

新都市社会技術融合創造研究会
第23回新都市社会技術セミナー

令和8年10月13日(火)
近畿地方整備局
1F共用会議室

PC橋の維持管理における デジタルツインを用いた構造性能の 評価に関する研究

神戸大学
大学院工学研究科市民工学専攻
教授 三木朋広

研究背景 (PC部材の設計と維持管理)

- PC部材の設計: 一般に, 部材にプレストレスを導入してひび割れ発生を許容しないことで, 部材を全断面有効と見なす.
- しかし, 既設PC橋をみると, 過去に主桁に沿ったひび割れや鋼材腐食などの変状が生じた事例がある.



P C 鋼材の腐食が進行すると,



鋼材の断面減少
さらに鋼材破断



影響が大きい
プレストレス消失
部材耐荷力の低下

PC橋においては変状の早期発見と
劣化初期の対策が極めて重要

研究の目的

耐久性の評価に
資する情報として

モチベーション: **時間軸に配慮した構造性能評価**

- 本研究では、橋梁構造の**安全性とその短期的な将来予測**
の評価精度の向上を目的とした現場検証を行う。

○ひび割れや鋼材腐食等の変状を再現した**PC橋全体系モデル(デジタルツイン)**を構築して、変状が進行した場合の影響を分析し、**PC構造の安全性、耐久性の評価に必要な情報を整理**する。

○**プレストレスの把握に向けた非破壊検査手法**の適用性と留意点を整理し、PC構造の性能評価に必要な調査項目と精度等を提案する。

→ 定期点検で変状を把握した後に、**詳細調査の要否や調査項目の選定の参考資料を提示**する。

活動メンバー

構成(学8名, 産11名, 官7名)
合計26名

国交省近畿地方整備局 道路部
近畿道路メンテナンスセンター
近畿技術事務所

プロジェクトリーダー

- 三木朋広(神戸大)
研究総括, デジタルツインの構築, 実験実施

顧問

- 宮川豊章(京都大)
研究助言, PC橋維持管理に関する指導, 助言

活動メンバー

- 大学6名(京都大, 大阪工業大, 大阪大, 関西大, 北海道大)
- 建設コンサルタンツ協会 近畿支部5名: 復元設計, 非破壊検査手法の調査と現場適用性の検証, デジタルツインの実装
- PC建設業協会 関西支部6名: 点検調書の分析, PC橋の維持管理に資する手引き案の作成



活動内容

令和5年度

- 点検調書に基づく**PC構造特有の変状**に関する情報の整理
- **詳細調査**によるPC桁の安全性, 耐久性の評価に資する情報の整理
- **非破壊検査手法**(鋼材破断, グラウト充填, 残存プレ)の原理, 特徴の整理
- PC橋を対象とした**デジタルツインモデル構築**に向けた情報整理

令和6年度

- 安全性, 耐久性の評価に資する**PC構造特有の変状に関する情報の体系化**
(2年以内にとりまとめ提案した)
- **損傷再現実験, 現場試験の実施, 非破壊検査手法による計測試験**
- PC橋のデジタルツインモデル構築, **現場展開における作業フロー**の素案作成

令和7年度

- **非破壊検査の現場適用性, 適用範囲, 測定精度, 留意点の提案**
(3年以内に調査研究を実施して提案した)
- **デジタルツインを用いた分析**, PC部材安全性, 耐久性評価に資する情報提案
- PC橋のデジタルツインモデル構築, **現場展開における作業フローと課題提示**



成果① プレストレストコンクリート(PC)橋のデジタルツイン 統合モデルによる構造性能評価・維持管理手引き(案)

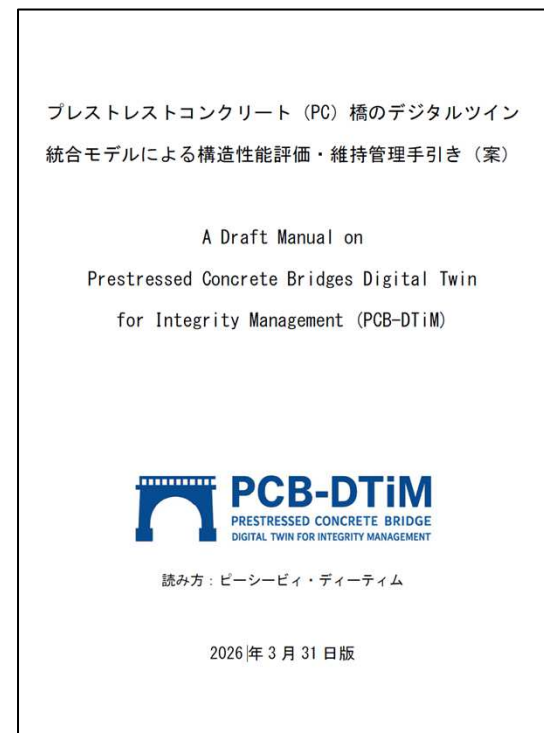
A Draft Manual on
Prestressed Concrete Bridges Digital Twin for Integrity Management
(PCB-DTiM) 読み方:ピーシービィ・ディーティム

本手引きは、**PC橋のデジタルツイン**によって構造性能を評価するために必要な情報、手順をまとめたものである。

「デジタルツイン」は、**実際の構造物と対(双子)となるコンピュータ上の数値モデル**のことである。広義には、実空間の情報と数値モデルの情報を**多面的、空間的、時間的に連動させたシステム**としても取り扱われる。

対象とする構造の状態やあり方の将来予測について、数値データで**見える化できる手法**として、インフラ分野を含め、様々な場面での適用が提案されている。

対象： 新設構造物，既設構造物を想定
新設構造物 PC橋の**形状、材料のモデル化、解析手法**
既設構造物 PC橋における**変状のモデル化**



成果① プレストレストコンクリート(PC)橋のデジタルツイン
統合モデルによる構造性能評価・維持管理手引き(案)の構成

第1編「PC橋デジタルツインのモデル化と解析の手順」

非線形有限要素解析によるPC 橋の構造性能評価に資する,
解析計画, PC橋の形状・材料のモデル化, 変状のモデル化, 非
線形解析の実施, 解析結果の出力, その妥当性の確認の方法

