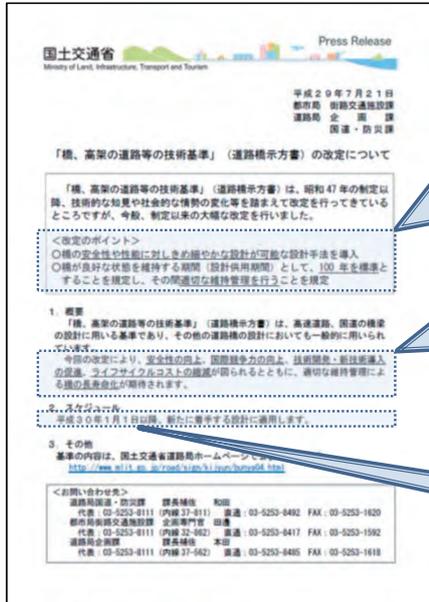
- H8
 - ・兵庫県南部地震を契機とする耐震設計の強化

- H13
 - ・性能規定化型への転換
 - ・疲労、塩害に対する耐久性能の考え方を導入

- H24
 - ・東北地方太平洋沖地震を契機とする設計地震動の見直し
 - ・構造設計上の維持管理への配慮事項を規定(具体的な方法の規定なし)

36

今回の改定



＜改定のポイント＞

- 橋の安全性や性能に対しきめ細やかな設計が可能な設計手法を導入
- 橋が良好な状態を維持する期間（設計供用期間）として、100年を標準とすることを規定し、その間適切な維持管理を行うことを規定

今回の改定により、安全性の向上、国際競争力の向上、技術開発・新技術導入の促進、ライフサイクルコストの削減が図られるとともに、適切な維持管理による橋の長寿命化が期待されます。

平成30年1月1日以降、新たに着手する設計に適用します。

37

今回の主な改定内容

- ① 多様な構造や新材料に対応する設計手法の導入
 - 橋の安全性や性能に対しきめ細やかな設計が可能な設計手法を導入
⇒ 「部分係数設計法」及び「限界状態設計法」を導入
- ② 長寿命化を合理的に実現するための規定の充実
 - 設計供用期間100年を標準とし、点検頻度や手法、補修や部材交換方法等、維持管理の方法を設計時点で考慮
 - 耐久性確保の具体の方法を規定
- ③ その他の改定
 - 熊本地震を踏まえた対応等

38

改定による効果

- ① 全ての橋について100年以上の長寿命化を実現
 - 現在の設計では、設計供用期間が規定されていないが、適切な維持管理により80年以上使用されている橋がある一方で、50年程度で使用できなくなる橋も存在。
 - 100年を基準化することで、全ての橋について100年以上の長寿命化の実現が期待される。
- ② ライフサイクルコストの優れた橋の実現
 - 100年間の点検や補修・更新などについての具体的な検討を促すこととなる。
- ③ 新技術の導入を促進
 - より適切な設計が可能となる新たな設計法を用いることで、新技術の導入促進を図る。
- ④ 日本企業の海外展開への支援
 - ISOに準拠した基準となり、日本企業がこの基準を用いて得たノウハウが、海外展開への武器となる。

39

照査フォーマット

$$\sum S_i(\gamma_{qi}\gamma_{pi}P_i) \leq \xi_1\xi_2\Phi_R R(f_c, \Delta_c)$$

P_i : 作用の特性値,

S_i : 作用効果(作用の組合せに対する橋の状態),

R : 部材等の抵抗に係る特性値(材料の特性値 f_c や寸法の特性値 Δ_c を用いて算出される値),

f_c : 材料の特性値, Δ_c : 寸法の特性値,

γ_{pi} : 荷重組合せ係数, γ_{qi} : 荷重係数,

ξ_1 : 調査・解析係数, ξ_2 : 部材・構造係数

Φ_R : 抵抗係数

40

各部分係数の意味

- ▶ γ_{pi} : 荷重組合せ係数
 - 設計供用期間中の荷重の同時載荷状況を考慮するための係数
- ▶ γ_{qi} : 荷重係数
 - 作用の特性値が設計供用期間中に橋に与える影響の極値を考慮するための係数
- ▶ ξ_1 : 調査・解析係数

0.90 が標準. 十分な検討を行ったときには0.95 を上回らない範囲で設定可

 - 橋の構造をモデル化し, 作用効果を算出する過程に含まれる不確実性を考慮して抵抗係数 ϕ_R を補正するための係数
- ▶ ξ_2 : 部材・構造係数
 - 部材等の非弾性域における強度増加又は減少の特性の違いに応じて抵抗係数 ϕ_R を補正するための係数
- ▶ ϕ_R : 抵抗係数
 - 抵抗値 R の評価に直接関係する確率統計的な信頼性の程度を考慮するための係数

41

荷重組合せ係数と荷重係数の値

作用の組合せ			荷重組合せ係数 γ_p と荷重係数 γ_q の値																	
			設計状況の区分		D		L		PS, CR, SH		TH		WS		WL		EQ		CO	
					γ_p	γ_q														
1	D	永続作用 支配状況	1.00	1.05	-	-	1.00	1.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2	D+L	変動作用 支配状況	1.00	1.05	1.00	1.25	1.00	1.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3	D+TH		1.00	1.05	-	-	1.00	1.05	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-		
4	D+TH+WS		1.00	1.05	-	-	1.00	1.05	0.75	1.00	0.75	1.25	-	-	-	-	-	-		
5	D+L+TH		1.00	1.05	0.95	1.25	1.00	1.05	0.75	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-		
6	D+L+WS+ WL		1.00	1.05	0.95	1.25	1.00	1.05	-	-	0.50	1.25	0.50	1.25	-	-	-	-		
7	D+L+TH+ WS+WL		1.00	1.05	0.95	1.25	1.00	1.05	0.50	1.00	0.50	1.25	0.50	1.25	-	-	-	-		
8	D+WS		1.00	1.05	-	-	1.00	1.05	-	-	1.00	1.25	-	-	-	-	-	-		
9	D+TH+EQ		1.00	1.05	-	-	1.00	1.05	0.50	1.00	-	-	-	-	0.50	1.00	-	-		
10	D+EQ		1.00	1.05	-	-	1.00	1.05	-	-	-	-	-	-	1.00	1.00	-	-		
11	D+EQ		偶発作用 支配状況	1.00	1.05	-	-	1.00	1.05	-	-	-	-	-	-	1.00	1.00	-	-	
12	D+CO		1.00	1.05	-	-	1.00	1.05	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	1.00		

42

抵抗側の部分係数の値

鋼部材の限界状態3について(SBHSを除く)

部 材	ξ_1	ξ_2	Φ_R
軸方向圧縮力を受ける両縁支持板	0.90	1.00*	0.85
軸方向圧縮力を受ける自由突出板	0.90	1.00*	0.85
軸方向圧縮力を受ける補剛板	0.90	1.00*	0.85
軸方向圧縮力を受ける部材	0.90	1.00*	0.85
軸方向引張力を受ける部材	0.90	1.00*	0.85
曲げモーメントを受ける部材	0.90	1.00*	0.85
せん断力を受ける部材	0.90	1.00*	0.85

* SBHS500, SBHS500Wについては, 多くの場合0.95

43

軸方向引張力を受ける鋼部材の場合

▶ (D+L)に対する降伏(限界状態1)の照査

$$\sum S_i(\gamma_{qi}\gamma_{pi}P_i) \leq \xi_1\xi_2\Phi_R R(f_c, \Delta_c)$$

$$(\gamma_{qD}\gamma_{pD}\sigma_D + \gamma_{qL}\gamma_{pL}\sigma_L) \leq \xi_1\Phi_{YT}\sigma_{yk}$$

$$\gamma_{qD} = 1.05, \gamma_{pD} = 1.00,$$

$$\gamma_{qL} = 1.25, \gamma_{pL} = 1.00$$

$$\xi_1 = 0.9, \Phi_{YT} = 0.85$$

$$1.05\sigma_D + 1.25\sigma_L \leq 0.765\sigma_{yk}$$

たとえば, 死荷重応力:活荷重応力=1:1の場合,

$$(1.05 \times 0.5 + 1.25 \times 0.5)\sigma = 1.15\sigma \leq 0.765\sigma_{yk}$$

$$\sigma \leq \frac{0.765\sigma_{yk}}{1.15} = \frac{\sigma_{yk}}{1.503}$$

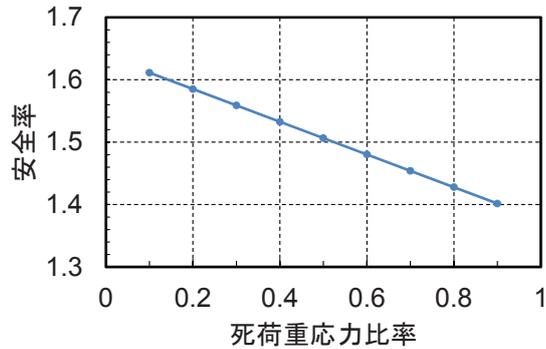


安全率1.5
程度に相当

44

軸方向引張力を受ける鋼部材の場合

▶ 死荷重応力比率による安全率の変化



死荷重応力比率の増加に伴い、安全率は線形で低下



死荷重応力の比率が高い場合、
これまでより経済的な設計

45

限界状態設計法の導入①

- ▶ 大地震や様々な荷重に対して橋の限界状態(1~3)を定義
 - ⇒ 複数の限界状態に対して安全性や機能を確保
 - ⇒ 橋に求める共通的な性能が明確化
 - ⇒ 多様な構造や新材料の導入が可能

限界状態	説明
1	橋としての荷重を支持する能力が損なわれていない限界の状態
2	部分的に荷重を支持する能力の低下が生じているが、橋としての荷重を支持する能力に及ぼす影響は限定的であり、荷重を支持する能力があらかじめ想定する範囲にある限界の状態
3	これを超えると構造安全性が失われる限界の状態

46

限界状態設計法の導入②

▶ 荷重と橋の限界状態の関係

荷重	安全性を確保すべき限界状態
通常作用する荷重 (自重, 自動車荷重, 温度や風の影 響など) ⇒ 永続作用や変動作用支配状況	橋の限界状態1 かつ 橋の限界状態3
滅多に作用しない荷重(大地震) ⇒ 偶発作用支配状況	橋の限界状態2 かつ 橋の限界状態3

47



2017 第7回MIDAS 建設分野 技術講座 II

鋼橋設計の構造解析 に関する2、3の話題

2017年11月21日
グランドパークカンファレンス

首都大学東京 客員教授
野上邦栄

1

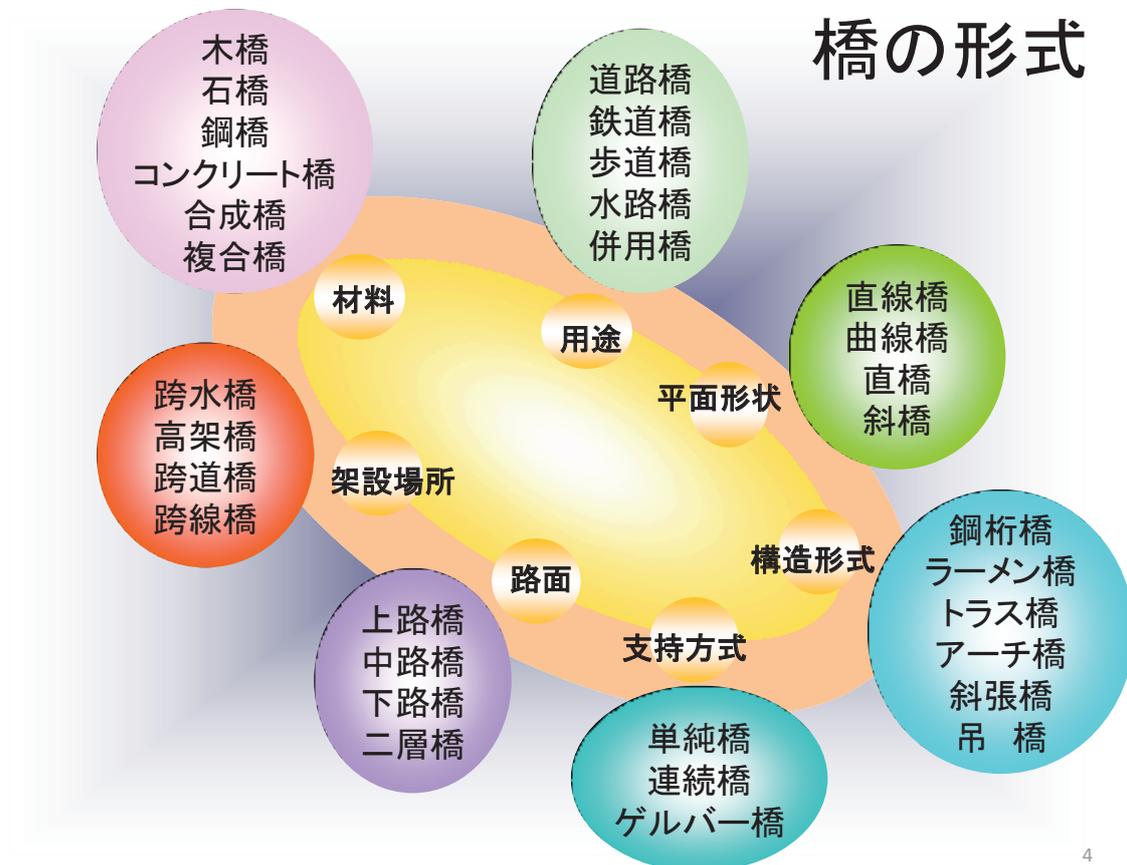
内容

1. 鋼橋設計と構造解析
2. 座屈・耐荷力に関する解析手法
3. 吊形式橋梁の耐荷力評価とMIDASソフトの適用
4. 鋼製橋脚隅角部のピーク応力算出に関する解析モデル
5. 既設構造物および部材の構造解析における配慮事項
6. 設計法の高度化への展望

2

鋼橋設計と構造解析

3



4

構造形式による分類



桁橋



アーチ橋



ラーメン橋



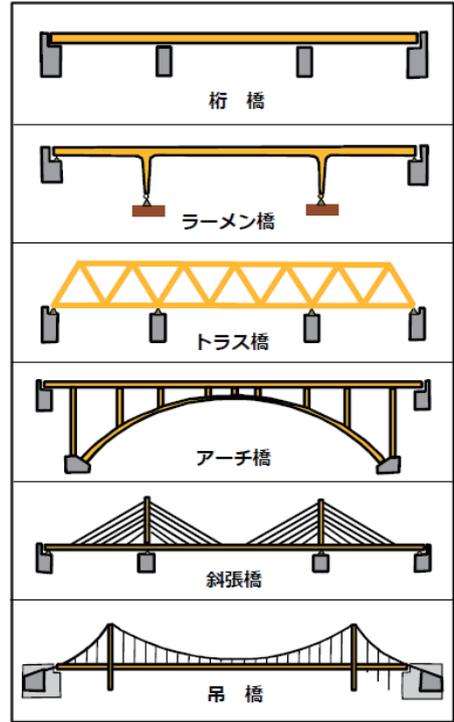
斜張橋



トラス橋



吊橋



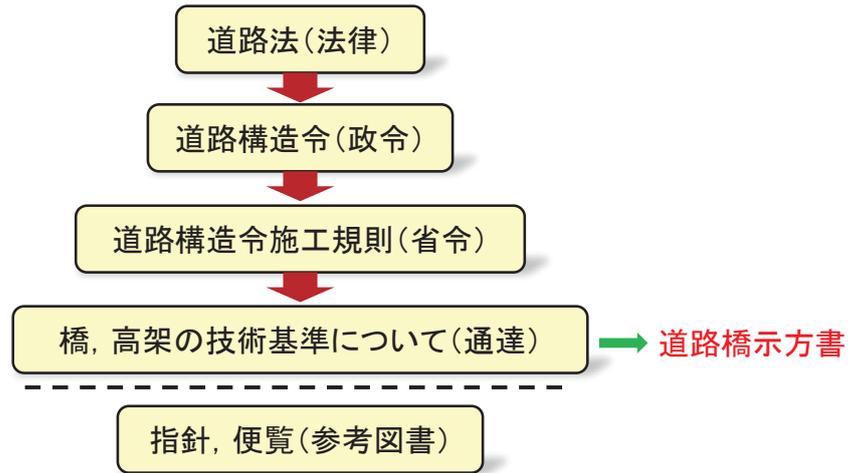
部材の種類

作用外力		部 材	用いられる構造物		備 考
軸方向力	引張力	引張材	ケーブル構造	トラス構造	内圧を受ける円筒殻なども主として引張力が作用する。
	圧縮力	圧縮材(柱)	アーチ構造		
曲げモーメント		曲げ材(はり)	桁構造など		
		板	床版(スラブ)など		板は面外からの荷重を受ける場合
曲げモーメントと軸方向力		はり-柱	ラーメン構造(橋脚), アーチ構造, 塔など		
曲げモーメントとねじりモーメント		ねじり部材	曲線桁構造, 格子桁構造		

部材単位設計法

設計規準

- 道路橋、鉄道橋、港湾構造物、電力構造物等
- 設計規準の準備
 - 共通した社会の中で、同じ目的を有する同種の構造物が、設計技術者の裁量によって安全性、使用性などの性能水準に不均衡が生じるのを避けるため



