

橋梁技術の変遷

— 丈夫で長持ちする橋を目指して —

平成28年11月18日

埼玉大学レジリエント社会研究センター
センター長・教授 睦好宏史

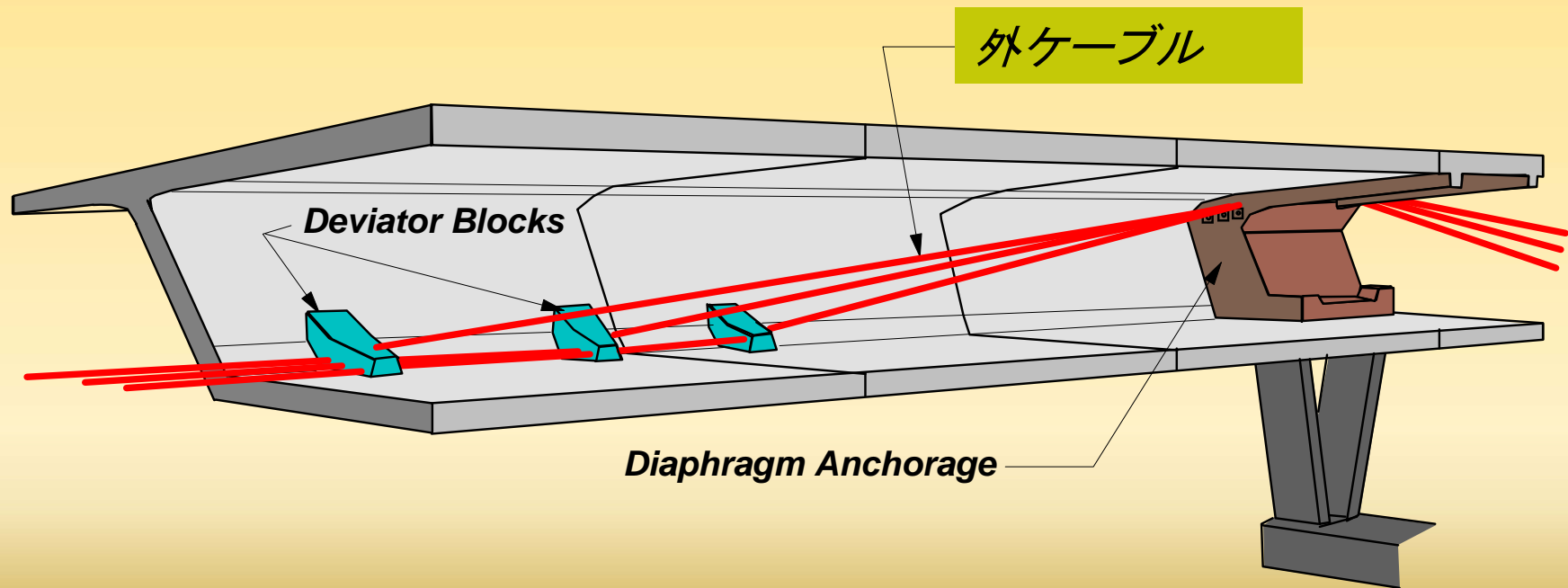
注：レジリエンス(Resilience)とは、「回復する力、立ち直る力」あるいは「しなやかで強いこと、強靱」と訳されています。レジリエント社会とは、大きな自然災害等が起こったとしても、被害を最小限に抑え、すぐに復旧して、人々がこれまでと同じ生活が出来るようにする社会です。

講演内容

1. 外ケーブルPC橋から大偏心外ケーブルPC橋へ
2. 橋梁の経年劣化の現状と問題点
3. 橋梁の長寿命化に向けた研究
4. 高い耐久性を持つ橋とは
5. 新道路橋示方書について

外ケーブル構造 (External Prestressing) とは?

定義: ケーブル (緊張材) がコンクリート断面の外部に配置された構造



外ケーブルの配置



他種構造との組み合わせ



複合トラスPC橋



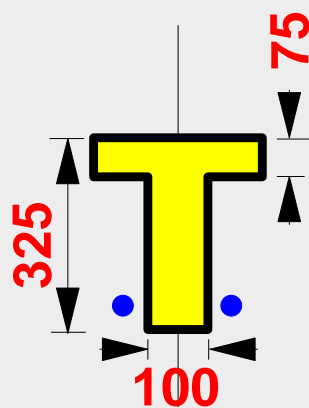
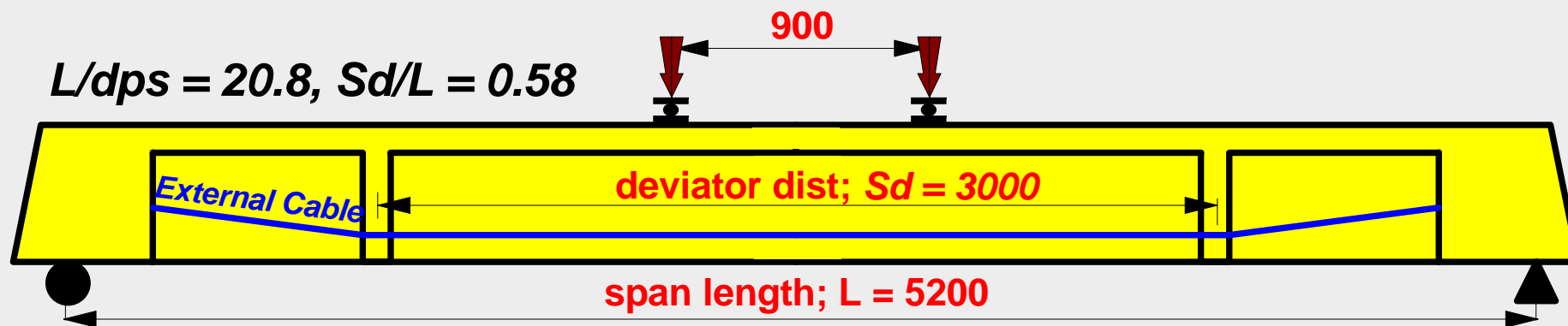
波形鋼板ウェブPC橋



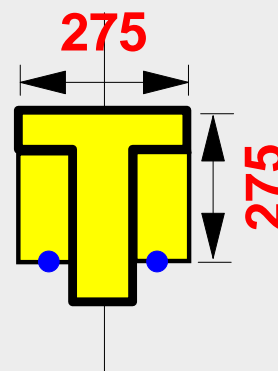
外ケーブルを用いた橋梁の補強例



実験に用いた外ケーブル試験体

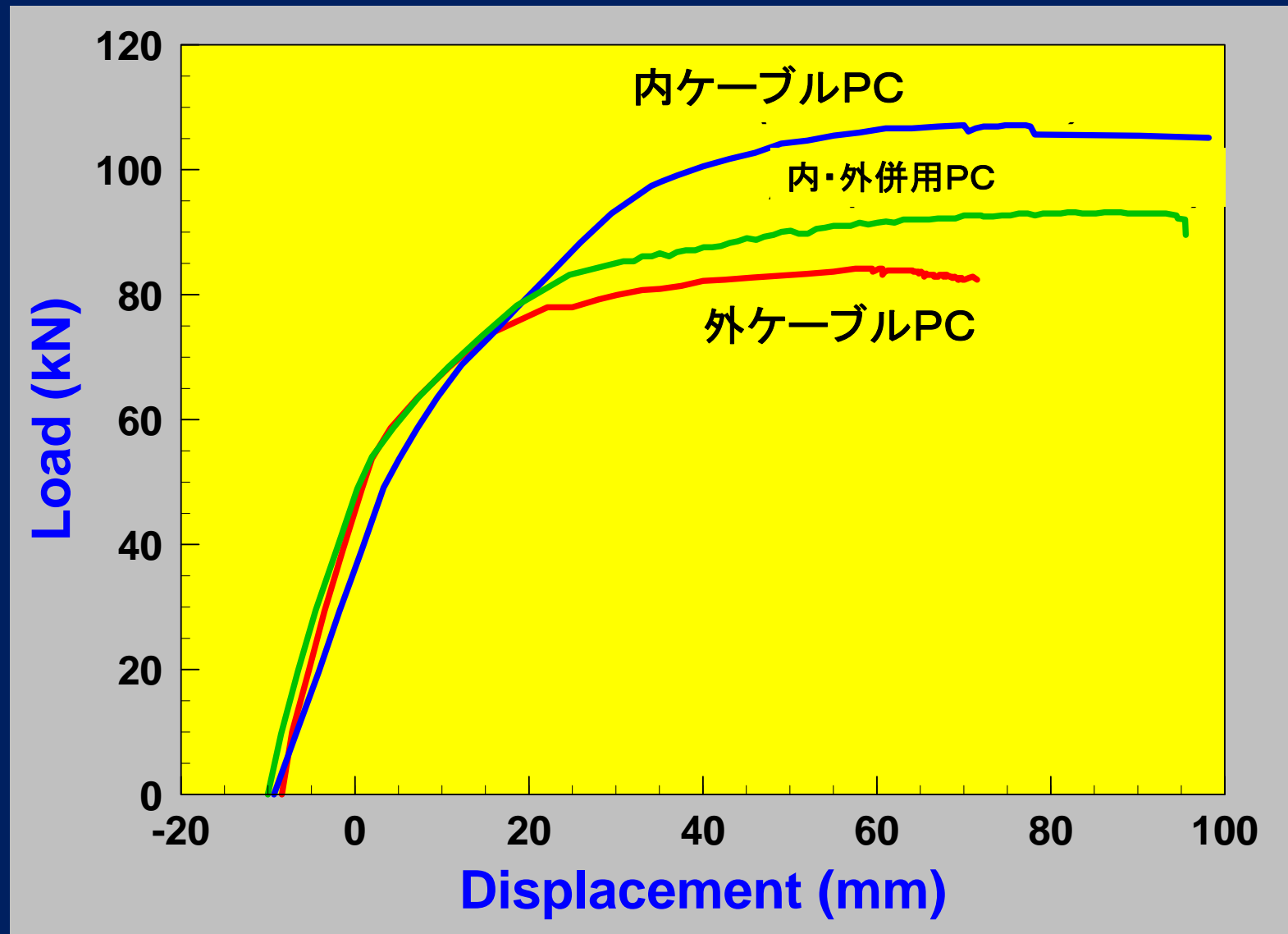


断面図

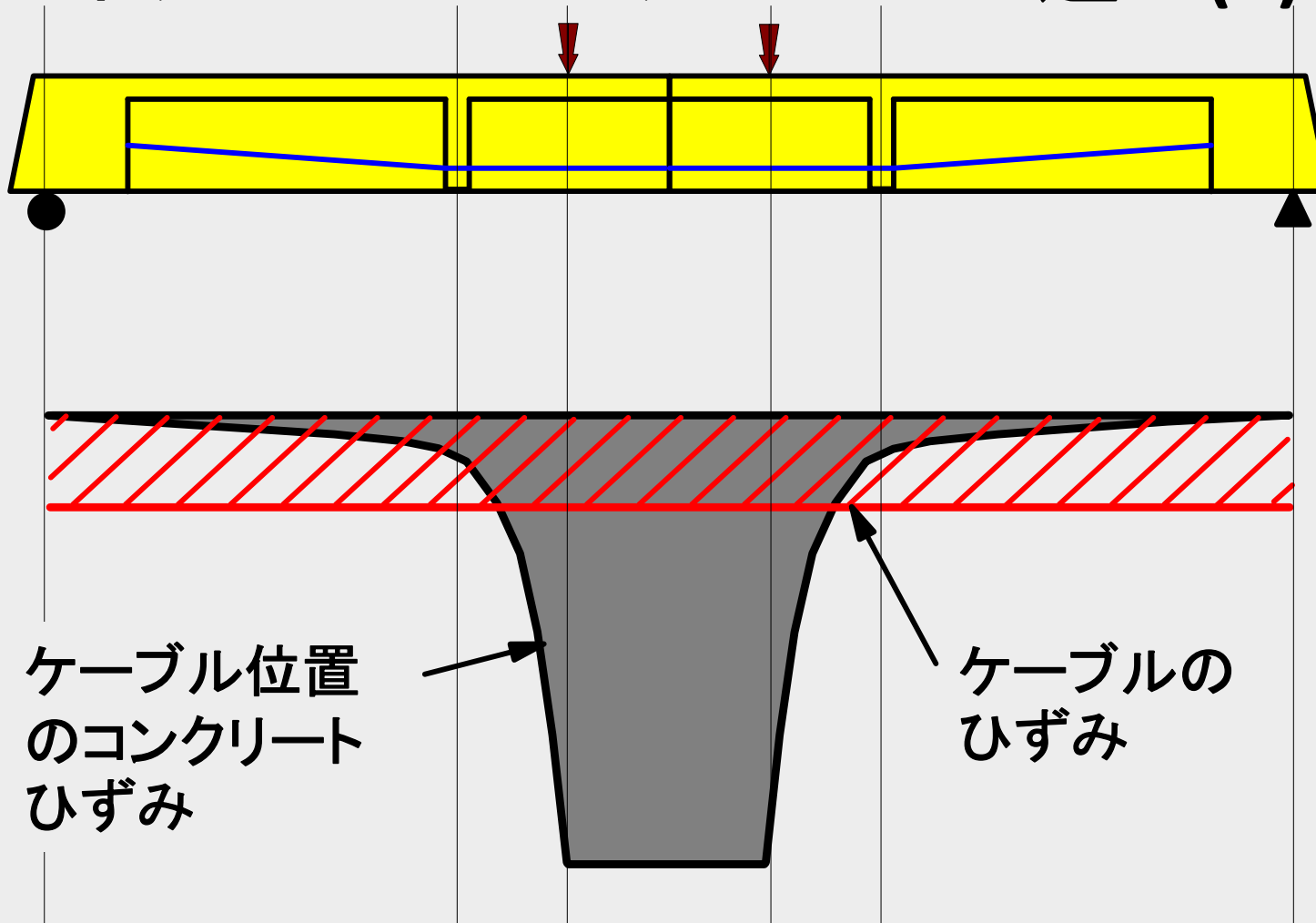


デビエータ部の断面図

荷重－変位曲線



外ケーブルと内ケーブルの違い(1)



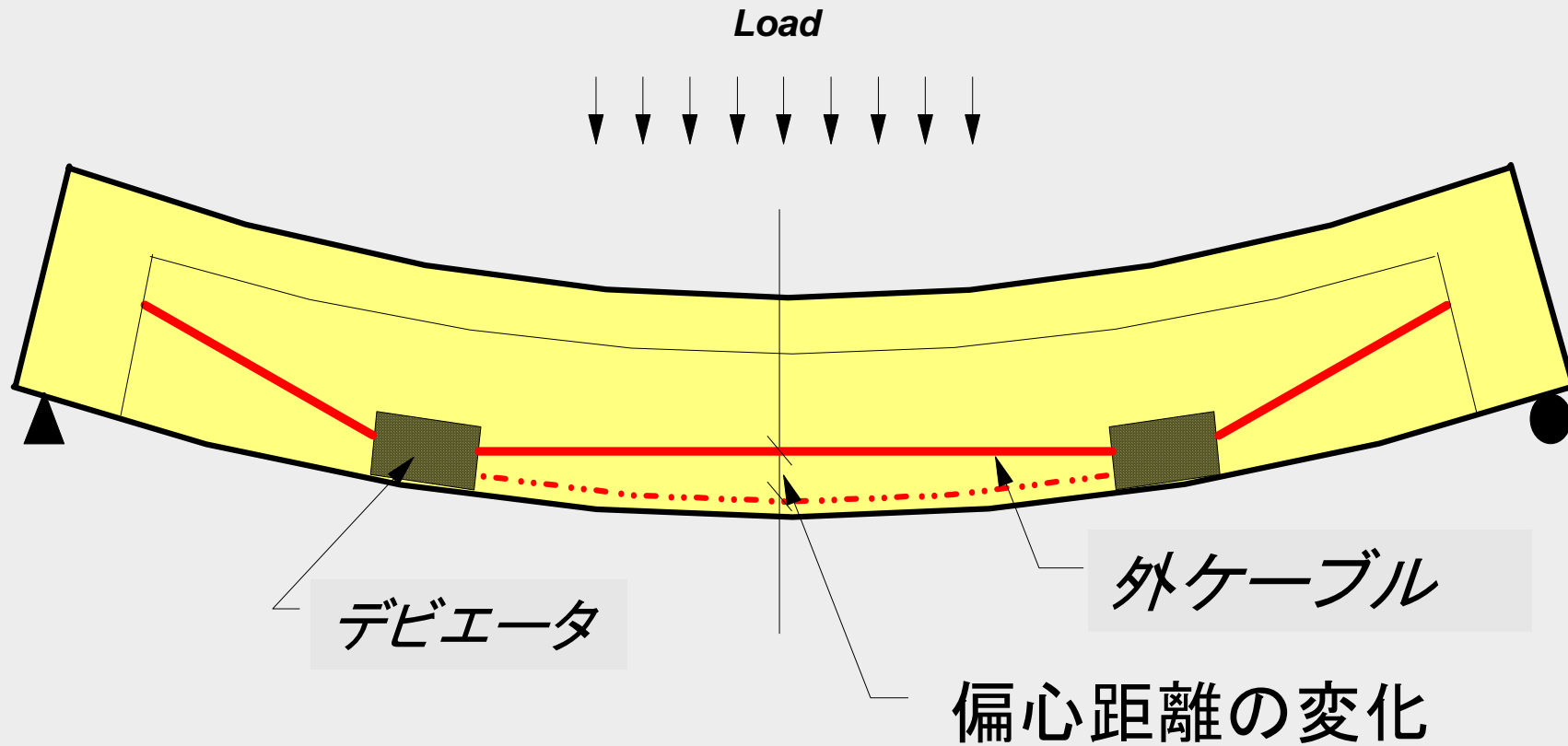
ケーブル位置
のコンクリート
ひずみ

ケーブルの
ひずみ

ケーブルとコンクリートとの付着がない

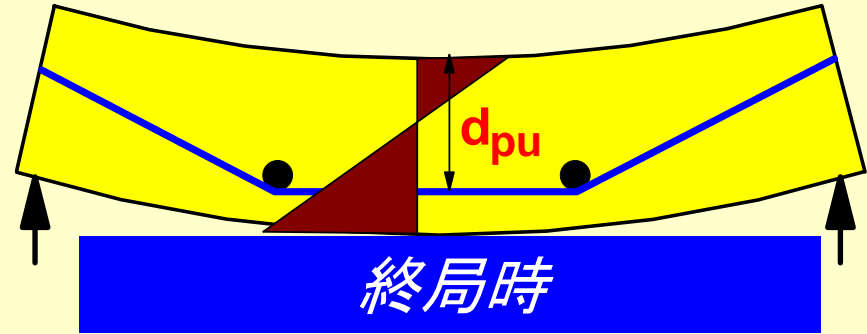
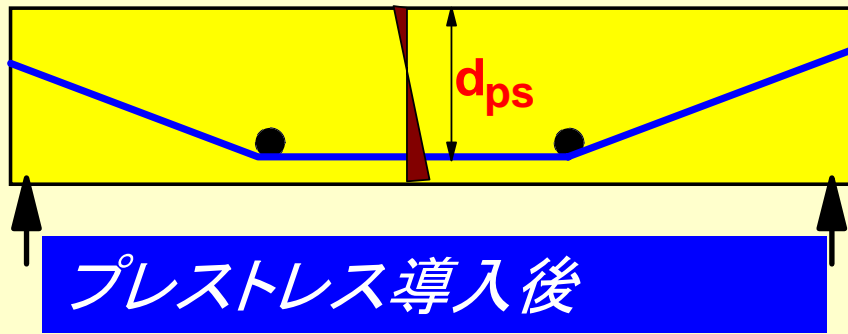
- 耐力の低下
- ひび割れ分散性が劣る

外ケーブルと内ケーブルの違い(2)



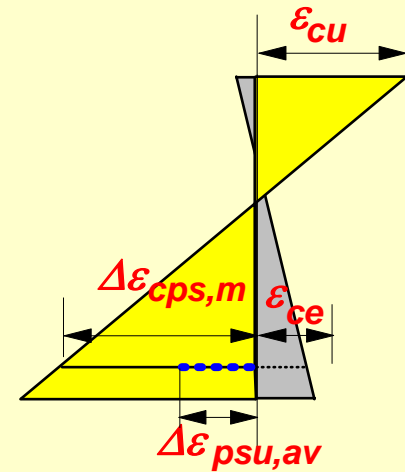
外ケーブルの偏心距離の変化
- 耐力の低減

設計の考え方



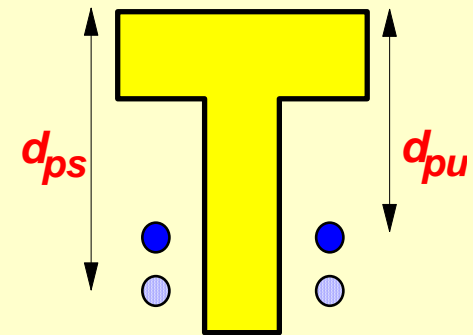
ひずみ低減係数 (Ω_u)

$$\Omega_u = \frac{\Delta \varepsilon_{psu,av}}{\Delta \varepsilon_{cps,m}}$$



有効高さ低減係数 (R_d)

$$R_d = \frac{d_{pu}}{d_{ps}}$$



設計の考え方

一般式

$$f_{ps} = f_{pe} + \Delta f_{ps}$$

ここに;

f_{ps}	=	終局時の外ケーブル応力
f_{pe}	=	有効初期外ケーブルの応力
Δf_{ps}	=	外ケーブルの応力増分

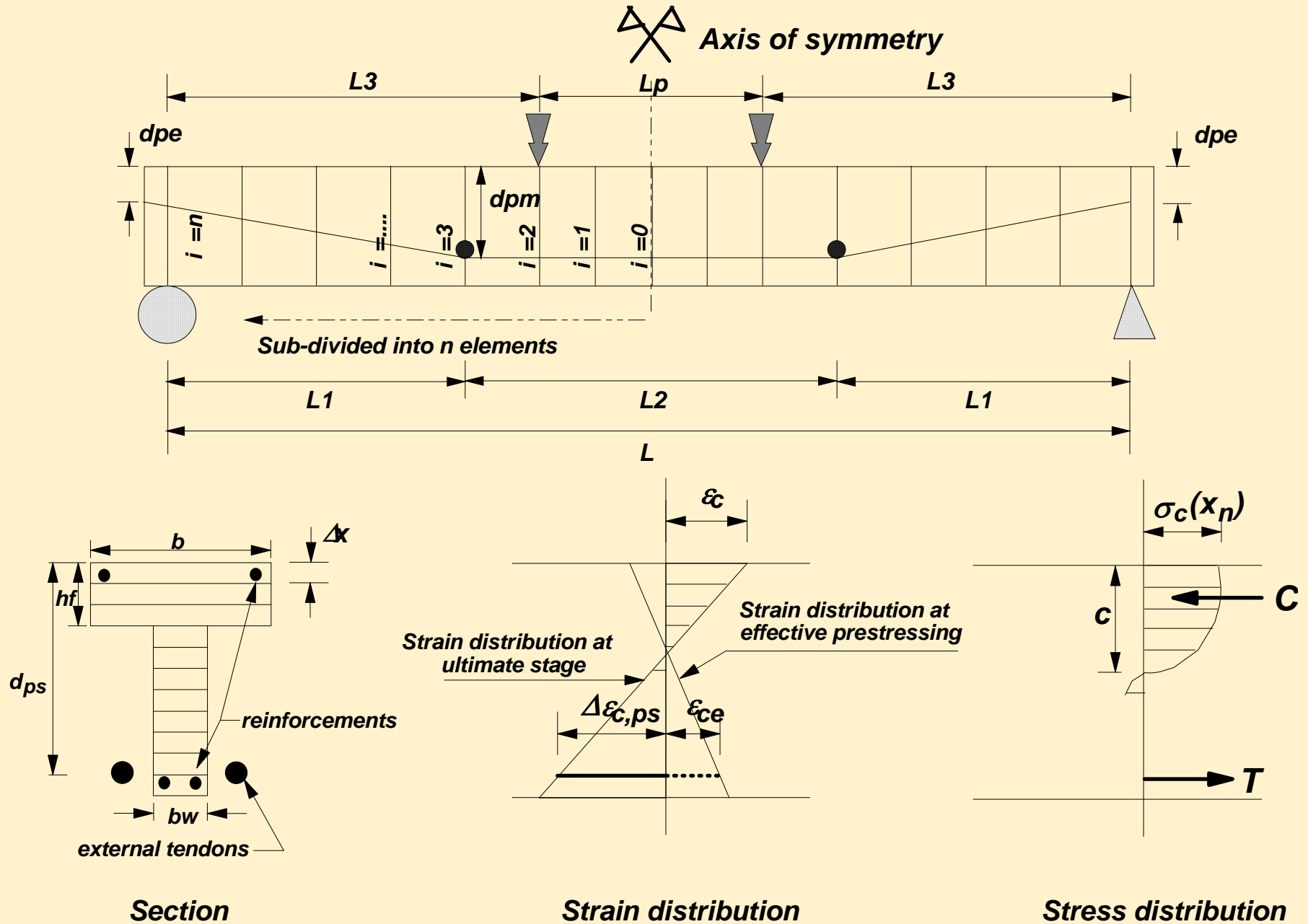
提案式

$$f_{ps} = f_{pe} + E_{ps} \Omega_u \epsilon_{cu} \left(\frac{d_{pu}}{c} - 1 \right) \leq f_{py}$$