第2編「PC橋デジタルツインと構造設計の連携に関するQ&A」

デジタルツインの作成や構造性能を評価するときに想定される
課題, 例えば設計図書として設計計算書や竣工図面がない場合
や情報が不足する場合に参考になるヒント

第3編「PC鋼材の規格変遷」

PC鋼材の種類, 強度, 化学成分, 製造工程, 諸特性等の変遷

第4編「非破壊試験の現場適用における留意点」

デジタルツインに必要な情報を取得する際における現場調査の
留意点やデータ取得のポイント



成果① PC橋デジタルツインのモデル化と解析の手順

第1章 はじめに

- 1.1 本手引きの目的
- 1.2 本手引きの構成
- 1.3 想定される本手引きの使い方
- 1.4 用語の説明

第2章 解析計画

- 2.1 解析の実施手順
- 2.2 解析計画の設定
 - 2.2.1 解析の目的の明確化
 - 2.2.2 解析対象の設定
 - 2.2.3 解析モデルの作成
 - 2.2.4 解析方法の選定
 - 2.2.5 解析計画書の作成

第3章 構造物のモデル化

- 3.1 形状のモデル化
 - 3.1.1 要素の種類
- 3.2 材料のモデル化
 - 3.2.1 コンクリート
 - 3.2.2 鋼材
 - 3.2.3 鋼材とコンクリート間の付着のモデル化
 - 3.2.4 境界面の摩擦のモデル化

3.3 作用・境界条件のモデル化

- 3.3.1 荷重のモデル化
- 3.3.2 プレストレスのモデル化
- 3.3.3 境界条件の設定

3.4 変状を再現するための材料のモデル化

- 3.4.1 コンクリートの変状
- 3.4.2 PC鋼材の変状
- 3.4.3 鉄筋の変状

第4章 解析の実施

- 4.1 解析条件の設定
 - 4.1.1 解析制御方法
 - 4.1.2 出力制御
- 4.2 ステップ解析の実施

第5章 解析結果の出力と妥当性の確認

- 5.1 解析実施前の事前検証
- 5.2 解析結果の妥当性の確認
 - 5.2.1 巨視的観点から解析結果の妥当性を確認する項目
 - 5.2.2 微視的観点から解析結果の妥当性を確認する項目
 - 5.2.3 解析結果が妥当でない場合の要因の一例
- 5.3 解析手法の妥当性
- 5.4 応答値の見方
- 5.5 3次元情報の可視化と共有

参考文献



成果① PC橋デジタルツインと構造設計の連携 に関するQ&A

1. はじめに.....	1
Q1.1-1 PC 橋のデジタルツインによる構造性能の評価を行う場面は？.....	1
Q1.1-2 PC 橋のデジタルツインによる構造性能の評価を行う際の留意事項は？.....	2
2. 解析計画について.....	3
Q2.1-1 デジタルツインによる構造性能の評価のための解析計画はどのように設定する？	3
3. 構造物のモデル化について.....	4
3.1 形状のモデル化.....	4
Q3.1-1 構造物のモデル化において参考とする情報は何か？また、必要な情報がない場合や不足する場合にどのような情報に基づいて構造物をモデル化するか？.....	4
Q3.1-2 構造設計に必要な形状寸法等の精度、構造物の形状のモデル化に必要な精度は？ ..	10
Q3.1-3 PC 鋼材、鉄筋など、構造設計に必要な条件は？.....	13
3.2 材料のモデル化.....	14
Q3.2-1 デジタルツインの入力値としてどのようなデータを使用するか？.....	14
3.3 作用・境界条件のモデル化.....	15
Q3.3-1 作用のモデル化のポイントは？.....	15
Q3.3-2 プレストレスのモデル化のポイントは？.....	16
Q3.3-3 境界条件のモデル化のポイントは？.....	18
3.4 変状を再現するための材料のモデル化.....	19
Q3.4-1 コンクリートに変状が見られる場合はどのように考慮するか？また、それらを考慮する場合、構造物全体を等しい強度とするのか、部位ごとに強度を変えるか？.....	19
Q3.4-2 PC 鋼材の変状が見られる場合はどのように考慮するか？また、それらを考慮する場合、構造物全体を等しい強度とするのか、部位ごとに強度を変えるか？.....	21
Q3.4-3 PC 鋼材の腐食による破断が生じた場合のプレストレスの評価方法は？.....	27
Q3.4-4 鉄筋の変状が見られる場合はどのように考慮するか？また、それらを考慮する場合、構造物全体を等しい強度とするのか、部位ごとに強度を変えるか？.....	30
Q3.4-5 材料劣化によって構造細目を守れなくなる状況はあるか？その場合に構造物のモデル化においてどのように考慮するか？.....	30

Q デジタルツインの入力値とその精度は？

Q プレストレスのモデル化のポイント

Q 変状のモデル化のポイント



成果① PC橋デジタルツインと構造設計の連携に関するQ&A

4. 解析の実施について.....	31
4.1 解析条件の設定.....	31
Q4.1-1 解析条件の設定における留意点は？	31
4.2 ステップ解析の実施.....	31
Q4.2-1 ステップ解析の実施における留意点は？	31
5. 解析結果の出力と妥当性の確認について.....	32
5.1 解析実施前の事前検証.....	32
Q5.1-1 解析結果が現実的ではない，想定と異なるなどを見つける着眼点は？	32
5.2 解析結果の妥当性の確認.....	32
Q5.2-1 解析結果の妥当性の確認における留意点は？	32
5.3 解析手法の妥当性の確認.....	32
Q5.3-1 解析手法の妥当性の確認における留意点は？	32
5.4 3次元情報の可視化.....	32
Q5.4-1 3次元情報の可視化の具体的な事例は？	32
5.5 2次元設計の照査値と FEM による応答値の関係	34
Q5.5-1 PC 部材の設計における着目断面に基づく変状箇所の感度分析のポイントは？	34
Q5.5-2 2次元設計の照査値と FEM による応答値を比較できる項目はあるか？	37
6. モデル化の事例.....	38
6.1 1 径間 5 主桁 T 桁のモデル化の例	38
6.2 鉄道高架橋のラーメン構造のモデル化の例.....	41
6.3 PC 橋の構造性能に基づく構造物の診断の例.....	42