7

道路橋示方書の変遷

1886年 国県道の築造標準(内務省令)

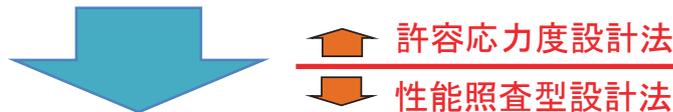
1972年 道路橋示方書 I 共通編、II 鋼橋編、IIIコンクリート橋編、IV 下部構造編、V 耐震設計編

2001年 道路橋示方書

- 疲労、塩害に対する耐久性能の考え方の導入
- 性能規定型への転換

2012年 道路橋示方書

- 設計地震動の見直し
- 疲労耐久性の向上、設計の合理化、施工品質の確保



2017年 道路橋示方書改定

- 性能照査型設計法(限界状態設計法および部分係数設計法)の導入
- 設計供用期間100年を標準とし、耐久性確保の具体の方法を規定
- 熊本地震を踏まえた対応



8

H29道示改訂における構造解析

I 共通編

1.8.2 設計の手法

設計は、理論的な妥当性を有する手法、実験などによる検証がなされた手法等適切な知見に基づいて行われなければならない。

【解説】

具体的な方法の規定は、理論的な妥当性や実験等による検証、または過去の経験や実験に基づき、この示方書に規定される要求事項を満足すると見なされているものから成っており、かつこれらの方法は、示方書が求める所用の性能が具体化されたものとして位置づけられている。

性能規定型の規定方法をとっているため、要求する事項を満たすと考えてよい方法として、規定されている方法に従うことで所用の性能を満たすとする設計も可能である一方、要求する事項を満たすと考えて良い方法として規定されている方法以外の方法による設計も採用できる。



採用の判断は、当該橋の条件に応じて、要求する事項を満足すると見なし、よい方法として規定されている方法に従う場合に確保される性能と同等以上の性能を実現できることを証明しなければならない

9

H29道示改訂における構造解析

II 鋼橋・鋼部材編

3.7 構造解析 【解説】

1. 構造形式や照査の目的に応じて、有限要素法、有限変位解析、動的解析などの高度な解析手法を適宜選択の上使用することができる
2. 応力の制限値、断面強度や抵抗係数などは、部材実験結果や観察結果の解釈を行う際には、**はり理論や版理論等の計算モデルにより算出される断面力及び公称応力と計測強度との比較で整理されていること**から、設計計算においては、それぞれの条件に適合する値を求めることを基本
3. **有限要素法等を適用する場合には、目的に応じて応答値の算出位置や制限値などを適切に設定する必要がある**



示方書と異なる照査手法による許容値や制限値を用いる場合、適切な安全余裕を確保する必要がある

10

鋼橋設計における 構造解析

- 平面格子解析
- 線形解析
- 立体格子解析

- 影響線載荷
- 断面力および応力
- 必要により変位・ひずみ

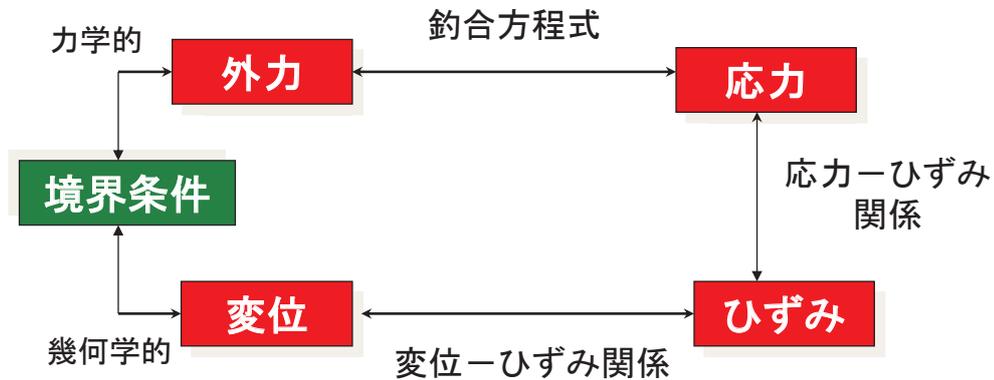
格子骨組モデルの解析結果で設計できる項目



鋼鈹桁橋の設計フロー

座屈・耐荷力に関する 解析手法

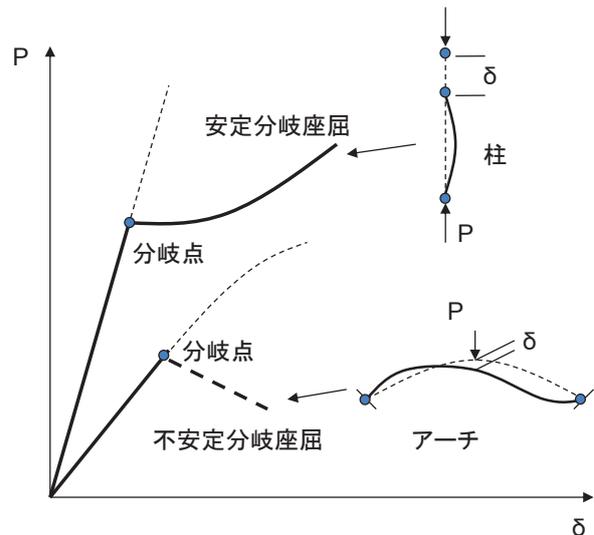
解析における力学的基本事項



解析レベル	釣合式	応力-ひずみ	変位-ひずみ	釣合状態	その他
微小変位解析	線形	線形	線形	変形前	
弾性有限変位解析	非線形	線形	非線形	変形後	幾何学的非線形
弾塑性解析	線形	非線形	線形	変形後	材料非線形
弾塑性有限変位解析	非線形	非線形	非線形	変形後	複合非線形

構造物の不安定現象

- **安定な**釣り合い経路
- **不安定な**釣り合い経路
- 分岐点は、初期変形様式から別な変形様式に分岐する点 (分岐荷重、あるいは座屈荷重)
- 分岐座屈は、初期変形様式から別な変形様式に急激に移行する現象 (単に座屈とも呼ぶ)
- 座屈は、**分岐**、**屈服**および**飛移り**などの弾性挙動を総称する場合が多い。
- 分岐点、極限点は、数学的には**特異点**の挙動



完全系・不完全系

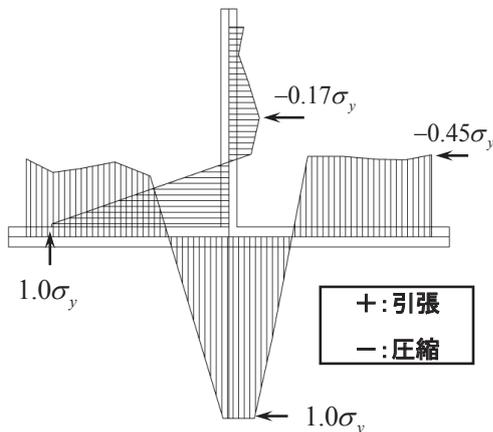
- 分岐は、理想化された系の数理的な概念
 - 実際の系は、荷重の偏心や部材の曲がりなどの完全状態からの狂い量である**初期不整**を持っているために、分岐は発生しない。
 - 初期不整がない系を「**完全系**」、初期不整を持つ系を「**不完全系**」と呼ぶ
- 理想化されたモデルである完全系の分岐挙動と実現象に対応する不完全系の非分岐挙動をともに理解することが重要

15

初期不整

初期たわみ

T断面の**残留応力**分布例



項目	初期たわみ	備考
柱	$W_0=L/1000$	
桁	$W_0=L/500 \sim L/2000$ (RC床版) $W_0=L/500$ (鋼床版)	
自由突出板	$W_0=b/100$	
圧縮板	$W_0=b/150$	
圧縮補剛板	$W_0=b/1000$ (全体) $W_0=b/150$ (鋼床版)	
腹板	$\delta=H_0/250$	

新潟県中越地震による座屈現象



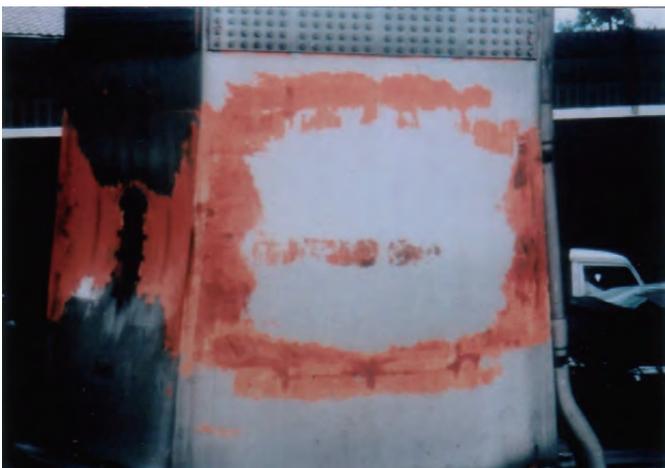
タンクの局部座屈



下横構の座屈変形

17

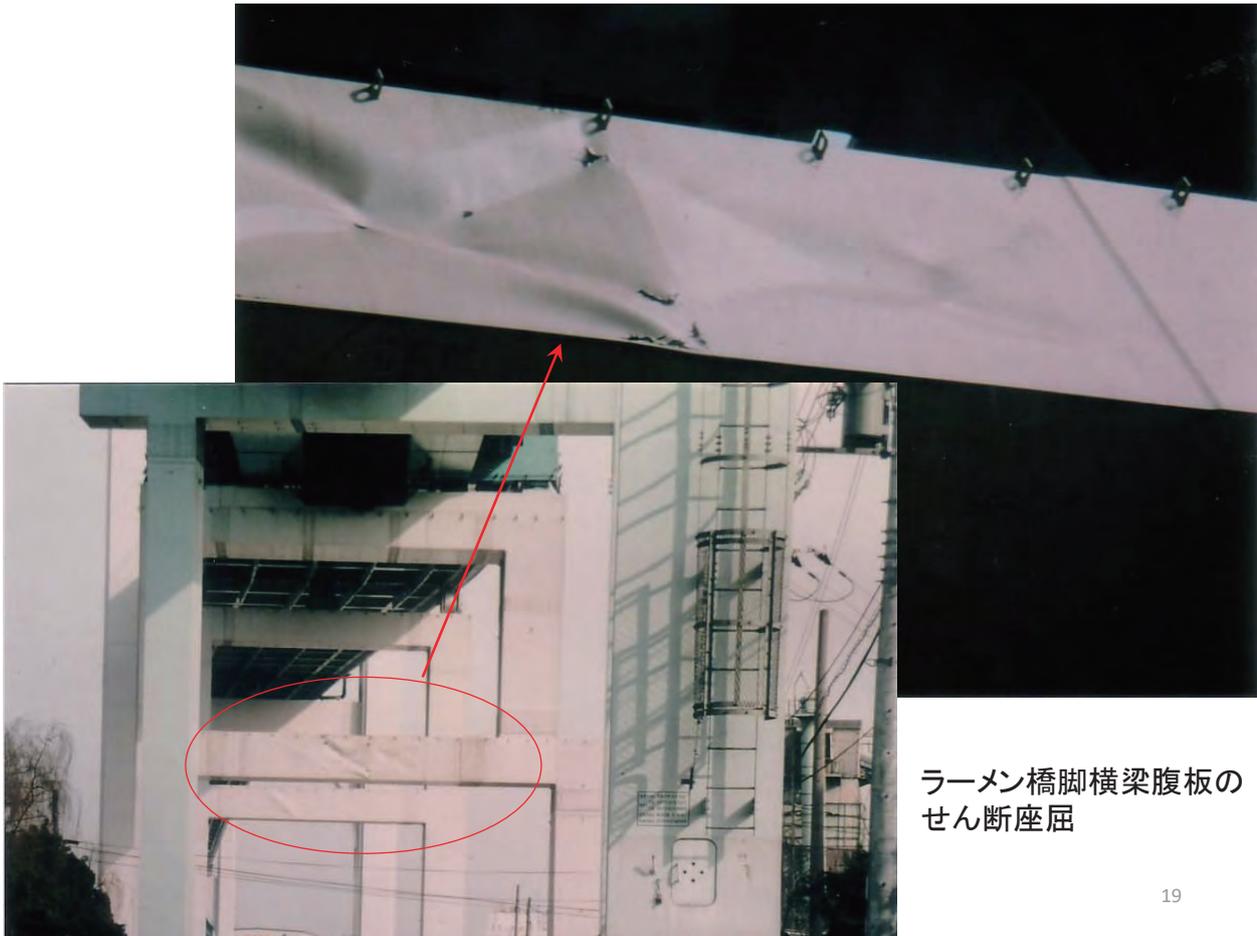
兵庫県南部地震による座屈現象



補剛板の補剛材間の板パネルの全体座屈



補剛板の補剛材間の
板パネルの局部座屈



19

座屈解析

- 座屈・分岐問題は、ある非線形釣合方程式の解を求める問題の一種
- 構造物の静的解析における不安定挙動は、分岐点挙動と極限点挙動(屈服)に分けられる
- 分岐挙動は、完全系において表れる …… **座屈解析**
- 座屈解析は、**線形固有値解析**により分岐荷重や極限点荷重を求める
- 線形固有値解析は、変形が十分に小さいことを前提に座屈前の変形を無視

20

釣合方程式

- 全ポテンシャル

$\Pi = (\text{内部エネルギー}) + (\text{外力ポテンシャルエネルギー})$

$$\Pi = \Pi(d, f)$$

$$d = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T, \quad f = (f_1, f_2, \dots, f_m)^T$$

- 非線形釣合方程式

全ポテンシャルエネルギーの停留原理

$$\Phi_i = \frac{\partial \Pi(d, f)}{\partial d_i} = 0$$

$$\Phi(d, f) = K(d)d + f = 0$$

21

特異点

- 釣合方程式 $\Phi(d, f) = 0$ を満たす解 (d, f) と、その近傍の別の解 $(d + \delta d, f + \delta f)$ を考える

$$\Phi(d + \delta d, f + \delta f) = \Phi(d, f) + \frac{\partial \Phi}{\partial d} \delta d + \frac{\partial \Phi}{\partial f} \delta f + \text{高次項} = 0$$

$$J \delta d = -\frac{\partial \Phi}{\partial f} \delta f - \text{高次項}$$

$$J = \frac{\partial \Phi}{\partial d}$$

Jacobi行列
接線剛性行列

- 特異点 (d_c, f_c) は、 $\Phi(d, f) = 0$ と特異性条件式を満足する

$$\det J(d_c, f_c) = 0$$

22

特異性条件式(弾性座屈解析)

- 特異点における荷重が、座屈荷重 f_c である
- 工学上重要な基本径路上の最初の特異点の荷重を**最小座屈荷重**と呼ぶ
- 一般化固有値問題
AとBは、対称行列で正定値のとき、次式を満足する f と d を求める問題

$$J(f)d = (A + fB)d = 0$$

$$|K_E + f K_G(N)| = 0$$

K_E : 微小変位理論による剛性行列

K_G : 幾何剛性行列

N : 軸力

$f = fN$

23

線形固有値解析手法

- 小規模マトリックス
 - べき乗法
 - 逆反復法
- 中規模マトリックス
 - スツルム法
 - 二分法(バイセクション法)
- 大規模マトリックス
 - サブスペース法

24

座屈解析のモデル化と設計上の適用

● 骨組構造・板構造の解析モデル

- 基本は、一般構造の応力解析と同様にモデル化
- 要素分割数は、構造形式と荷重条件とから**座屈モードを想定**して決定
- 板要素形状の縦横比は、座屈変形を支配する領域で1:2以下とし、それ以外の部分で 1:3 程度
- 境界条件は、現実の構造を観察して、6自由度を適切に拘束

● 座屈解析の適用例

- 設計上構造物の不安定挙動が生じる理由を理解する手段
- 座屈モードに基づき初期たわみ形状の決定など
- **有効座屈長の算定**

25

有効座屈長の評価

部分構造解析法

- 近似式
- 図表
- 構造部分系の特性方程式を解く方法
- 軸力に依存しない
- 得られる有効座屈長は安全側な値
- **適用範囲に限界がある**
- **複雑な構造に適用困難**

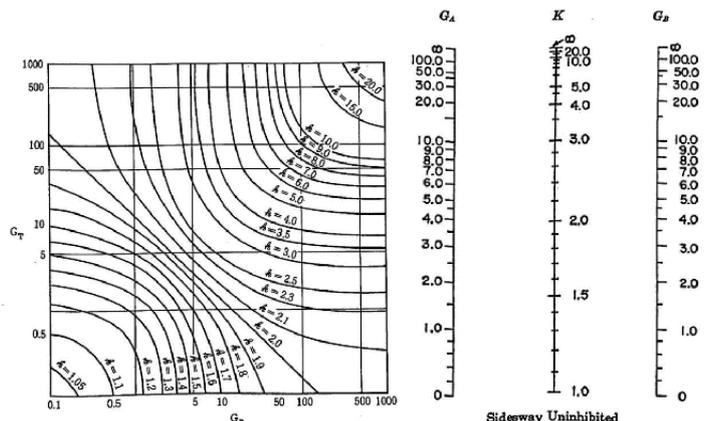
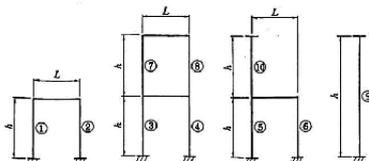
座屈形式	面内座屈
1層の柱 ① 下端固定	$l = 1.5k$ $= [1.5 + 0.04(k-5)]k$: $k \leq 5$: $5 < k \leq 10$
② 下端ヒンジ	$l = 3.5k$ $= [3.5 + 0.2(k-5)]k$: $k \leq 5$: $5 < k \leq 10$
2層以上の柱 ③ ⑦~⑧	$l = 1.9k$ $= [1.9 + 0.14(k-5)]k$: $k \leq 5$: $5 < k \leq 10$
1本足の柱 ④	$l = 2.0k$
2層以上の1本足の柱 ⑤ ⑨	$l = 2.2k$