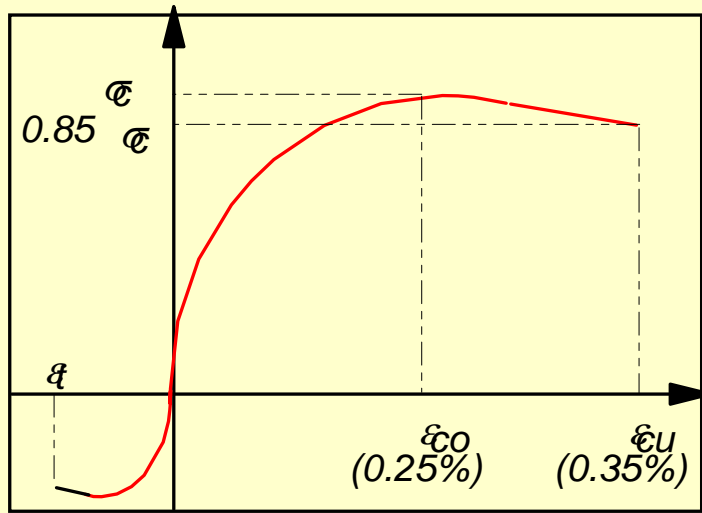
ここに;

Ω_u	=	ひずみ低減係数
R_d	=	有効高さ低減係数

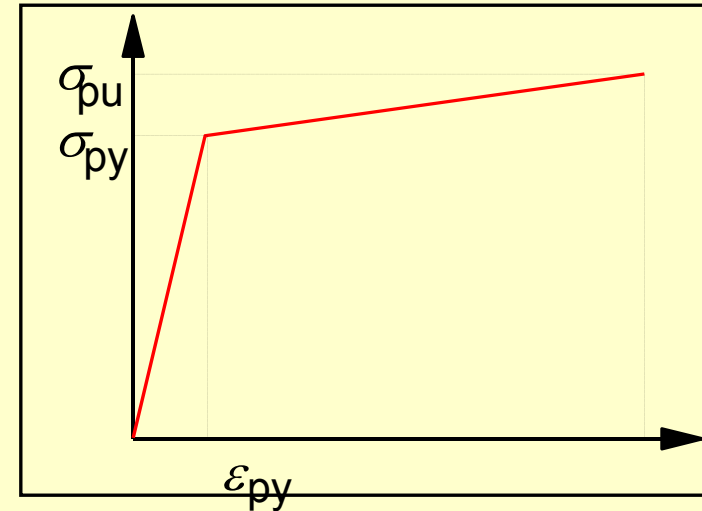
ファイバーモデルによる解析



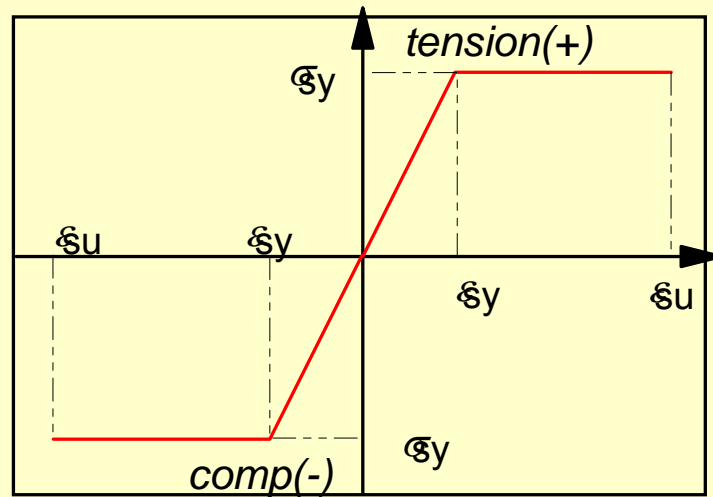
材料の応力-ひずみ曲線



Concrete

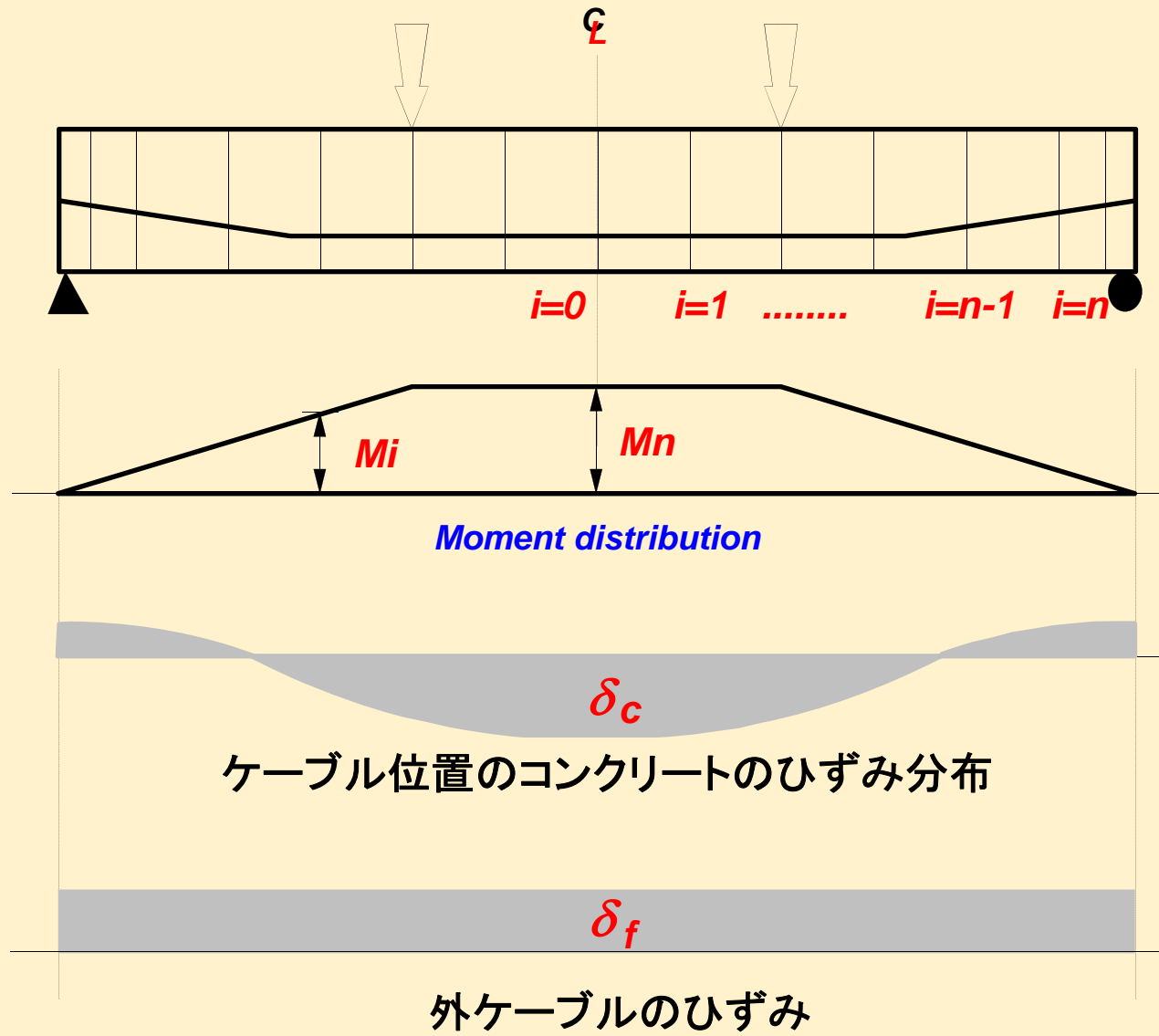


Prestressing steel



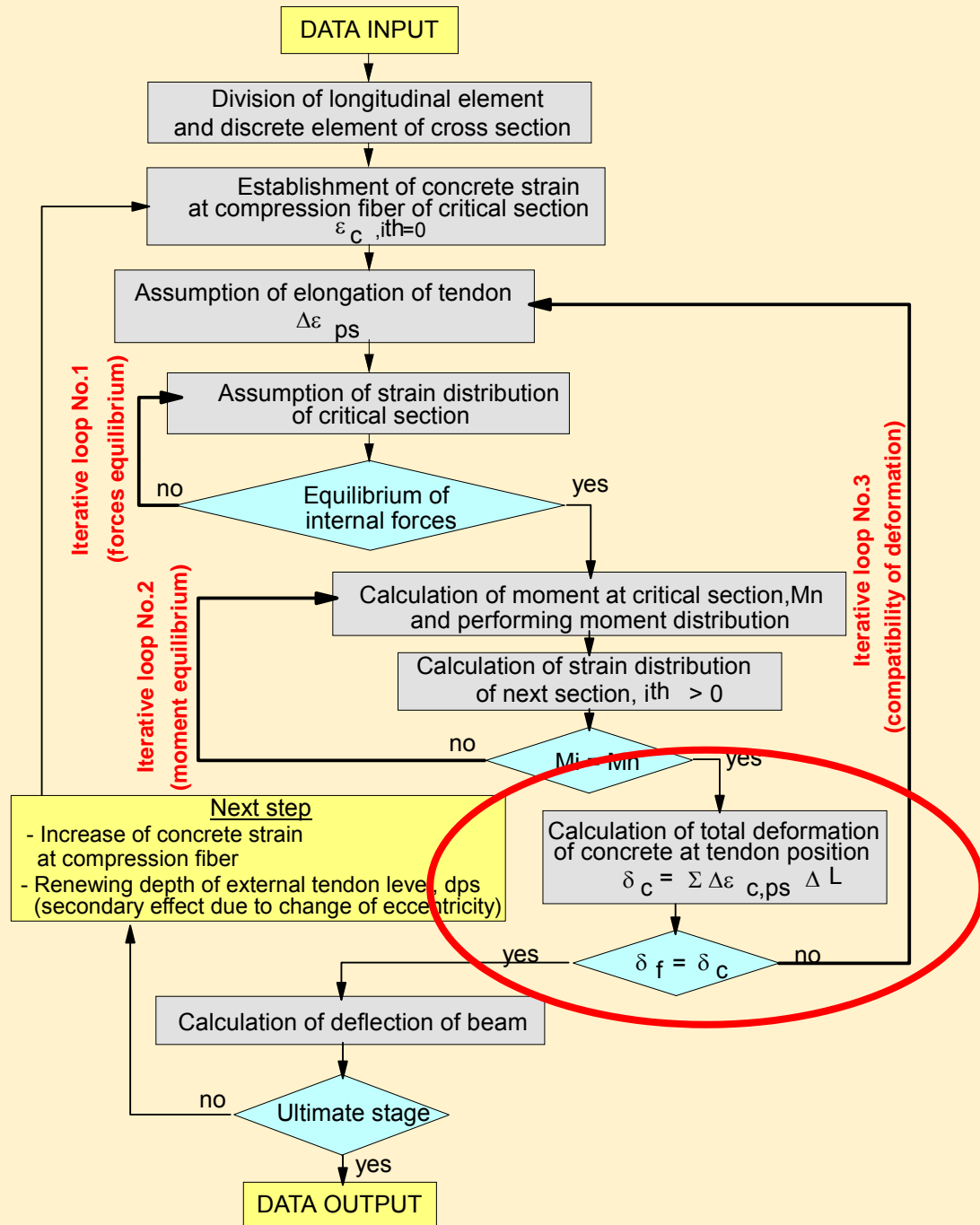
Reinforcement

変形の適合条件

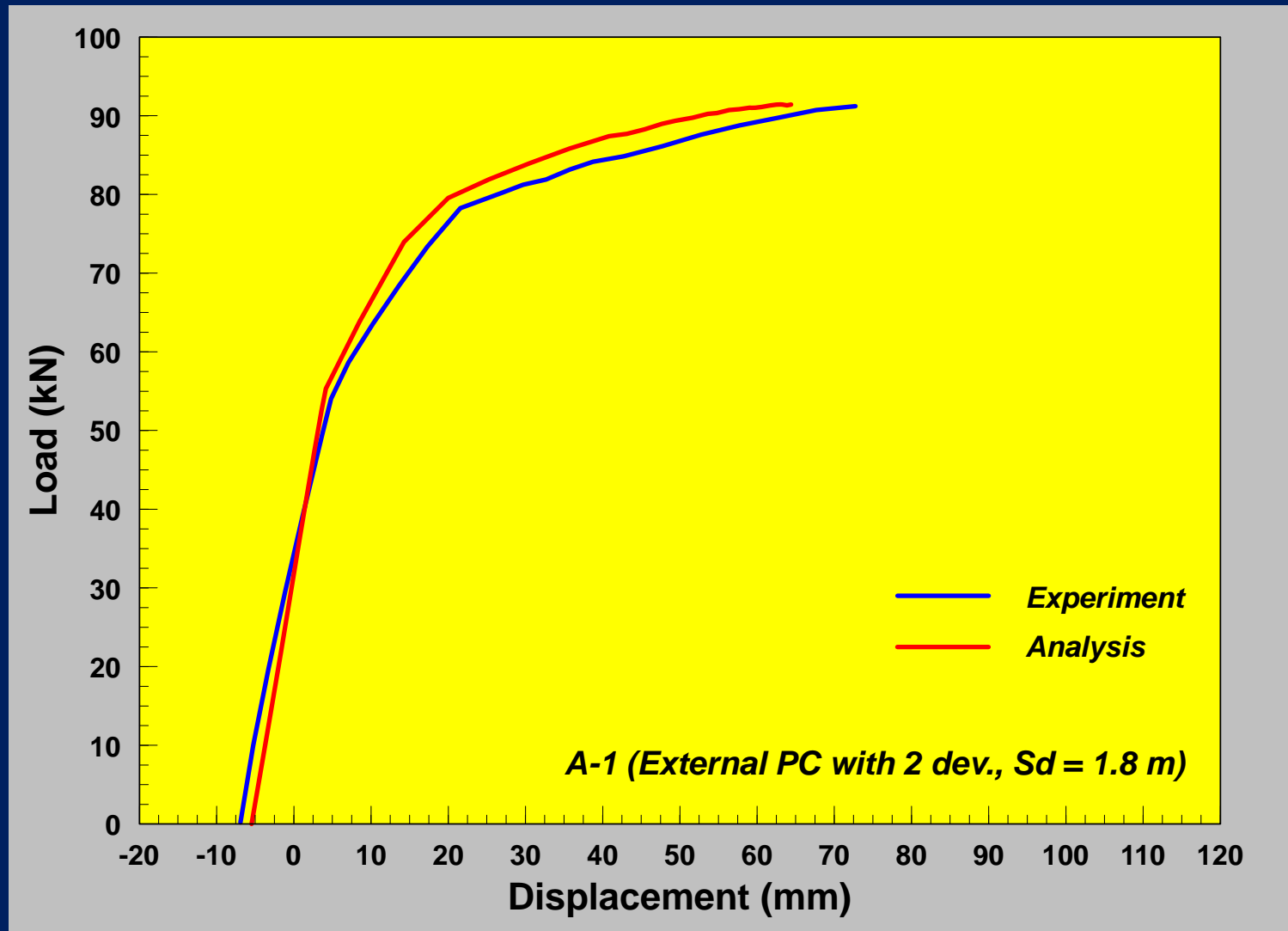


変形の適合条件 $\delta_c = \delta_f$

解析のフローチャート

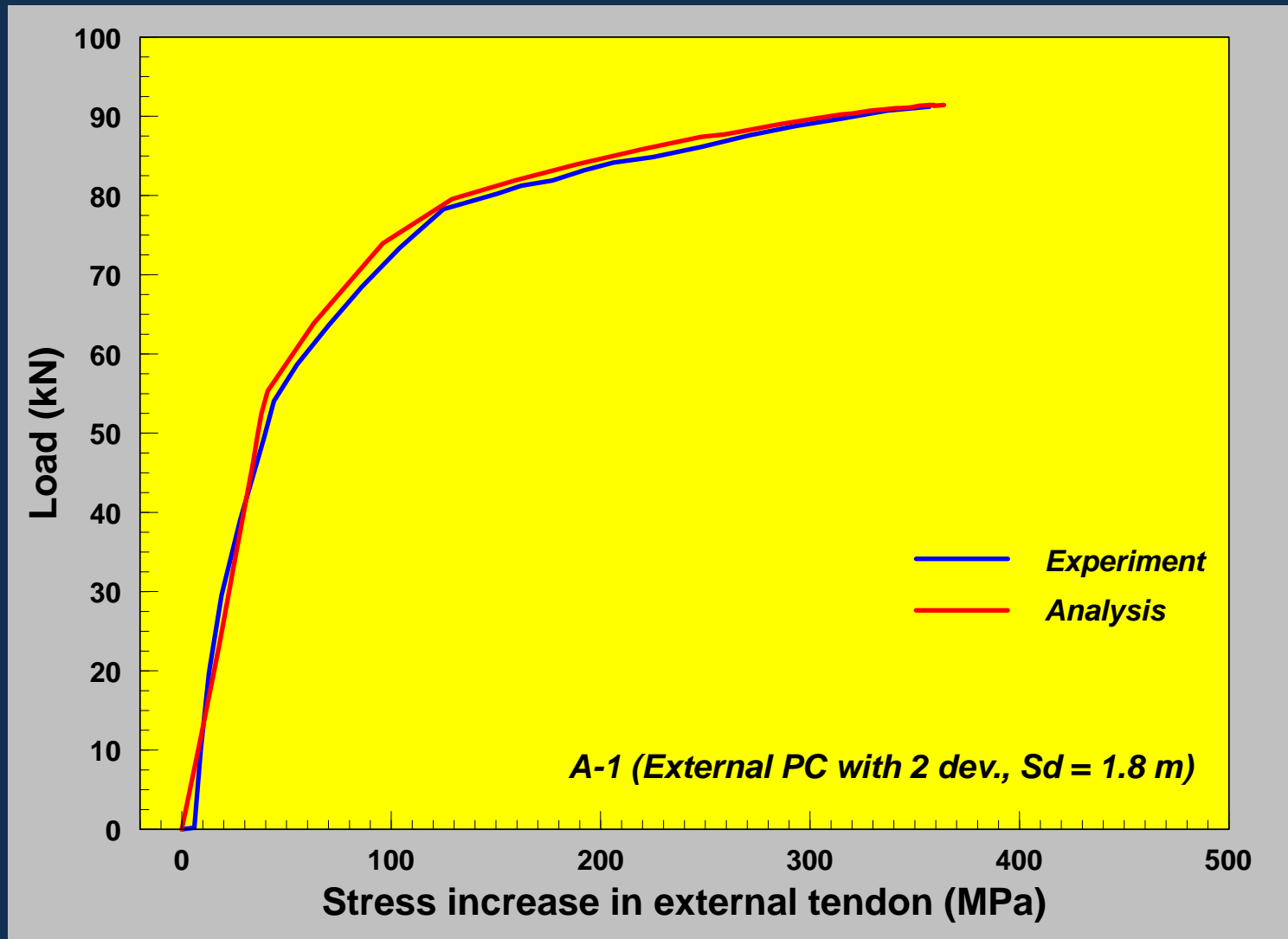


実験値との比較（荷重－変異曲線）



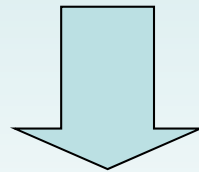
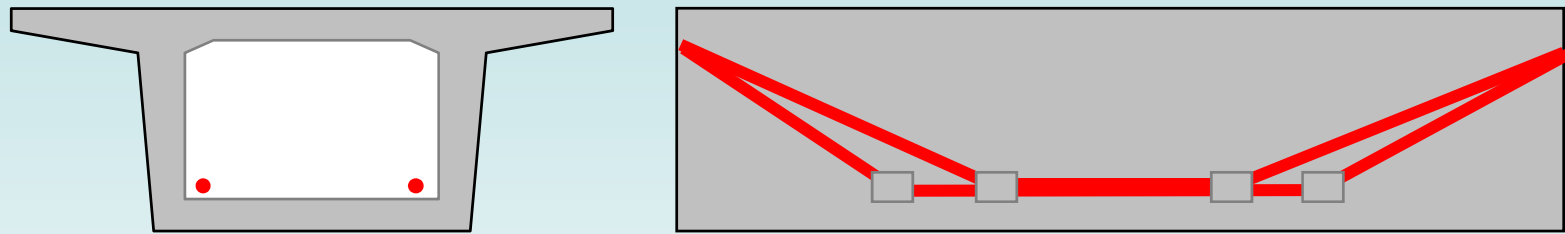
解析結果

荷重－外ケーブル張力の増分量

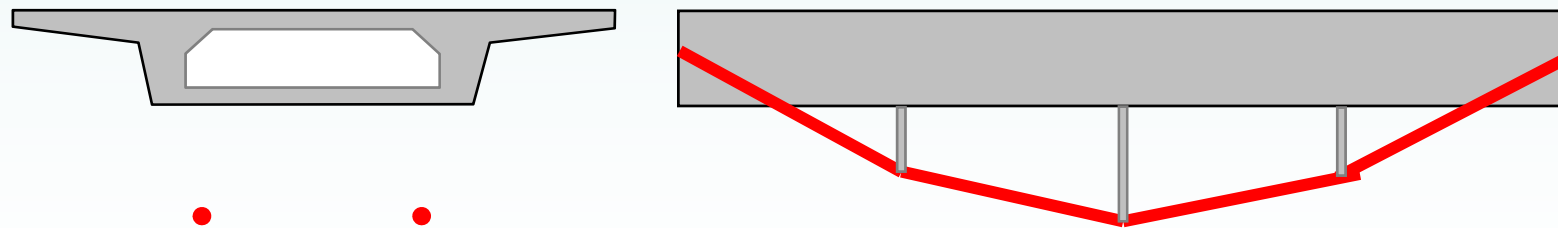


外ケーブル構造から大偏心外ケーブル構造へ

一般の外ケーブル構造



大偏心外ケーブル構造



大偏心外ケーブル橋



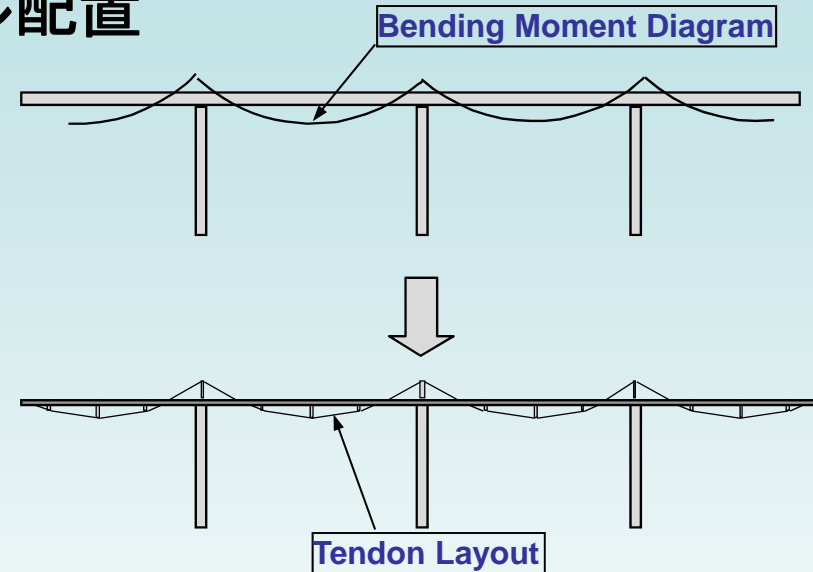
あゆみ橋
(静岡県)

Bedretto Bridge
(Ticino, Switzerland)



新しいコンセプトによる2径間大偏心外ケーブル橋

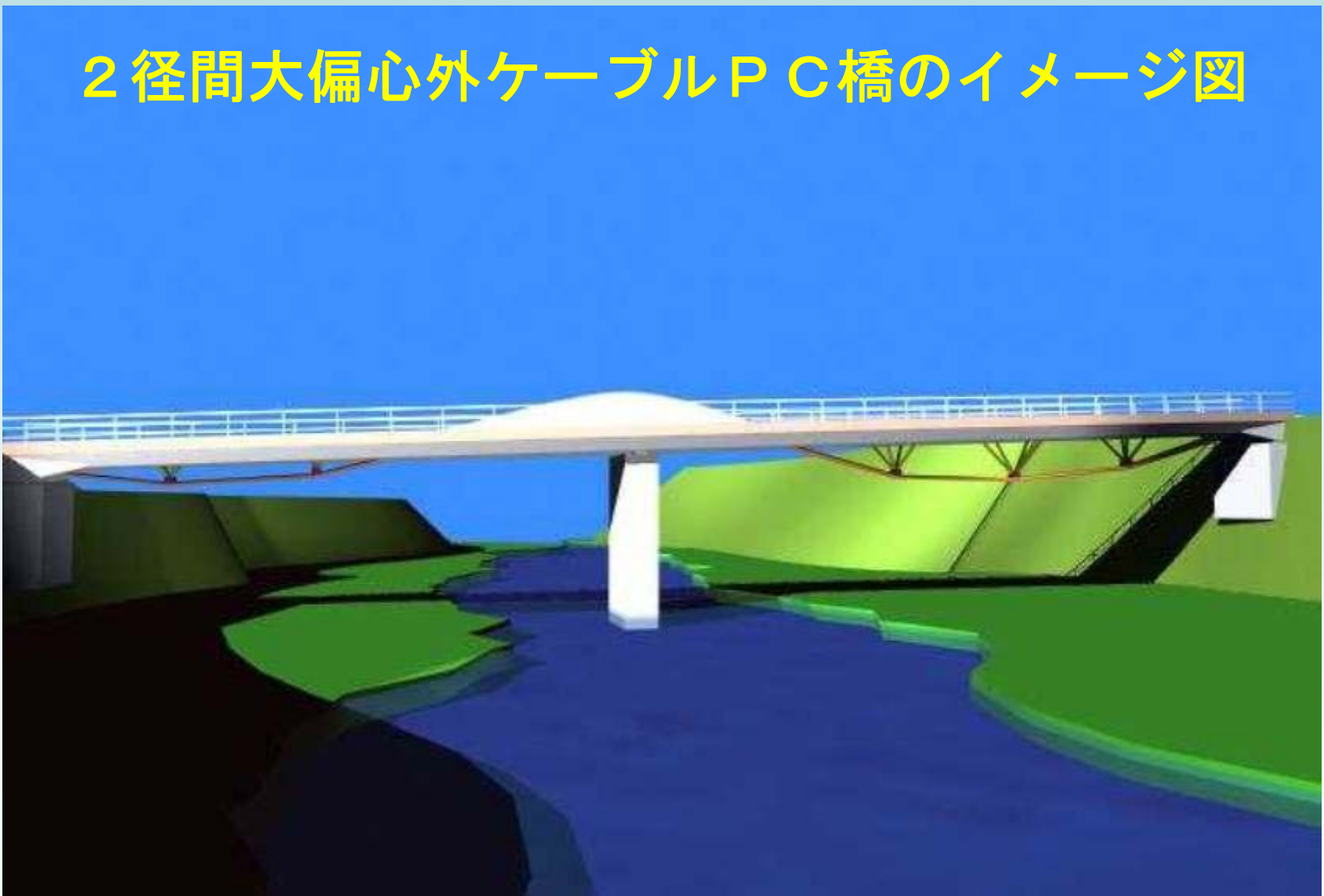
- ・曲げモーメントの分布と同じケーブル配置
- ・支点部では魚のひれ(fin)のような構造形式