Q 解析結果の妥当性の確認のポイント

モデル化の事例 診断の例



成果① PC橋デジタルツインと構造設計の連携に関するQ&A

2. 構造物のモデル化

2.1 形状のモデル化

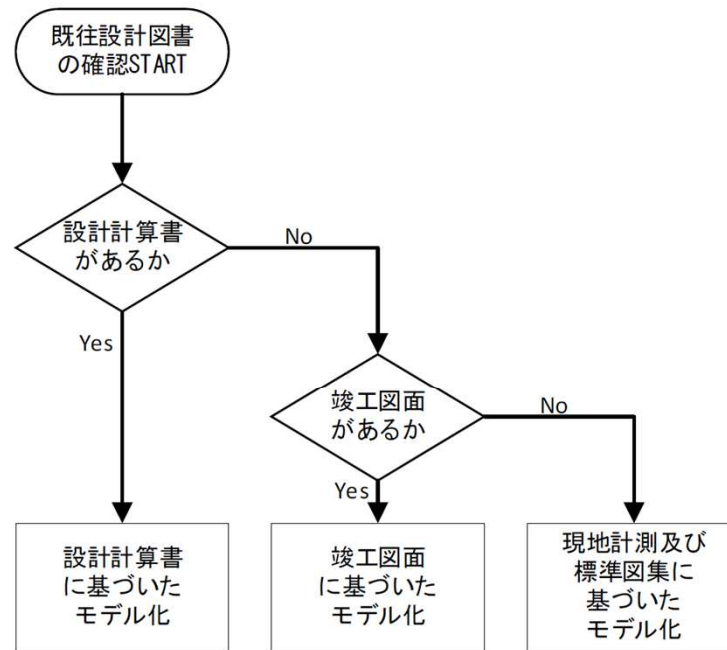


図 3.1.1 情報の有無、不足によって使用できる情報が異なる場合の構造物のモデル化のフロー

表 3.1.1 既往設計図書から得られる情報

取得可能な情報		設計計算書に基づいたモデル化	竣工図面に基づいたモデル化	現地計測及び標準図集に基づいたモデル化	備考
1	適用基準類	○	○	※1	竣工図書、竣工年次等から確認
2	構造諸元	○	○	現地計測＋標準図集	計算書の入力、図面から確認
3	使用材料、材料強度	○	○	標準図集＋非破壊or微破壊試験	コンクリート設計基準強度、PC鋼材・鉄筋の種別等
4	PC鋼材配置、鉄筋配置	○	○	標準図集	PC鋼材：有効高さ、定着位置、鉄筋：鉄筋径と配置
5	プレストレス量	○	※2	※2	

※1：道路台帳や橋梁台帳、点検資料等から竣工年次が分かれば、適用基準類の想定は可能。

※2：当初設計基準と復元設計結果より入力の妥当性を検証。



成果① PC橋デジタルツインと構造設計の連携に関するQ&A

3. 構造物のモデル化について

3.1 形状のモデル化

Q3.1-2 構造設計に必要な形状寸法等, 構造物の形状のモデル化に必要な精度は?

構造設計に用いる形状寸法は, **10 mm ラウンド(10 mm 刻みでの評価)**で設定することが基本である。ただし, 構造物のモデル化における形状寸法の精度の決定の際には, 寸法計測精度, 検討目的に応じて変更することが望ましい。

既設構造物は, 施工時に道路橋示方書等の関係諸基準の管理基準に準拠して施工されているため, **各管理基準における施工精度の値も参考にすると良い。**

JIS 桁及び標準設計等における部材寸法, 形状寸法の設定方法も参考になる。

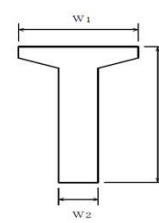
<参考資料>

・部材寸法の施工精度(参考文献1)より)

表-解 17. 14. 1 部材寸法の施工精度

項 目	施 工 精 度
垂直部材の長さ寸法	設計寸法の $\pm 1\%$ 又は $\pm 30\text{mm}$ のうち小さい方の値。
水平部材の長さ寸法	設計寸法の $\pm 1\%$ 又は $\pm 30\text{mm}$ のうち小さい方の値。
柱及び桁の断面寸法	設計寸法の $\pm 2\%$ 又は $\pm 20\text{mm}$ のうち小さい方の値。
床 版 厚	$+20 \sim -10\text{mm}$

ポステン桁製作工

測 定 項 目	規 格 値	測 定 箇 所
幅(上) w_1	$+10$ -5	
幅(下) w_2	± 5	
高さ h	$+10$ -5	
桁長 l 支間長	$l < 15 \dots \pm 10$ $l \geq 15 \dots \pm (l-5)$ かつ $\sim 30\text{mm}$ 以内	
横方向最大タワミ	$0.8l$	

土木工事施工管理基準及び規格値(案)

令和8年3月
国 土 交 通 省

成果① PC橋デジタルツインと構造設計の連携に関するQ&A

3. 構造物のモデル化について

3.3 作用・境界条件のモデル化

Q3.3-2 プレストレスのモデル化のポイントは？

ケーブルやPC 鋼材のプレストレスは、解析モデルに合わせて適切にモデル化する。プレストレスのモデル化において、ケーブルやPC 鋼材にプレストレスを ①外力として与える方法と、②温度荷重、初期ひずみ、初期応力、初期断面力のように内力として与える方法がある。

PC 鋼材に導入するプレストレスに相当する応力もしくは緊張力の大きさについては、設計で考慮した有効プレストレスや解析で想定する材齢などに応じて適切な値を設定するのがよい。

表 3.3.1 プレテンション方式・ポストテンション方式の PC 部材のモデル化の例

プレストレス導入方法	鉄筋要素（完全付着）	鉄筋要素（付着特性考慮）
プレテンション方式	Case 1（図 3.3.1）	Case 2（図 3.3.2）
ポストテンション方式	Case 3（図 3.3.3）	Case 4（アンカープレートモデル化無し）（図 3.3.4） Case 5（アンカープレートモデル化あり）（図 3.3.4）

【Case4, Case5】 Case4, 5ともに、基本的には Case2 と同じである。

Case2 との違い

- ✓ Phase1 で張力と反力と自重を同時載荷し、Phase2 で自重のみに切り替える（＝プレストレスは自己釣り合い）
 - ✓ Case4 はアンカープレート無し、Phase2 で鉄筋端部とコンクリート節点を TYING する（＝セットロスを考慮しない）
 - ✓ Case5 はアンカープレート有り、Phase2 で鉄筋端部とアンカープレート節点を TYING する（＝セットロスを考慮する）
 - ✓ プレストレスの反力は張力とは別ケースとして作成する。
- Case4 はコンクリートへの節点荷重(NODAL/FORCE)、Case5 はプレートへの線分布荷重(ELEMENT/EDGE/FORCE)