ここに、

$$k = \frac{I_c/k}{I_g/L}$$

I_c : 柱の断面二次モーメントの平均値 (cm⁴)

I_g : はりの断面二次モーメントの平均値 (cm⁴)



全体構造解析法

• 弾性固有値解析

$$|\mathbf{K}_E(E_i, I_i) + f_{cr} \mathbf{K}_G(N_i)| = 0$$

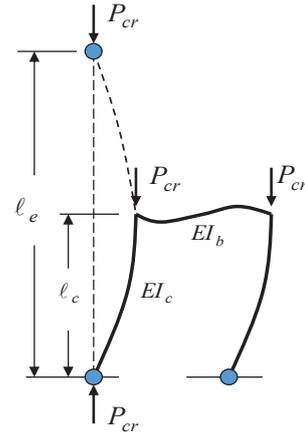
$$\ell_e = \pi \sqrt{\frac{E_{ci} I_{ci}}{f_{cr} N_{ic}}} \quad P_{cr} = N_{cr} = f_{cr} N_{ic}$$

• E_f 法

$$|\mathbf{K}_E(E_{fi}, I_i) + f_{cr} \mathbf{K}_G(N_i)| = 0$$

$$\ell_e = \pi \sqrt{\frac{E_{fi} I_{ci}}{f_{cr} N_{ic}}} \quad E_{fi} = \frac{\sigma_{cri}}{\sigma_{ei}} E_{ic}$$

P_{cr} : 座屈荷重
 f_{cr} : 固有値
 N_{ic} : 軸力

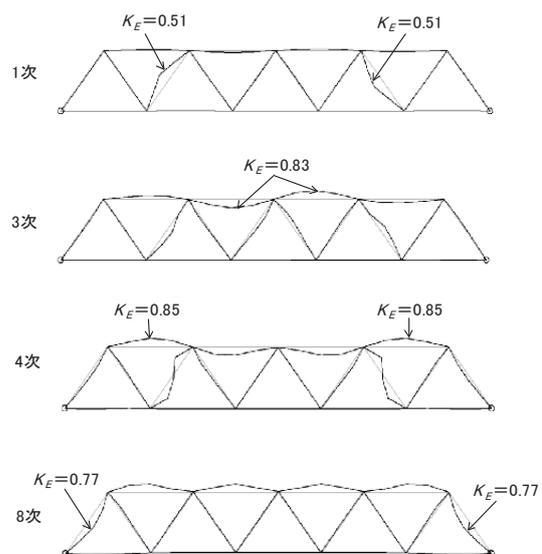


- 分岐座屈荷重に相当する固有値は、構造系に一つ存在
- 全体座屈強度と全部材の座屈強度がほぼ等しい構造に対して精度が良い
- ✓ 構造形式、断面変化、拘束条件、および荷重条件を容易に考慮
- ✓ 全体として伝統的方法に比較して、有利な有効座屈長を評価
- 軸力が小さい場合不合理な有効座屈長を算出
- 断面力解析における荷重状態と有効座屈長を算出時の荷重状態が異なる

27

不合理な有効座屈長の設計上の対策

- 適切な数値による有効座屈長の頭切り
- 変断面部材を一様断面に換算した圧縮部材として断面設計
- 変化する軸圧縮力を一様軸圧縮力に換算した圧縮部材として断面設計
- 高次固有値法
 - 弾性固有値解析
 - 高次固有値あるいは固有モードの適用
- 付加軸力法
 - 弾性固有値解析
 - 不合理な有効座屈長を与える部材の作用軸力のみ増加して、すべての軸圧縮強度が等価になるように算出



$$|\mathbf{K}_E(E_i, I_i) + f_{cr} \mathbf{K}_G(\bar{N}_i)| = 0$$

$$\bar{N}_i = \alpha_i N_i \quad (\text{微小軸圧縮力断面部材})$$

弾性有限変位解析による 特異点探索法

- 非線形固有値解析
 - 座屈前の変形が無視できない場合
 - 弾性有限変位解析により釣合径路を追跡計算しながら、接線剛性行列の値がゼロになる点として特異点を特定する
- 弾性有限変位解析
 - 摂動(微小初期たわみ)を考慮したによる特異点探索

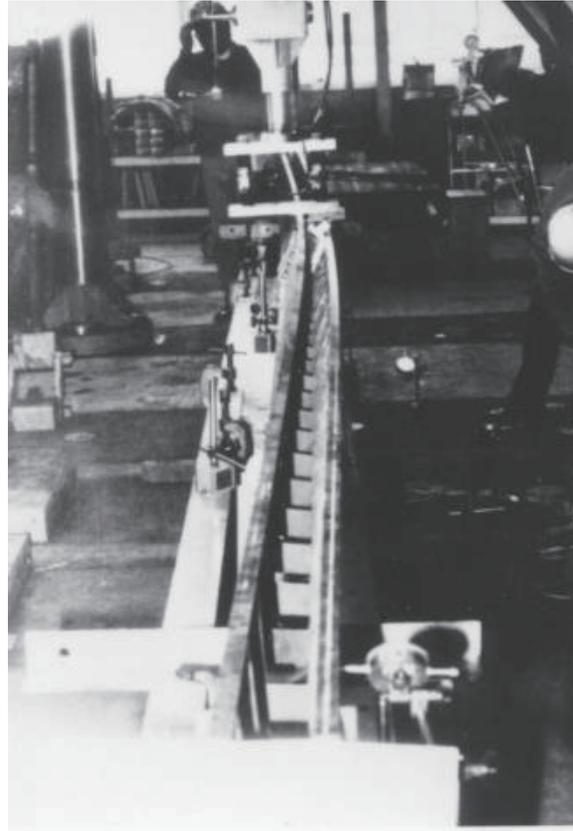
29

非線形数値計算法

- 反復法
- 増分法
 - 荷重増分法
 - 変位増分法
 - 弧長増分法

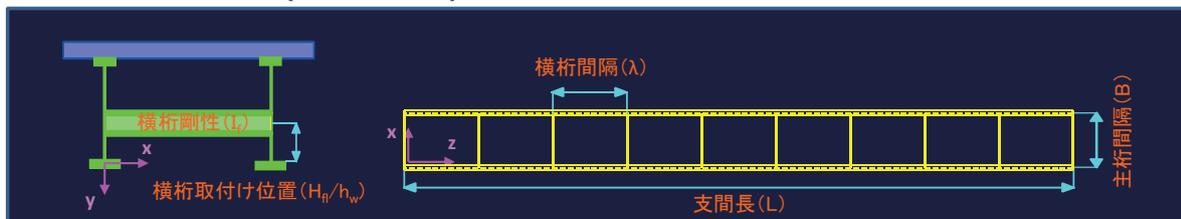
30

2主桁の 全体横座屈



解析モデルと要素分割

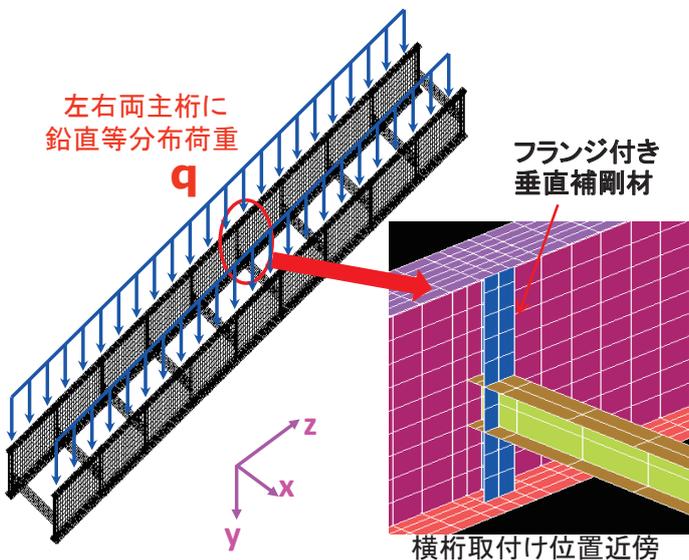
合理化2主桁橋(基本モデル)



左右両主桁に
鉛直等分布荷重

q

フランジ付き
垂直補剛材



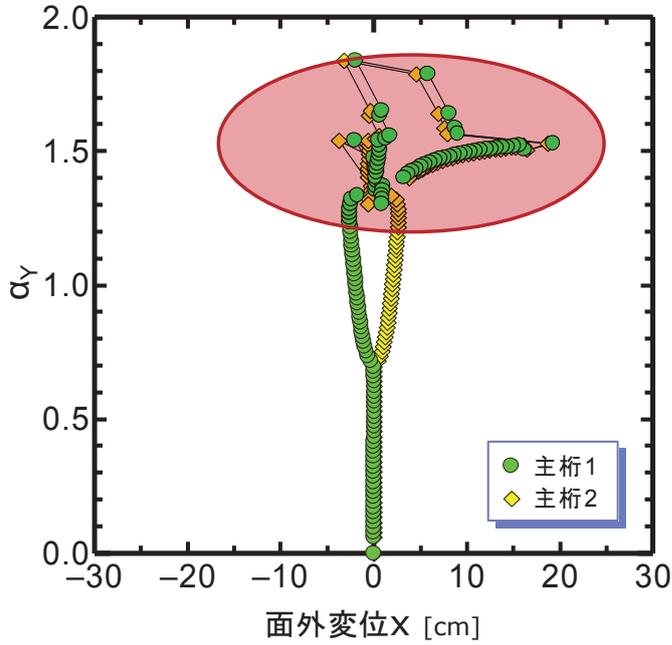
- × 支間長 (L=3000)
- × 横桁間隔 (λ=600)
- × 横桁剛性 ($I_m/I_f=118$, $I_f=118000$)
- × 主桁中心間隔 (B=600)
- × 横桁取付け位置 ($H_f/h_w=0.40$, $h_w=288$)

基本モデルの要素分割数: 11352

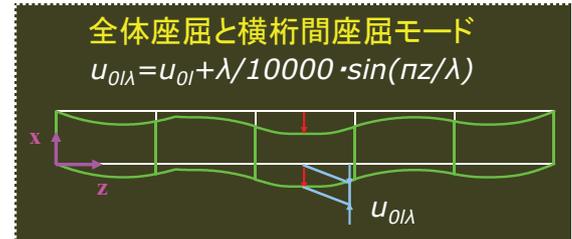
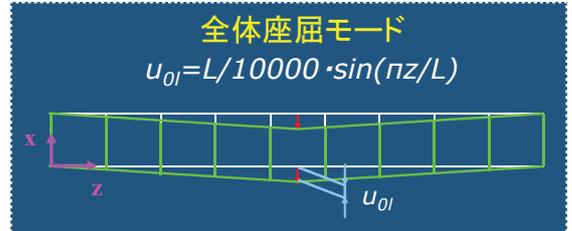
		x方向	y方向	z方向
主桁	上フランジ	6	-	204
	下フランジ	8	-	204
	ウェブ	-	10	204
横桁	フランジ	14	-	2
	ウェブ	14	2	-
垂直補剛材	フランジ	-	10	2
	ウェブ	2	10	-

分岐点の不安定挙動

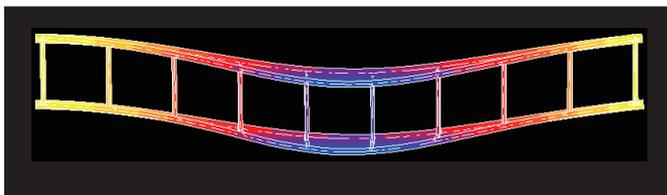
完全系 ($\lambda/L=0.20$)モデル



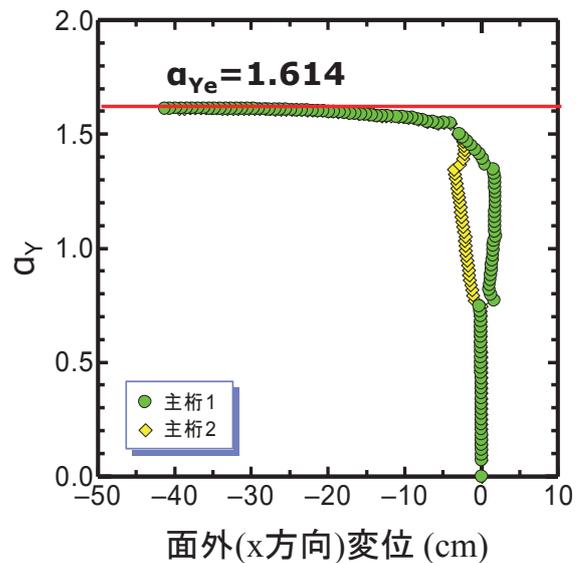
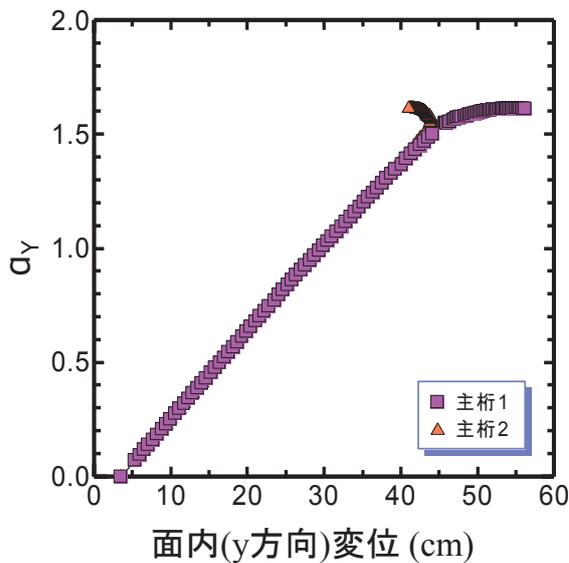
初期たわみを導入



$$\alpha_Y = \frac{q}{q_y}$$



横座屈後挙動



荷重—変位曲線

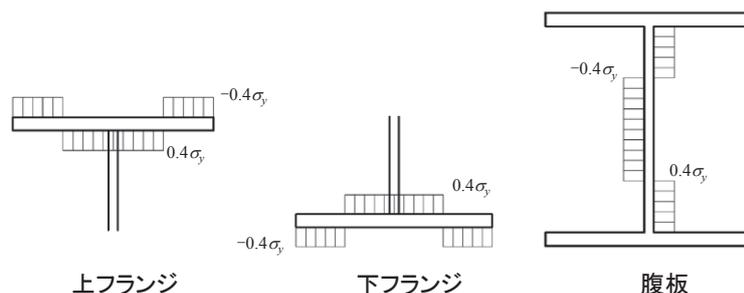
耐荷力解析

- 極限点挙動は、初期不整のある実際の不完全系構造物の終局挙動に表れることが多い
 -耐荷力解析(弾塑性有限変位解析)
- 耐荷力解析は、終局状態を含む変形挙動を直接予測追跡するもの
 - 初期不整 (初期たわみ、荷重偏心、残留応力)
 - 構成則の非線形
 - 釣合式の非線形

35

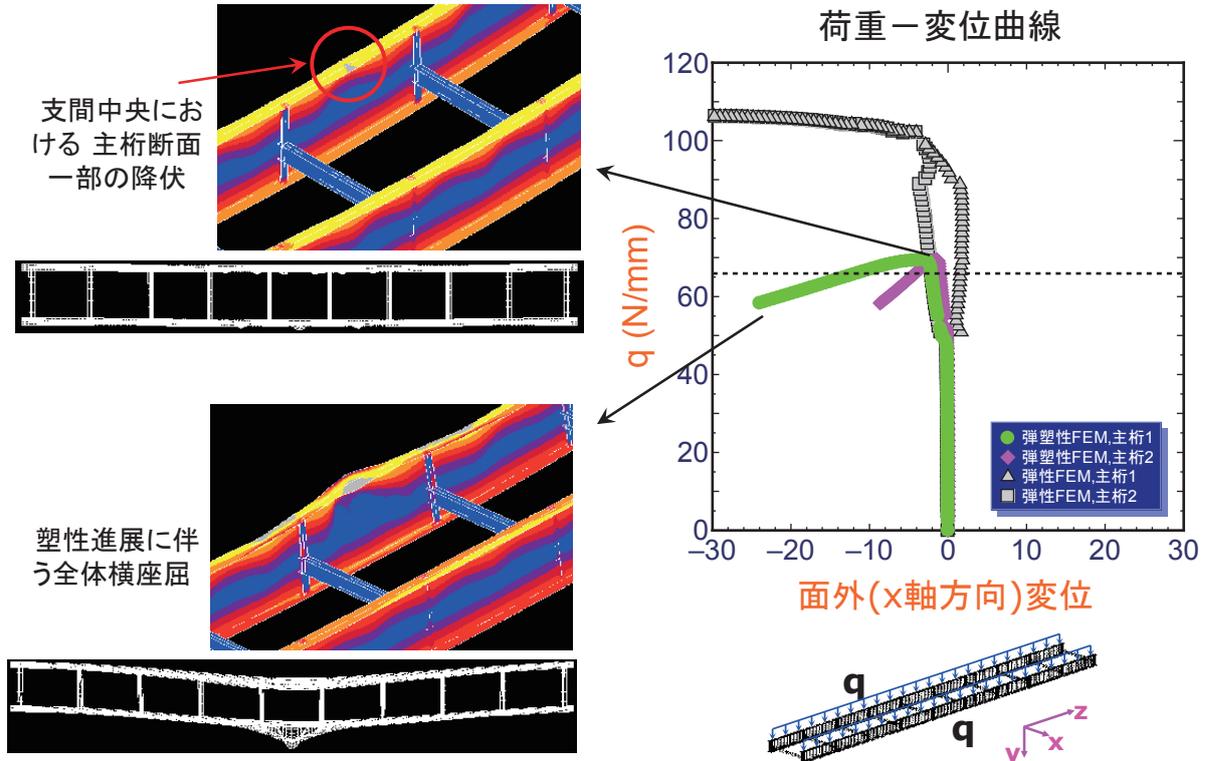
残留応力の導入

- 骨組解析：
 - 断面内のセグメントに初期応力(これまでに実績のある残留応力分布値、あるいは実験実測値など)を入力する。
- 板構造解析：
 - 溶接部に正負の初期応力(これまでに実績のある残留応力分布値、あるいは実験実測値など)を与えて全体構造解析をし、溶接部に残留応力を発生させる。



