

# 第16回 コンクリート構造物の品質確保に関する技術講習会

## 角島大橋のLCC検討 脱炭素社会への懸念

徳山工業高等専門学校

温品達也

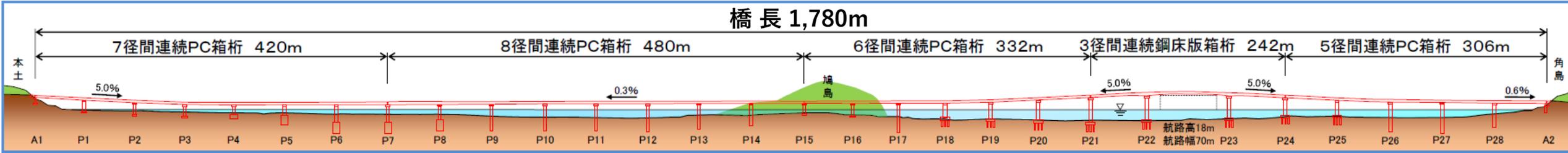
- ① 角島大橋の実績に基づき  
海上橋梁のライフサイクルコストを試算  
補修コストの高さと  
耐久性向上技術の意義を考える
- ② 持続可能な社会について  
何故、脱炭素が必要なのか



豊北町 佐々木医院 佐々木医師による空撮

# 角島大橋下部工

## ■ 角島大橋概要図<sup>1)</sup>



着工前



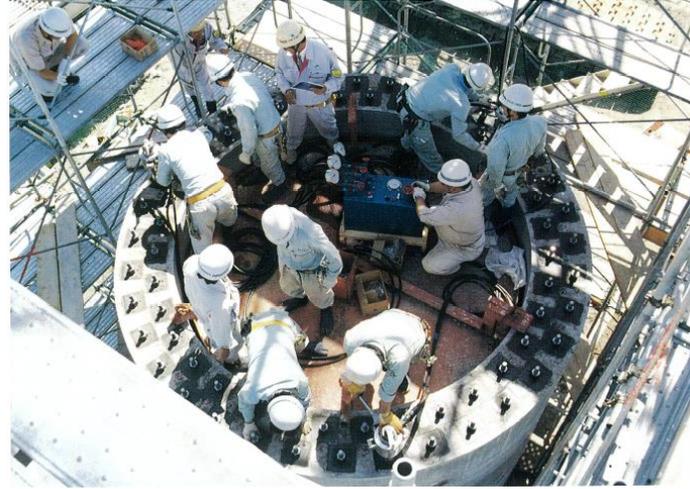
完成後

# 角島大橋下部工

## ■ 角島大橋の施工状況<sup>1)</sup>

### 高強度プレキャスト橋脚の施工

橋脚躯体施工



PC上部エセグメント仮置き



PC上部エセグメント架設

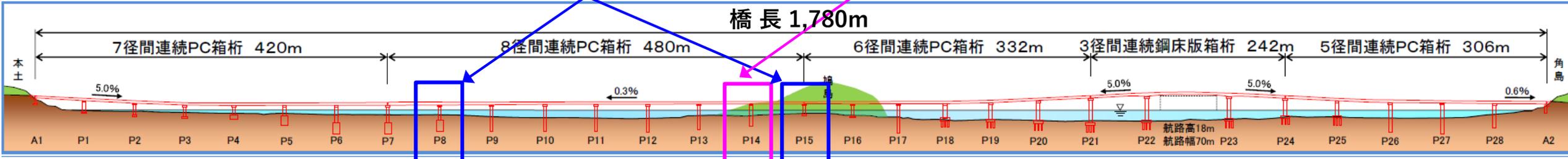
# 角島大橋下部工

## ■ 角島大橋概要図<sup>1)</sup>

現場打ち部のコア採取

PCa部のコア採取

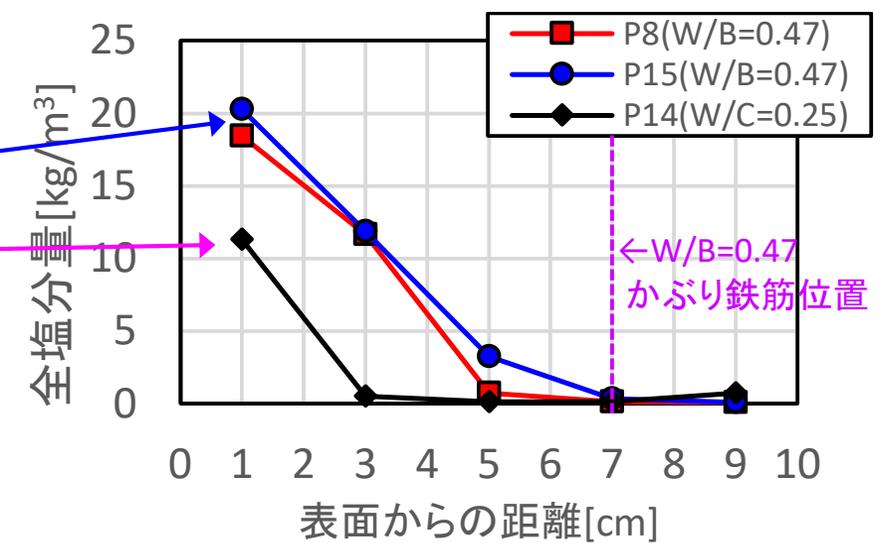
←全28のうち10橋脚がPCa



## ■ 下部工コンクリートの配合

対象部位	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント種類	W/B	s/a	単体体積重量[kg/m <sup>3</sup> ]			
					W	C	S	G
現場打ち部	30	BB	0.47	0.45	162	345	821	1020
PCa部	70	OPC	0.25	0.41	160	640	655	978