手順

★ Phase1: 張力 NOBOND

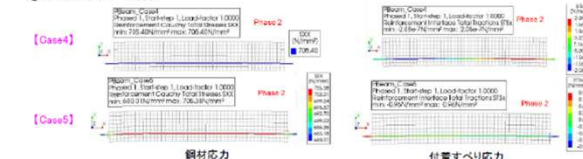
① LOAD ステップ：自重+張力+反力の同時載荷

★ Phase2: 実際の付着特性に入れ替え、TYING を ON

(ACTIVE REINFO 'Line 1' / MATERI 2)

① START ステップ：自重のみ載荷で釣り合い計算(LOAD PREVIO OFF, ADD LOADNR 1)

② LOAD ステップ：外力



※ 緊張力導入時にコンクリートと PC 鋼材の間は付着なしと設定し、PC 鋼材に緊張力を外力として作用させる。プレストレス力の導入は、鋼材端部に設置したアンカープレート（鋼材要素で別途モデル化する）に作用させ、アンカープレートとコンクリートを接続（Tying）させてコンクリートに応力を伝達させる。アンカープレートの有無によってモデル化の詳細が異なる。

図 3.3.4 ポストテンション方式（付着特性考慮）のモデル化の例

成果① PC橋デジタルツインと構造設計の連携に関するQ&A

3.4.1 コンクリートの変状

変状が生じたコンクリートでは、健全なコンクリートと比較して、圧縮強度、引張強度、静弾性係数などの力学特性が異なることが想定される。著しい変状が生じた場合、健全なコンクリートを対象とした設計で想定した強度や弾性係数より小さいことが想定される。

劣化の要因ならびに変状の程度をそれぞれ適切に把握し、必要に応じてデジタルツインに反映するのがよい。

対象とする構造物の変状の程度が小さい場合は、その変状の影響を踏まえた材料特性を考慮し、3.2 材料のモデル化で示した応力-ひずみ関係を用いて解析することもできる。その場合でも、Q&A Q3.2-1(1)の方法でコンクリートの力学特性を確認するのがよい。

3.2 材料のモデル化

Q3.2-1 デジタルツインの入力値としてどのようなデータを使用するか？

(1) コンクリート

- 1) 圧縮強度 2) 静弾性係数 3) その他の力学特性
- (2) 鋼材・鉄筋 (3) 補修材料

参考となる
既往研究を紹介

3.4 変状を再現するための材料のモデル化

Q3.4-1 コンクリートに変状が見られる場合、どのようにデジタルツインに導入するか？

- (1) 構造物全体の均一な強度低減によるモデル (2) 部位ごとに強度を変えるモデル



成果② PC 鋼材の変遷について

【概要】国内におけるPC 鋼材について、以下に示す既往文献を調査し、**化学成分や製造工程、PC鋼材の諸特性の変遷**を整理した。なお、本資料は、過去の文献を取りまとめたものであり、PC鋼材の諸特性(腐食特性)については、最新の知見とは異なる部分がある点を留意されたい。

〔対象文献〕

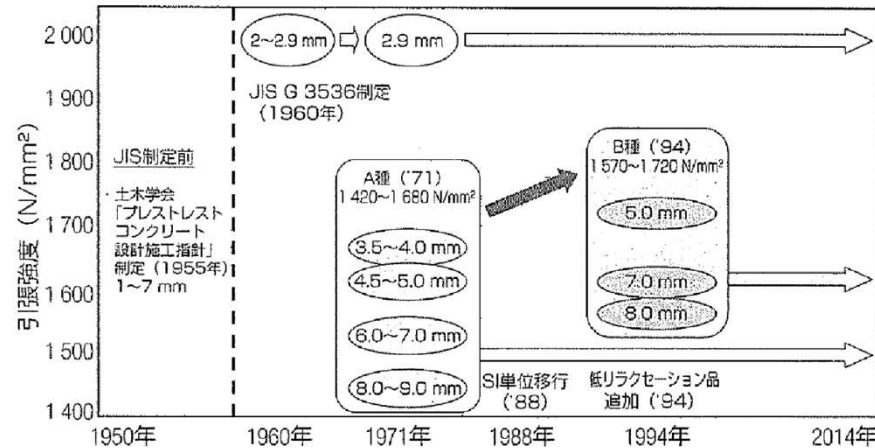
- PC鋼材の製造とその取扱いについて、富岡敬之、プレストレストコンクリート, 1971.4
- PC鋼材, 谷餘士雄, コンクリート・ジャーナル, 1972.9
- PC鋼材の歴史をふり返って, 倉内実, プレストレストコンクリート, 1983.11
- PC橋のPC鋼材の変遷, 山田真人, 橋梁と基礎, 2014.8
- 仮設PC鋼材設計・施工マニュアル, 高速道路調査会, 1997.7

【内容構成】

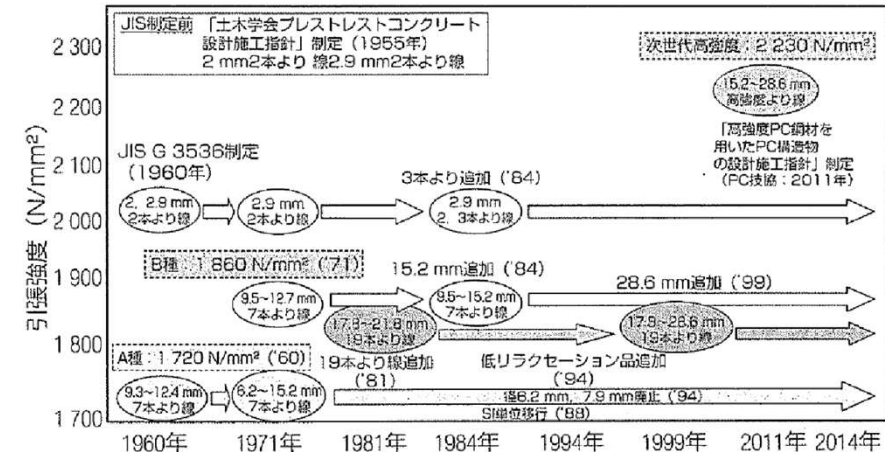
1. PC 鋼材の種類と強度(PC 鋼線、PC 鋼より線、PC 鋼棒)
2. **PC 鋼材の製品規格と化学成分**
3. **PC 鋼材の製造方法**
4. PC 鋼材の諸特性
 - 1) 強度特性
 - 2) リラクセーション特性
 - 3) 応力腐食特性
5. PC 鋼材の破断事例