36

塑性崩壊挙動



終局限界挙動の分類

終局限界挙動

後座屈挙動

支間長 L

横桁間隔 λ

横桁剛性 I_m/I_f

主桁中心間隔 B

横桁取り付け位置 H_{fl}/h_w

■ **モードⅠ** : 主桁断面の塑性崩壊(基本モデル)

塑性化



Von Mises応力 [N/mm²]

■ **モードⅡ** : 弾性全体横座屈

弾性



■ **モードⅢ** : 弾性全体横座屈と横桁間横座屈の連成

弾性



■ **モードⅣ** : 主桁の塑性と全体横座屈の連成

塑性化



■ **モードⅤ** : 主桁の塑性と横桁間横座屈の連成

塑性化



塑性域

353.0

282.4

211.8

141.2

70.6

吊形式橋梁の耐荷力評価 とMIDASソフトの適用

39

Cable supported bridges in the world

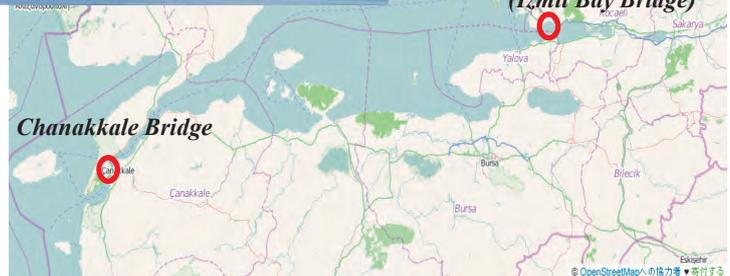
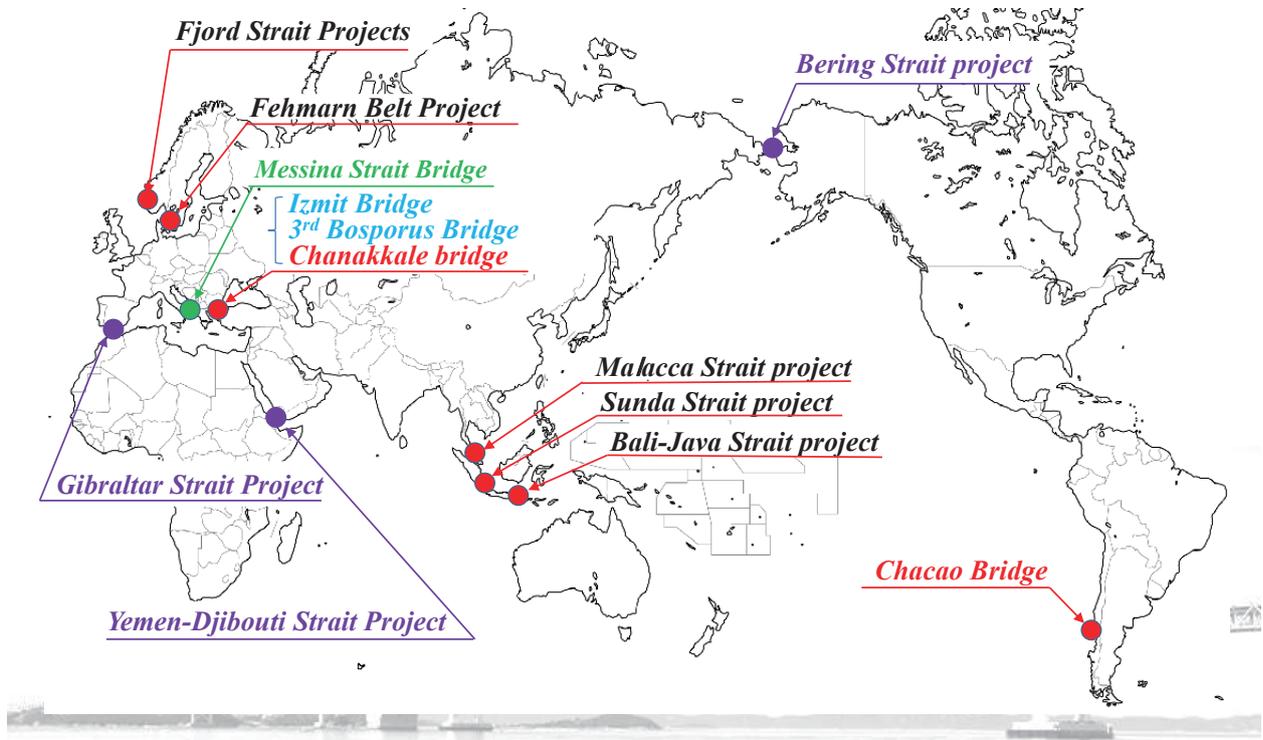
Suspension bridges

No.	Bridges	Max. length of span (m)	Country	Year
1	チャナッカレ大橋	2,023	Turkey	2023(under const.)
2	明石海峡大橋	1,991	Japan	1998
3	武漢楊泗港長江大橋	1,700	China	2019(under const.)
4	虎門二橋坭洲水道橋	1,688	China	2018(under const.)
5	舟山西候門大橋	1,650	China	2009
6	グレートベルト・イースト橋	1,624	Denmark	1998
7	イズミット大橋	1,550	Turkey	2016
8	李舜臣大橋	1,545	Korea	2013
9	潤揚長江公路大橋	1,490	China	2005
10	第二座洞庭湖大橋	1,480	China	2017(under const.)
11	南京長江第四大橋	1,418	China	2012
12	ハンバー橋	1,410	U.K.	1981
13	第3ボスボラス橋	1,408	Turkey	2016
14	江陰長江大橋	1,385	China	1999
15	青馬橋	1,377	China	1997
16	ハダングル橋	1,310	Norway	2013
17	ベラザノ・ナロウズ橋	1,298	U.S.A.	1964
18	ゴールデンゲート橋	1,280	U.S.A.	1937
18	陽邏長江大橋	1,280	China	2007
20	ヘガクステン橋	1,210	Sweden	1997

Cable-stayed bridges

No.	Bridges	Max. length of span (m)	Country	Year
1	ルースキー島連絡橋	1,104	Russia	2012
2	滬通鐵路長江大橋	1,092	China	2019(under const.)
3	蘇通長江公路大橋	1,088	China	2008
4	昂船洲橋	1,018	China	2009
5	青山長江大橋	938	China	2019(under const.)
6	鄂東長江大橋	926	China	2010
7	嘉魚長江大橋	920	China	2019(under const.)
8	多々羅大橋	890	Japan	1999
9	ノルマンディー橋	856	France	1995
10	池州長江大橋	828	China	2018(under const.)
11	石首長江大橋	820	China	2018(under const.)
12	九江長江公路大橋	818	China	2013
13	荊岳長江公路大橋	816	China	2010
14	蕪湖長江二橋	806	China	2017(under const.)
15	仁川国際空港第二連絡橋	800	Korea	2009
15	鴨池河特大橋	800	China	2016(under const.)
17	廈漳跨海大橋	780	China	2013
18	武穴長江大橋	768	China	2019(under const.)
19	沌口長江大橋	760	China	2017(under const.)
20	ザラトイログ湾橋	737	Russia	2012

Planning of the Strait crossing projects in the world



Projects in Marmara ocean area (Turkey)



Fjord Strait Projects (Norway)



Extended by new structure type

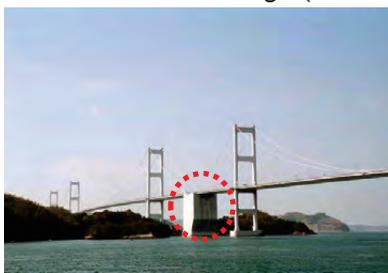


Development of multi-span suspension bridges

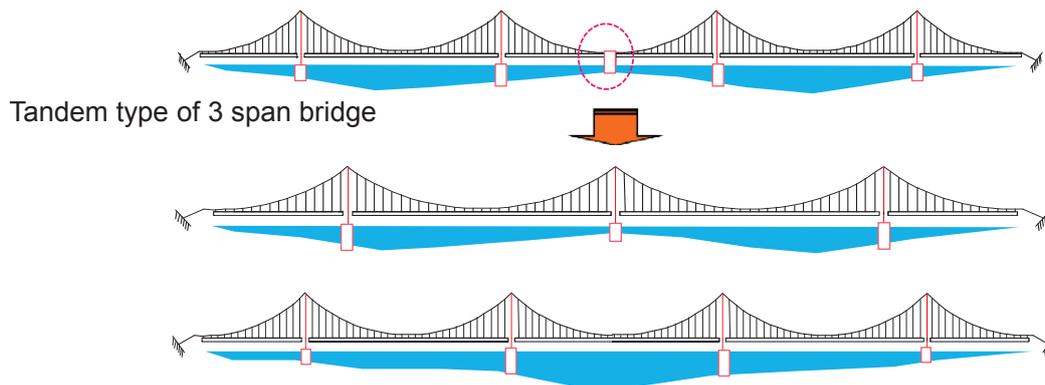
Oakland bay bridge (USA)



Kurushima bridge (JAPAN)



Seto bridge (JAPAN)



4-span suspension bridge in Japan



小鳴門橋 (1961)
中央径間：160m



桃介橋 | 人道橋 (1993復元)
中央径間：104m

4-span suspension bridge in china



泰州長江大橋 (2012)
中央径間：**1080m**

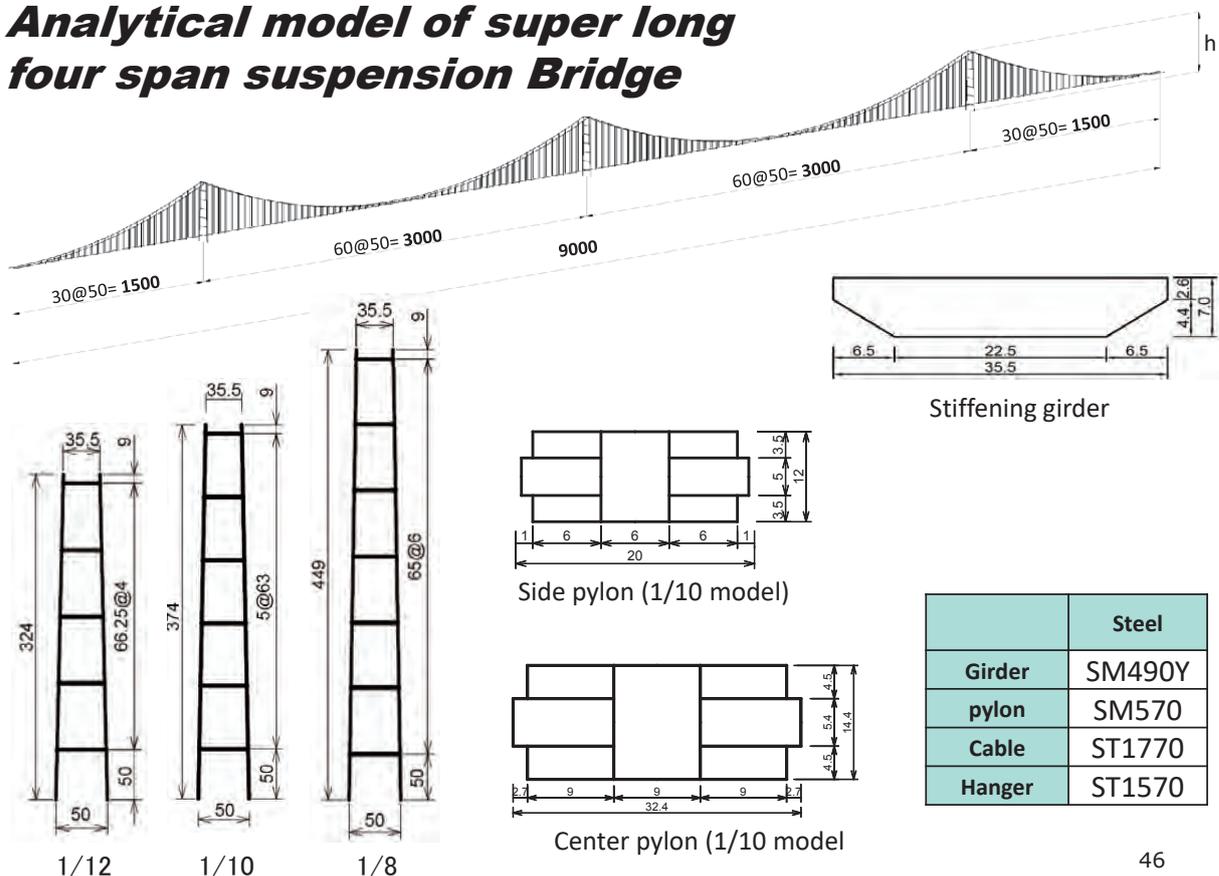


馬鞍山長江公路大橋 (2013)
中央径間：**1080m**

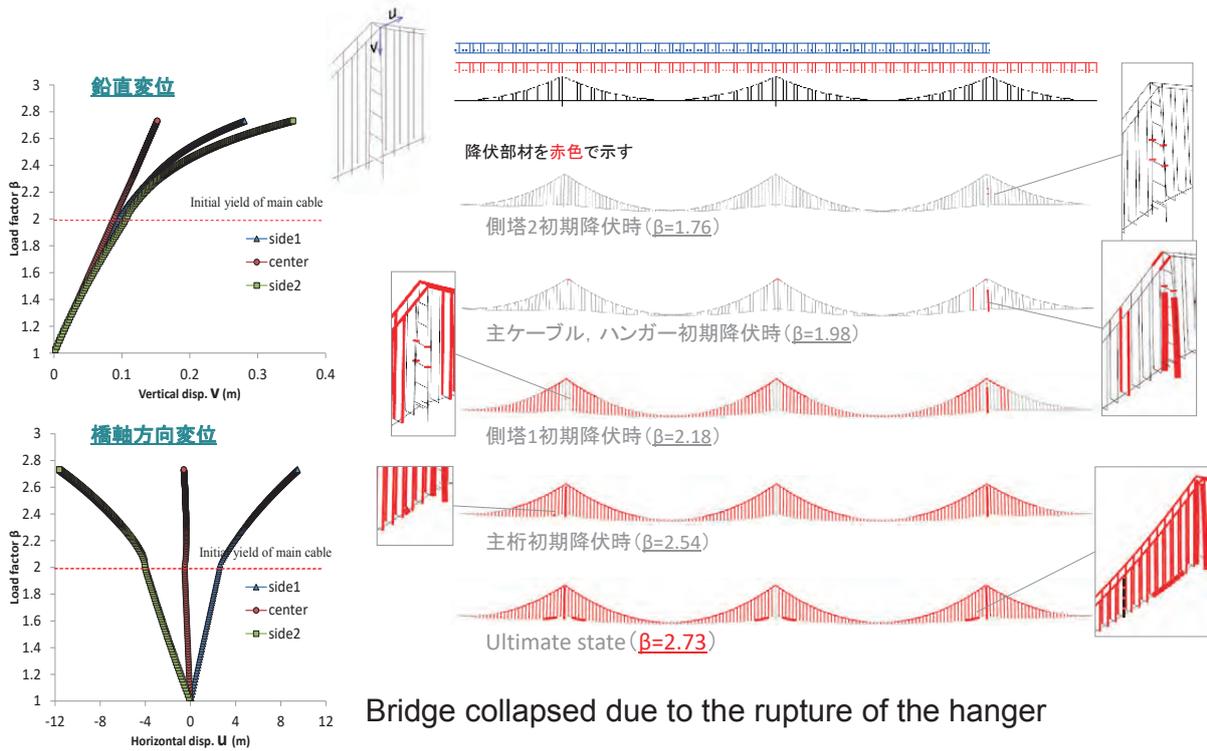


武漢鸚鵡洲長江大橋 (2015)
中央径間：**850m**

Analytical model of super long four span suspension Bridge



Elasto-plastic behaviors (Sag ratio 1/8)