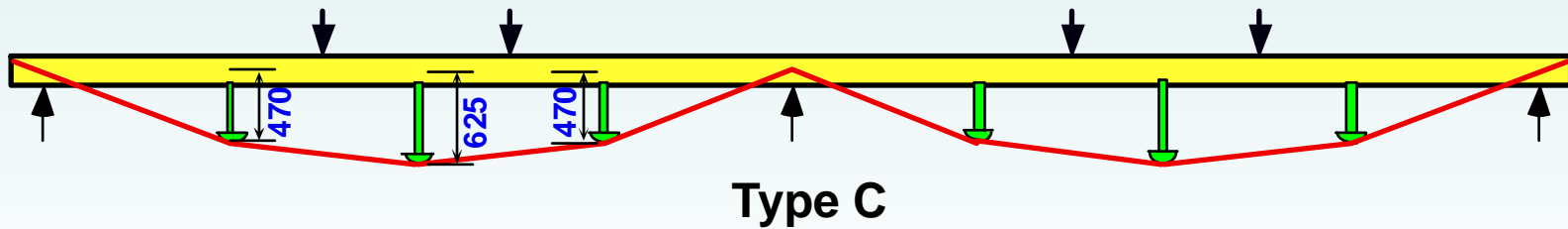
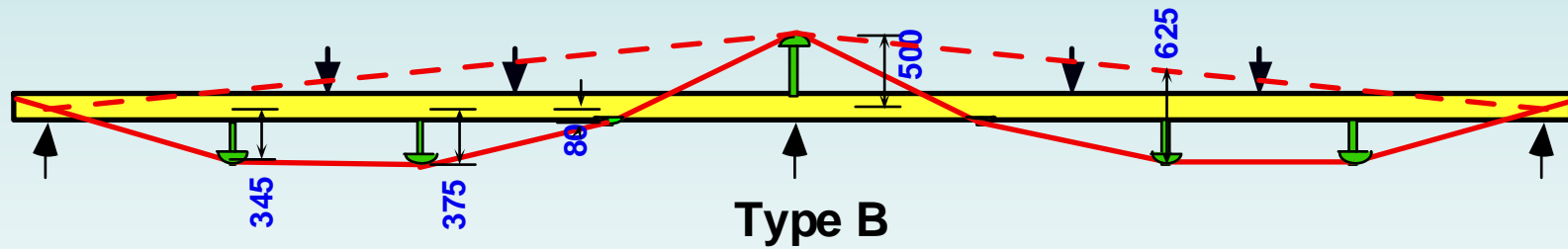
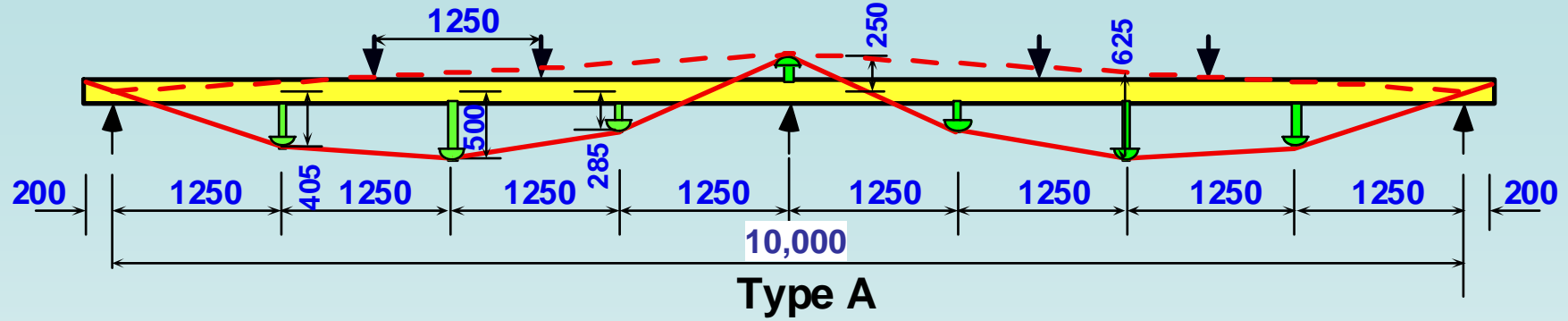
構造上の利点

- ・桁高を減少させることによる自重軽減効果
- ・現場の状況に応じて設計に柔軟性(フレキシビリティ)を持たせることができる。

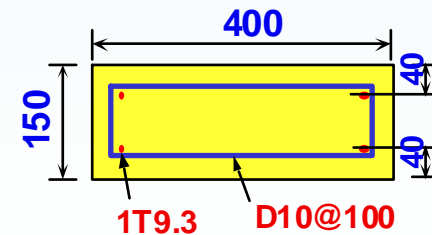
2径間大偏心外ケーブルPC橋のイメージ図



実験供試体の形状寸法



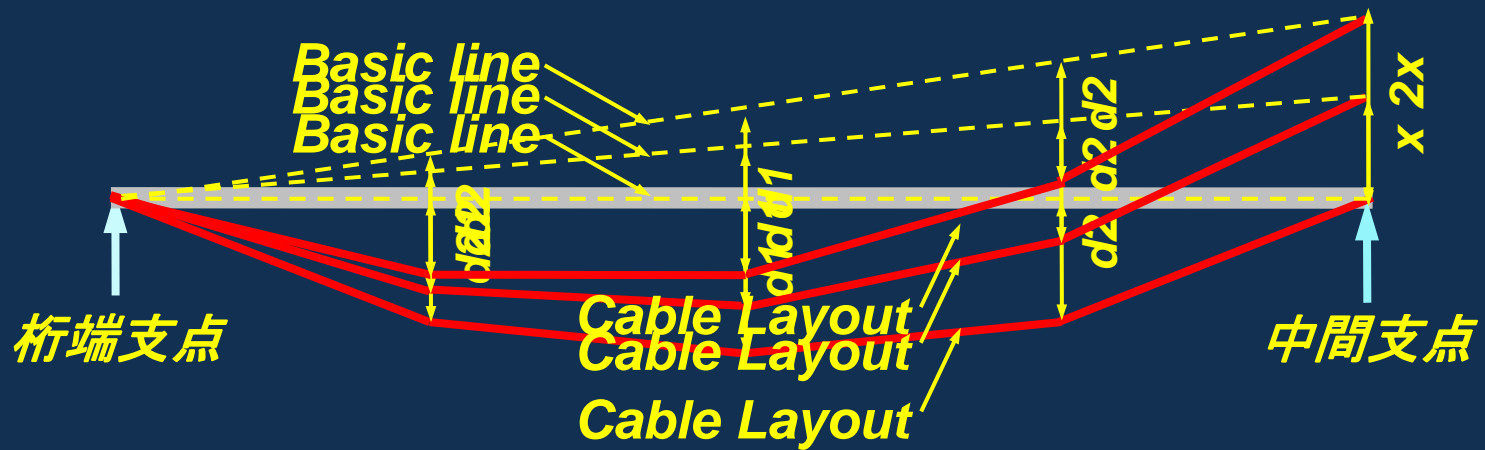
* ケーブルの配置は線形変換則による



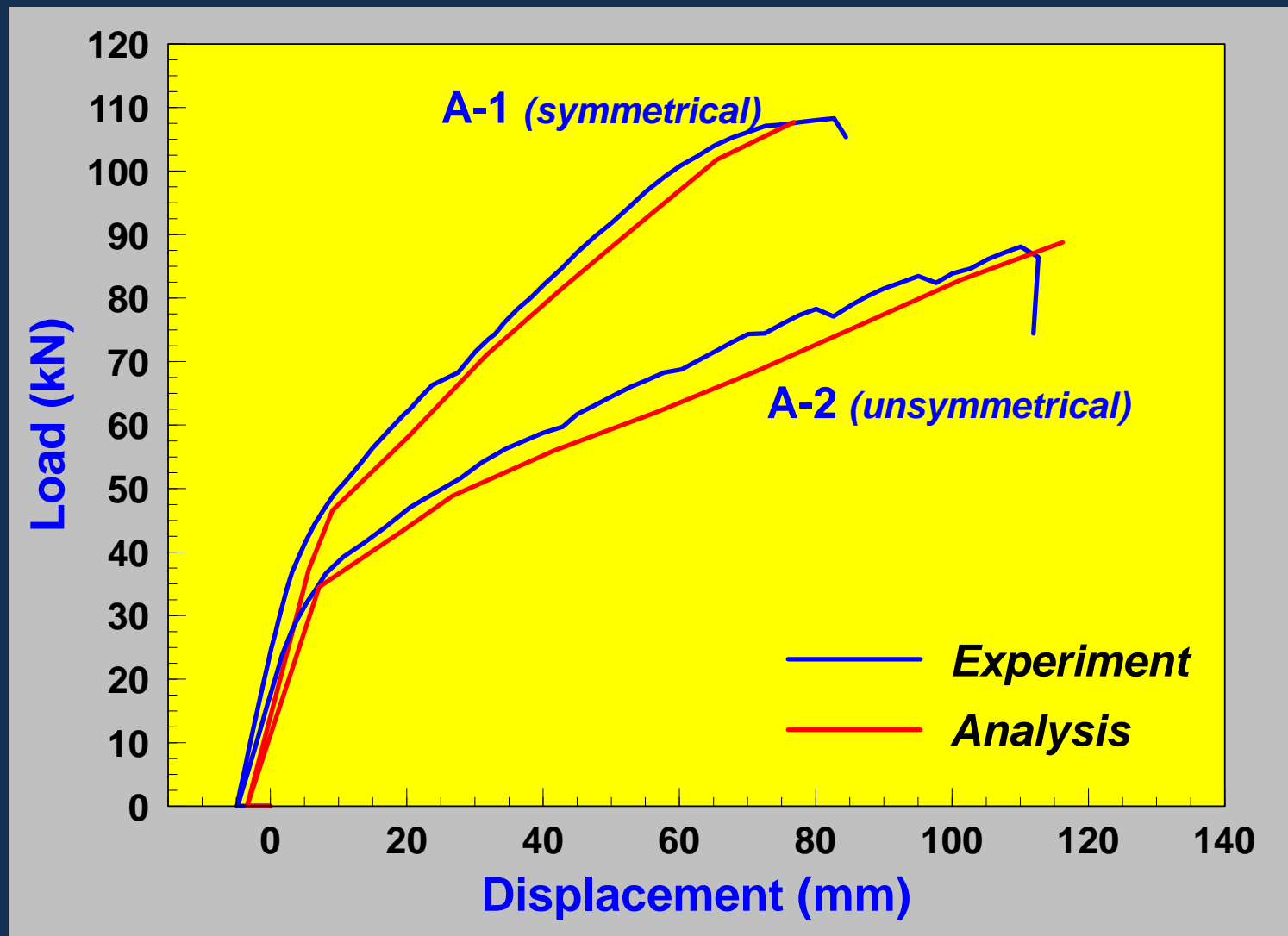
All dimensions in mm

断面形状

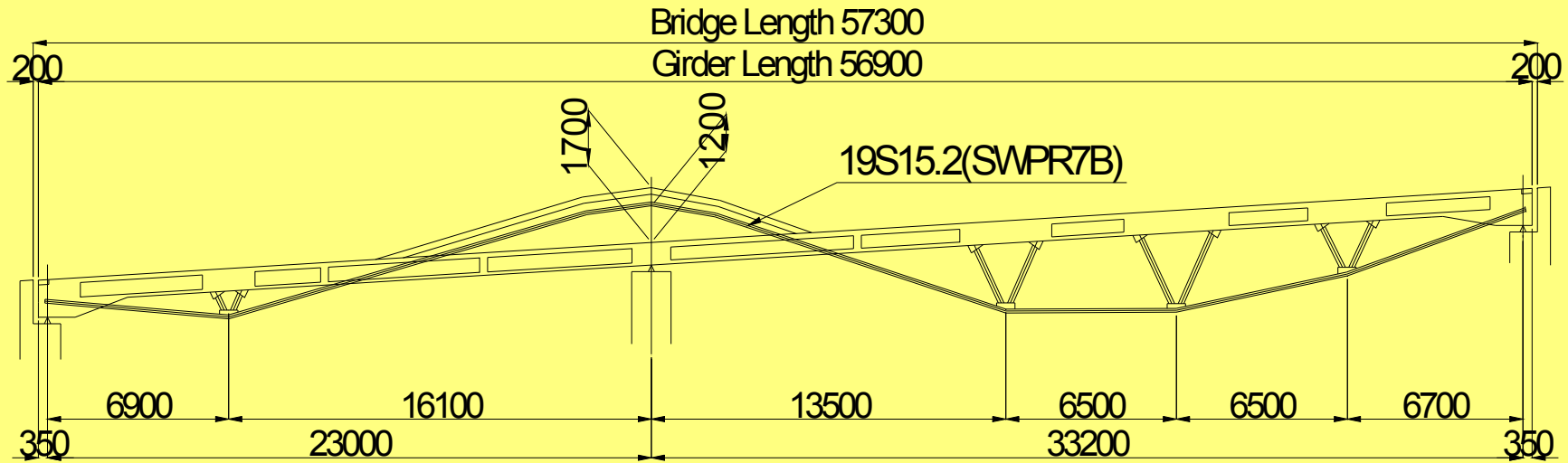
ケーブル配置の線形変換則



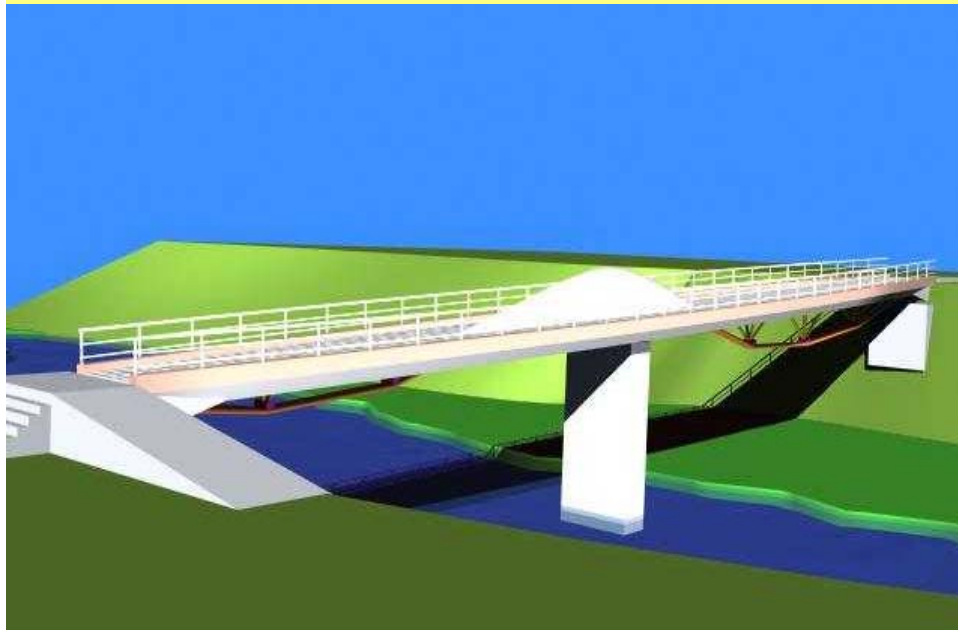
実験と解析結果の比較



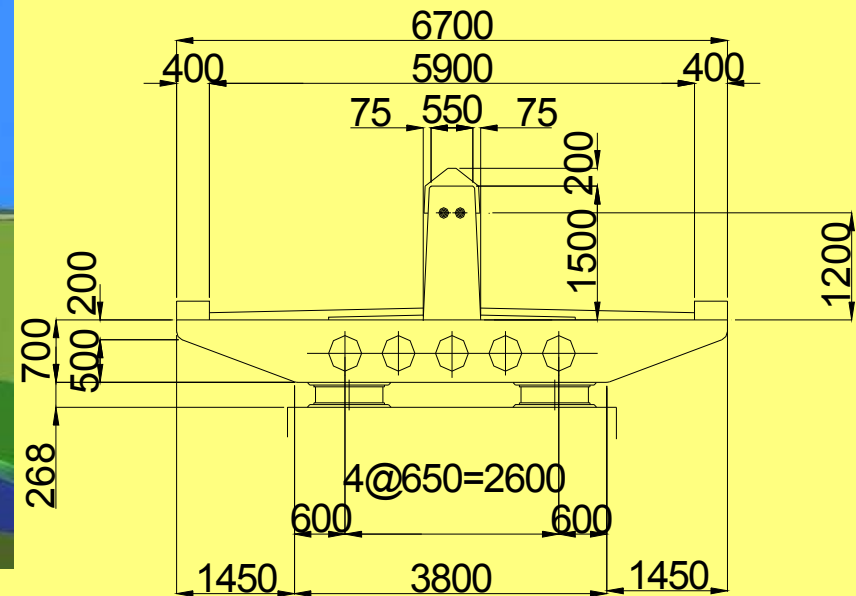
実橋への適用



縦断形状



Perspective Image



断面形状

鳥崎公園橋の建設

仮設工



鋼製ストラットの設置



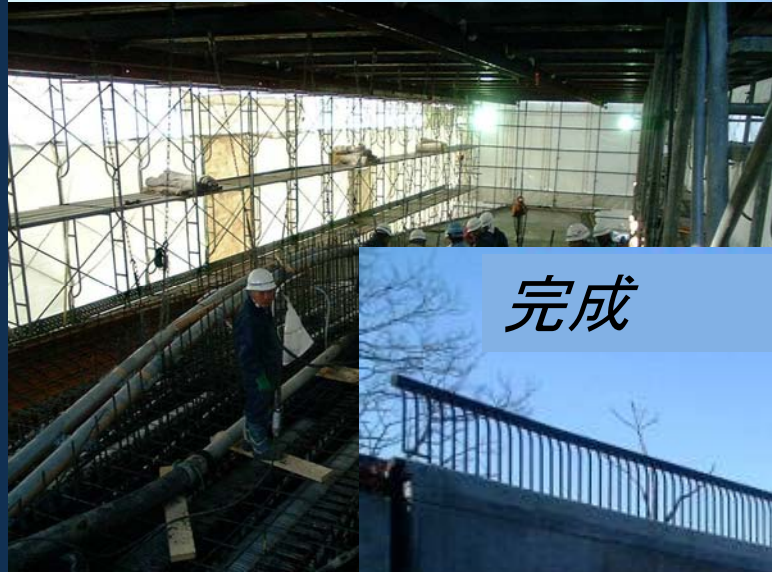
外ケーブルの配置



型枠と鉄筋の配置



コンクリート打設（主桁）



コンクリート打設（フィン部）



完成



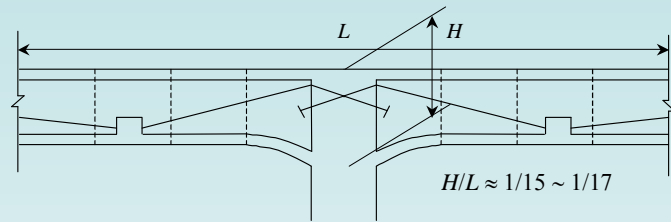
プレストレスの



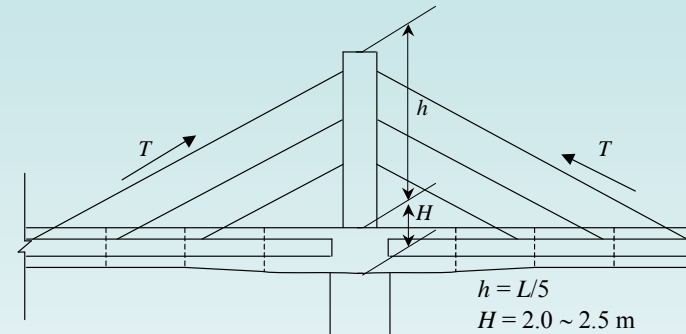
導入（最終緊張）



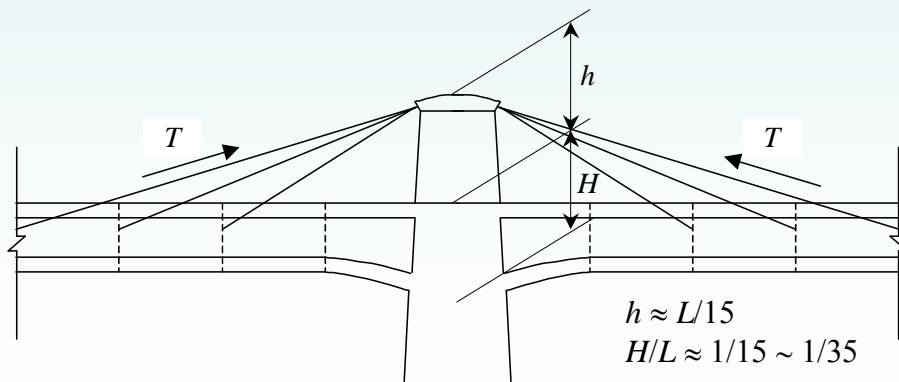
外ケーブルPC—エクストラドーズドPC—PC斜張橋



一般の外ケーブルPC橋



PC斜張橋



エクストラドーズドPC橋

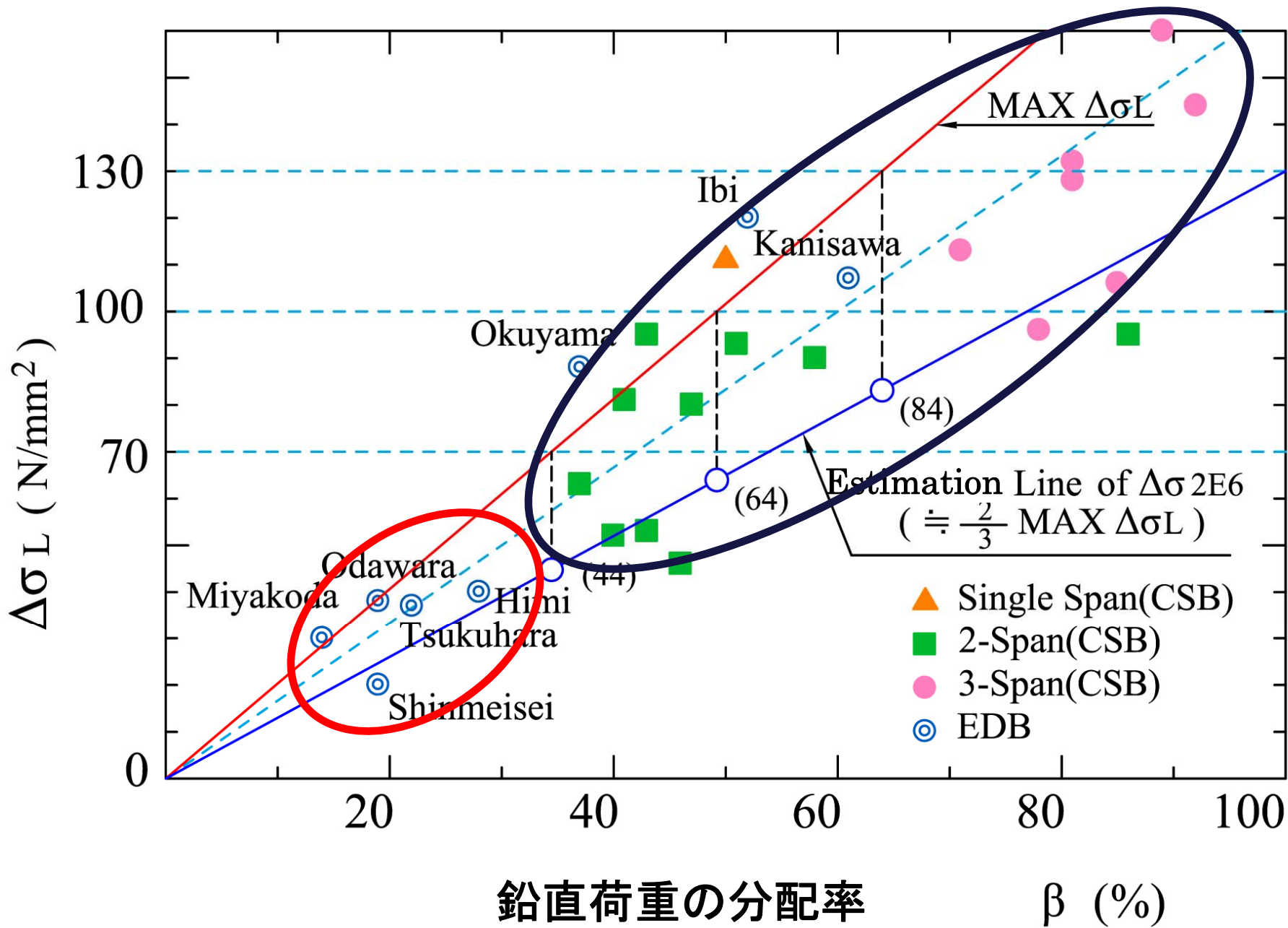
エクストラドーズドPC橋(ケーブルの許容
応力 $=0.6f_{pu}$)