## ■ 下部工 浸透塩分量 コア実測値17年<sup>2)</sup>



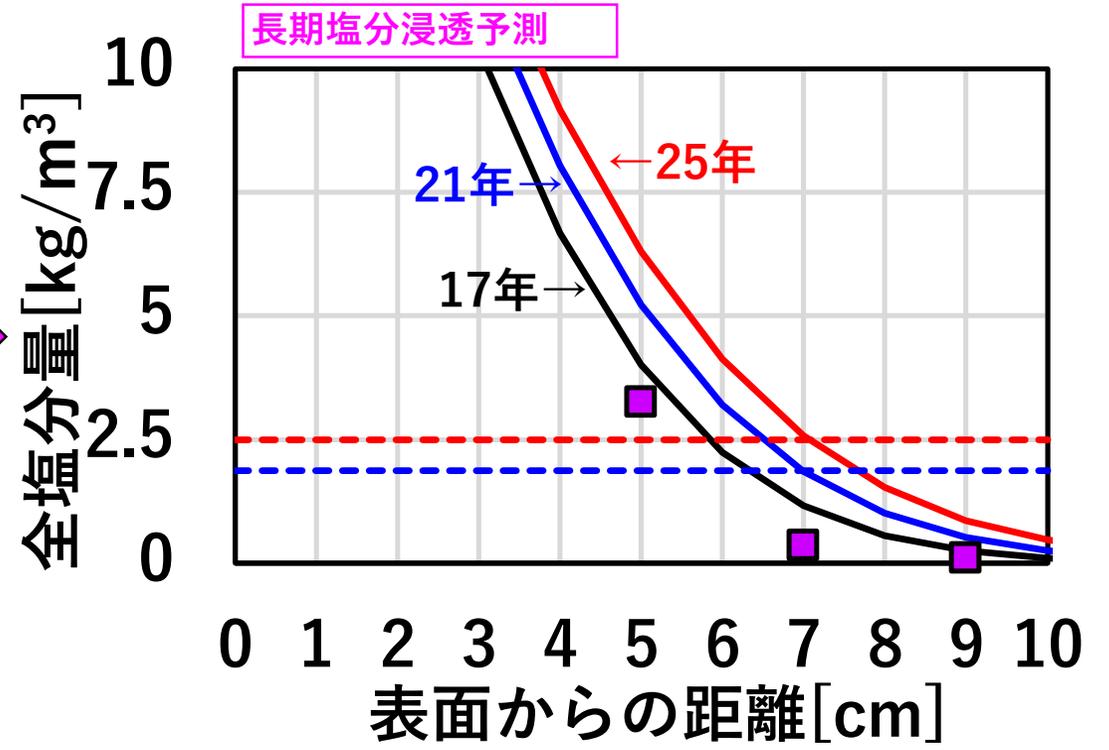
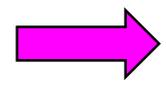
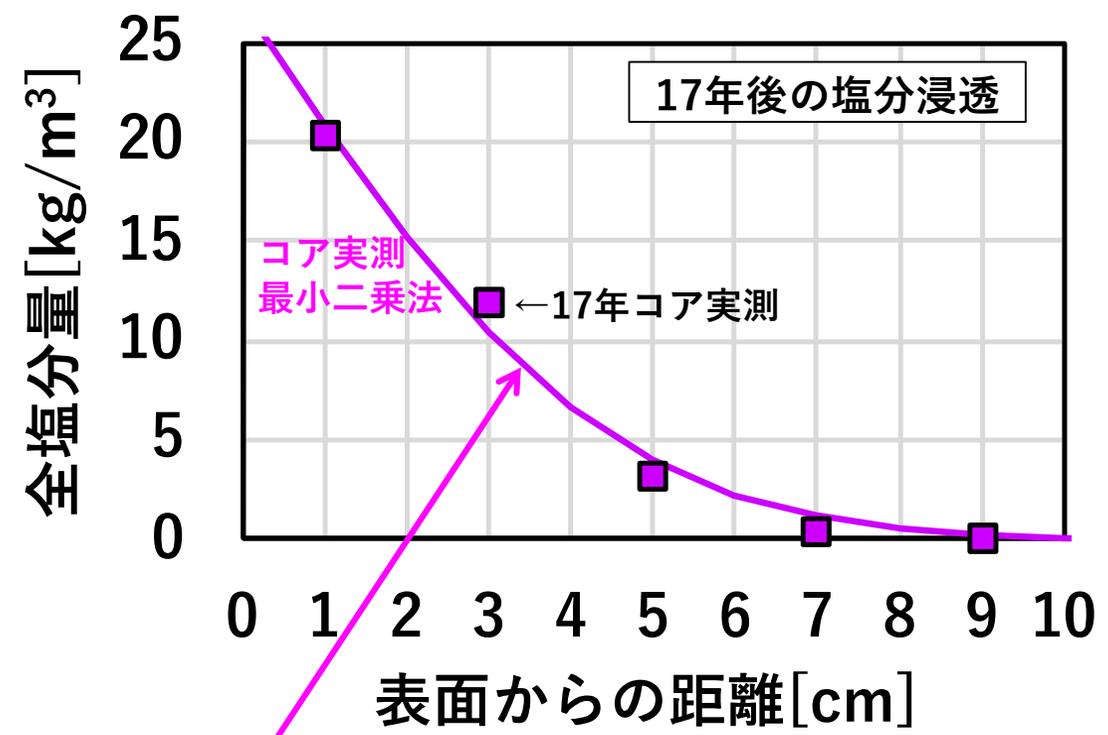
ライフサイクルコストを検討するには  
寿命(限界状態)を予測する必要がある