47

Conversion by MIDAS Civil and NFX

Input data(~.nas)

MIDAS Civilにより、対象橋梁の入力データ (節点、要素番号) の作成

自主開発ソフトの入力フォーマットに変換

Input data(~.dat)

自主開発ソフトによる弾塑性有限変位解析 (suspension.exe)

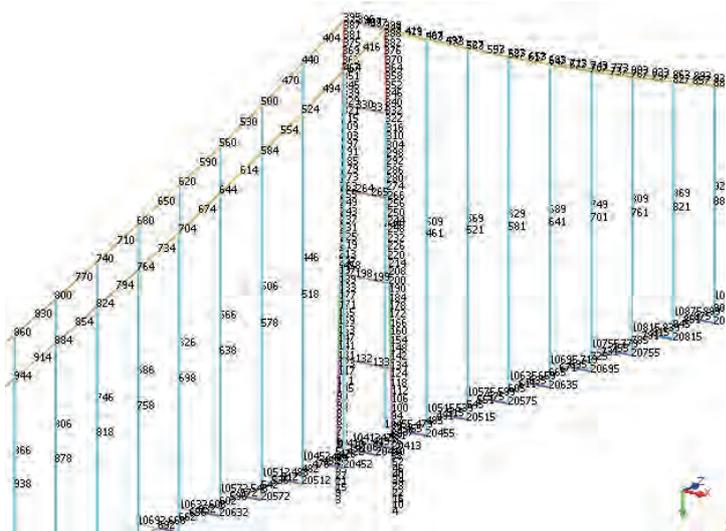
Output data(~.cal)

自主解析ソフトの解析データをMIDAS NFXデータに変換

Input data(~.nas) and Output data(~.fno)

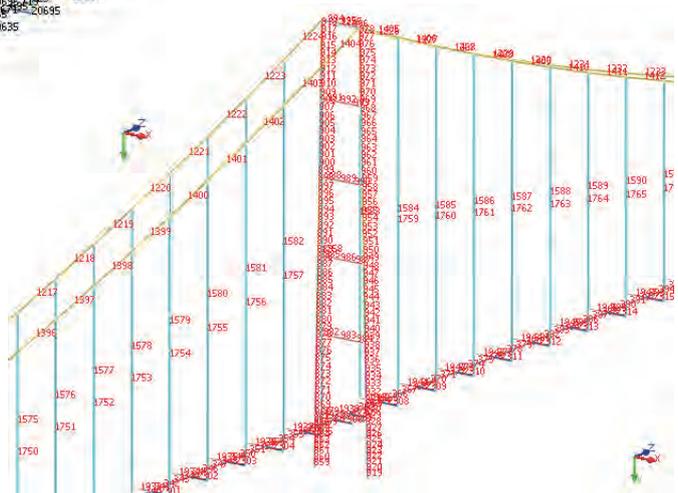
→Midas program data

48



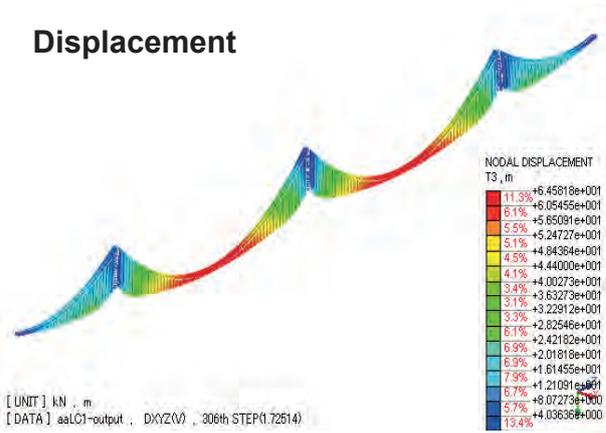
Input file(~.nas)

Node data

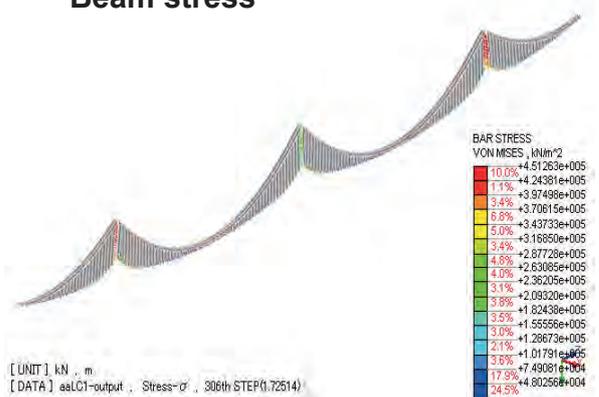


Element data

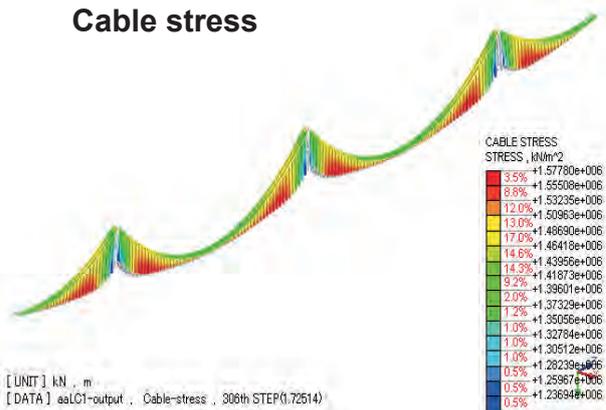
Displacement



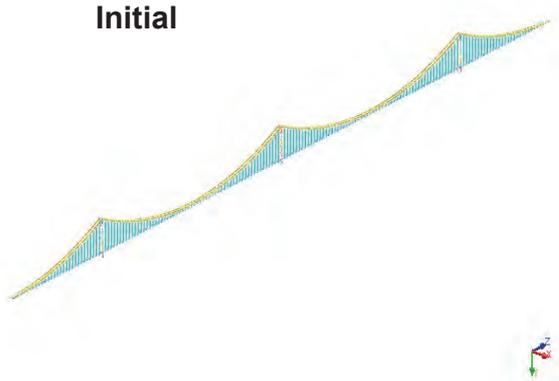
Beam stress



Cable stress



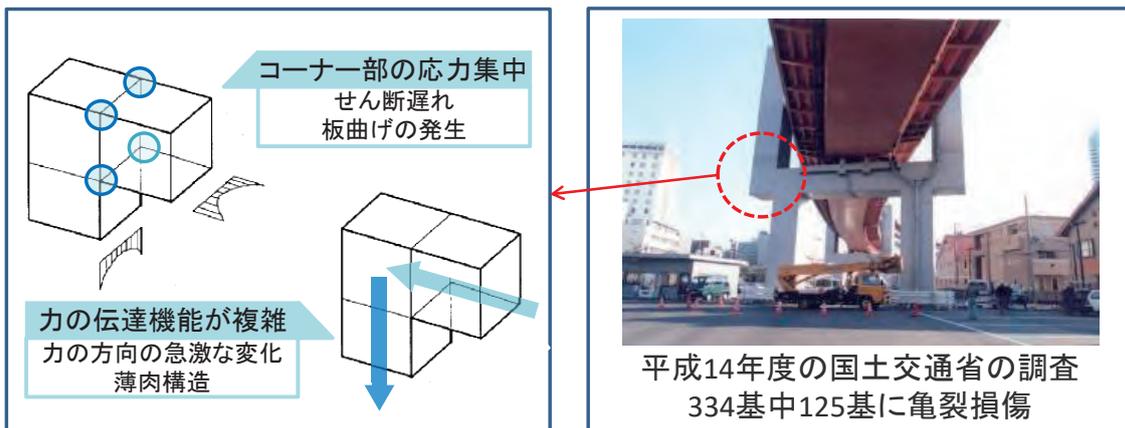
Initial



鋼製橋脚隅角部のピーク応力算出に関する解析モデル

51

鋼製橋脚隅角部の設計

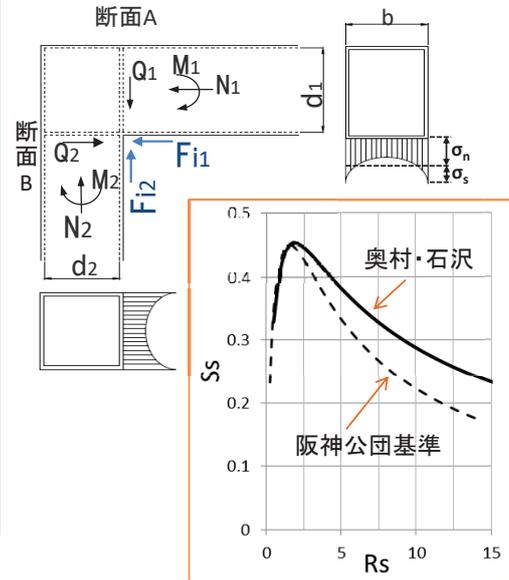
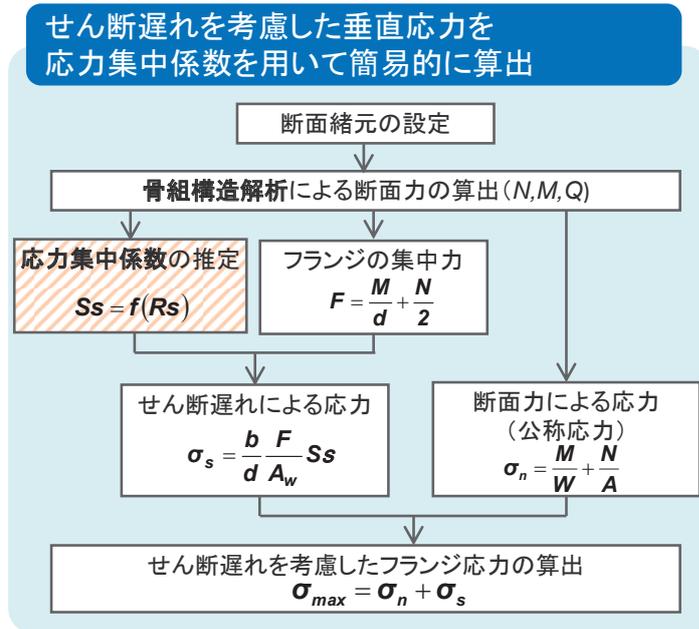


- 隅角部の設計は、はり・柱の交差部付近のせん断遅れ現象に起因するピーク応力を用いた弾性設計 → **隅角部の厚板化**
- 疲労強度の低下を防止するため、応力集中の緩和構造としてフィレットの設置を義務付け → **細部構造であり、弾性設計では考慮されない。**

- 平均応力を適用できれば合理的設計が可能

52

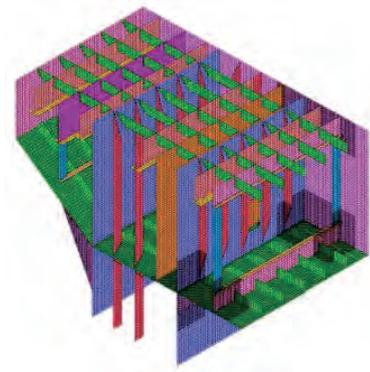
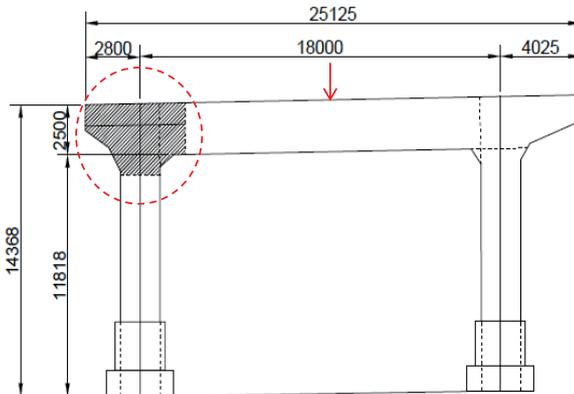
奥村・石沢の方法



欠点 ダイアフラム・フィレットなど構造細目の検討ができない
 局部応力・板曲げ応力など詳細な応力性状の算出ができない

せん断遅れによるピーク応力度評価の精度

- 高度解析手法による比較
 - 骨組構造解析
 - 一定せん断流要素FEA
 - シェル要素FEA



解析手法

- 骨組構造解析、一定せん断流要素FEA、シェル要素FEA

奥村・石沢の方法(骨組構造解析)

現在一般的に用いられている解析手法

全てはり要素
平面モデル
(面外変形考慮なし)

骨組構造解析
⇒奥村石沢の方法

一定せん断流要素FEA(隅角部のみ)

接合部:
剛梁を設置

隅角部:
一定せん断流
パネル要素

応力集中部:
密な要素分割

隅角部以外:
はり要素

シェル要素FEA(隅角部のみ)

隅角部
シェル要素

接合部
仮想剛板を設置
(厚さ1mm)

応力集中部:
密な要素分割
(25mm四方)

隅角部以外:
はり要素

シェル要素FEA(橋脚全体)

全てFEMシェル
要素

応力集中部:
密な要素分割
(25mm四方)

一定せん断流要素FEA

せん断応力のみ抵抗する板要素と鉛直応力のみを負担するはり要素を用いた解析手法

板要素
(せん断流パネル)

はり要素
(縁部材)

境界条件の設定

要素分割の設定

構造詳細の設定

荷重の設定

結果の判定

一定せん断流パネルの
剛性マトリックス

$$k = \frac{Gt}{ab} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

一定せん断流パネルの
縁部材に対する剛性マトリックス

$$k = \frac{2EA}{l} \begin{bmatrix} 6/l^2 & -3/l & -3/l \\ -3/l & 2 & 1 \\ -3/l & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

板要素
(せん断流パネル)

はり要素
(縁部材)

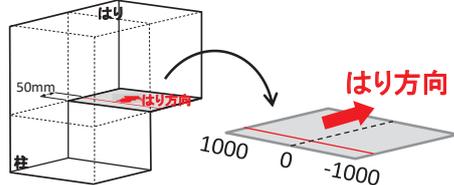
▲ 隅角部モデル例

特徴

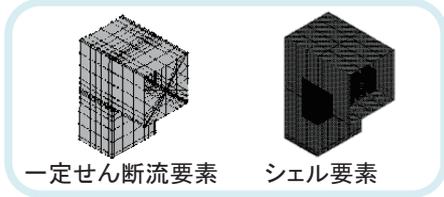
シェル要素FEAに比べ 少ない要素分割で精度良くせん断変形を評価
応力ではなく断面力で解析結果を表示する

現設計法と高度解析手法の比較(1)

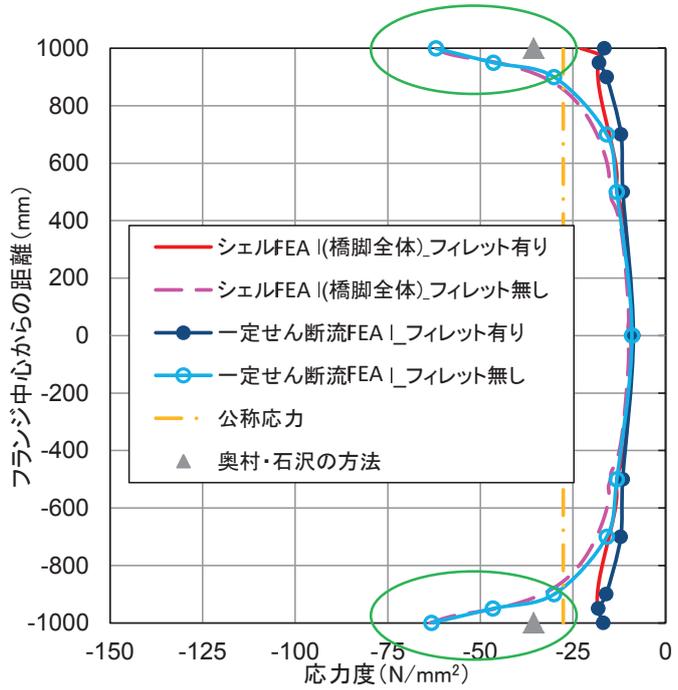
はり下フランジ軸方向応力



▲応力評価位置(はり下フランジ)



フィレット有り無しにかかわらず、
シェル要素と**一定せん断流要素**は誤差5%以内
 (フィレットが無い場合は 奥村法の1.8倍程度
 有る場合は 奥村法の60%程度の最大応力)

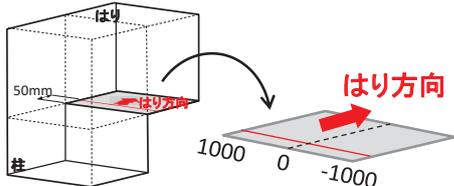


はり下フランジ軸方向応力分布比較

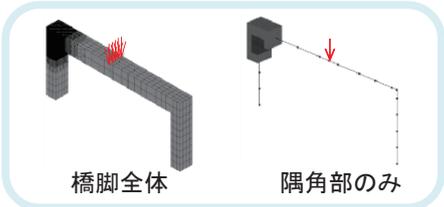
57

現設計法と高度解析手法の比較(2)