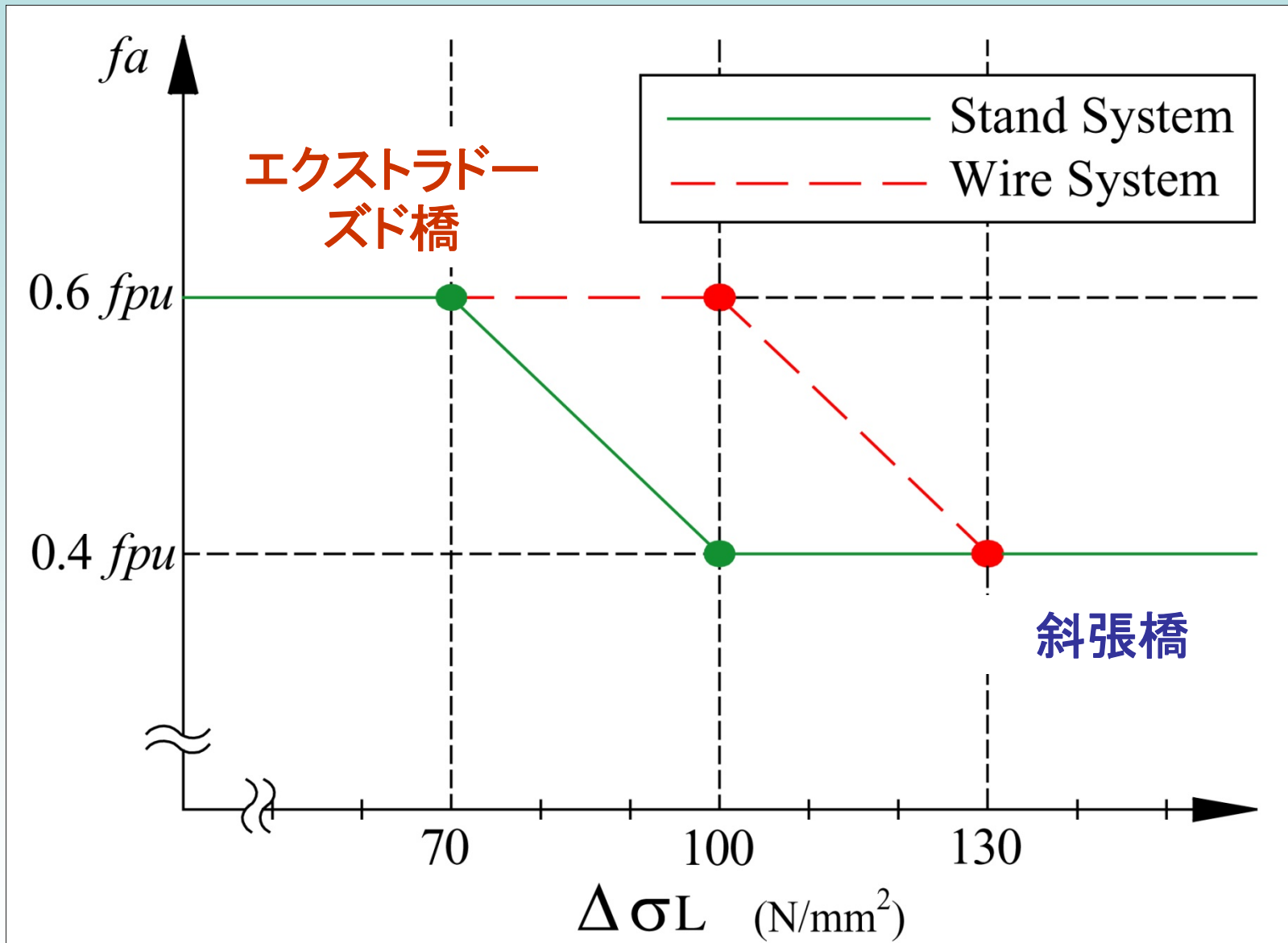


PC斜張橋(ケーブルの許容応力 $=0.4f_{pu}$)



活荷重によるケーブルの応力変動



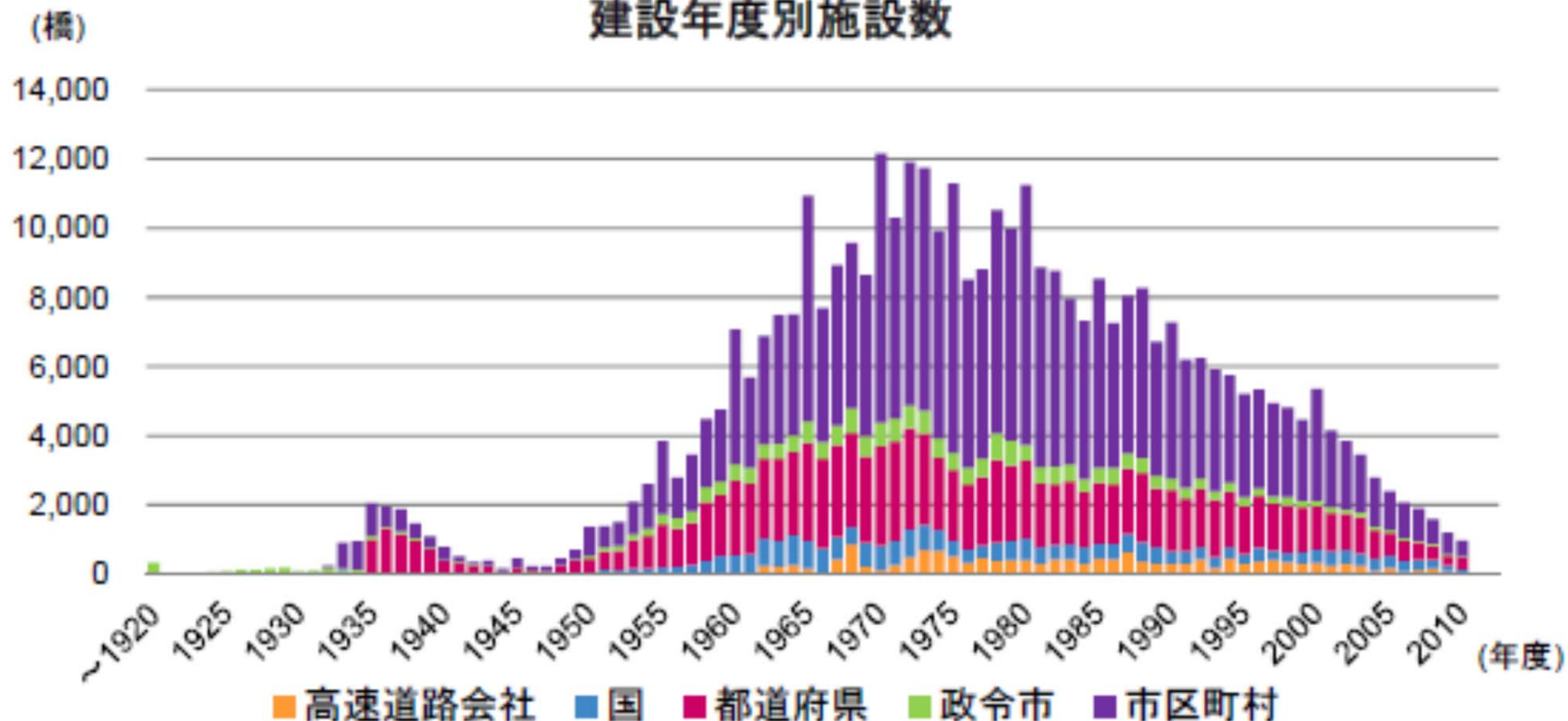


ケーブルの許容応力と変動応力

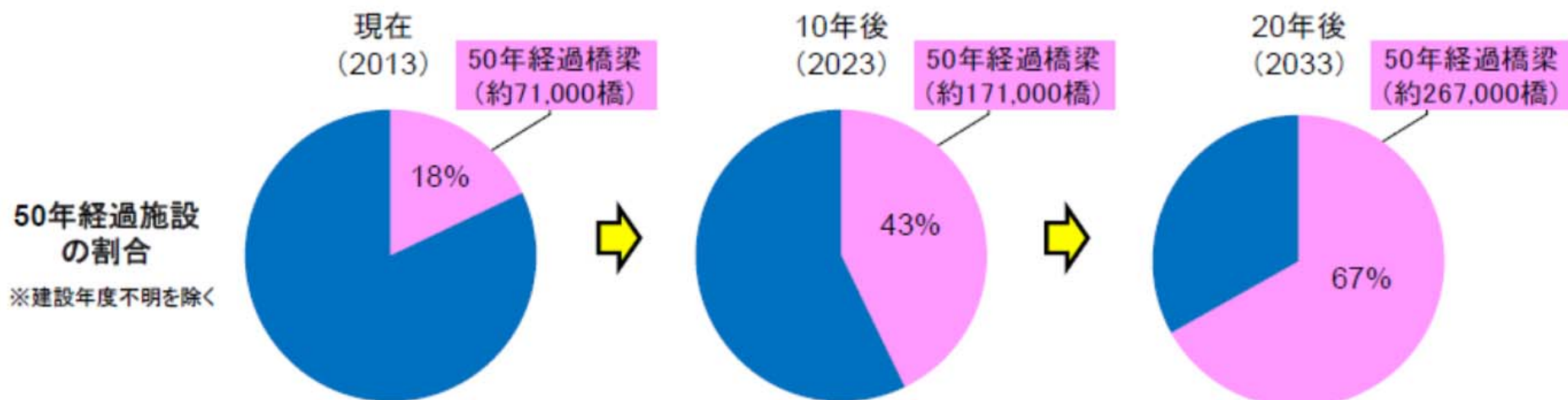
講演内容

1. 外ケーブルPC橋から大偏心外ケーブルPC橋へ
2. 橋梁の経年劣化の現状と問題点
3. 橋梁の長寿命化に向けた研究
4. 高い耐久性を持つ橋とは
5. 新道路橋示方書について

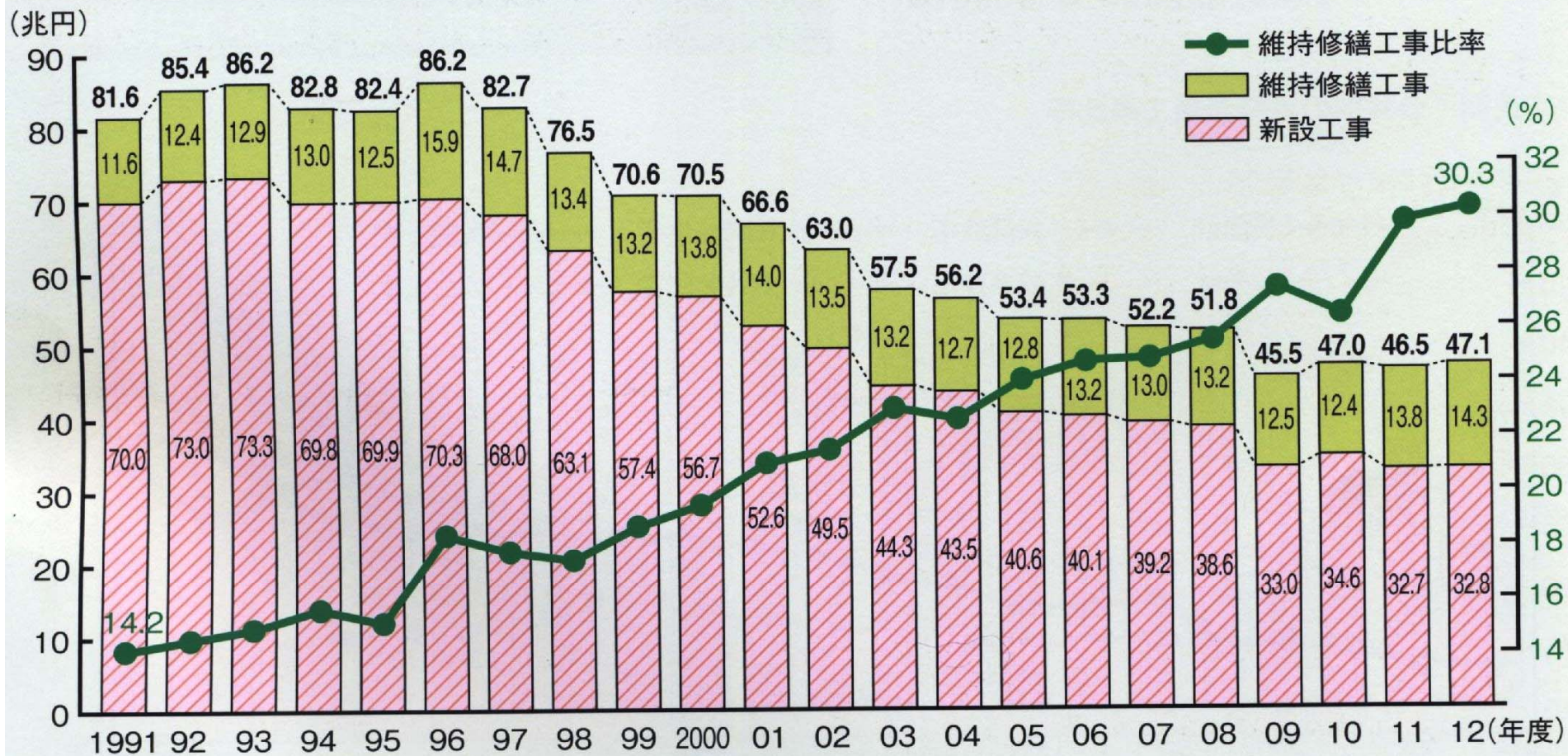
建設年度別施設数



注)この他、古い橋梁など記録が確認できない建設年度不明橋梁が約30万橋ある ※2011~2012年度はデータ無し



出典:国土交通省



(注) 1. 金額は元請完成工事高。建設投資（前頁）との水準の相違は両者のカバーする範囲の相違等による。

2. 維持修繕工事比率＝維持修繕工事完工高／完工高計（いずれも元請分）

資料出所：国土交通省「建設工事施工統計」

維持修繕工事の推移

維持管理における技術基準の体系

省令・告示、定期点検要領の体系

道路法

政令

省令・告示

H26.3.31公布
H26.7.1施行

通知(道路橋定期点検要領)

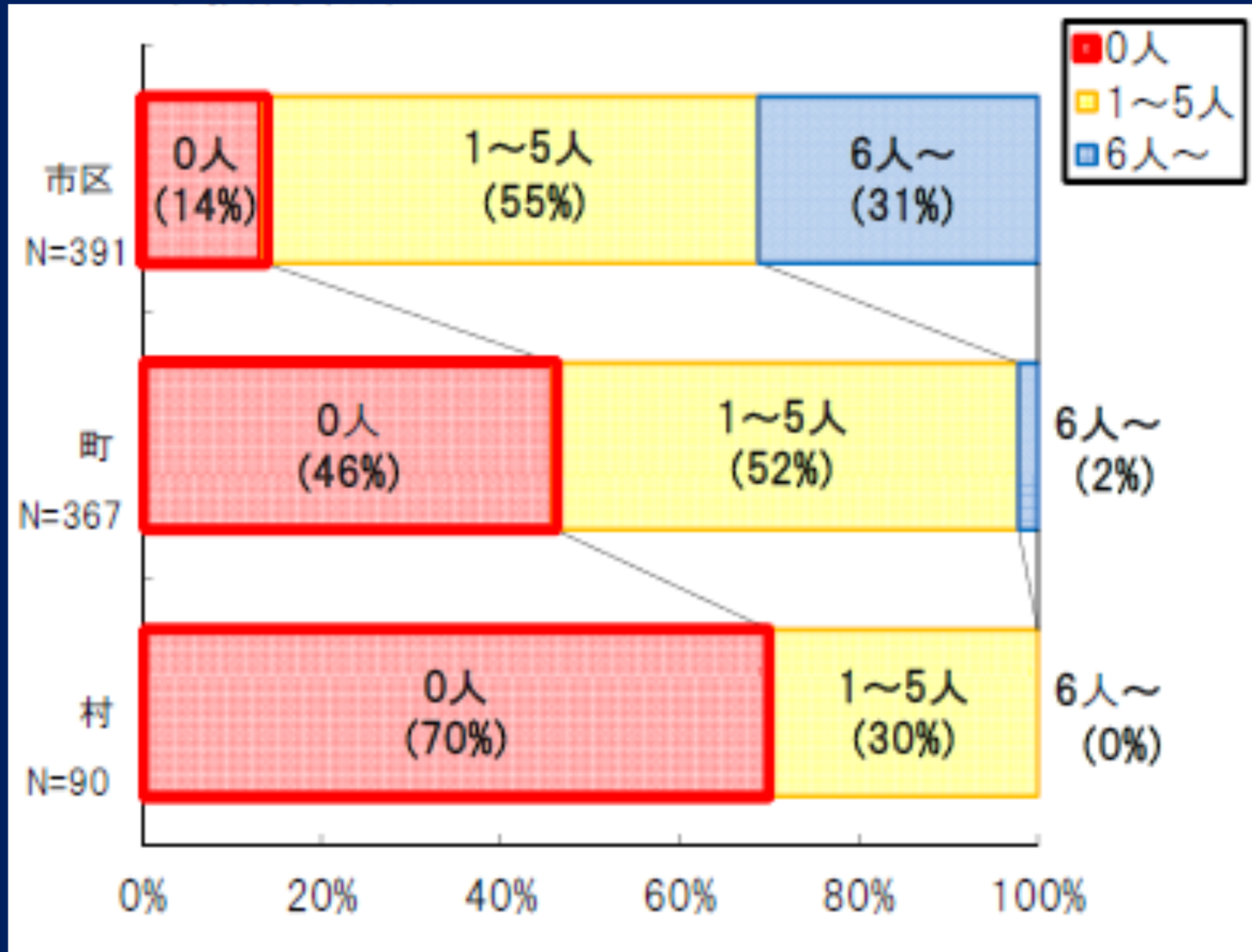
H26.6.25策定

定期点検は4つの条件が少なくとも満たされるものでなければならない。

- ・「**必要な知識と技能を有する者**によること」
- ・「**5年に1度の頻度**で行われること」
- ・「**近接目視**によること」
- ・「**健全性の診断**を行うこと」

- ・道路法施行規則第4条の5の2の規定に基づいて行う点検について、最小限の方法、記録項目を具体的に記したもの
- ・上記4つの項目に対して具体の考え方や留意点を補足
- ・「一般的構造と主な着目点」、「判定の手引き」

市区町村における橋梁保全業務に携わる土木技術者数



道路局調査(H24.7)



Ynys-y-Gwas橋の落橋(イギリス 1985年)

・腐食によるPC鋼材の破断



・グラウト+ポステン方式の
禁止





The River Scheldeに架かるPC橋の落橋
(ベルギー1992年)



- ・1995年完成
- ・自動車レース場と駐車場を結ぶ歩道橋。
- ・プレテンションPC鋼材の破断。

PC歩道橋の落橋(米国ノースキャロライナ:
2000年)



形式: 3スパントラス橋
橋長: 581m
主スパン: 140m
幅: 34.5m
建設年: 1967年

ミシシッピ川に架かる州間高速道路
35W号線(米国ミネソタ州: 2007年8月)



**The I35SW bridge collapse on August 1, 2007
at 6:05pm**





セントアンソニーフォールズ橋(PC箱桁橋:370m)



2013/04/15

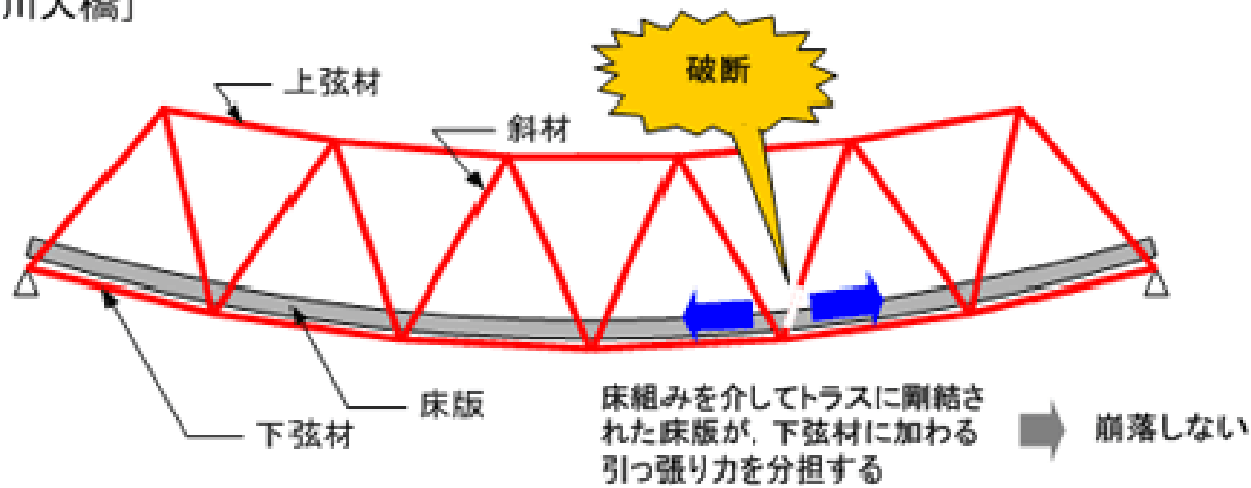


長さ: 858.46 m
最大支間長: 70.63 m
幅: 11.8 m
形式: 12連単純平行
弦下路ワーレントラス橋
建設年: 1963年

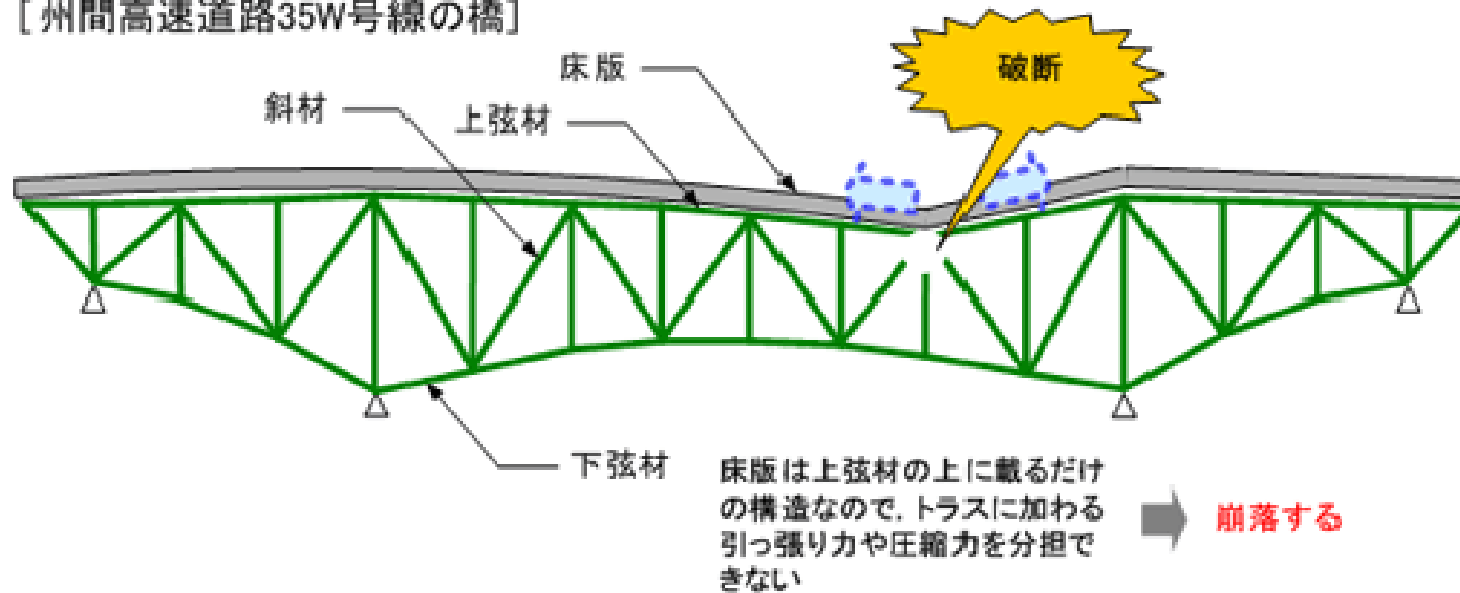
木曾川大橋(国道23号線)

●部材が破断したトラス橋の比較

[木曾川大橋]



[州間高速道路35W号線の橋]



(注) 州間高速道路35W号線の橋の部材が破断した位置は推定



形式：PCポステンI型橋
橋長：144 m
建設年：1965年

暮坪陸橋(国道7号線, 山形県)



- 1980年頃(15
年経過)
- ・主桁にひび
割れ
 - ・錆汁が発生



- 1980年頃(15
年経過)
- ・主桁にひび割れ
 - ・錆汁が発生





エポキシ樹脂
による補修



1991年(26年経過)