成果② PC 鋼材の種類と強度の変遷



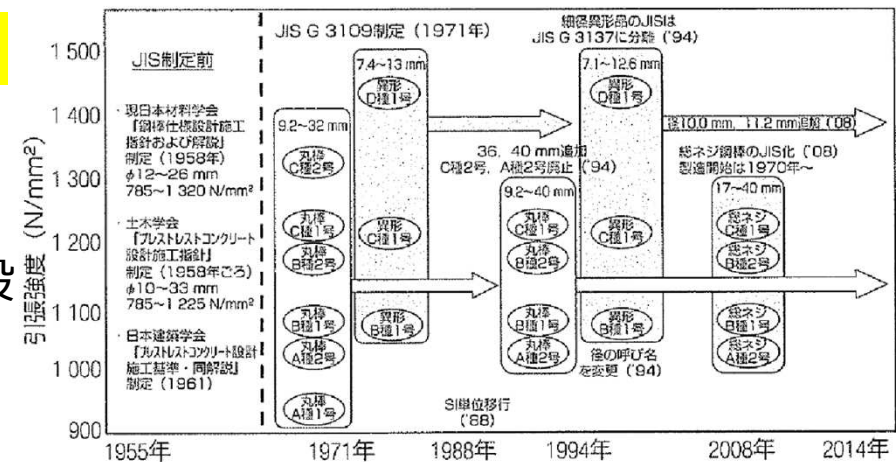
PC 鋼線のサイズと強度の変遷



PC 鋼より線のサイズと強度の変遷

PC 鋼材には大別して**PC 鋼線**、**PC 鋼より線**、**PC 鋼棒**の3種類がある。

歴史的にはPC 鋼線が最初に実用化され、初期から国産のPC 鋼線が提供された。土木学会「プレストレストコンクリート設計施工指針 (1955 年)」 $\phi 1.0 \sim 7.0 \text{ mm}$ が制定された。