1)角島大橋建設誌2001

2)角島大橋長寿命化修繕計画報告書2012

# 限界状態の予測

## ■ コア実測から最小二乗法で算出した設計値による予測



$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right)$$

↑ 26.9kg/m<sup>3</sup>
↑ 0.35cm<sup>2</sup>/y

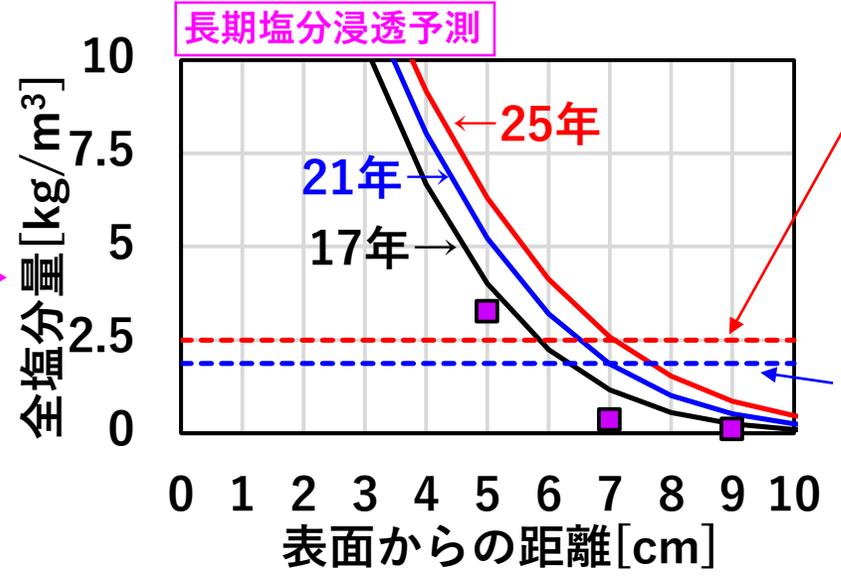
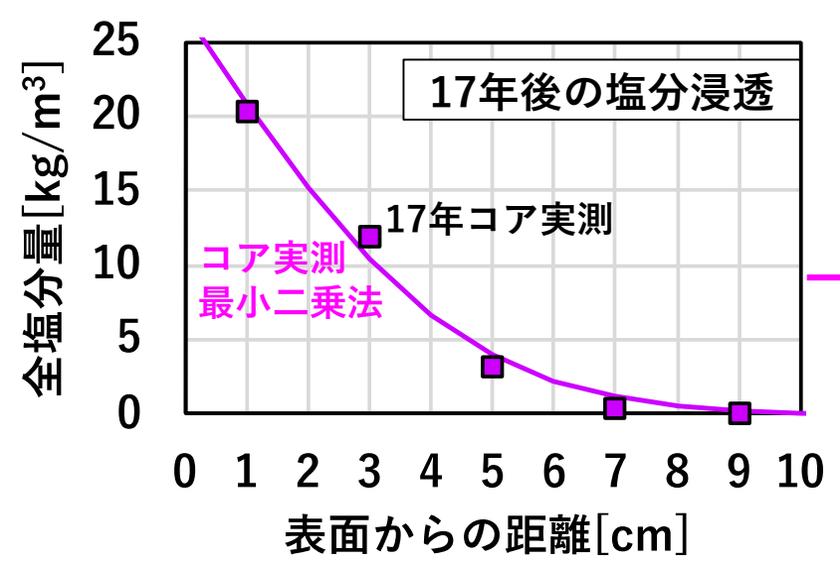
コア実測値より最小二乗法を用いて  
C0とDdを算出し示方書予測式に  
基づき塩分浸透を予測

■ 何をもって限界状態とするのか、  
限界状態でどう措置するのか

- ・ かぶり鉄筋位置の塩分量？  
→ 補修基準とできる数値が存在しない