・耐力確保のために新たに2基の支柱を設置



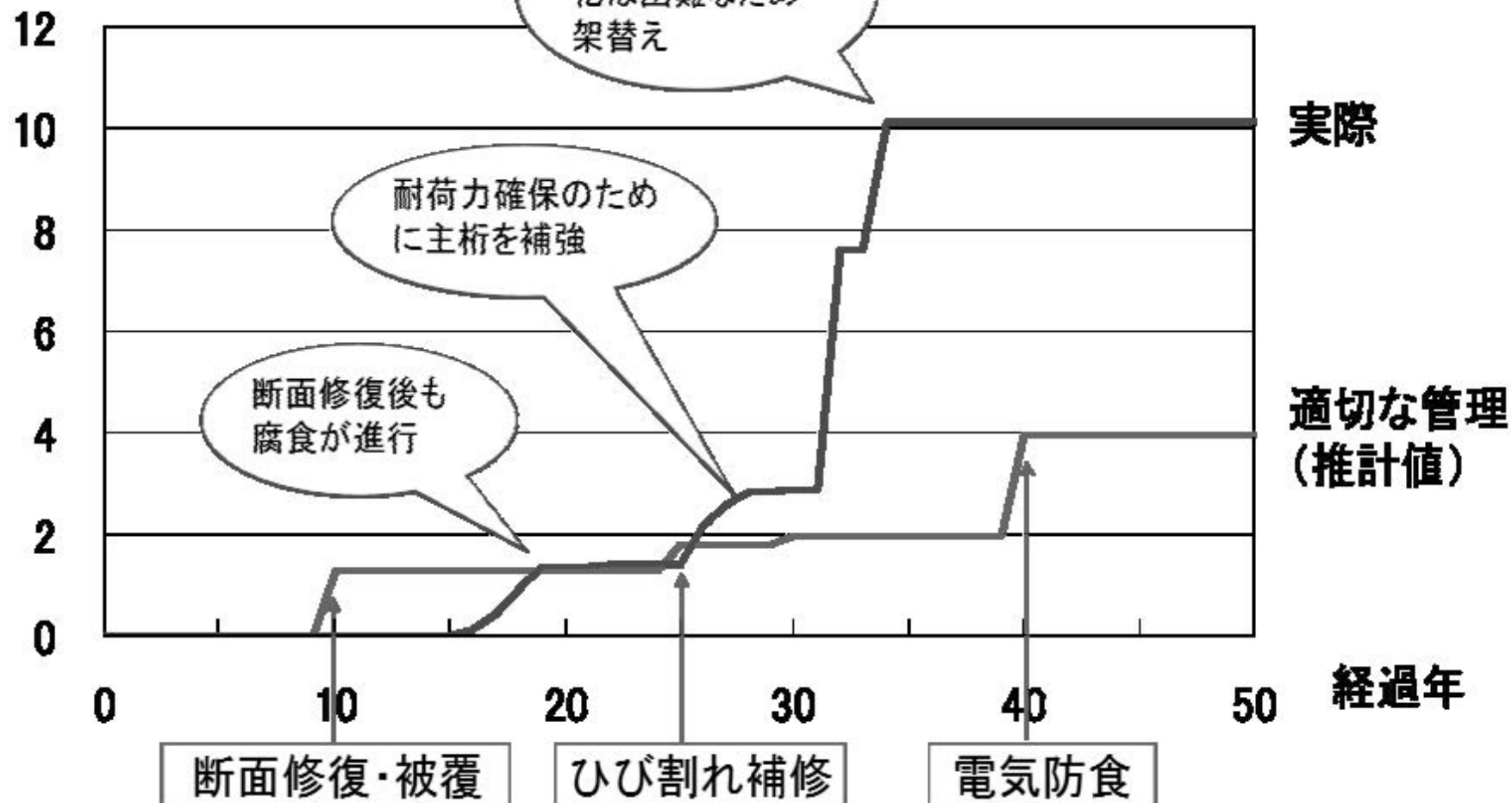
1991年(26年経過)

・主桁内部のPC鋼線が破断



・1999年架け替え

累計工事費(億円)

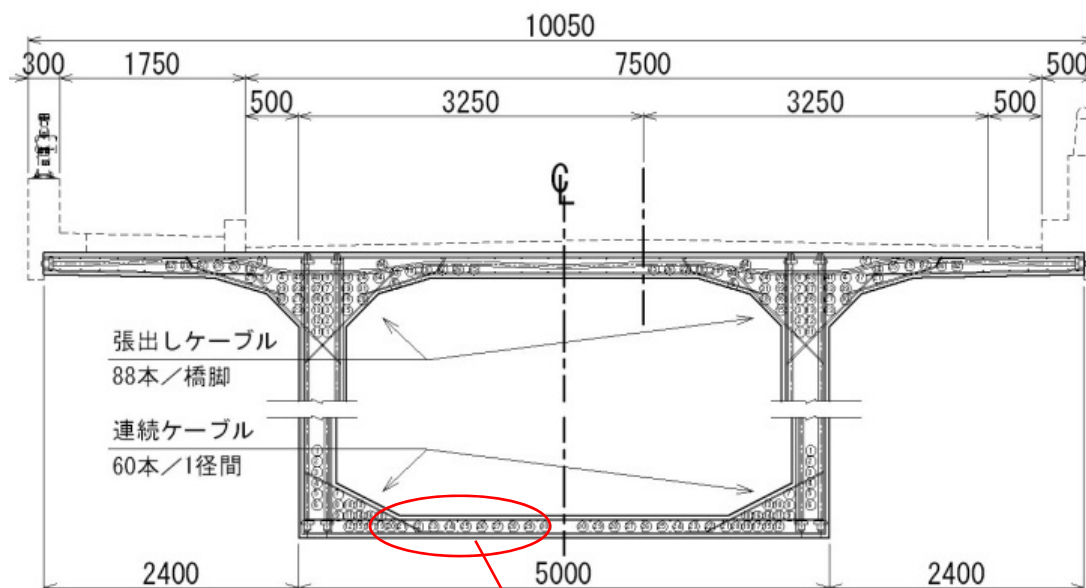


妙高大橋



4径間連続ラーメン橋、L=300m、セグメントPC
1972年竣工

PC鋼材の破断が発見される



9本破断

現場打ちコンクリート部



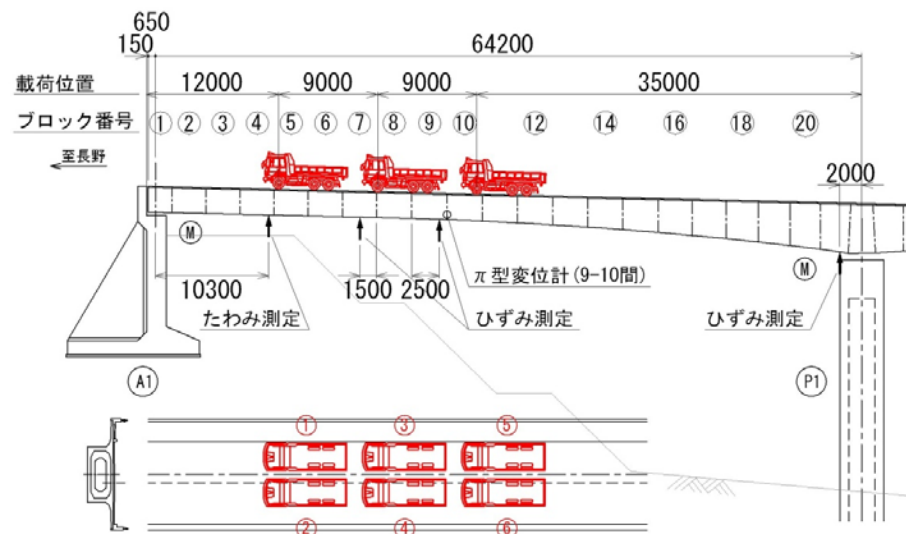
載荷試験

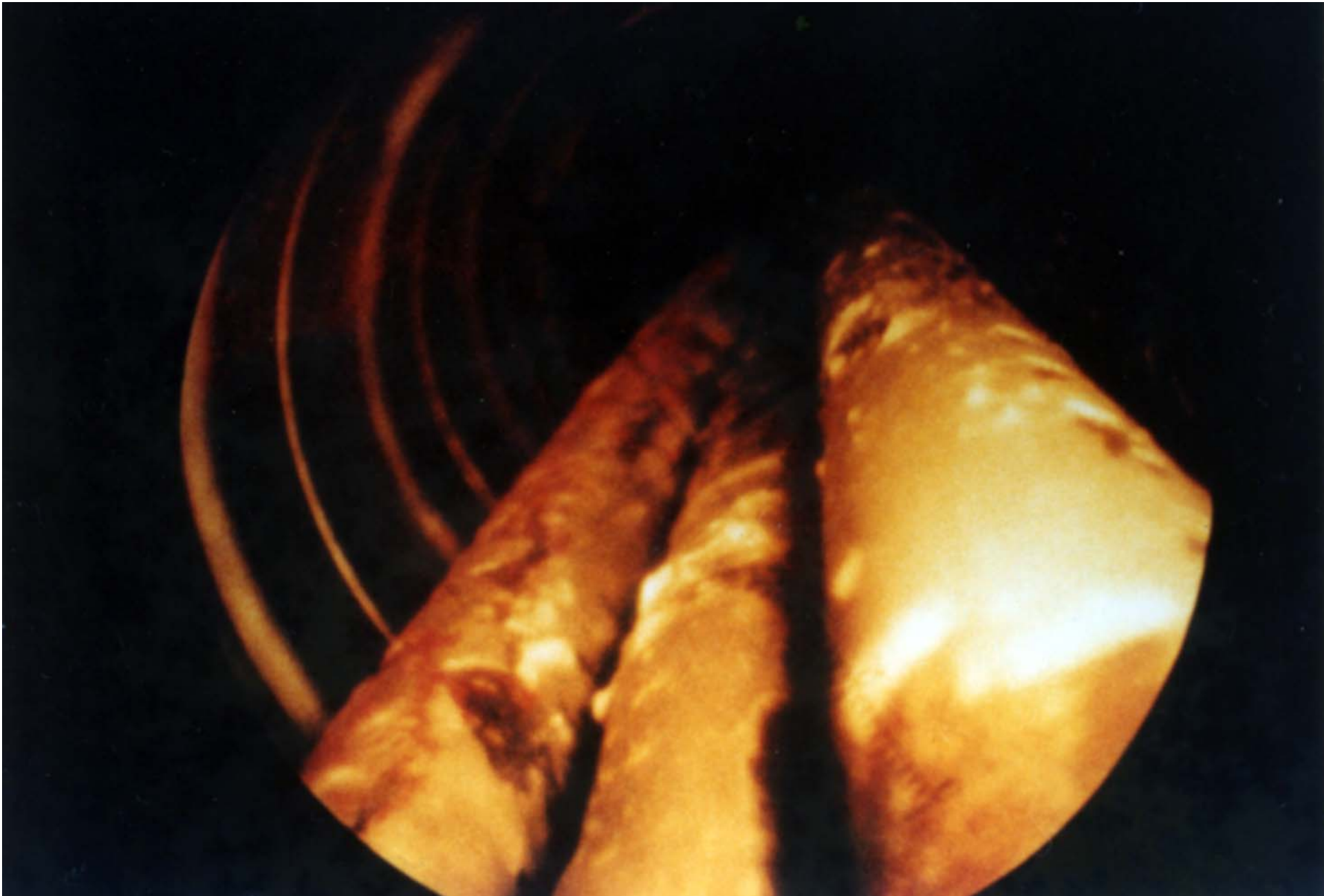
- コンクリート応力は計算値と概ね整合。
- たわみ量は計算値の約6割程度。
- セグメント継ぎ目に大きな開きは生じなかった。

測定箇所	応力度(N/mm ²)	
	載荷試験	計算値
第1径間 9ブロック	-3.4	-3.5
第4径間 91ブロック	-3.3	-3.6

測定箇所	たわみ量(mm)	
	載荷試験	計算値
第1径間	8.0	13.6
第4径間	6.2	9.8

載荷荷重：120t（静的載荷）
載荷位置：第1径間、第4径間





橋梁の劣化に影響を及ぼす要因

(外的要因)

- 1) 塩害→鋼材腐食
- 2) 疲労→床版の更新
- 3) 凍結融解
- 4) その他(過積載)

(内的要因)

- 1) グラウト(ポステンPC橋)
- 2) 防水・排水
- 3) ASR
- 4) その他(継手、ひび割れ)

(解明すべき点)

- 1) 鋼材が腐食破断した場合の安全性(耐荷性)
- 2) グラウトの未充填に対する対処
- 3) ASRに対する処置
- 4) その他

講演内容

1. 外ケーブルPC橋から大偏心外ケーブルPC橋へ
2. 橋梁の経年劣化の現状と問題点
3. 橋梁の長寿命化に向けた研究(埼玉大学)
4. 高い耐久性を持つ橋とは
5. 新道路橋示方書について

PC鋼材が破断したPC桁の 力学的性状に関する研究

PC鋼材を破断させた梁の力学的性状

インデントPC鋼材 $\phi 7\text{mm} \times 3$ 本配置

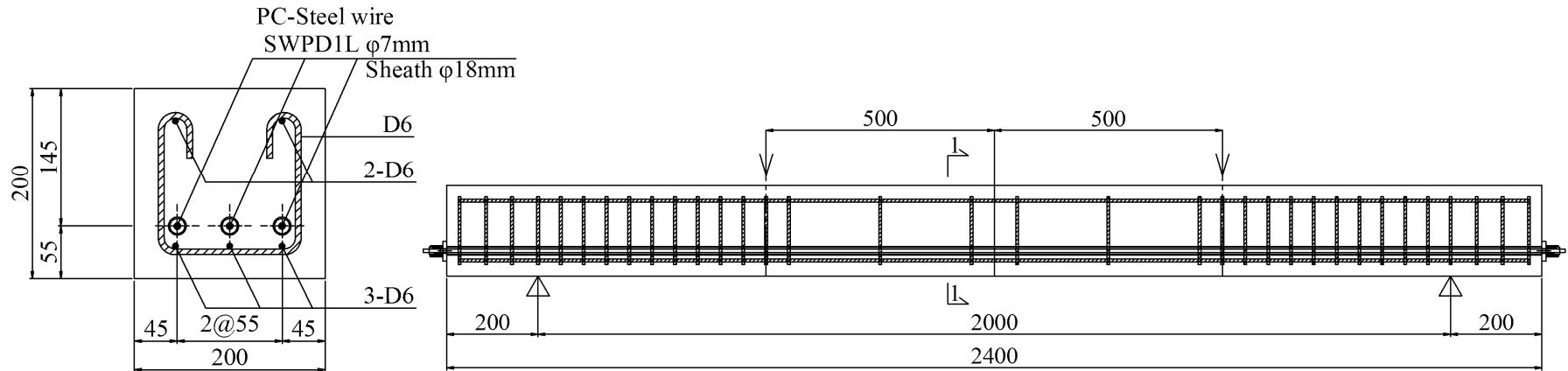


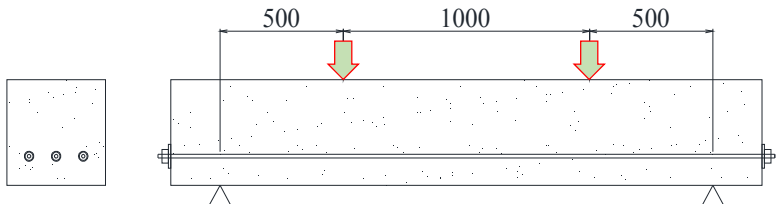
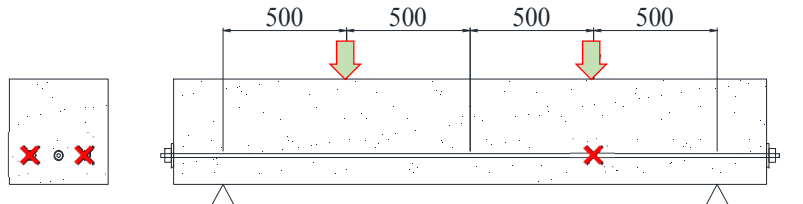
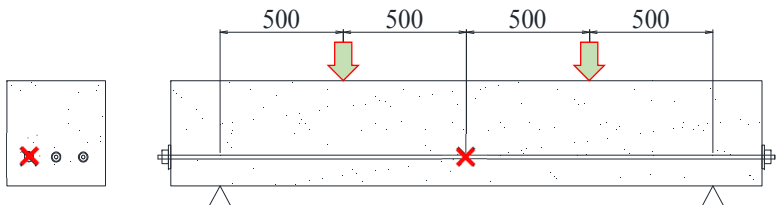
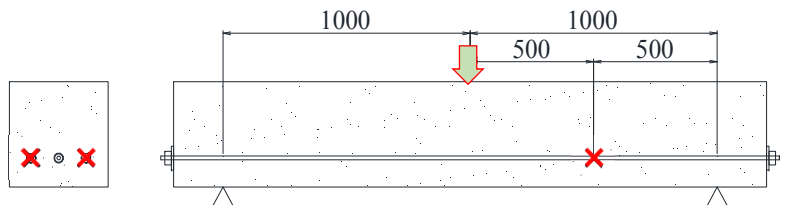
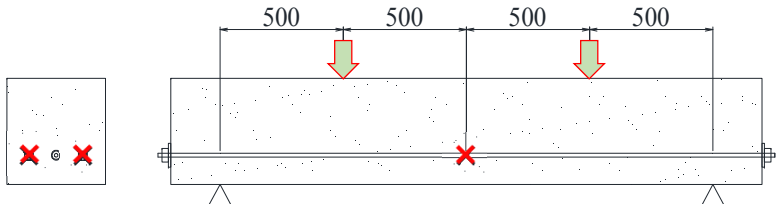
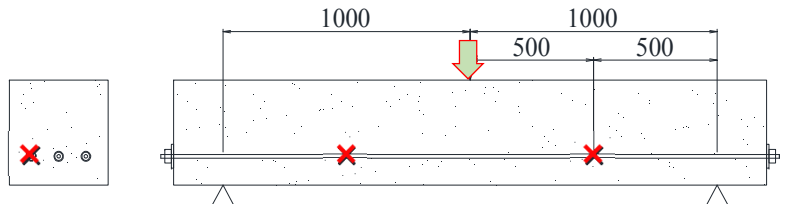
図-3: 実験供試体の概要

表-1: 使用材料および材料強度・導入直後の鋼材応力度

CASE	コンクリート 圧縮強度	グラウト 圧縮強度	鉄筋 (SD345 D6)		PC鋼材 (SWPD1L $\phi 7$)			プレストレス
	f_c (N/mm^2)	f_g (N/mm^2)	σ_{sy} (N/mm^2)	E_s (kN/mm^2)	σ_{py} (N/mm^2)	σ_{pu} (N/mm^2)	A_p (mm^2)	σ_{pe} (N/mm^2)
CASE-0	54.9	74.4	475	215	1,435	1,653	38.48	758
CASE-1	56.5	91.0						809
CASE-2	56.6	89.8						721
CASE-3	57.4	93.5						782
CASE-4	56.3	94.1						830
CASE-5	57.7	89.1						743

PC鋼材を破断させた梁の実験概要

- PC鋼材の切断本数、切断箇所、および載荷方法(1点/2点)をパラメータとして載荷実験を実施し、鋼材破断による曲げ性状を確認

<p><CASE-0> 切断なし (健全な状態) 二点載荷</p> 	<p><CASE-3> 1/4点2本切断 二点載荷</p> 
<p><CASE-1> 中央1本切断 二点載荷</p> 	<p><CASE-4> 1/4点2本切断 中央一点載荷</p> 
<p><CASE-2> 中央2本切断 二点載荷</p> 	<p><CASE-5> 1/4点2箇所1本切断 中央一点載荷</p> 

注: "X"印はPC鋼材の切断箇所を示す

図-4: 実験ケース

漏洩磁束法による破断位置の推定

▶ 漏洩磁束法の適用性確認

漏洩磁束法: 鋼材の破断を検知する非破壊検査手法の1つ。
コンクリート表面から永久磁石により内部の鋼材を磁化(着磁)し、
測定した磁束分布波形から鋼材破断部の漏洩磁束の有無を判定する。

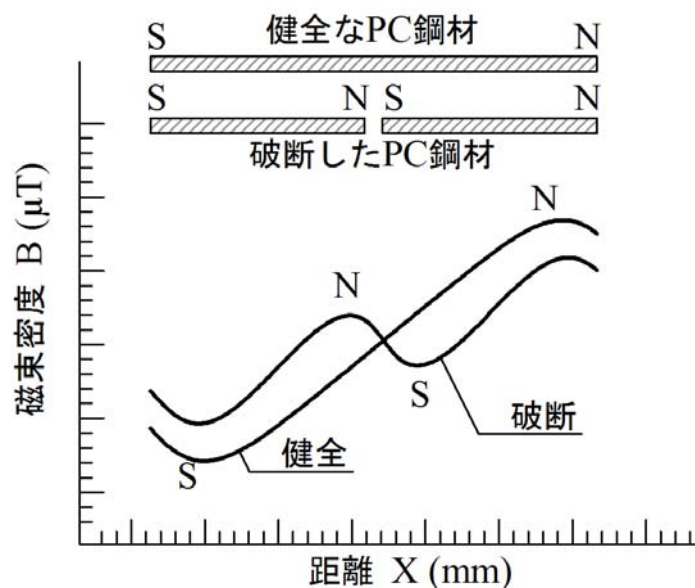
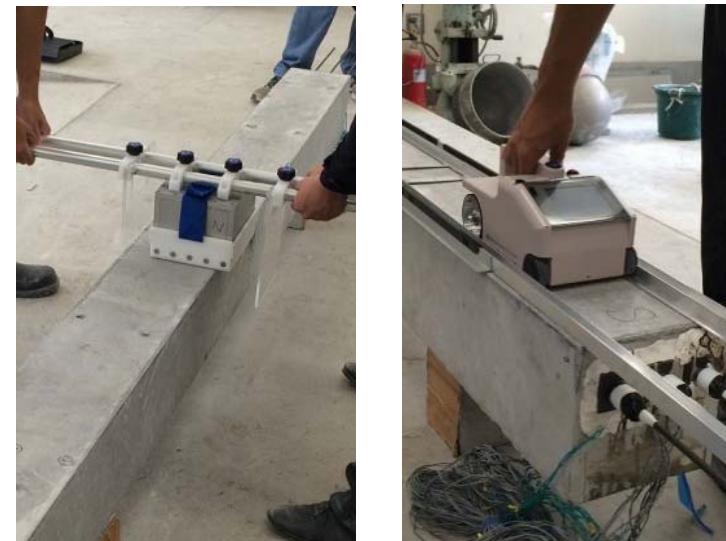


図-8: 漏洩磁束法の
測定結果イメージ



着磁の様子

計測の様子

図-9: 漏洩磁束法検査状況

漏洩磁束法による破断位置の推定

▶ 漏洩磁束法の適用性確認

- PC鋼材を2本切断したケースについては、破断箇所で比較的明瞭なS字曲線を確認することができた。
- 切断前に着磁したCASE3においても、破断箇所を確認できた。