はり下フランジ軸方向応力

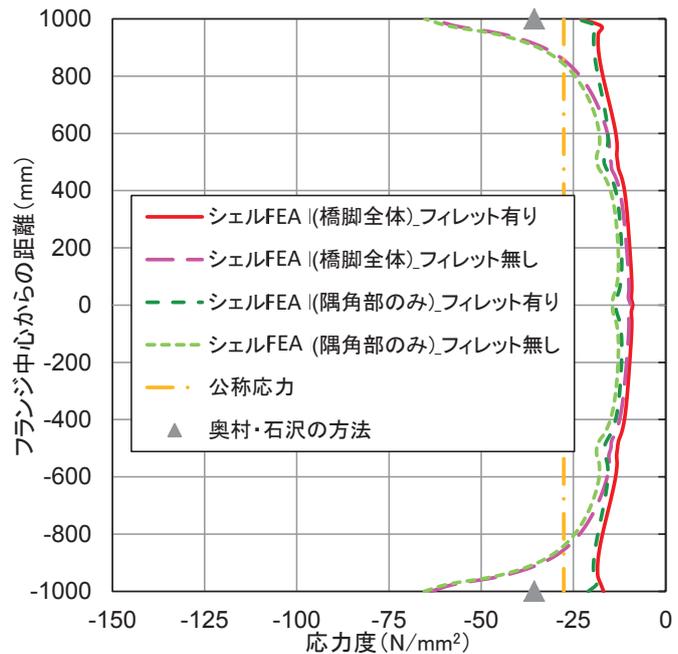


▲応力評価位置(はり下フランジ)



フィレット有り無しにかかわらず、
 FEMと一定せん断流は誤差5%以内
 (フィレットが無い場合は 奥村法の1.8倍程度
 有る場合は 奥村法の60%程度の最大応力)

モデル化領域による結果の違いは見られない

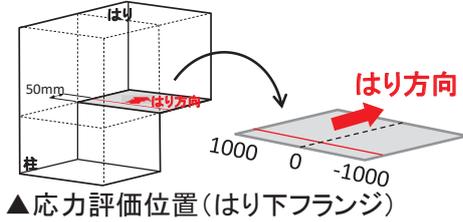


はり下フランジ軸方向応力分布比較

58

現設計法と高度解析手法の比較(3)

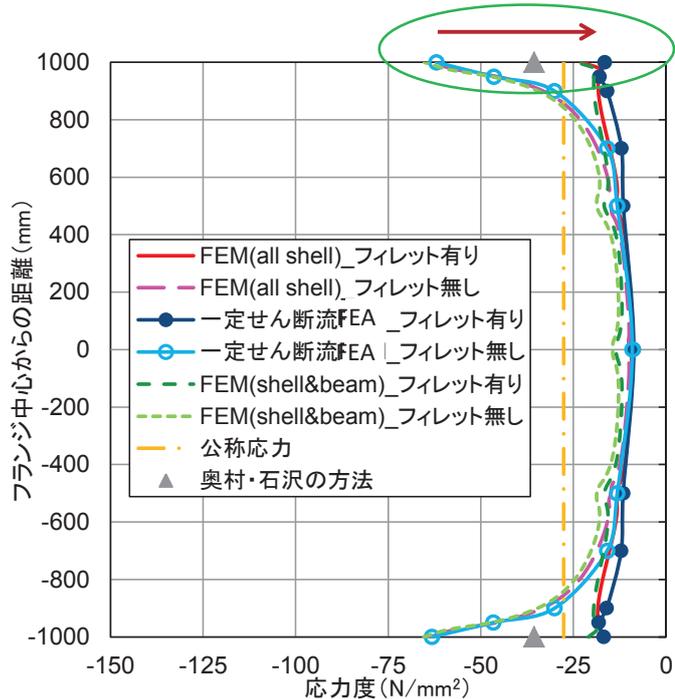
はり下フランジ軸方向応力



フィレット有り無しにかかわらず、
FEMと一定せん断流は誤差5%以内
(フィレットが無い場合は 奥村法の1.8倍程度
有る場合は 奥村法の60%程度の最大応力)

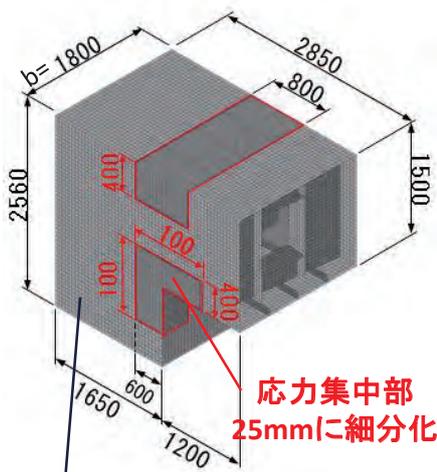
モデル化領域による結果の違いは見られない

フィレットの設置により、
コーナー部の応力集中は緩和(70%程度減少)



はり下フランジ軸方向応力分布比較

隅角部のモデル化の構築



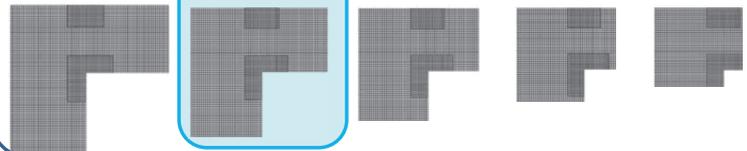
50mmに分割

基準の隅角部モデル条件

(首都高の設計¹⁾あるいは国総研の解析²⁾を基準とする)

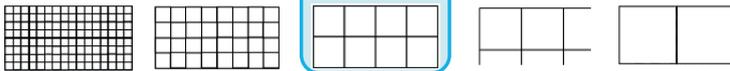
隅角部モデル化領域

1.25H 1.00H 0.75H 0.5H 0.25H



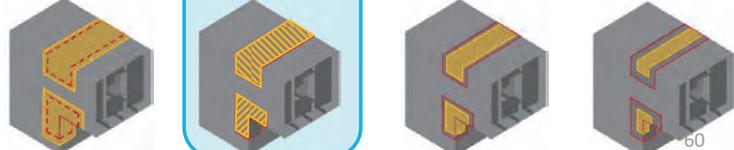
応力集中が予想される部分の要素サイズ

6.25mm 12.5mm 25mm 3.75mm 50mm

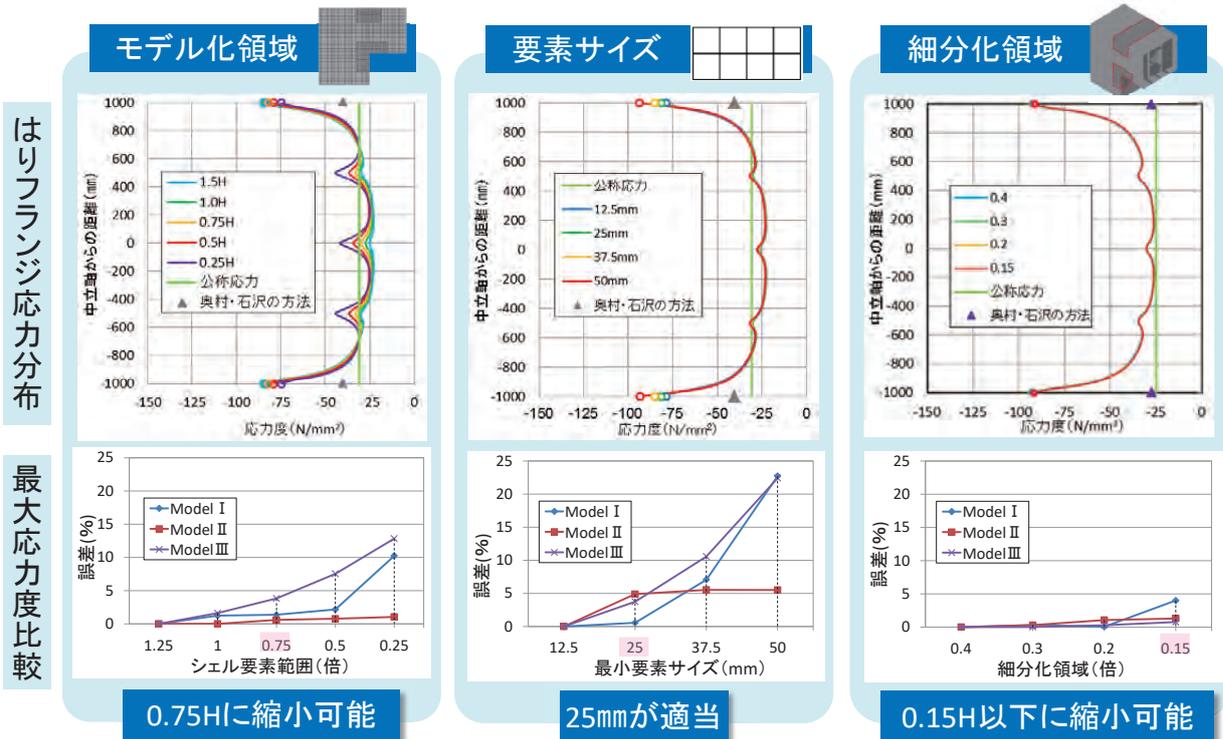


応力集中が予測される部分の細分化領域

0.4H 0.3H 0.2H 0.15H



シェル要素FEMにおけるモデル化手法の提案



シェル要素FEMにおいて 隅角部モデルの簡略化が可能

既設構造物および部材の 構造解析に関する配慮事項

既設構造物の構造解析における配慮事項(1)

- 作用(荷重状態)の変化
 - 設計荷重と実態荷重
 - 利用形態の変更や環境条件(物理的、化学的、生物学的性格)の変化
- 構造全体の形状変化
 - 隣接構造との連結等、構造形式、力学特性の変化
 - 都市環境の変化に対応するための嵩上げ
 - 土地有効利用を図るための構造物の平行移動
- 部材の形状変化
 - 腐食による板厚減少
 - 疲労き裂の進展
 - 部材交換
 - 部材取り外し
 - 剥離
 - 補剛材の取り付け
 - 当て板補強

63

既設構造物の構造解析における配慮事項(2)

- 解析条件の変化
 - 静水圧, 基礎変位等の静的解析 →耐震、耐風, 地震動, 衝撃力等の動的解析
- 境界条件の変化
 - 支承部の変化
 - 基礎の浮上り
 - 構造物の一部が接触あるいは接地
 - 滑動
 - 剥離等
- 時間依存型の作用による劣化
 - 腐食による板厚減少
 - 疲労によるき裂進展
- 経年に伴う材料物性値の変化および地盤の変化

モデル化の不確実性の低減

64

既設構造物の構造解析における配慮事項(3)

構造解析手法の選択

- 実作用応力(断面力)の算出
 - ・骨組構造解析(格子解析)、一定せん断流要素FEA、シェル要素FEA、ソリッド要素FEAか ?
 - ・設計荷重、実態荷重か
 - ・劣化損傷の配慮は
 - ・ひずみゲージや変位計などによる直接計測か ?

- 耐荷力の算出
 - ・骨組構造解析、シェル要素FEA、ソリッド要素FEAか
 - ・劣化損傷はどのように反映するか ?
 - ・点検データを有効に活用できる環境にあるか
 - ・適用要素、要素分割数の選択の判断は ?

65

既設構造物の構造解析における配慮事項(4)

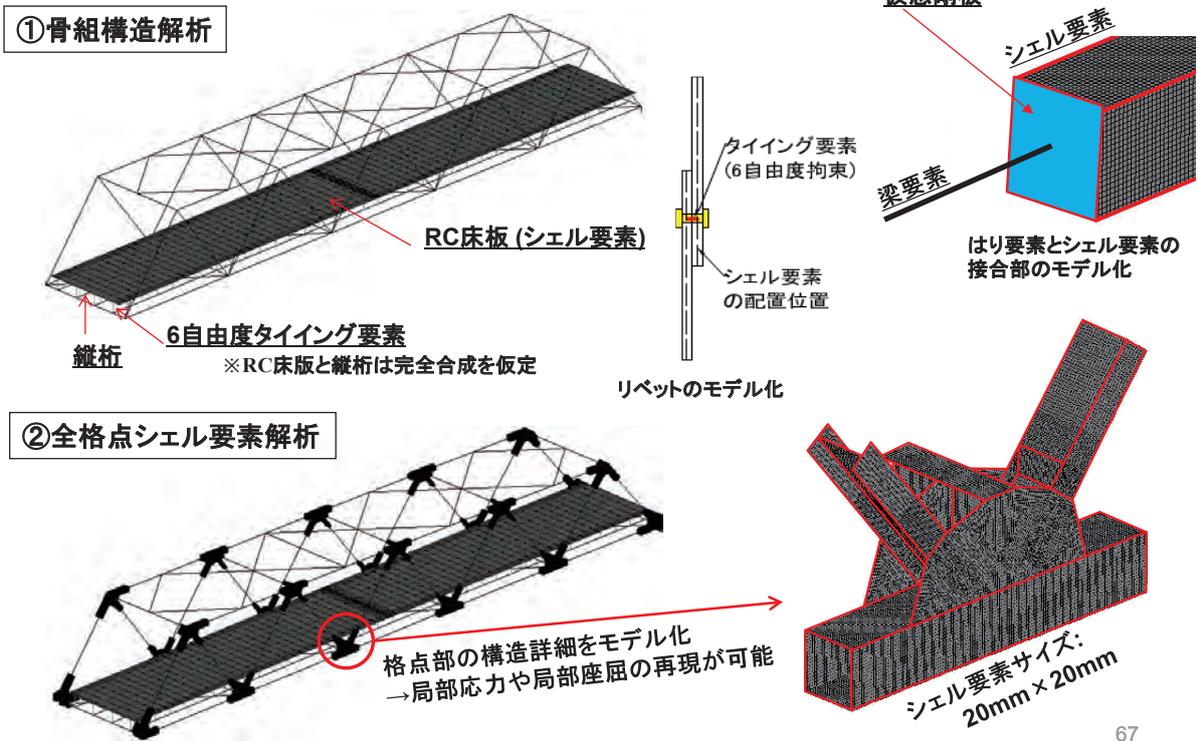
構造系のモデル化

- 解析は、どのような解法で実施するか ?
 - 骨組構造解析: 全はり要素
 - FEA+はり要素: 部分シェル要素+はり要素
 - FEA+はり要素: 部分ソリッド要素+はり要素
 - FEA: 全シェル要素モデル
 - FEA: 全ソリッド要素モデル

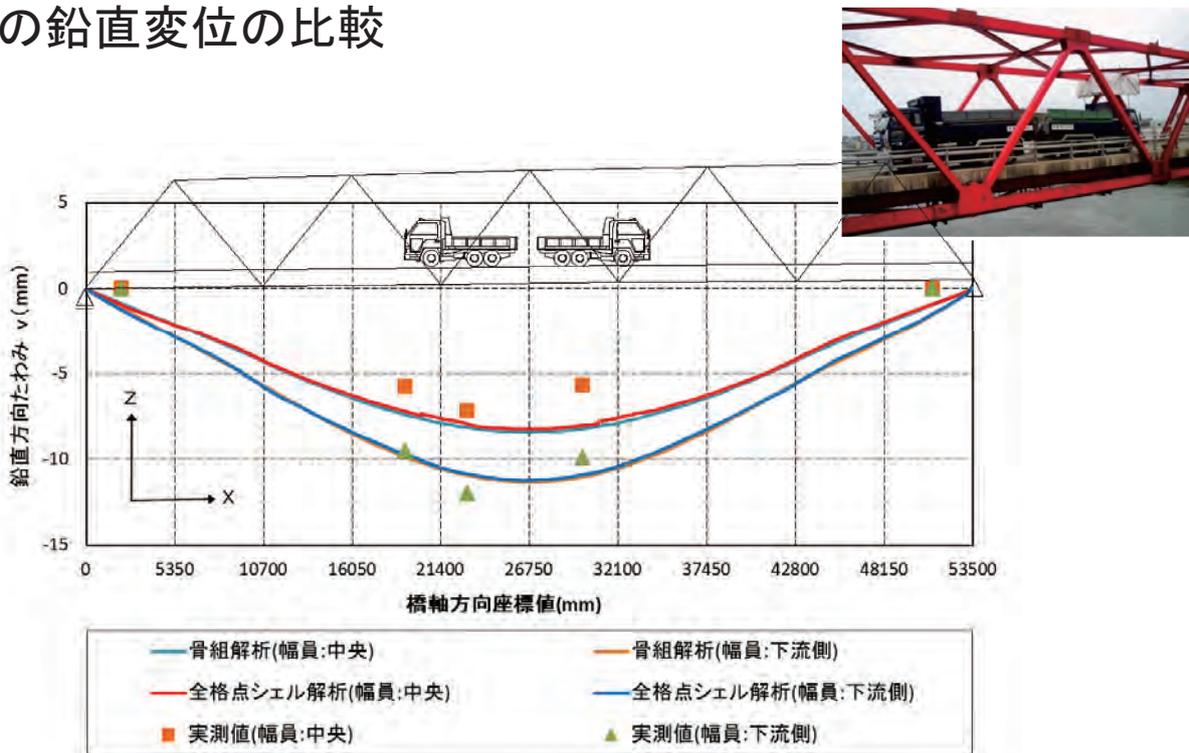
 - シェル要素あるいはソリッド要素とはり要素の境界部のモデル化 ?
 - 剛板か剛棒
 - その厚さ、剛性

66

鋼トラス橋の部分シェル要素FEAモデル



骨組構造解析、部分シェル要素FEAとProof loading testの鉛直変位の比較



補強材は考慮していない

既設建造物の構造解析における配慮事項(5)