# 限界状態の予測

## ■ コア実測から最小二乗法で算出した設計値による予測



- 角島大橋補修目安(=2.5kg/m<sup>3</sup>)
  - ・ 塩害を受けた土木構造物の補修指針(建設省)を参考に設定された
  - ・ 補修は断面修復が計画されている
- 鋼材腐食発生限界濃度  $C_{lim}$  (=1.9kg/m<sup>3</sup>)
  - ・ 示方書2017[設計編] W/B=0.47 BB配合

断面修復工法は腐食ひび割れが発生以降で実施することが一般的であり塩分量2.5kg/m<sup>3</sup>の潜伏末期で実施することは不経済となり得る

## ■ 設計時の照査だけでなく

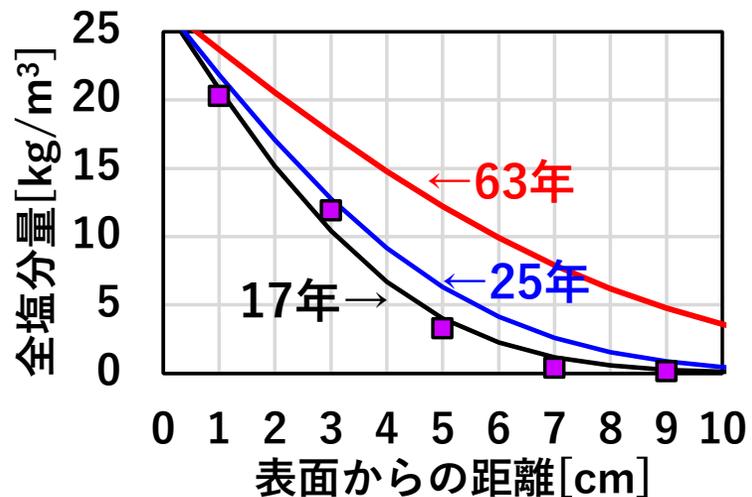
かぶり位置の塩分量に基づき補修時期まで検討することは  
→維持管理においては大きく安全側で不経済となる