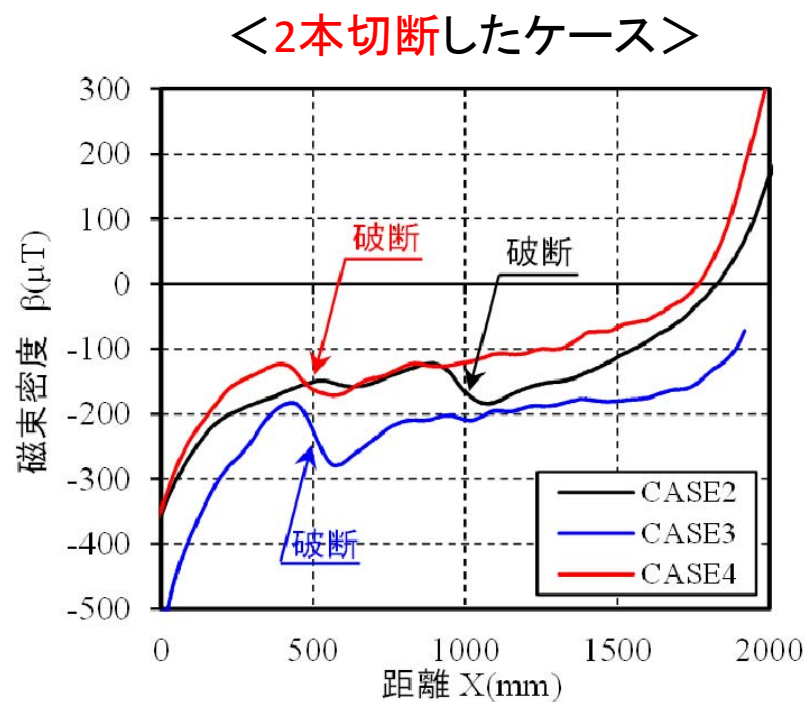


図-10: CASE2,3,4 測定結果

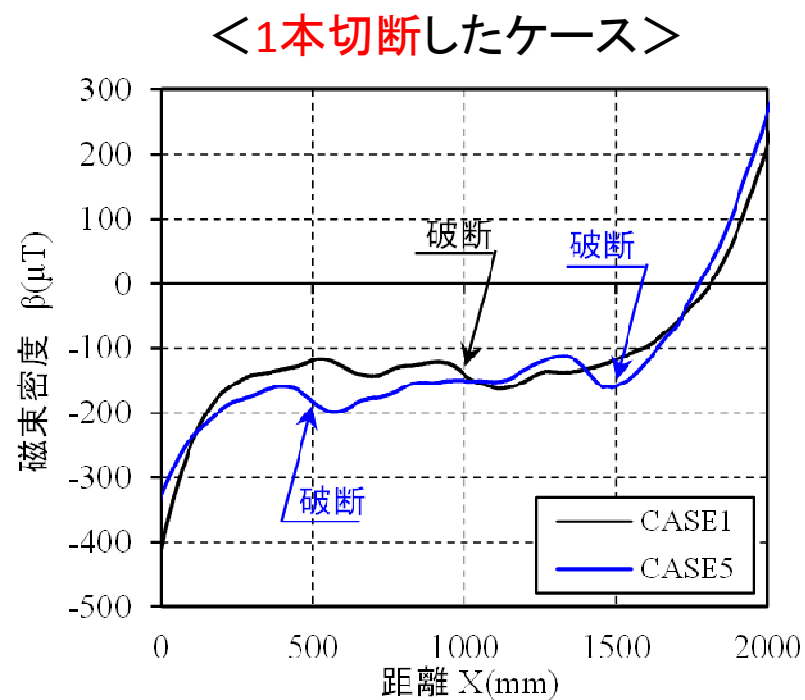


図-11: CASE1,5 測定結果

PC梁の載荷実験結果

➤ 載荷試験結果

- いずれのケースも曲げ圧縮破壊
- 1点載荷と2点載荷が混在するため、支間中央のモーメントに換算し、最大モーメントを比較

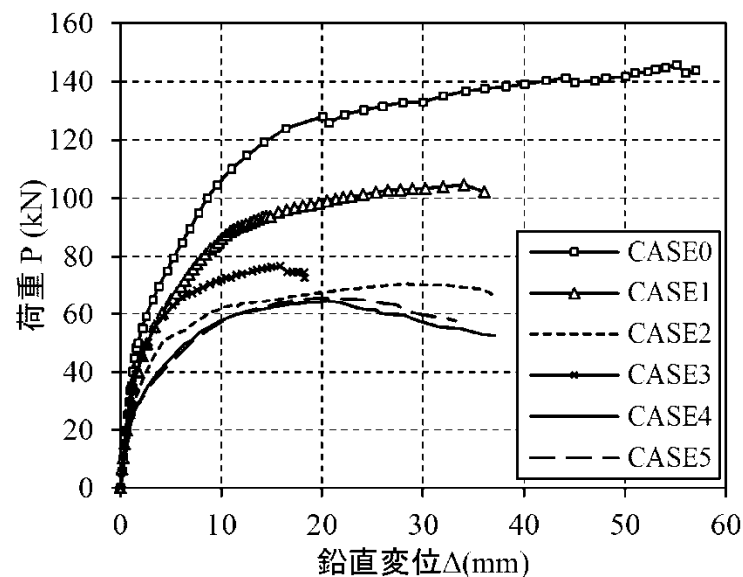


図-13: 荷重～鉛直変位関係

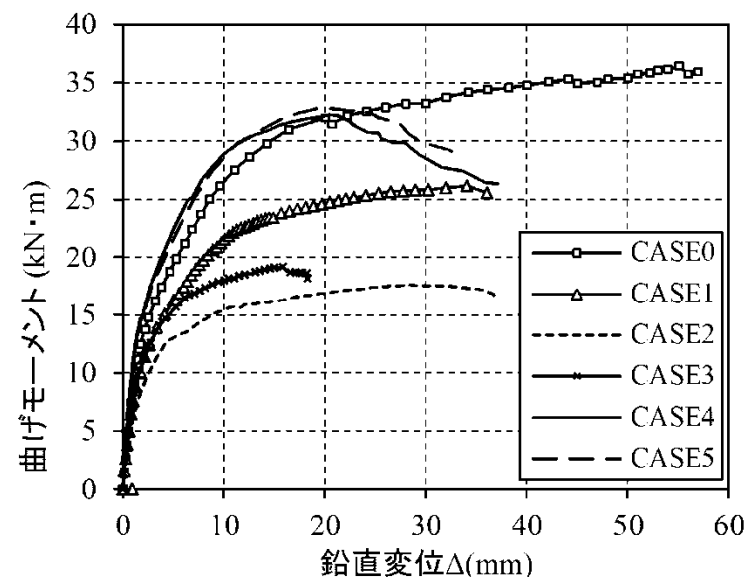
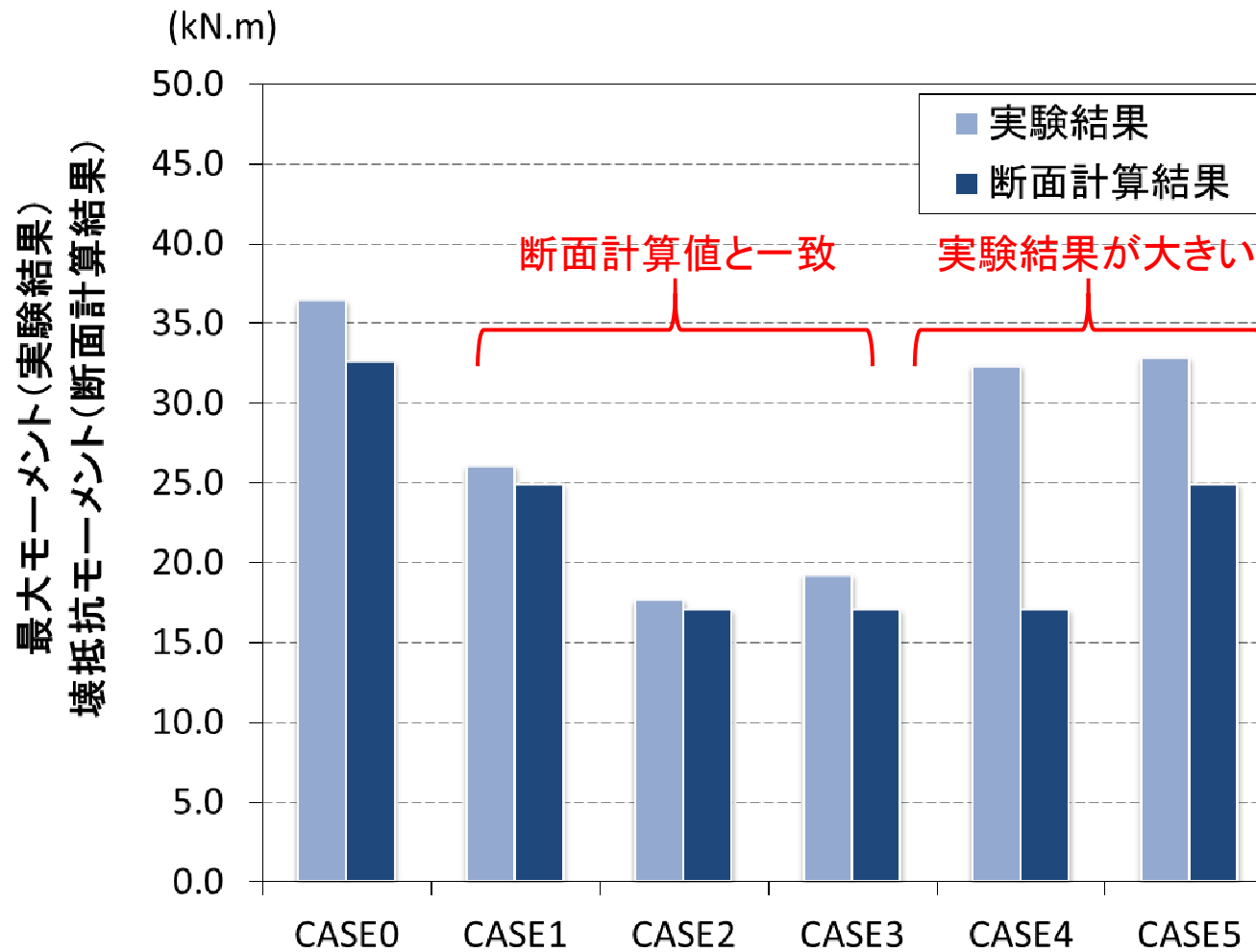


図-14: 支間中央の
曲げモーメント～鉛直変位関係

PC梁の載荷実験結果

➤ 載荷試験結果(断面計算結果との比較)



PC梁の載荷実験結果

➤ 載荷試験結果

- 鋼材破断箇所と最大モーメントを示す箇所が一致する
CASE1,CASE2,CASE3は、実験値と破壊抵抗モーメント(計算値)が一致。

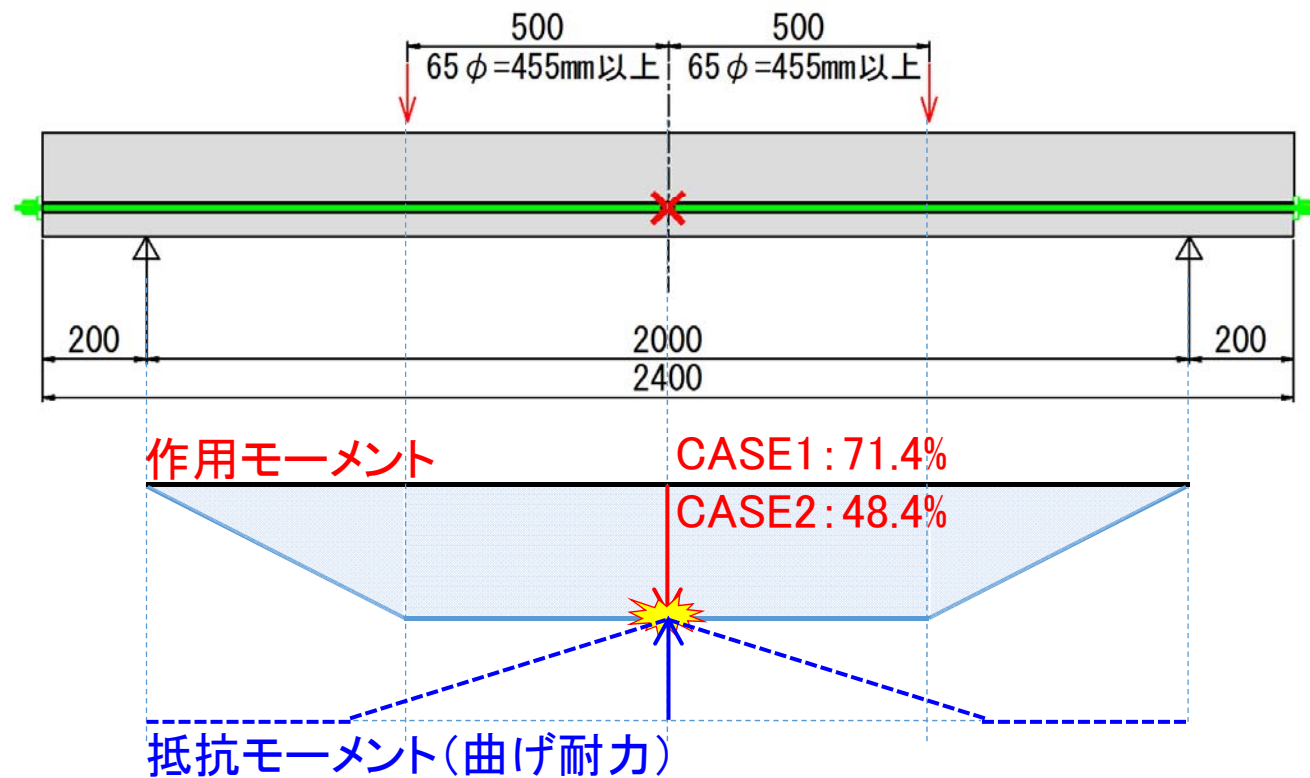


図-16: 鋼材破断を伴う曲げ破壊の概念 (CASE1,2)

PC梁の載荷実験結果

➤ ひび割れ性状

- CASE1,CASE2,CASE3は、鋼材破断位置において曲げ破壊

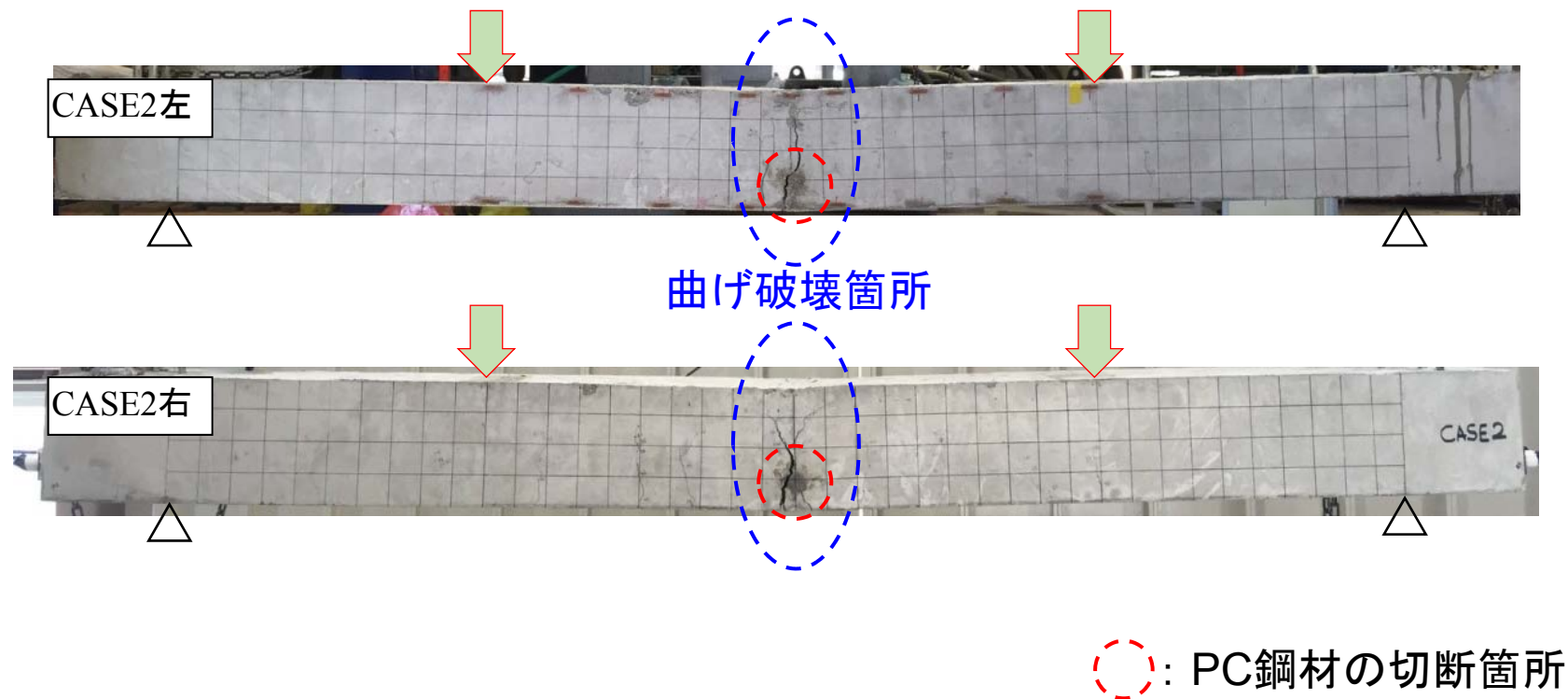


図-20: 載荷実験後の供試体 (CASE2)

PC梁の載荷実験結果

➤ 載荷試験結果

- CASE4,5は、破断箇所が最大モーメントを示す支間中央より離れており、破断面の抵抗モーメントの低下による影響を受け難い。

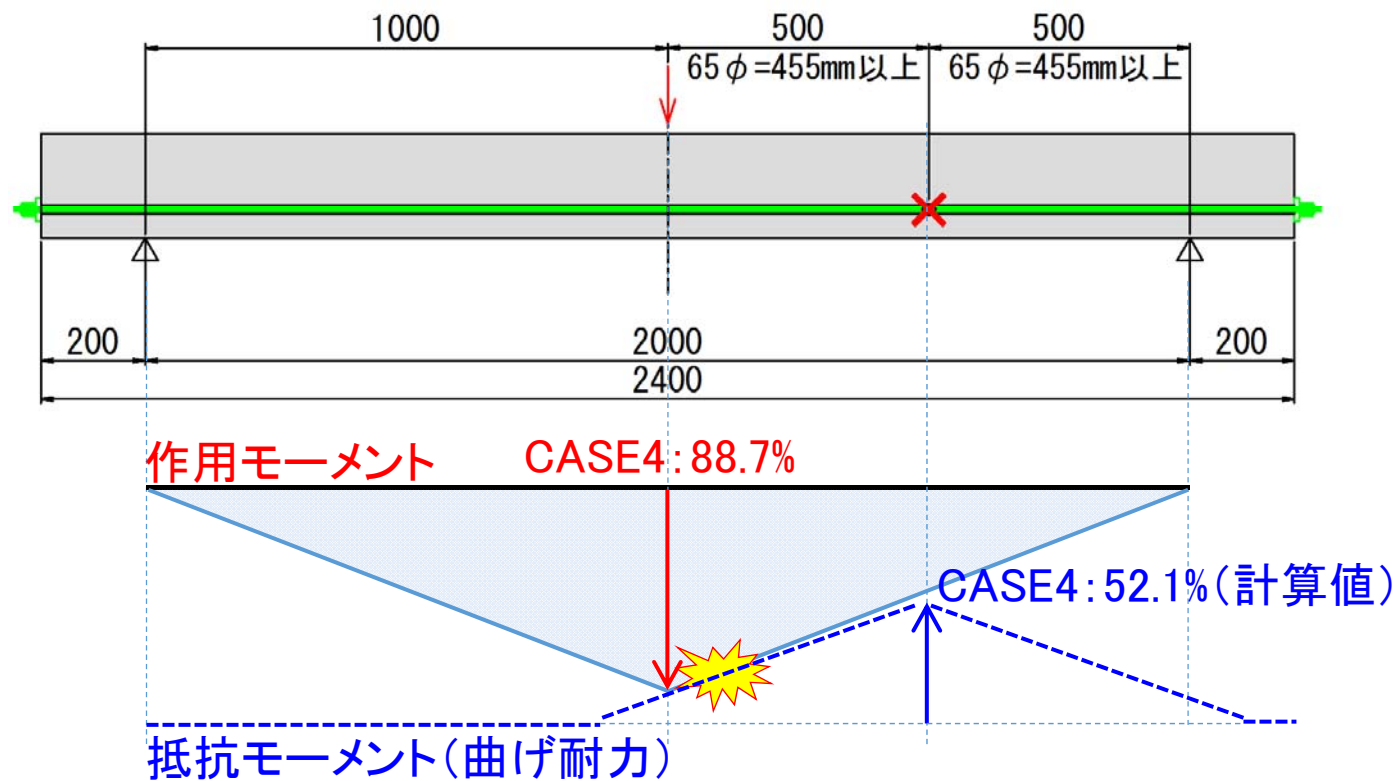


図-18: 鋼材破断を伴う曲げ破壊の概念 (CASE4)

PC梁の載荷実験結果

➤ ひび割れ性状

- CASE4は、支間中央より鋼材破断側に偏って損傷(曲げ破壊)

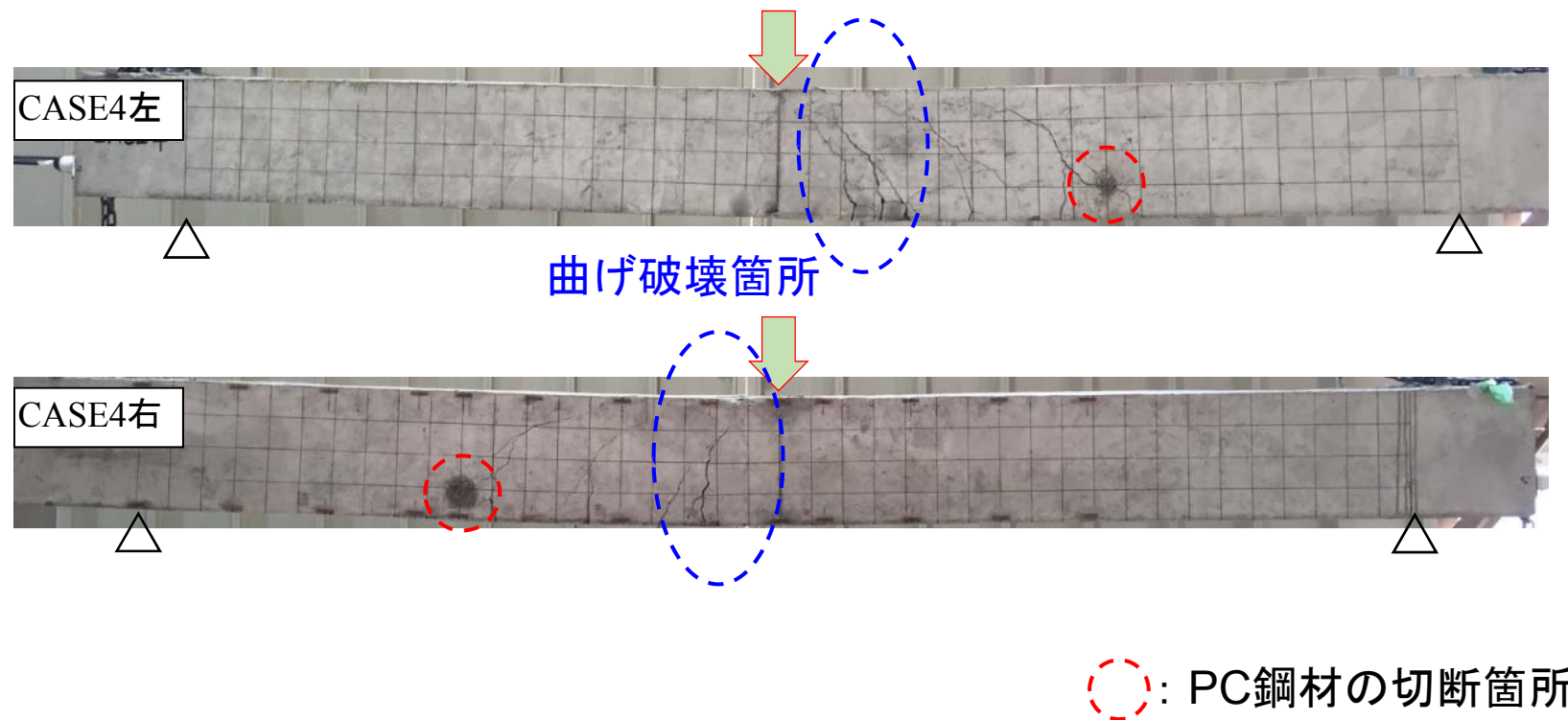


図-21: 載荷実験後の供試体 (CASE4)

実PC桁の実験 (土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造) Vol. 71, No. 3, 2015より)

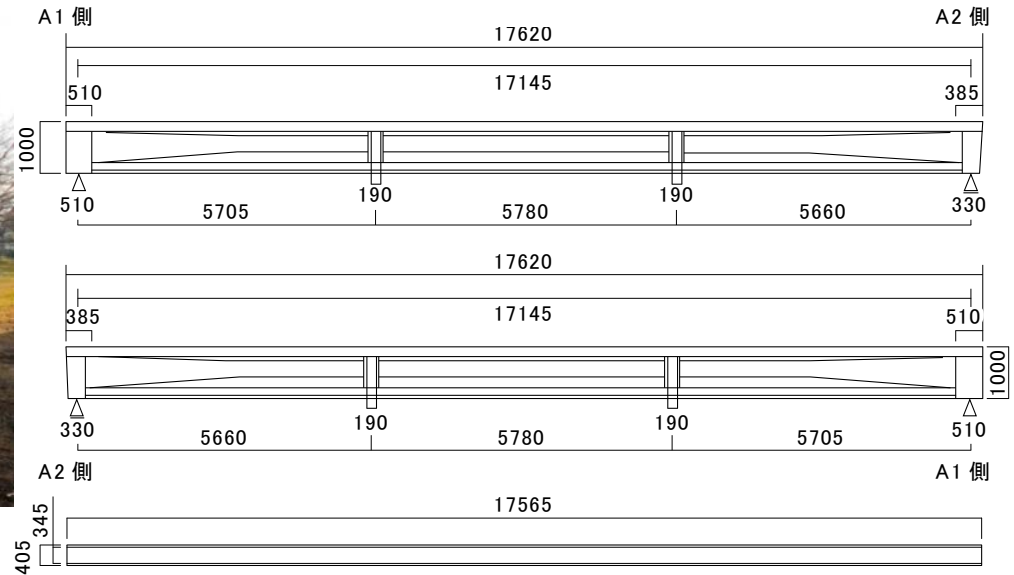
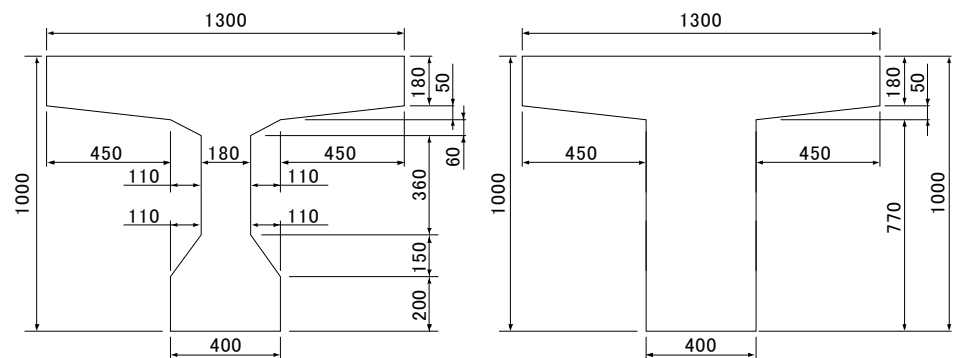