PC 鋼棒のサイズと強度の変遷

成果② PC 鋼材の製造方法

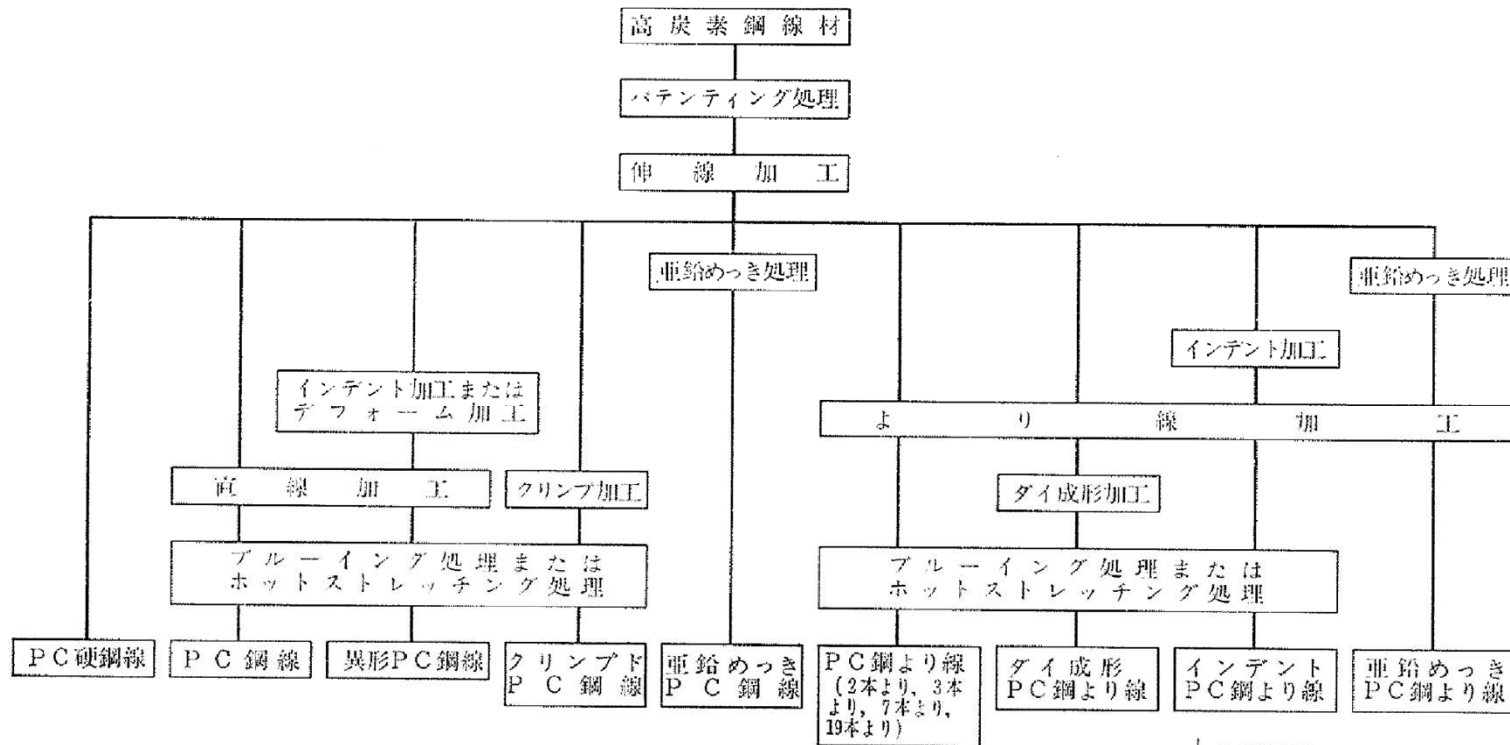


図4 PC 鋼線およびPC 鋼より線の製造方法

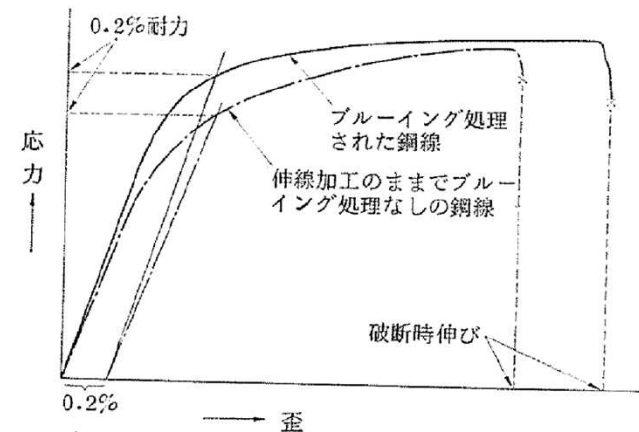


図5 ブルーイング処理の有無による応力歪曲線の比較

成果③ PCケーブル等の軸力の把握に向けた各種非破壊検査の整理，留意点等の提案

- 既往の非破壊検査手法の原理，特徴の整理：

- 鋼材破断の検出
- グラウト充填状況の確認
- 残存プレストレスの推定

を目的とした非破壊検査手法の情報集約は実施済み。

- 現場適用における課題の整理，
- デジタルツインに入力する項目と精度を整理する。

- 損傷再現実験の実施，各検査手法の結果の整理：

詳細調査の要否や調査項目の選定を目的とした各手法の位置付けを明確にする。

- 現場試験：非破壊検査を現地で実施する際の適用性，適用範囲，測定精度，留意点の調査研究

成果③ 非破壊試験の現場適用における留意点

第1章 非破壊検査手法の原理, 特徴の整理

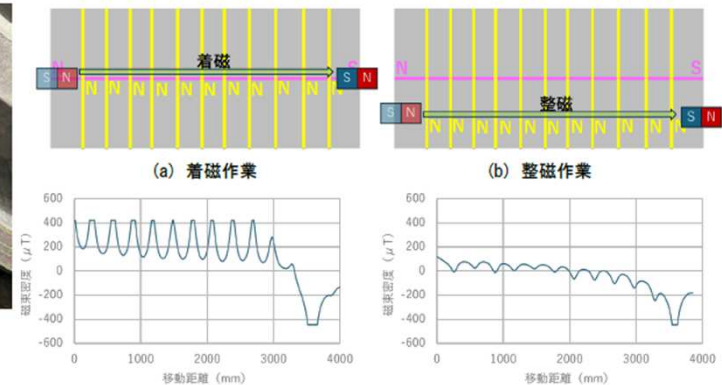
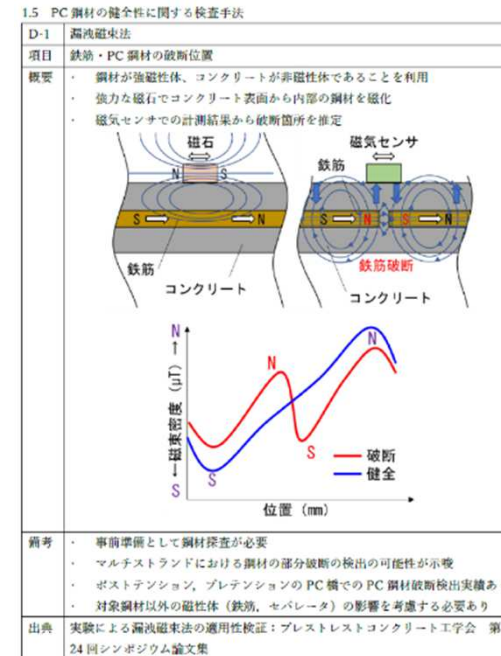
- 1.1 調査項目に対する検査手法の選定
- 1.2 鋼材配置および鋼材量に関する検査手法
- 1.3 コンクリートの物性値に関する検査手法
- 1.4 PC鋼材の健全性に関する検査手法
- 1.5 グラウトの充填状況に関する検査手法
- 1.6 プレストレス量に関する検査手法
- 1.7 まとめ

第2章 現場試験における非破壊検査の適用性

- 2.1 調査の対象および実施箇所
- 2.2 調査概要
- 2.3 調査結果_鉄筋探査
- 2.4 調査結果_点群データ計測
- 2.5 調査結果_漏洩磁束法
- 2.6 調査結果_電磁パルス法
- 2.7 調査結果_超音波法