汎用コードの特異性

- コーディング技術に依存した解析機能
 - 要素発生／要素消滅(当て板補修、部材補強、部材交換など、部材レベルの形状変化が生じる場合)
 - 時間関数
 - リスタート
 - 局所的な隣接節点間の関係付け
(局所座標系、制約条件、接触面等)

解析データの保存形態

- (1) モデル作成作業が最大のネックであり、**モデル作成の効率化**.
- (2) 作成した解析データは担当者が代わっても、将来にわたり同じデータが使用できるよう、**保存方法と将来の利用が容易なわかり易いデータ構成に留意**

69

非線形解析における配慮事項(1)

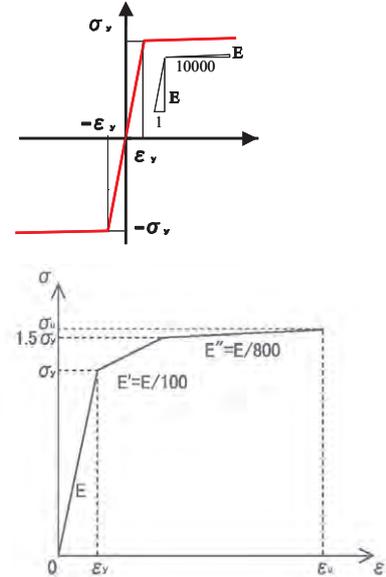
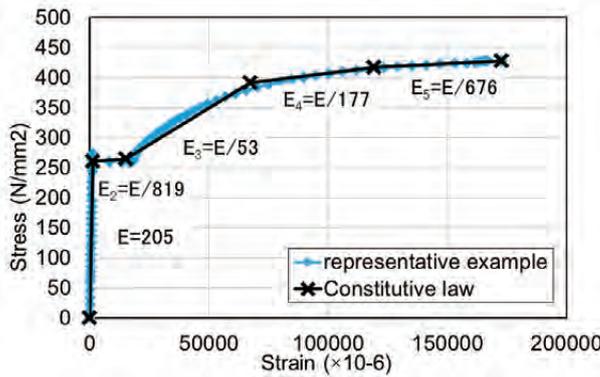
- 弾塑性解析
 - (1) 降伏条件: Misesの降伏条件
 - (2) 流れ則 : J2 流れ則
 - (3) 硬化則 : 等方硬化, 移動硬化, 修正2曲面モデル, 3曲面モデル
- 有限変位解析
 - (1) 非線形解析: トータルラグランジュ法
更新ラグランジュ法
(選択は解析コードに依存、ユーザーが選択の判断を求められることはない)
 - (2) 増分法: 変位増分法
弧長増分法

70

非線形解析における配慮事項(2)

構成則

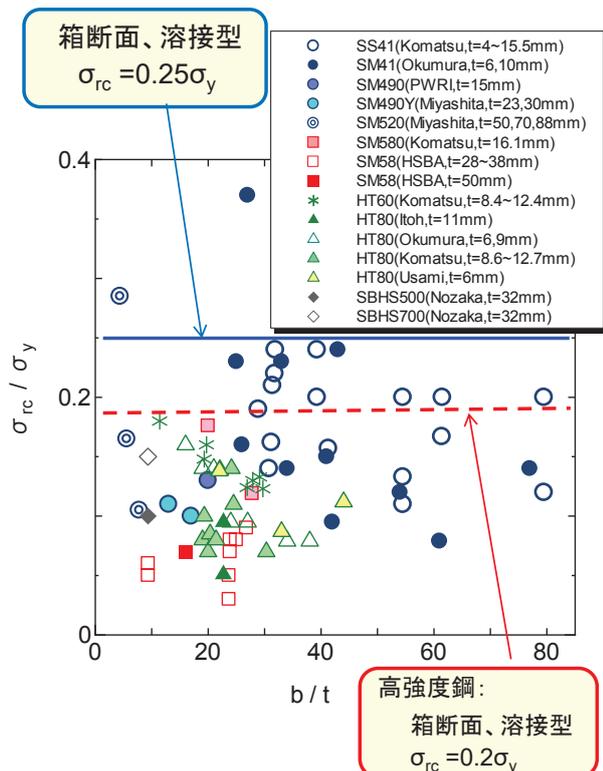
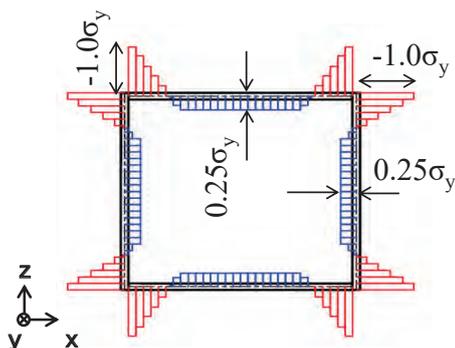
- ・ 材料の応力-ひずみ関係は、引張試験のデータを適用
- ・ 経年に伴う鋼材の応力~ひずみ関係は、不変



非線形解析における配慮事項(3)

残留応力

- ・ 残留応力の計測の必要性
- ・ 腐食減肉に伴う残留応力の再分配の影響
 - 耐荷力には影響少
- ・ 残留応力のモデル化



非線形解析における配慮事項(4)

初期たわみ

- 柱としてのたわみ
- 平板としてのたわみ
- 補剛板としてのたわみ
- 腹板としてのたわみ
- ダイヤフラムのたわみ
- 桁としてのたわみ
- 橋梁全体系としてのたわみ

既設鋼構造物を構成する部材の全体座屈と局部座屈の連成座屈挙動

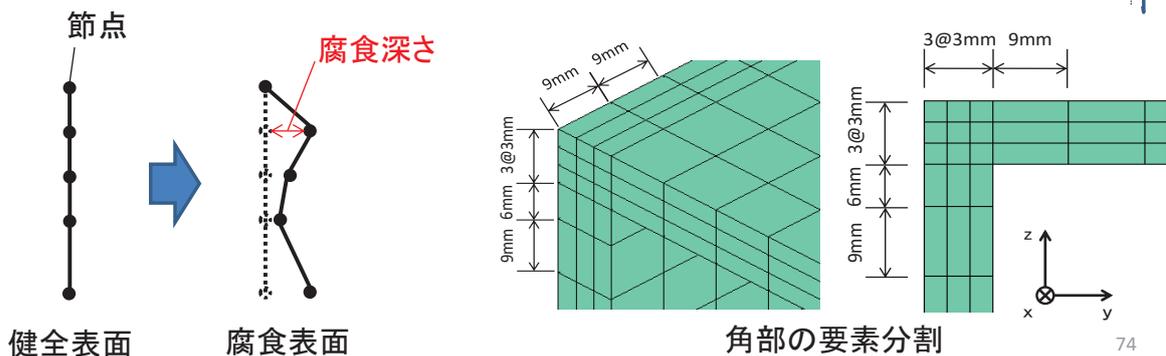
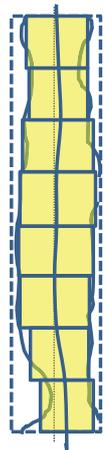
- 初期たわみおよび初期倒れの計測の必要性
- 初期たわみのモデル化
- 実験などのセッティング時不整の考慮
- 荷重の偏心

73

非線形解析における配慮事項(5)

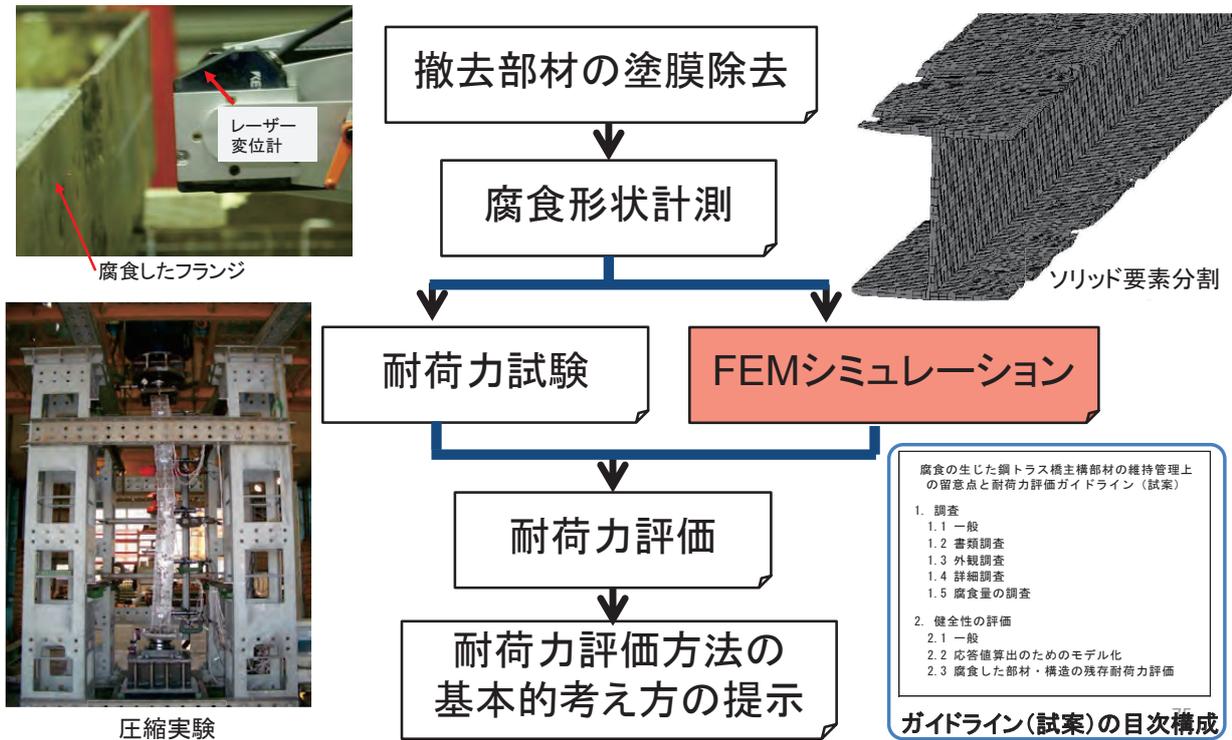
腐食モデル

- シェル要素
 - 平均板厚の評価 ?
 - 軸線の変化 ?
 - 腐食形態(不均一全体腐食、局部腐食など)と要素分割数 ?
- ソリッド要素
 - 肉厚方向の要素分割数 ?
 - 肉厚方法の要素分割数が耐荷力へ与える影響 ?



74

腐食部材の耐荷性能評価の検討手順



鋼トラス橋

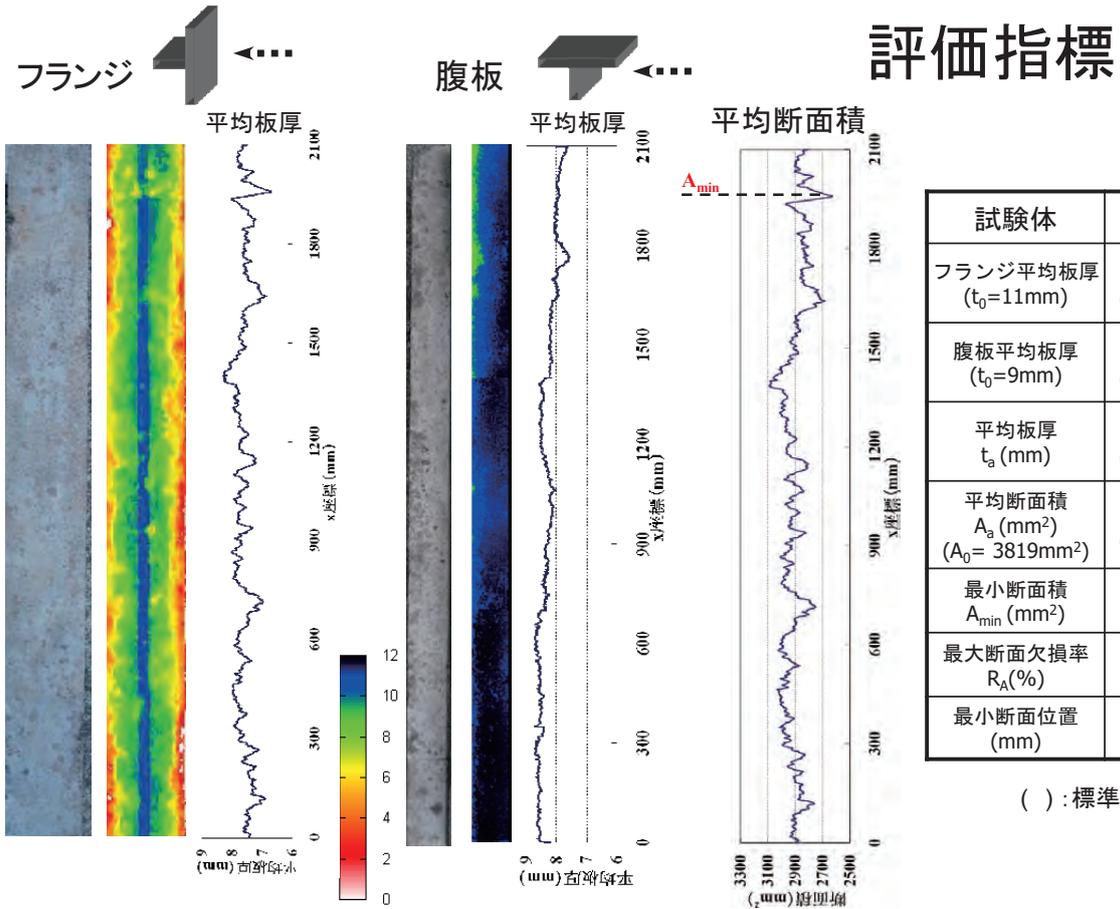
- 1962 竣工 (55 年)
- 5 径間ゲルバートラス橋
- 全長 407m



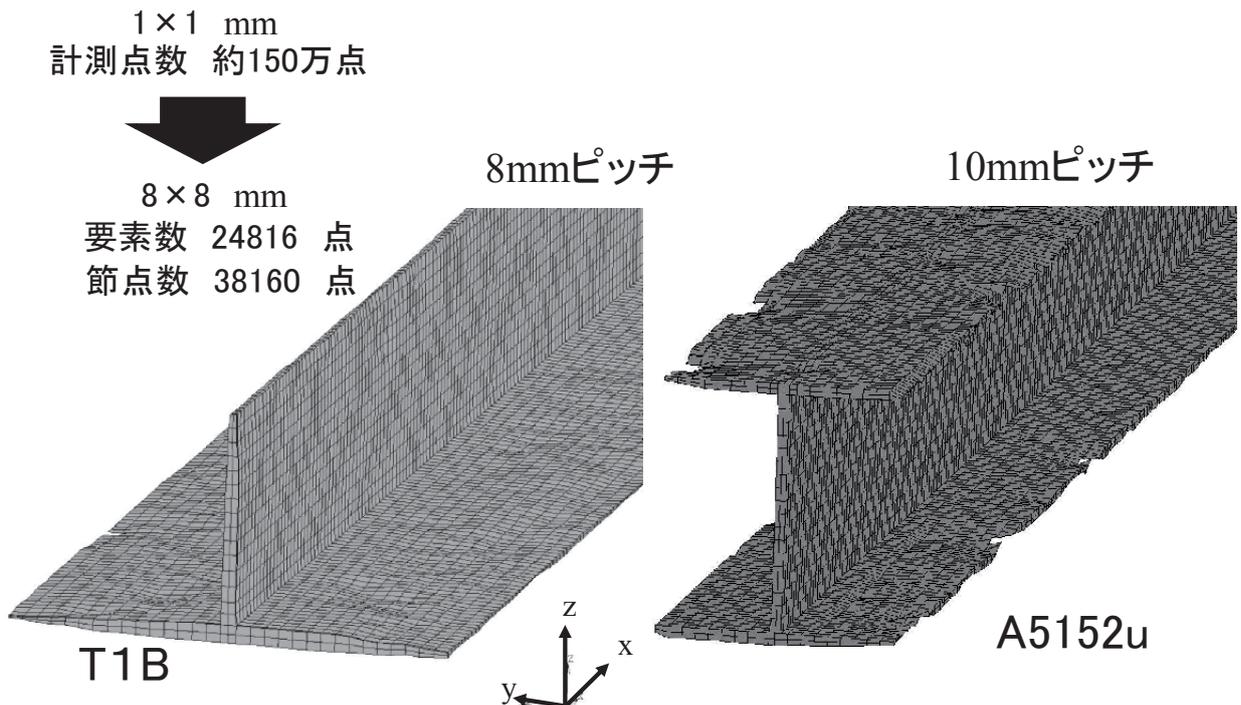
● 圧縮部材

- ・ 横構および横支材 (T、H 断面)
- ・ 斜材および弦材 (箱断面)
- ・ 格点部





腐食導入モデル(T形・H断面)