表 PC桁の主要材料強度など

主要材料		規格・設計値等
Co設計 基準強度		400 kgf/cm ²
鉄筋	D13	SD30
PC 鋼線	12φ7	引張強度 155 kgf/mm ² 降伏点応力度 135 kgf/mm ² 伸び 5%以上

(a) 側面・上面図

単位：mm



(b) 桁中央断面

(c) 桁端断面

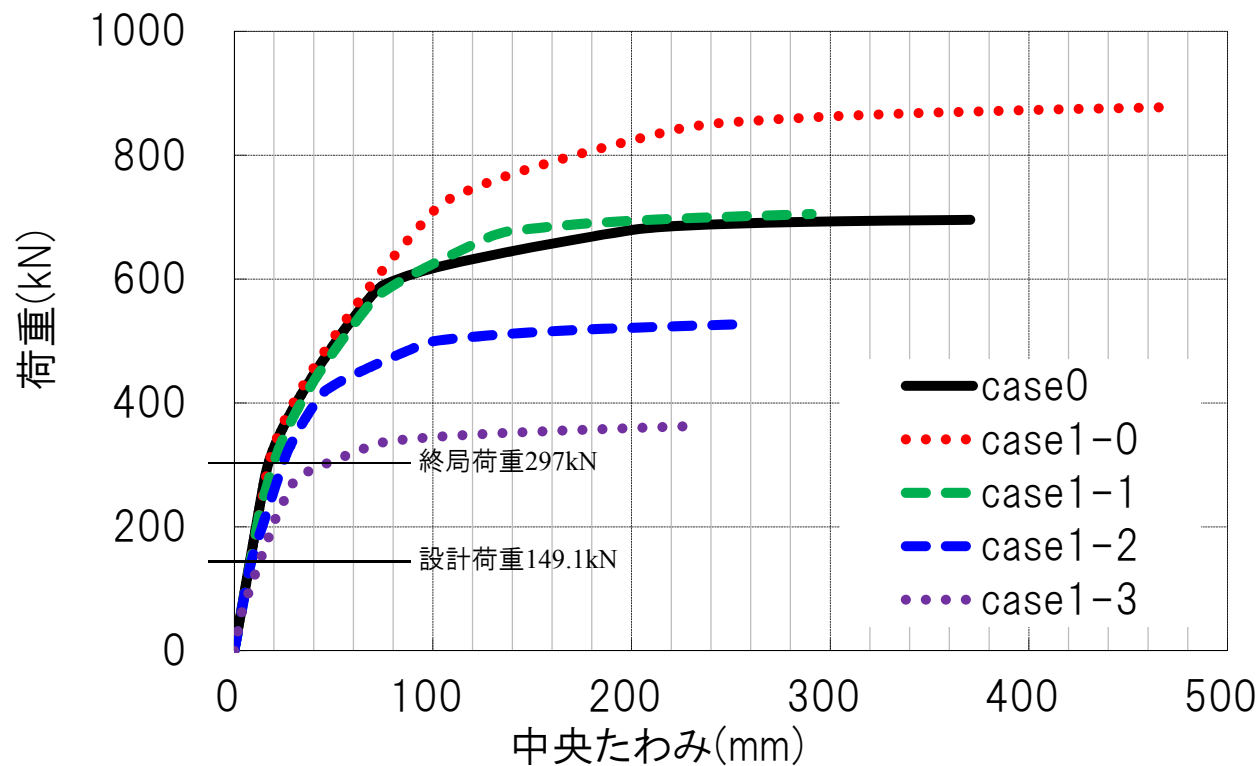
図 PC桁の構造一般図

5章 載荷実験（計測位置等）



載荷実験状況

PC桁の曲げ耐荷性能



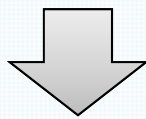
ケース	モデル	破断束数
Case 0	規格値	0束
Case1-0	試験値	0束
Case1-1		1束
Case1-2		2束
Case1-3		3束

・PC鋼線全5束中3束破断した場合でも、設計の終局荷重作用時を満足

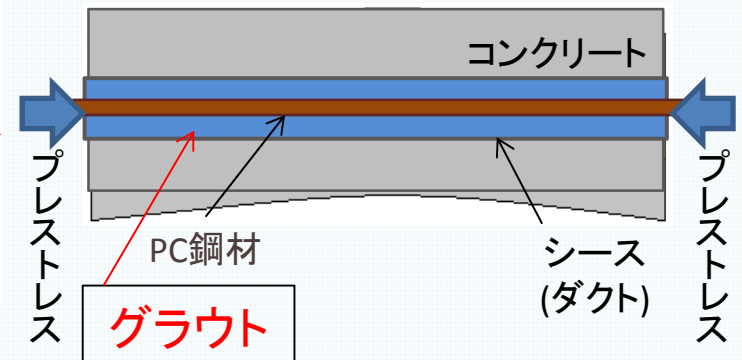
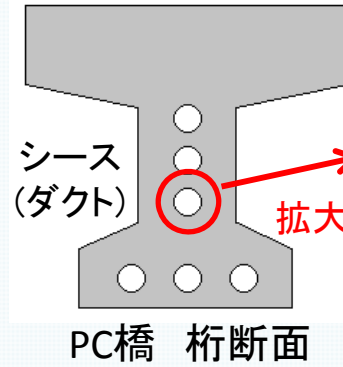
イオン交換樹脂を混和した 再注入用PCグラウトの開発

背景

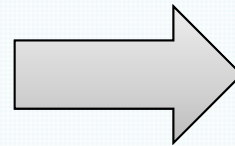
既設PC橋における
グラウトの未充填が問題視



未充填部が塩害を受け
PC鋼材が腐食する



補修せずに
腐食が進むと...



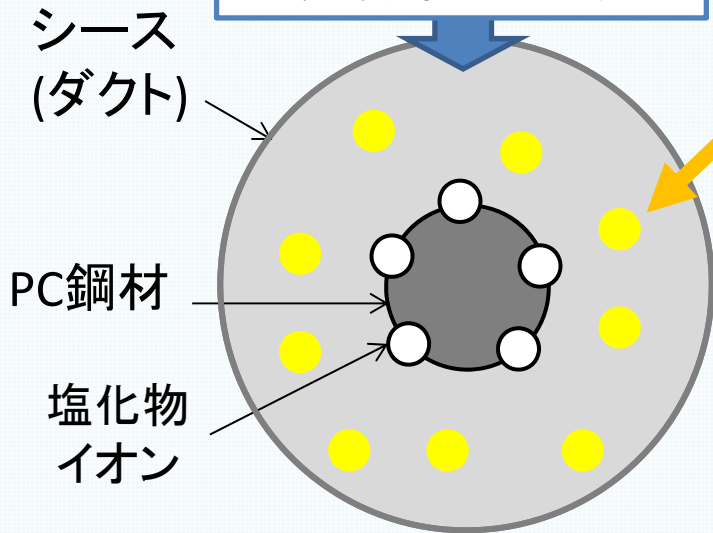
PC鋼材の塩化物イオンを取り除く補修材の開発が求められている

塩化物イオンを吸着する能力を持つ
イオン交換樹脂に注目



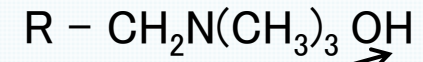
補修用グラウトに混入させる

未充填部に注入する



グラウト未充填部 断面図

イオン交換樹脂



Cl⁻

吸着

粒径 約0.5 mm

OH⁻

放出

○主な用途

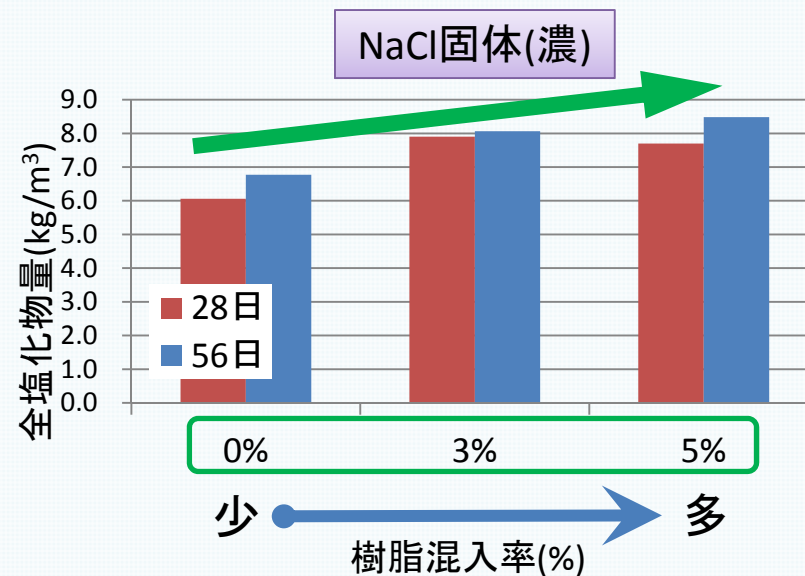
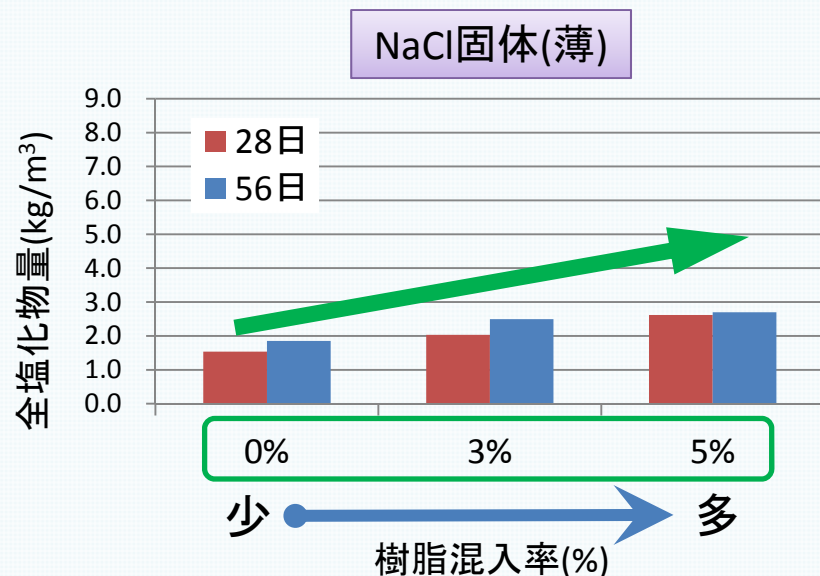
電力・化学・食品工業における水の脱イオンである

イオン交換樹脂の
吸着効果により...

鋼材表面から補修用グラウトに
塩化物イオンを拡散させる効果を期待

実験結果 全塩化物量

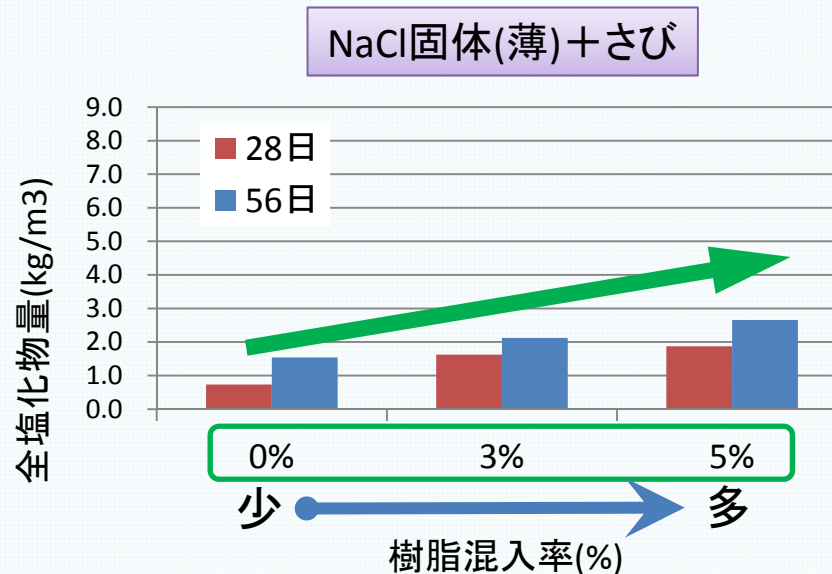
➤ 固体としてNaClを付着させた場合



樹脂混入率の増加に伴い
全塩化物量が増加している



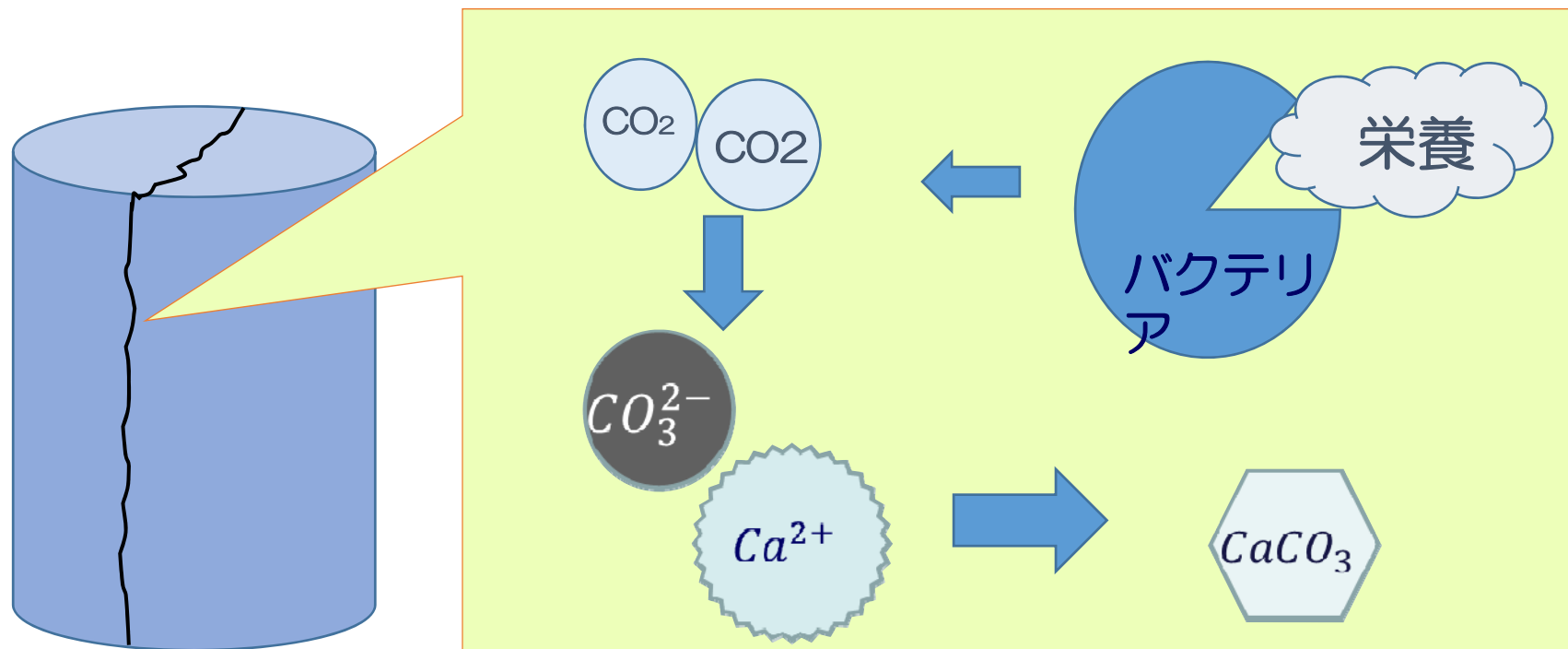
イオン交換樹脂による塩化物イオンの
吸着効果により拡散した塩化物量が
増加したと考えられる



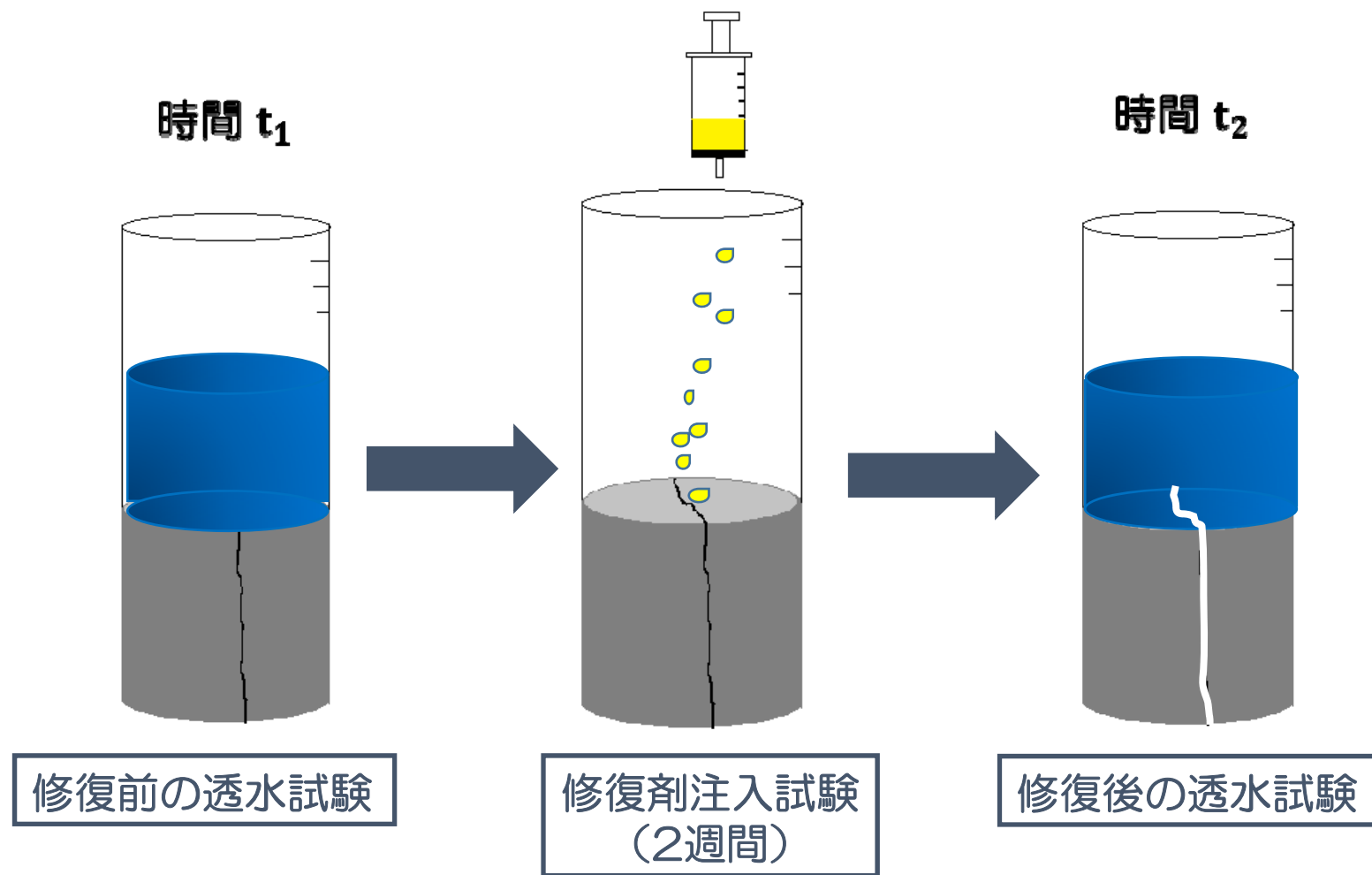
微生物を用いたコンクリートのひび割れ 治癒技術の開発

修復原理

- バクテリアを用いたひび割れ修復工法開発すること



透水試験方法

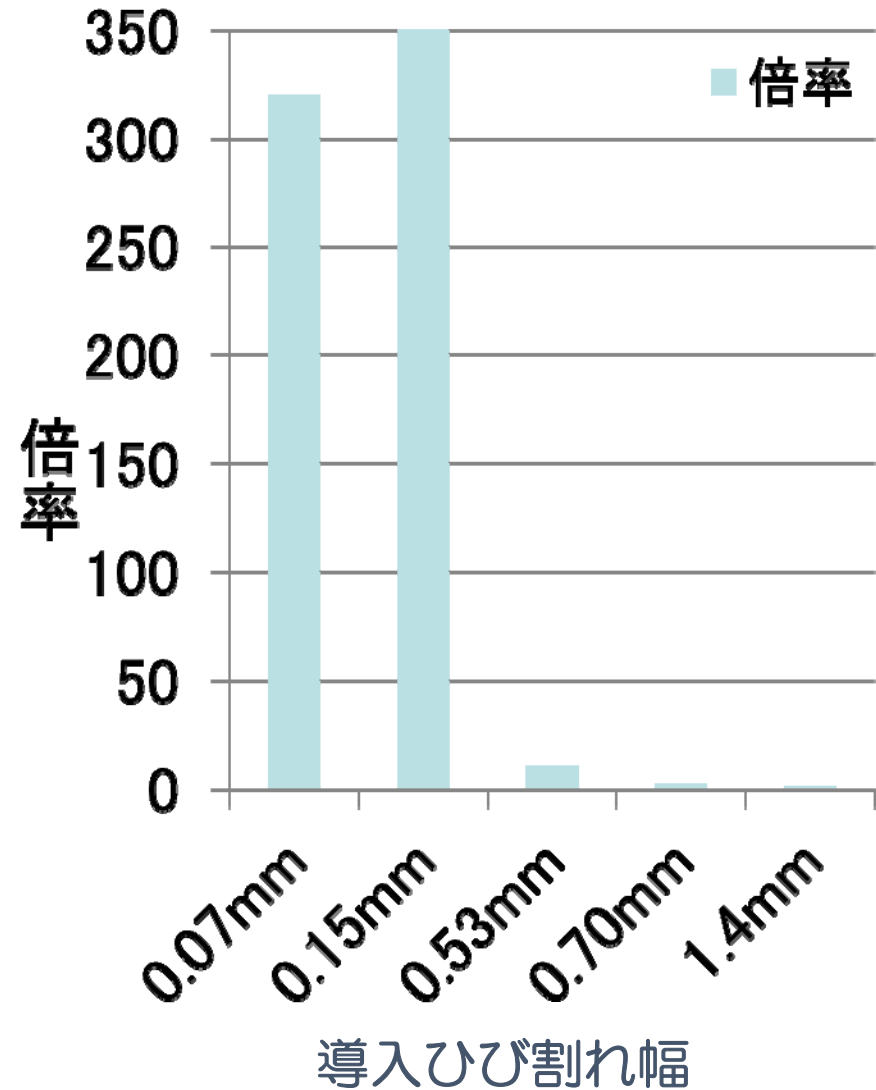
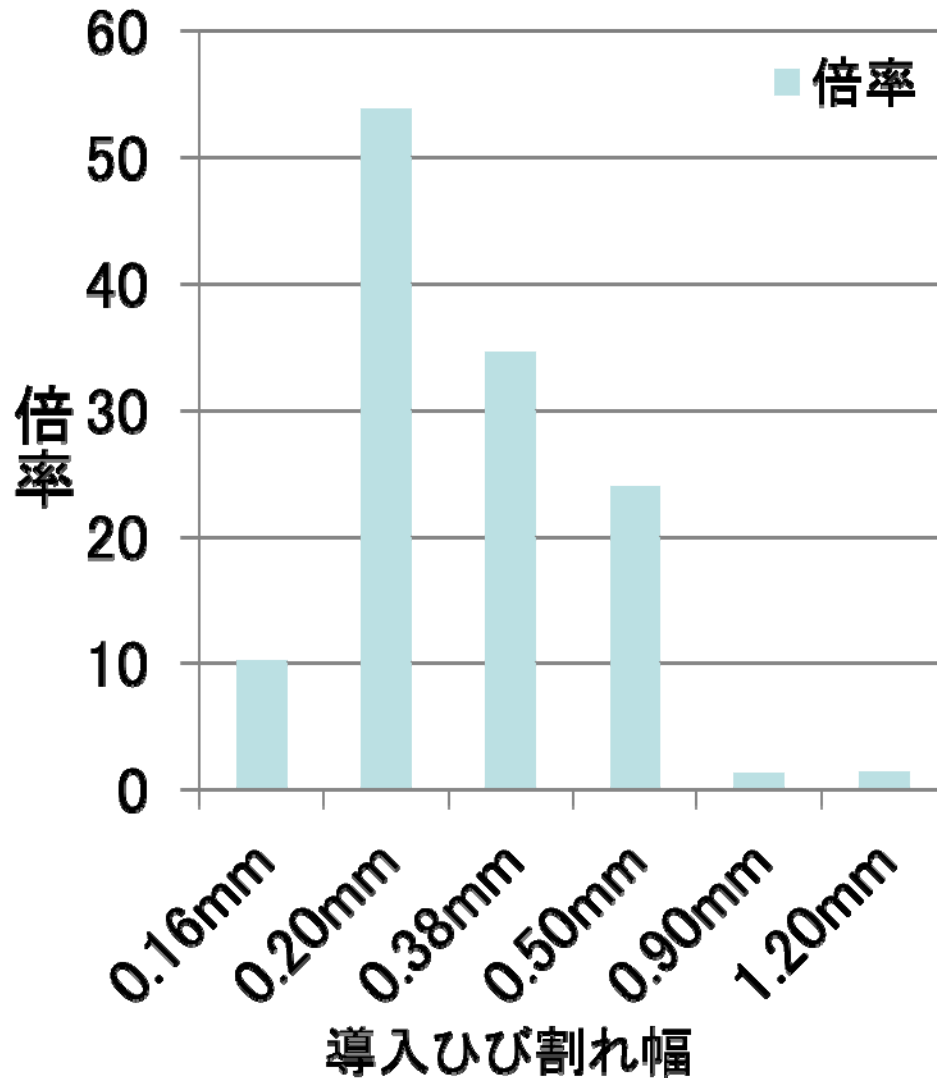