写真 2.2.7 磁束密度の計測



(c) 着磁後の測定磁束密度

(d) 整磁後の測定磁束密度

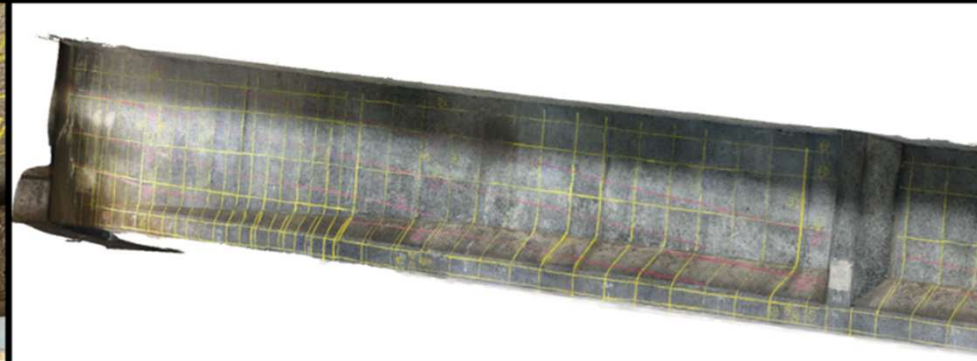
図 2.5.1 配筋の帯磁による測定磁束密度への影響の低減

成果③ 非破壊検査手法試行 行松高架橋ポステン桁における計測および取得結果一例

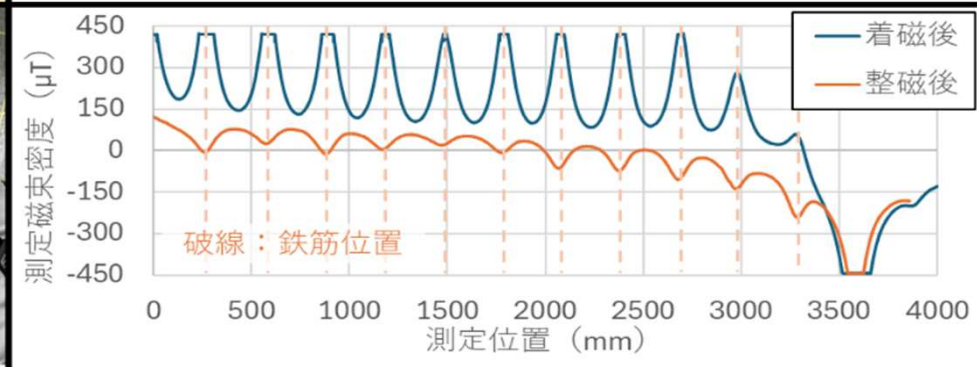
鋼材探査



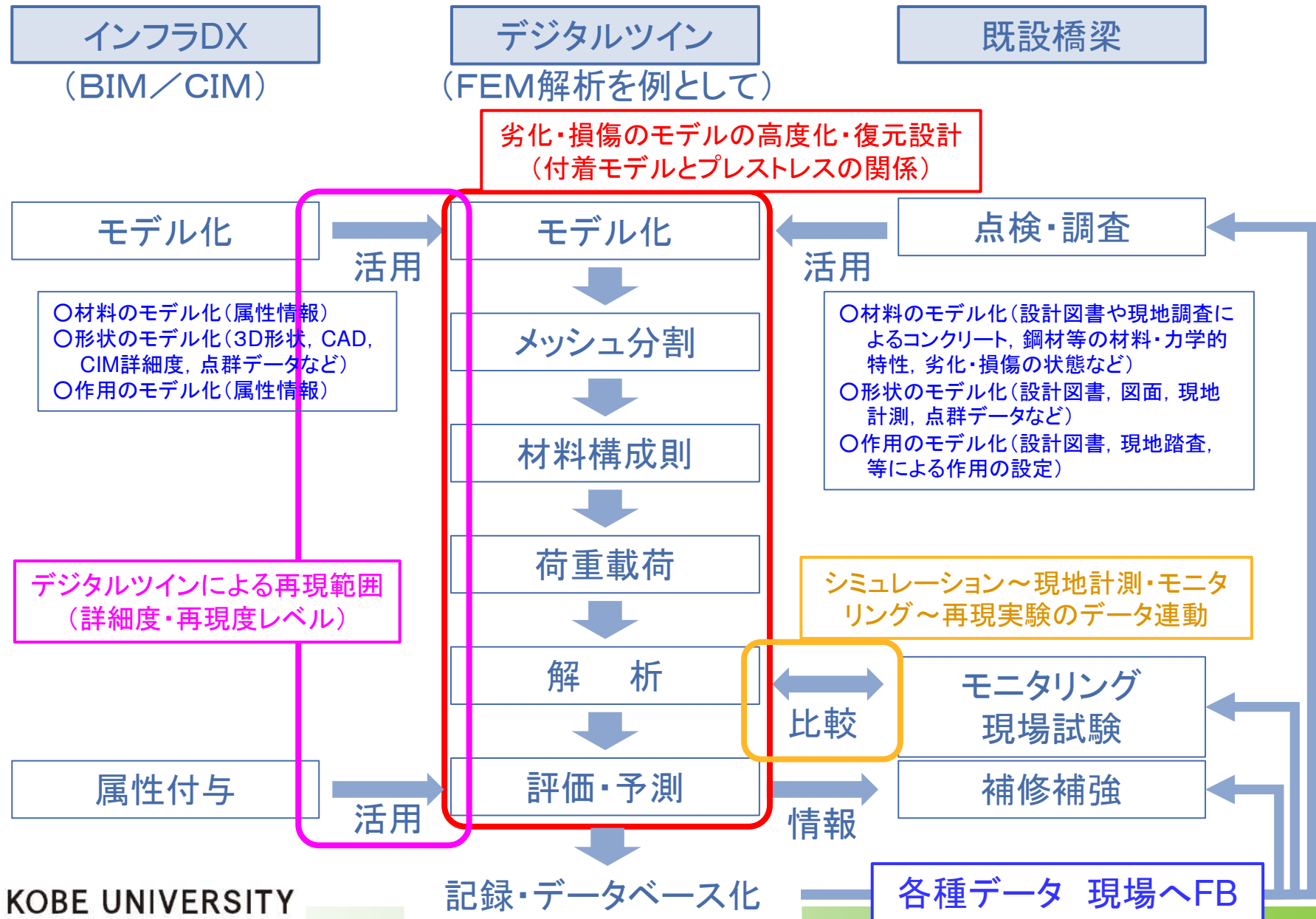
点群データ



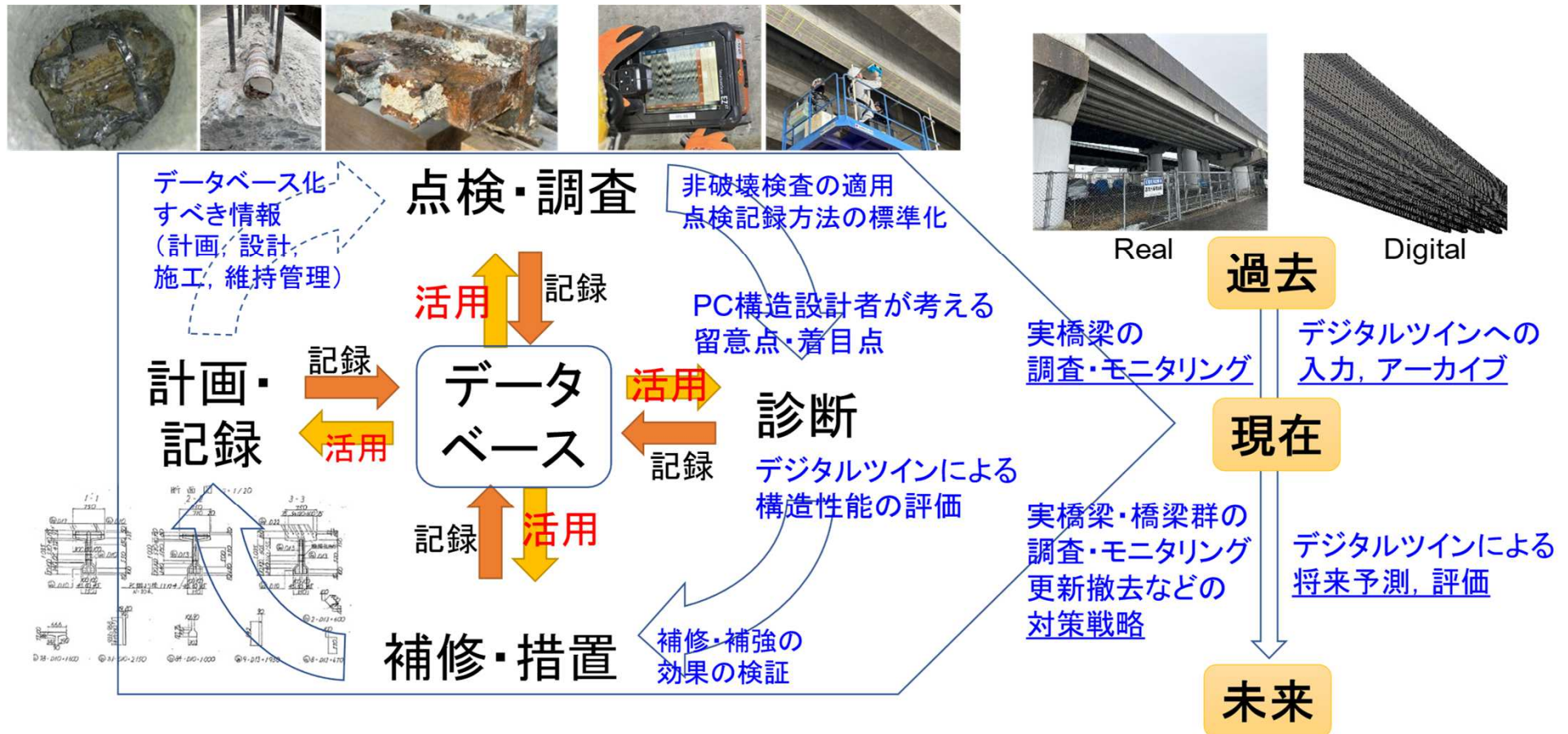
PC鋼材損傷



成果③デジタルツイン実装の作業フロー提案

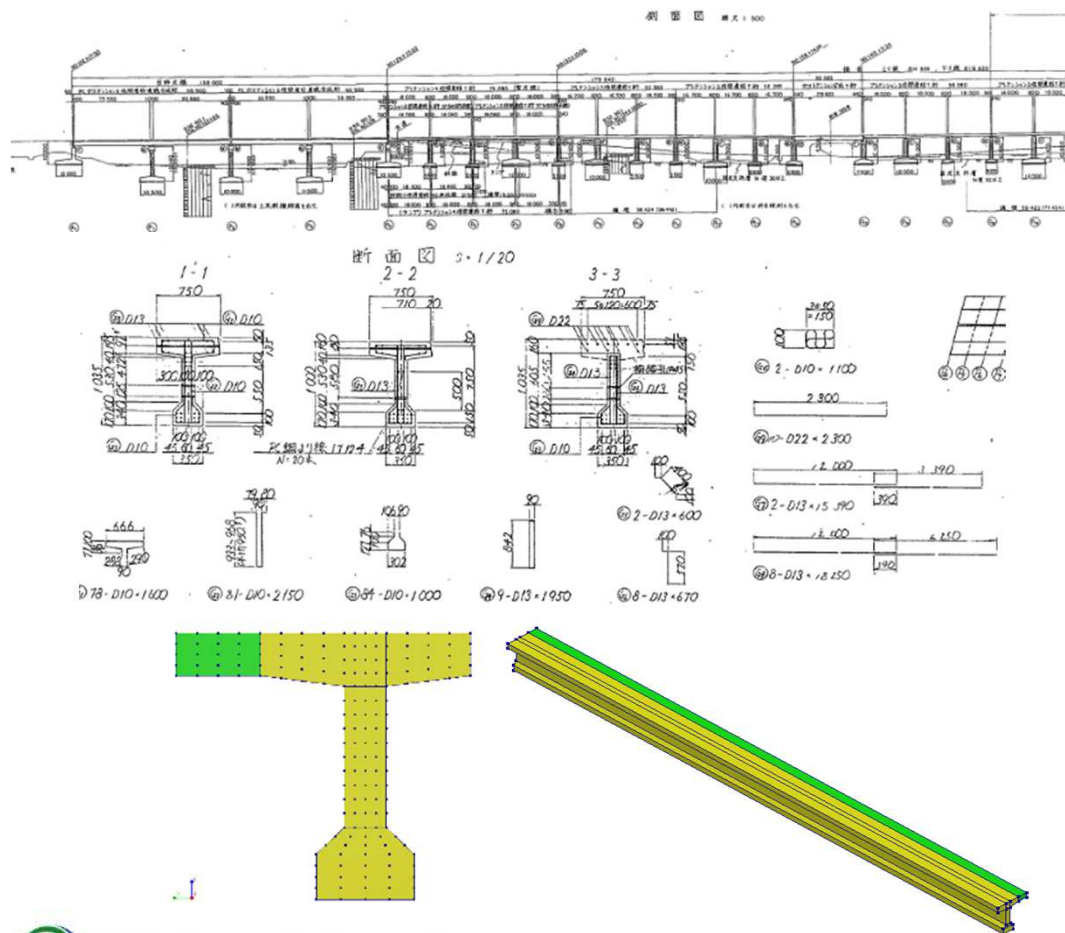


デジタルツインを用いた PC橋の維持管理戦略



今後期待される展開(手引きはできたが)