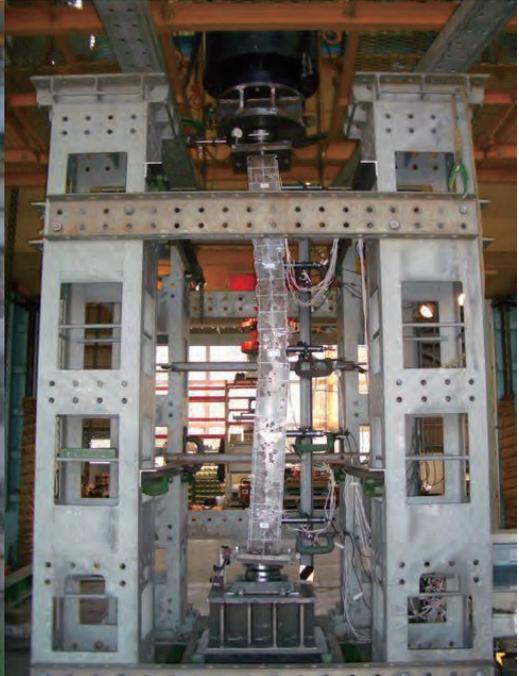
圧縮耐荷力実験



T形断面部材の載荷試験



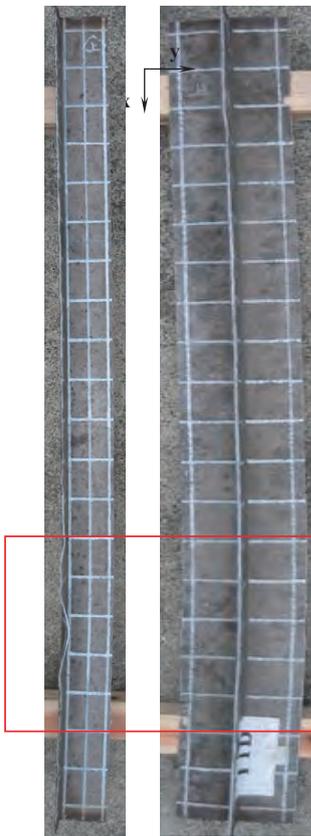
H形断面部材の載荷試験



崩壊時の試験体モード

79

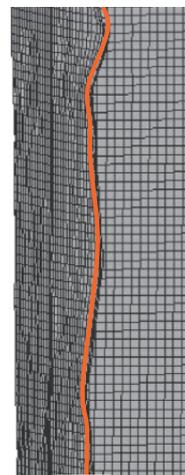
全体座屈



崩壊時挙動 T1B

局部座屈と全体座屈の
連成座屈崩壊

局部座屈

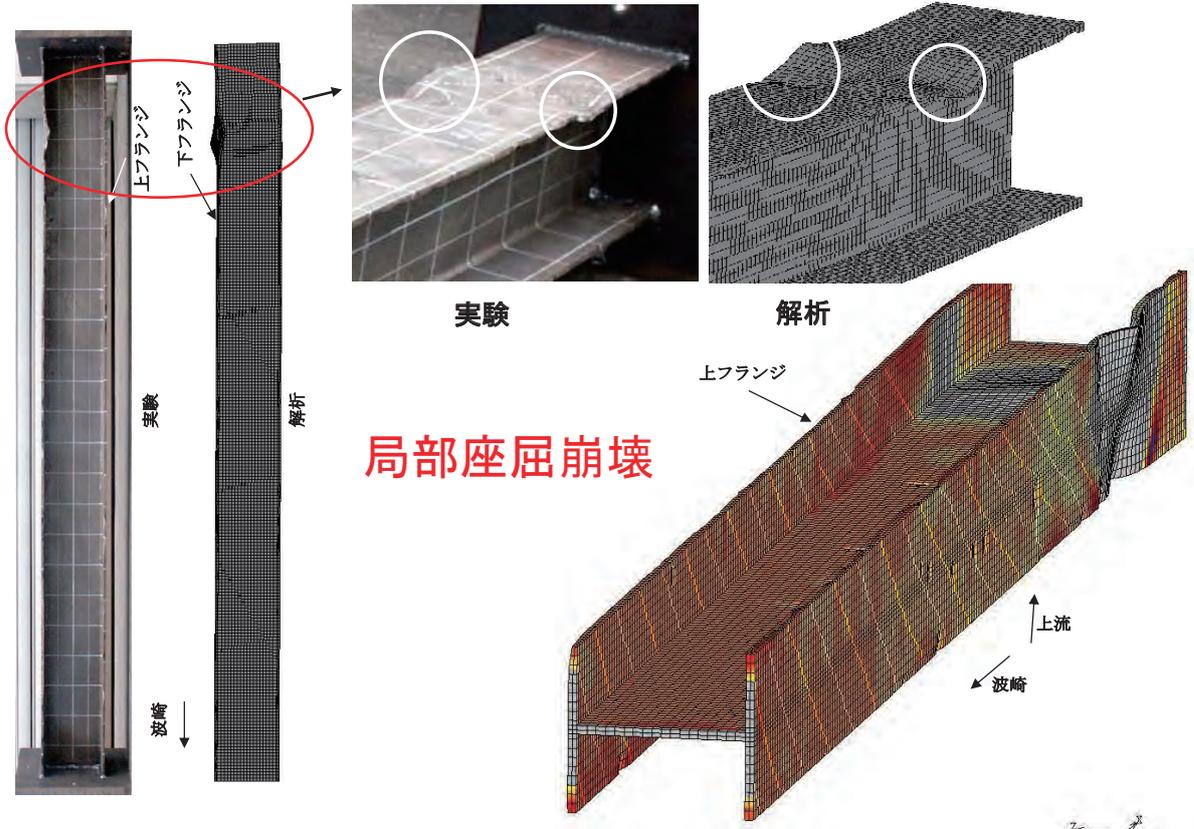


実験

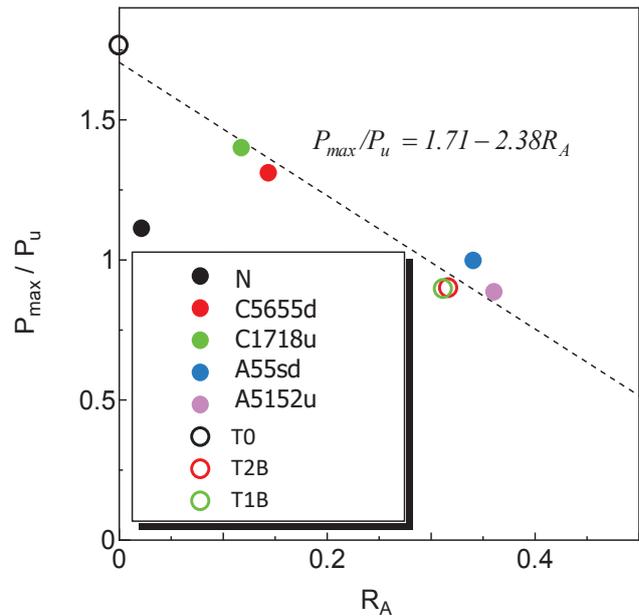
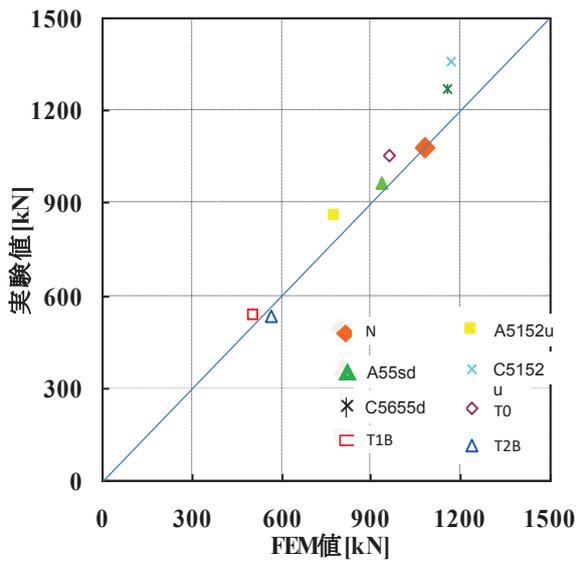
FEM

80

崩壊時挙動 C5655d



残存耐荷力評価 (H形、T形断面部材)



$$R_A = \frac{A_0 - A_{min}}{A_0}$$

R_A : 最大断面欠損率
 A_0 : 健全時の断面積
 A_{min} : 最小断面積

設計法の高度化への展望

83

設計・維持管理の高度化への期待(1)

- 道路橋、鉄道橋、港湾構造の設計基準
 - 性能照査型設計へ移行
 - 座屈設計 = 強度設計
 - 耐震設計 = 強度設計 + じん性設計
 - 耐久設計 = 維持管理性 + リダンダンシー



座屈設計、耐震設計、耐風設計、耐久設計の連携

84

腐食の損傷事例

国の修繕代行事業

大渡ダム大橋

- ・S59完成(32年経過)
- ・中央径間長240m単純補剛吊橋
- ・H26. 仁淀川町から四国地整による修繕代行依頼
- ・H29.3 補修代行事業完成



【メインケーブルカバーの腐食破断状況】



【メインケーブルカバーの腐食状況】



ケーブルの破断



原田橋



弁天橋

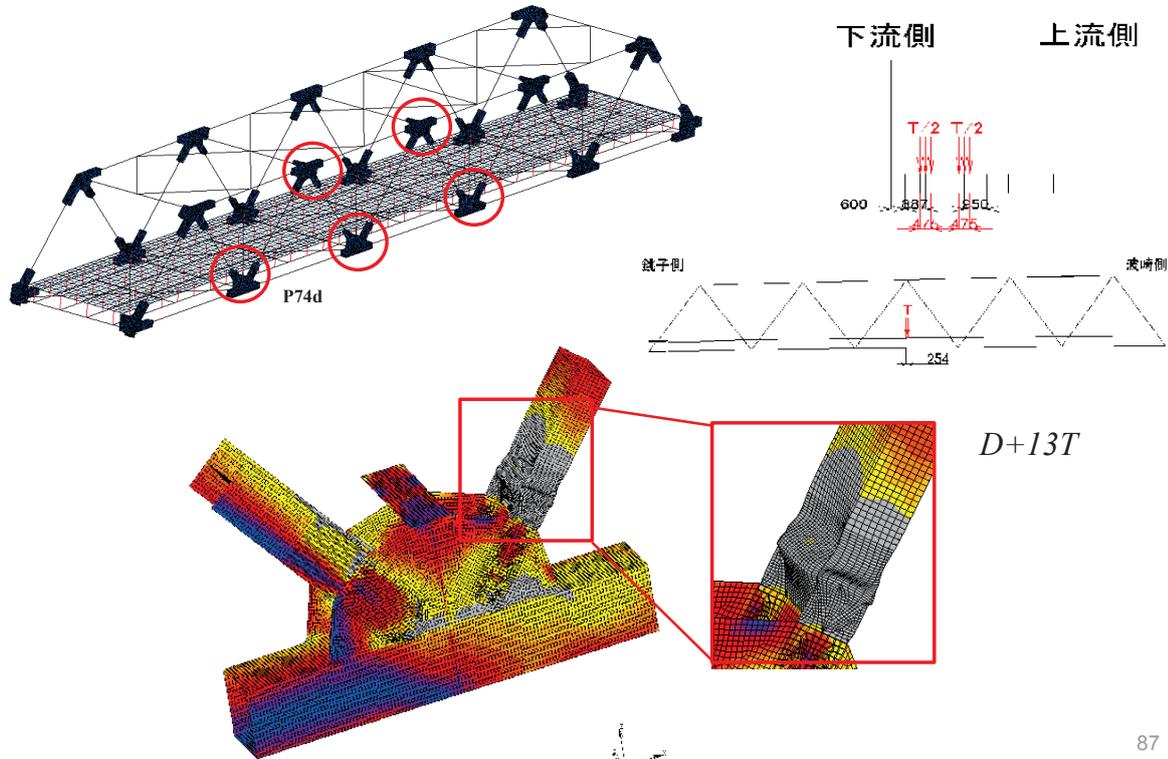


君津新橋



雪沢大橋

高精度の耐荷力評価に向けて



設計・維持管理の高度化への期待(2)

- 設計荷重(偶発作用)を超える作用に対して、粘り強く発揮できる構造物の技術開発・整備
 - 変形しつつも崩壊し難い「粘り強い構造」
 - リダンダンシーの有る構造設計
 - 冗長性(余計に大きい、多い、長い)、補完性または代替性(道示の表現)
 - ダメージコントロールを考慮した設計
 - * 被災の発生は止むを得ないとしてもその程度を極力低く抑える
 - * 被災をあらかじめ想定した範囲やモードに抑える



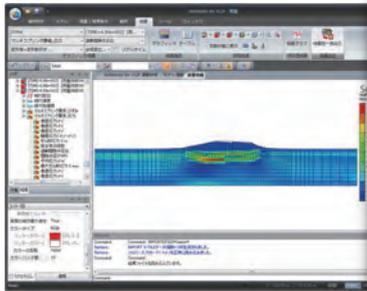
均一耐力の方針から脱皮も必要か !!

- 部材単位設計から全体構造設計への変化
- 構造の階層化
- FEM解析、非線形解析の適用

ご清聴ありがとうございます。



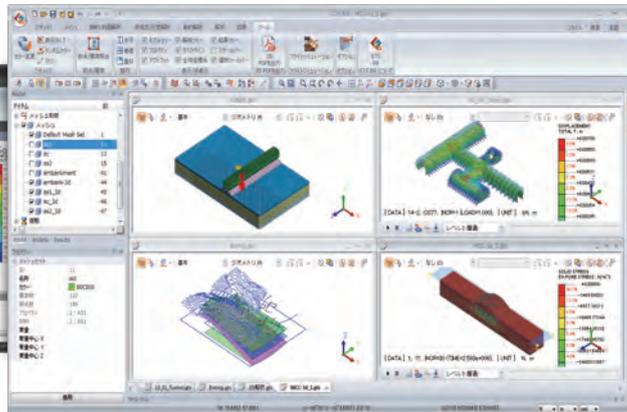
MIDAS Total Solution



SoilWorks for FLIP

FLIP専用のプリ・ポスト

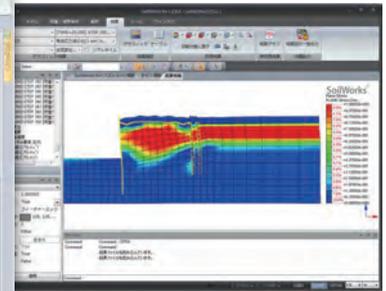
SoilWorks for FLIPはFLIP「地震時の液状化による構造物被害予測プログラム」専用のプリ・ポストです。SoilWorksの操作性をそのまま継承しており、AutoCAD感覚でデータを作成することができます。データ作成後は、FLIPを起動させ計算を実行することもでき、FLIP解析のための統合された作業環境を提供します。



GTS NX

GTS NX - 地盤分野汎用解析システム

GTS NXは最先端プリ・ポストと解析機能を搭載した新しい概念の地盤汎用解析プログラムです。GTS NXは最新のOS環境変化に合わせて64ビット、並列処理を適用した統合ソルバを搭載しており、初心者も使いやすいように直観的なメニュー形式を用意しております。また、様々な解析機能、圧倒的に速い解析速度、優れているグラフィック表現および結果整理機能などを提供します。



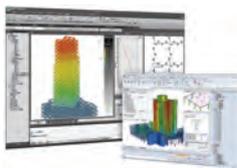
SoilWorks for LIQCA

LIQCA専用のプリ・ポスト

SoilWorks for LIQCAはLIQCA専用のプリ・ポストです。SoilWorksの操作性をそのまま継承しており、AutoCAD感覚でデータを作成することができます。データ作成後は、LIQCAを起動させ計算を実行することもでき、LIQCA解析のための統合された作業環境を提供します。
※ LIQCAは1987年京都大学の岡 二三生教授をはじめとするLIQCA開発グループにより開発された有効応力に基づく液状化解析プログラムです。

建築

Building Engineering



midas iGen

任意形状構造物の
汎用構造解析
及び許容応力度計算

midas eGen

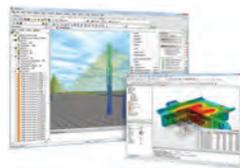
任意形状建物の
一貫構造計算
CAD基盤モデリング

midas Drawing

建築構造図面の
自動生成プログラム

土木

Bridge Engineering



midas Civil

土木分野の
汎用構造解析および
最適設計システム

midas FEA

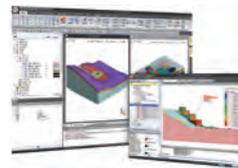
建設分野の非線形解析
および詳細解析システム

midas CIM ※開発中

3D情報モデルを活用した
土木構造物のモデリング/
図面生成/施工管理
ソリューション

地盤

Geotechnical Engineering



GTS NX

2/3次元地盤汎用解析
プログラム

SoilWorks

2次元専用地盤汎用解析
プログラム

SoilWorks for FLIP

液状化解析プログラム
FLIP用のプリ・ポスト

SoilWorks for LIQCA

液状化解析プログラム
LIQCA用のプリ・ポスト

midas GeoXD

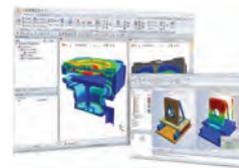
土留め設計図面生成
プログラム

SOLIFLUK PE

河川堤防の液状化
対策設計ソリューション

機械

Mechanical Engineering



midas NFX

機械分野の
汎用構造解析システム

midas NFX CFD

流動解析システム

MIDAS

建設分野 技術講座

Change is Chance



株式会社マイダスイティジャパン

〒101-0021 東京都千代田区外神田5-3-1 秋葉原OSビル7F

TEL 03-5817-0787 | FAX 03-5817-0784 | e-mail g.support@midasit.com

Copyright© Since 1989 MIDAS Information Technology Co., Ltd. All rights reserved.

<http://jp.midasuser.com/geotech>