ひびわれ修復倍率 ($=\frac{t_2}{t_1}$) > 1.0 で修復されたと判断される

透水試驗結果



透水試験結果



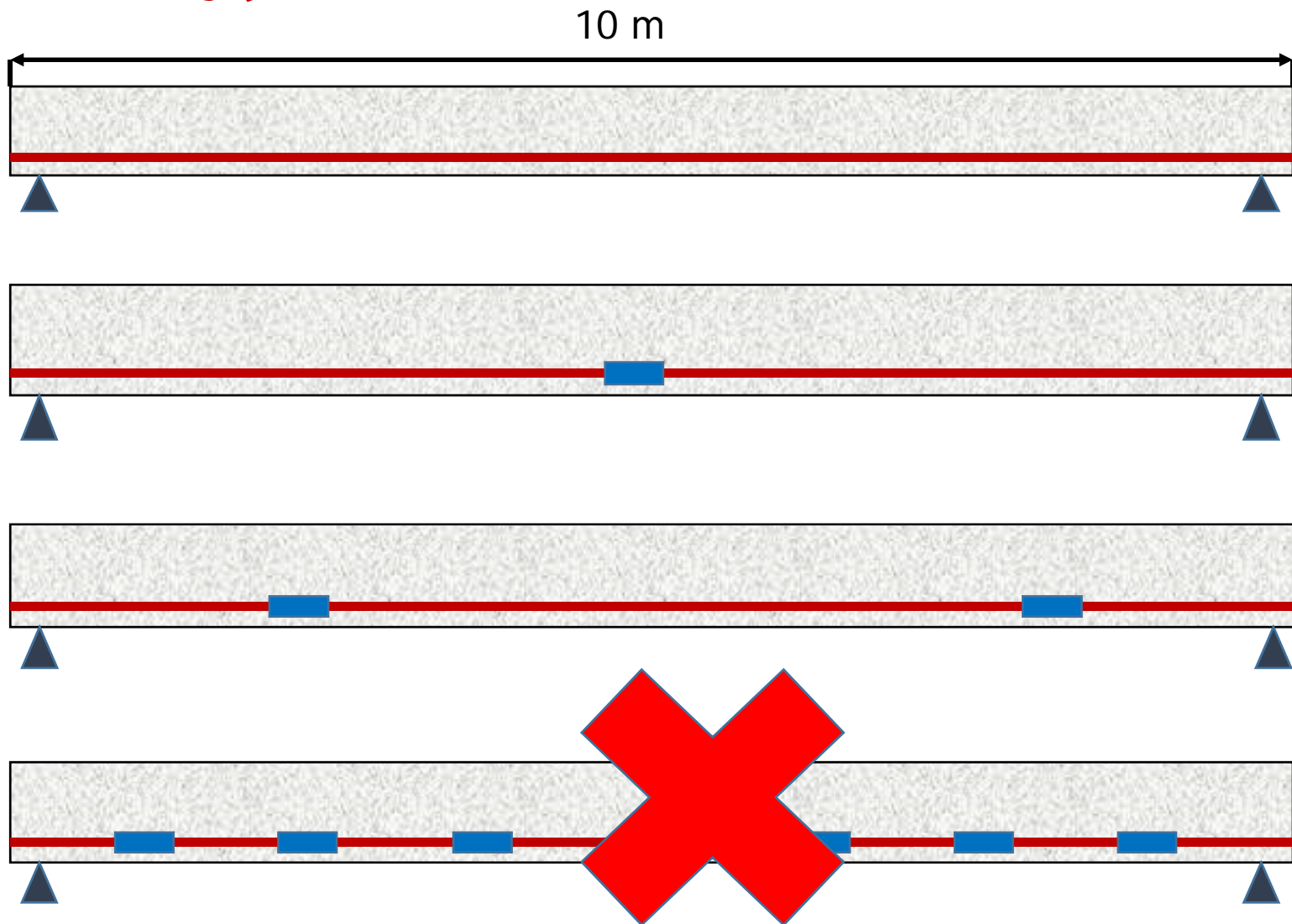
講演内容

1. 外ケーブルPC橋から大偏心外ケーブルPC橋へ
2. 橋梁の経年劣化の現状と問題点
3. 橋梁の長寿命化に向けた研究
4. 高い耐久性を持つ橋とは
5. 新道路橋示方書について

今後新設あるいは架け替えされる橋(耐久性の観点から)

1) 構造的合理性

理にかなうとは？



Kinokawa Bridge

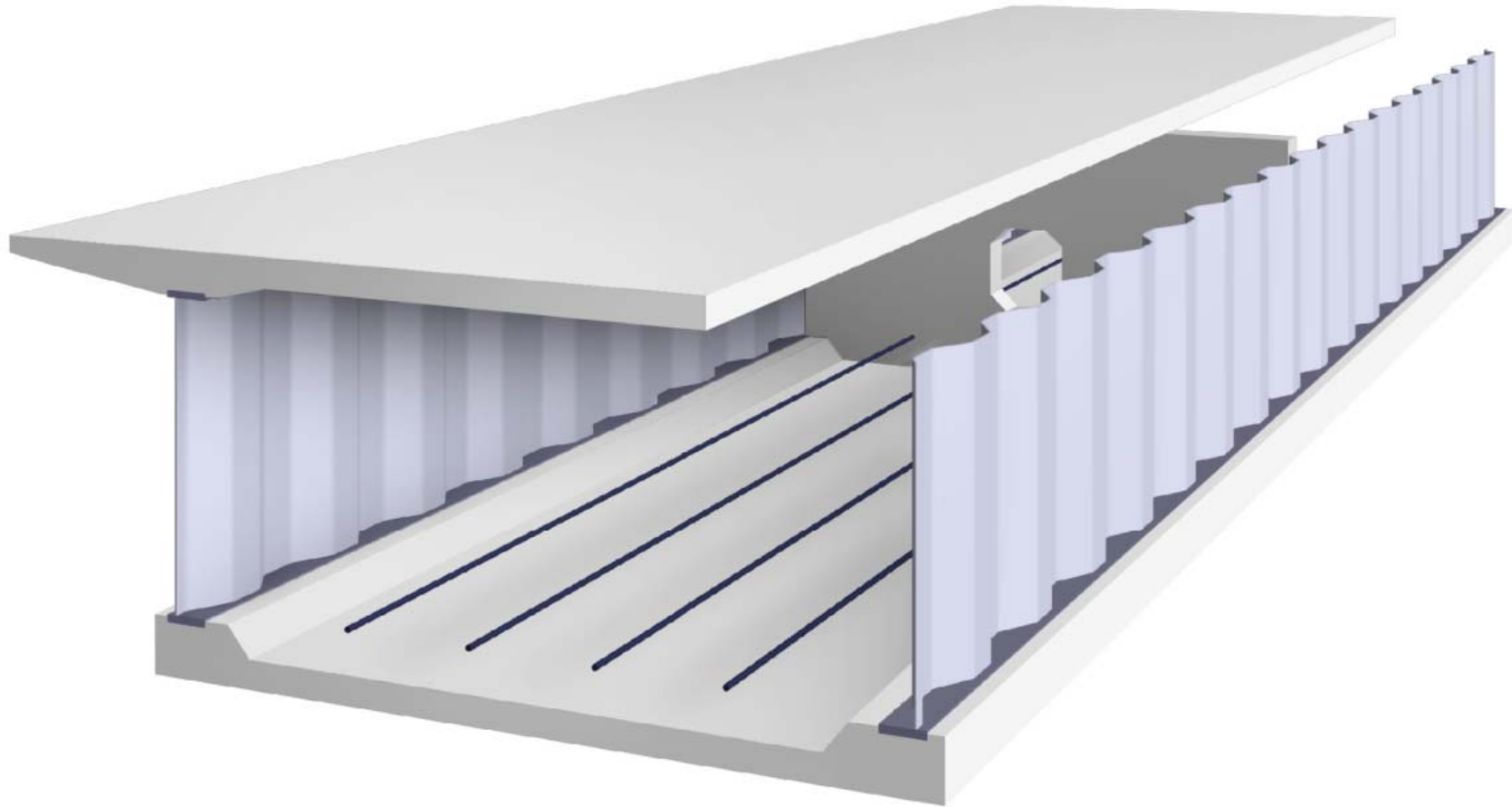


複合トラス橋



Name: [Ginzanmiyuki Bridge](#)

Type: 5-span continuous PC bridge with corrugated steel web



1
2
3
4
5
6

Completed in 1995





長さ: 858.46 m
最大支間長: 70.63 m
幅: 11.8 m
形式: 12連単純平行
弦下路ワーレントラス橋
建設年: 1963年

木曾川大橋(国道23号線)

今後新設あるいは架け替えされる橋(耐久性の観点から)

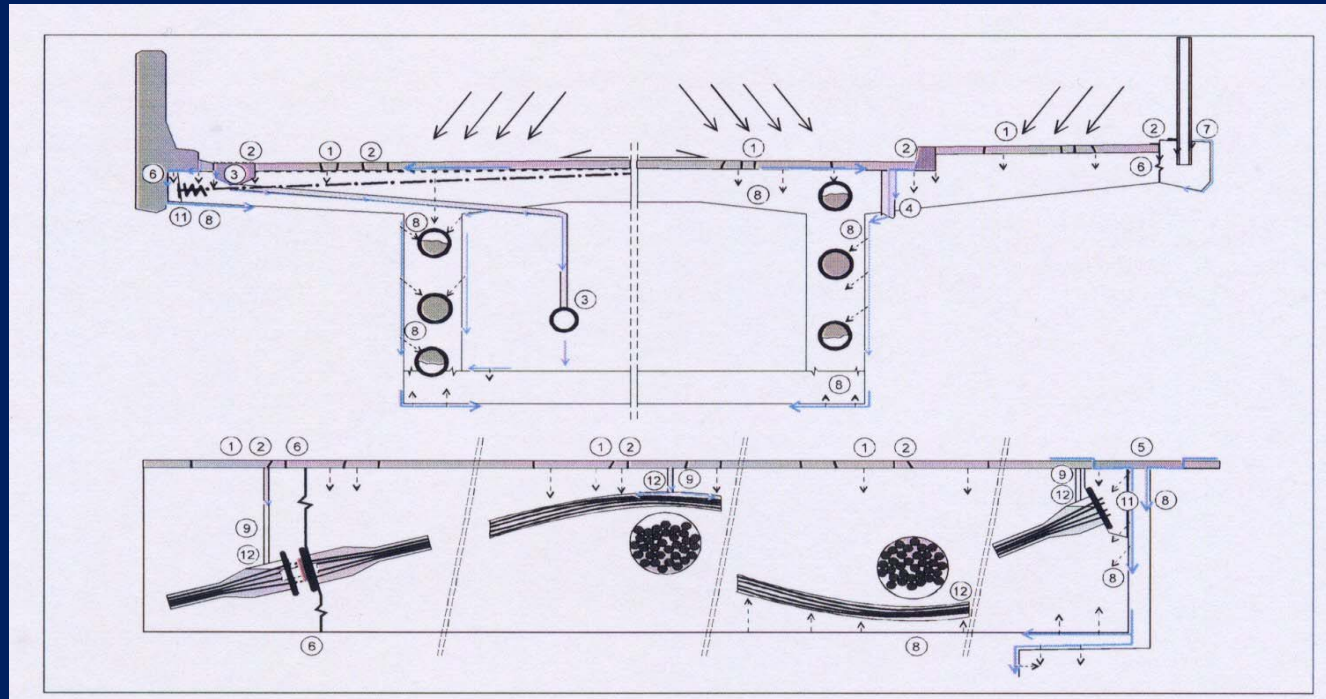
1) 構造的合理性

2) 多重防護層 (Multilayer Protection)

3) 検査が容易であること

PC鋼材の腐食過程

典型的なPC箱桁橋のハザードシナリオ(危険シナリオ)



PC鋼材を保護する外縁の層の破壊

- ① 舗装の欠陥(ひび割れなど)
- ② 床版防水層の欠陥
- ③ 排水柵や排水管の欠陥
- ④ 排水管の設置位置のミス
- ⑤ 伸縮装置からの漏水
- ⑥ 地覆の打ち継ぎ目からの漏水
- ⑦ インサートからの侵入
- ⑧ コンクリートかぶりの欠陥

PC鋼材を直接保護する層の破壊

- ⑨ グラウトホース内のグラウト未充填
- ⑩ 鋼製シースの破損
- ⑪ 定着具の後埋めコンクリートの欠陥
- ⑫ ダクト内のグラウト未充填による空隙

PC橋のマルチレイヤーシステム(多重防護層)

Action \ Structural Protection		構造的防護層		
		High ¹⁾	Medium ²⁾	Low ³⁾
外的環境／作用	High ⁴⁾			PL3
	Medium ⁵⁾		PL2	
	Low ⁶⁾	PL1		

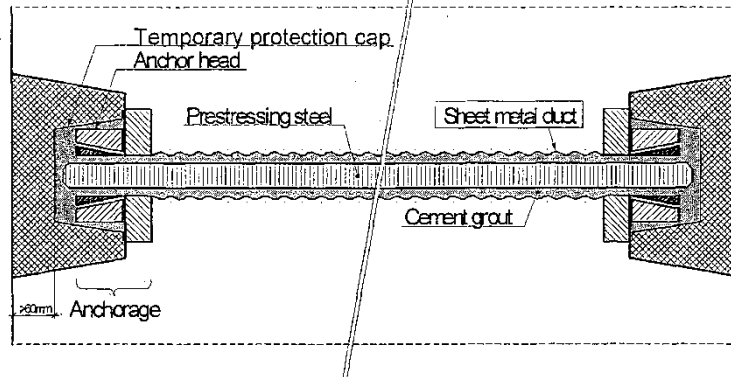
構造的防護層

- 1) High: 床版防水層＋高品質コンクリート＋容易な点検
- 2) Medium: 表面改質＋通常のコンクリート
- 3) Low: セグメント目地＋表面保護層なし＋点検できない構造

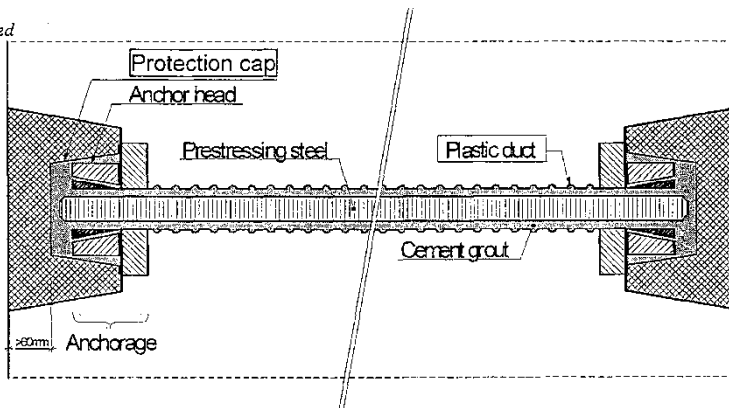
外的環境／作用

- 4) High: 飛沫帯や凍結防止剤の散布域
- 5) Medium: 湿潤環境
- 6) Low: 構造物の内部などの乾燥している所

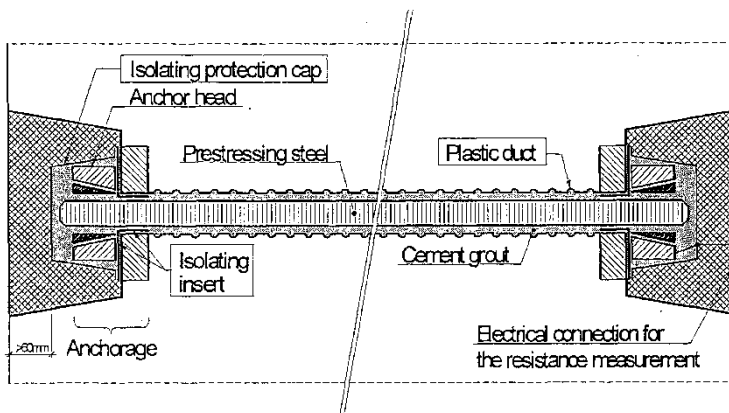
a) Tendon system for PL1



b) Fully-encapsulated tendon system for PL2



c) Electrically isolated tendon system for PL3



PL1: 鋼製シース+グラウト

PL2: プラスチックシース+グラウト

PL3: プラスチックシース+グラウト+モニタリング

PL3の適用例：ラローン橋（スイス）



鉄道橋 迷走電流による電気腐食の懸念（直流電流が危険）
プラスチックシース+グラウト+モニタリング

今後新設あるいは架け替えされる橋(耐久性の観点から)

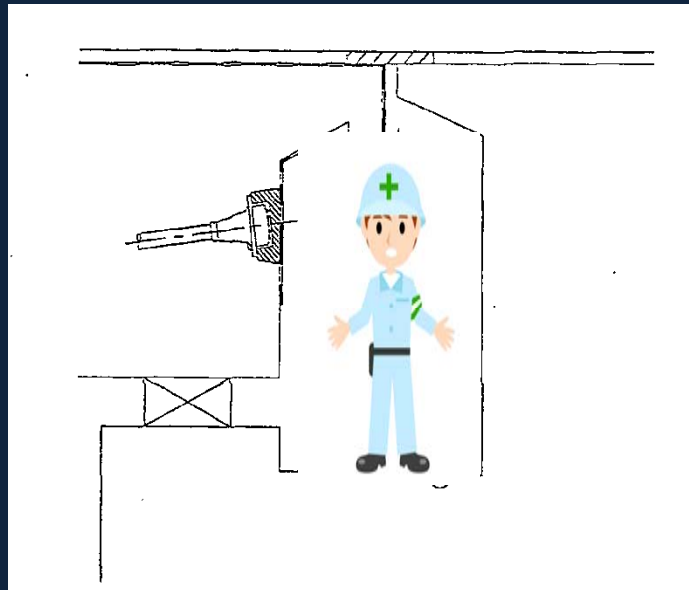
1) 構造的合理性

2) 多重防護層 (Multilayer Protection)

3) 検査が容易であること

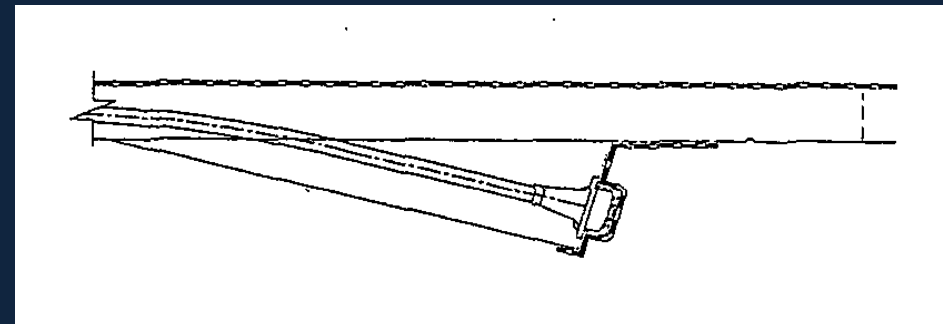
点検時や維持管理時のアクセス

点検時や維持管理時にその部位に簡単に行けるようにすることは、マルチレイヤプロテクションの考え方の中でも重要な点である。特に桁端の定着部に設置されるテンドンギャラリーは重要である。



テンドンギャラリー

点検(アクセス)可能+水が直接定着部に行かない配慮



箱桁内に定着突起を設け定着

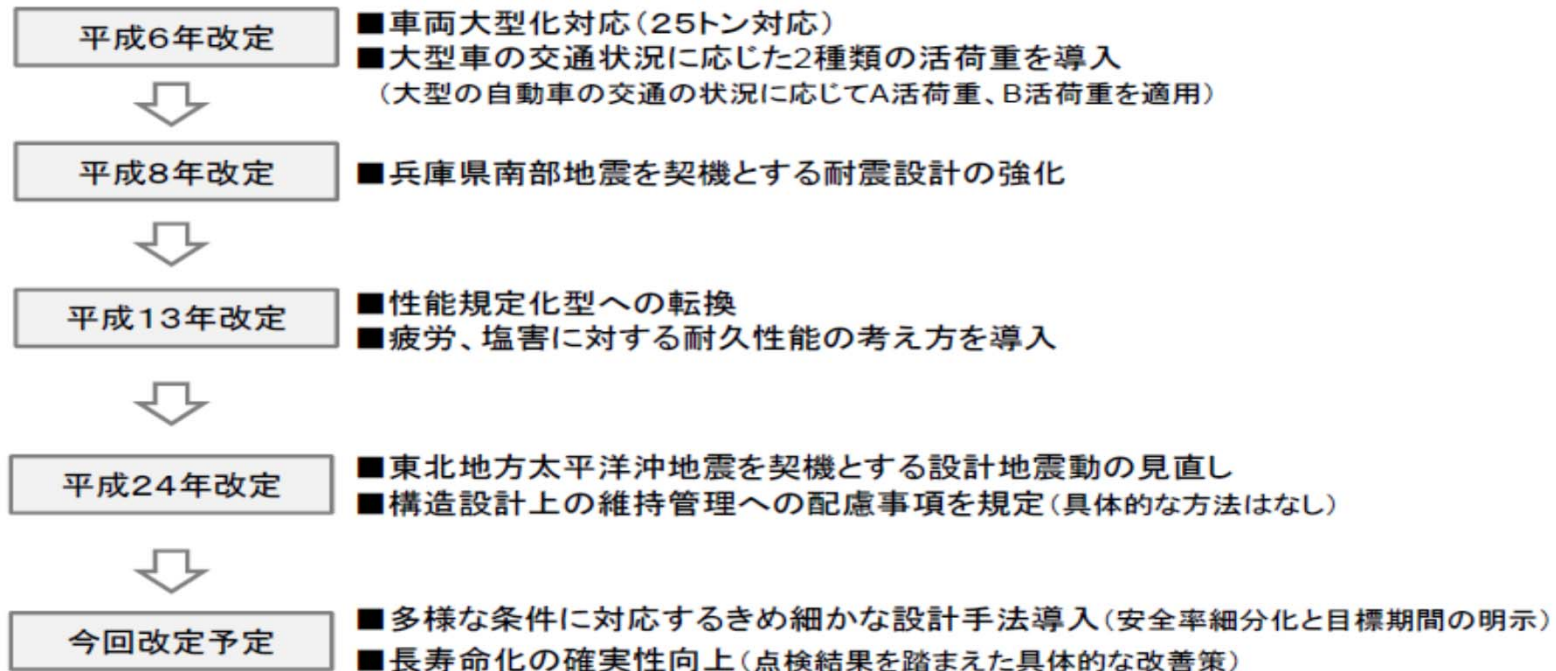
点検(アクセス)可能+水が直接定着部に行かない配慮

講演内容

1. 外ケーブルPC橋から大偏心外ケーブルPC橋へ
2. 橋梁の経年劣化の現状と問題点
3. 橋梁の長寿命化に向けた研究
4. 高い耐久性を持つ橋とは
5. 新道路橋示方書について

1. 橋、高架の道路等の技術基準の改定の経緯

- 「橋、高架の道路等の技術基準」は、地震発生に伴う対応や、性能規定化への転換といった最新の知見の反映等を目的として、改定を行っている
- 最近の主な改定内容は、活荷重見直し、耐震設計(設計地震動)の見直し、耐久性(疲労と塩害)の考え方導入、維持管理への配慮事項の規定導入等



出典:国土交通省

[参考] 部分係数設計法のイメージ

- 部分係数は、設計上見込む安全率を、荷重係数、部材係数、材料係数等の要因毎に細分化して示すものであり、多様な条件に対応したきめ細かな設計が可能となる

ケーブルの
安全率のイメージ

荷重要因Aに対し
必要な本数



(10本)

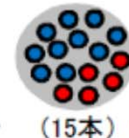
+

荷重要因Bに対し
必要な本数



(5本)

=



(15本)

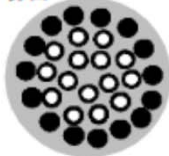
【従来の設計法のイメージ】

合計として必要な本数



(15本)

安全率「2」
とする場合



$$15 \times 2 = 30$$

【部分係数設計法のイメージ】

荷重要因Aの
安全率「1.8」

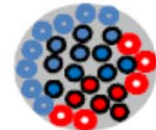


(10+8)

荷重要因Bの
安全率「2」



(5+5)



$$(10+8) + (5+5) = 28$$



それぞれの要因
毎の安全率を設定することで、
多様な条件に対
応したきめ細か
な設計を実現

出典：国土交通省

[参考] 国内外の基準の部分係数設計法への移行状況

- 国内の他分野の構造物や、海外の橋梁の設計基準は、多様な条件に対応したきめ細かな設計を行うことができるとされる部分係数設計法※へ移行している。

※部分係数設計法

- 設計上見込む安全率を、荷重係数、部材係数、材料係数等の要因毎に細分化して設計するもの
- 一方、現在の基準である許容応力度法は、全体で一つの安全率を確保するように設計

■国内の他分野の構造物の設計基準の動向

	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
設計法	部分係数設計法	部分係数設計法	部分係数設計法
導入年	平成14年	平成19年	平成4年

■海外の橋梁の設計基準の動向

地域・国	ISO	米国	欧州
基準名	ISO 2394	AASHTO LRFD Bridge Design Specifications	Eurocode
設計法	Partial factors format (部分係数設計法)	LRFD(Load Resistance Factor Design) (荷重抵抗係数設計法)	Partial factor method (部分係数設計法)
	1986年	1994年	2007年

出典：国土交通省

ご清聴ありがとうございました。