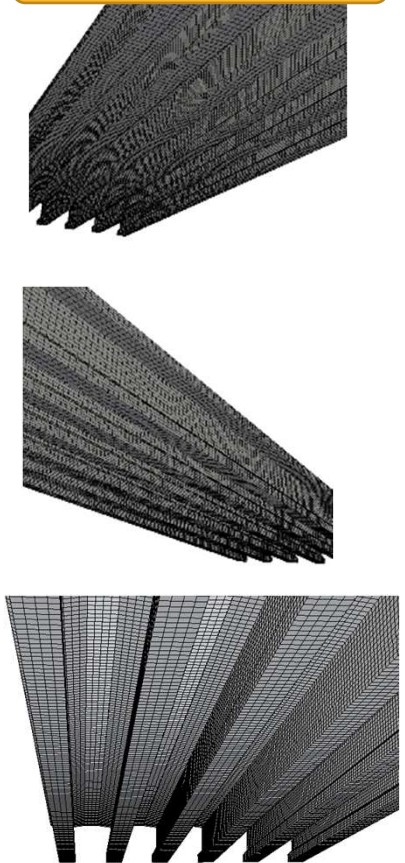
PC橋を含め、道路橋の維持管理を適切に行うためには、**点検・診断・対策・記録の一連の維持管理サイクルを確実に、効率的に回し続ける**ことが極めて重要となる。構造物の構造性能の評価は構造物単体のみでなく、同様の形式の**インフラ群**に対する評価にも展開し、情報を有効活用できる。しかし、デジタルツインのモデル作成者間のばらつきがあれば、インフラ群を対象として**統一的に比較**することができなくなる。本手引きがデジタルツインを用いた性能評価の場面における**標準化の一助**となれば幸いである。今後の**現場展開**を期待したい。



実体



デジタルツイン



ご清聴ありがとうございました

新都市社会技術融合創造研究会

第23回新都市社会技術セミナー

PC橋の維持管理における

デジタルツインを用いた構造性能の評価に関する研究

神戸大学 三木朋広