## ■何をもって限界状態とするのか、 限界状態でどう措置するのか

- ・かぶり鉄筋位置の塩分量？  
→補修基準とできる数値が存在しない
- ・腐食ひび割れ発生？  
→ひび割れ発生の予測をどうすればいいのか  
今は、できるようになった

# 限界状態予測-進展末期(鋼材腐食量)

## ■最小二乗法 塩分浸透予測



$$I_{corr} = a(C_{Cl} - C_{lim})$$

塩分量 鋼材腐食発生限界濃度

$$a = \exp(-0.24d - 0.07D + 0.03H - 0.26)k$$

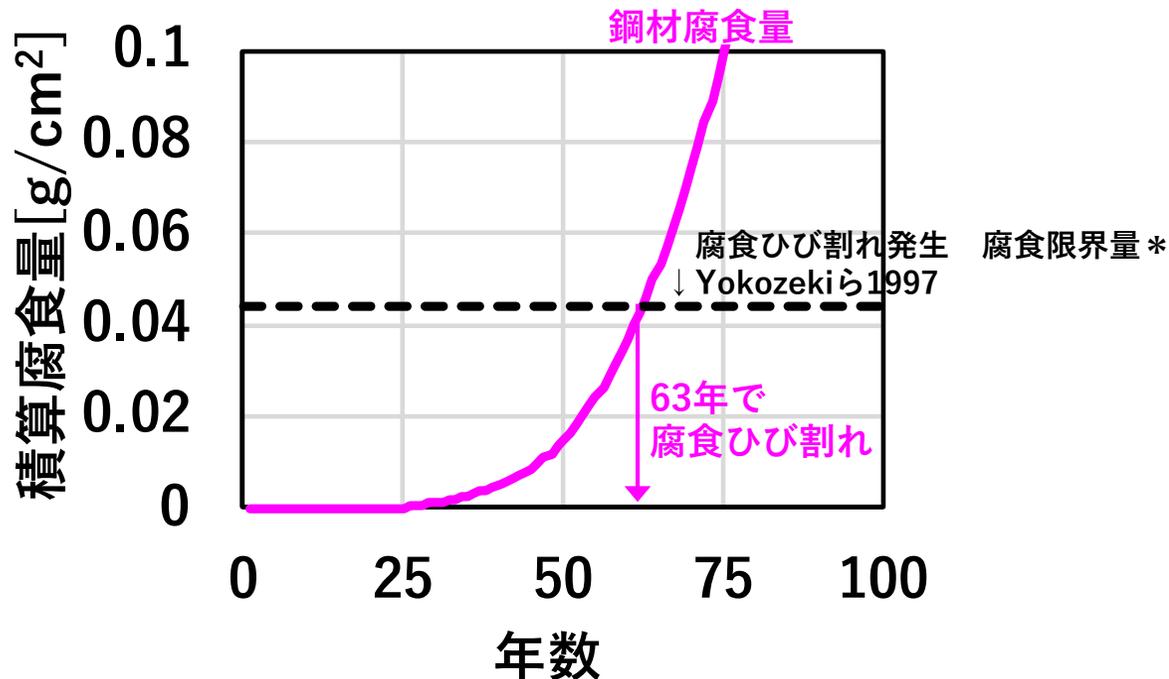
かぶり 鉄筋径 相対湿度

[OPC=3.1 BB=1]

\*コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術  
研究小委員会(338委員会)成果報告書その1・2

\*網野ら(2008)

## ⇒ かぶり鉄筋位置の鋼材腐食量

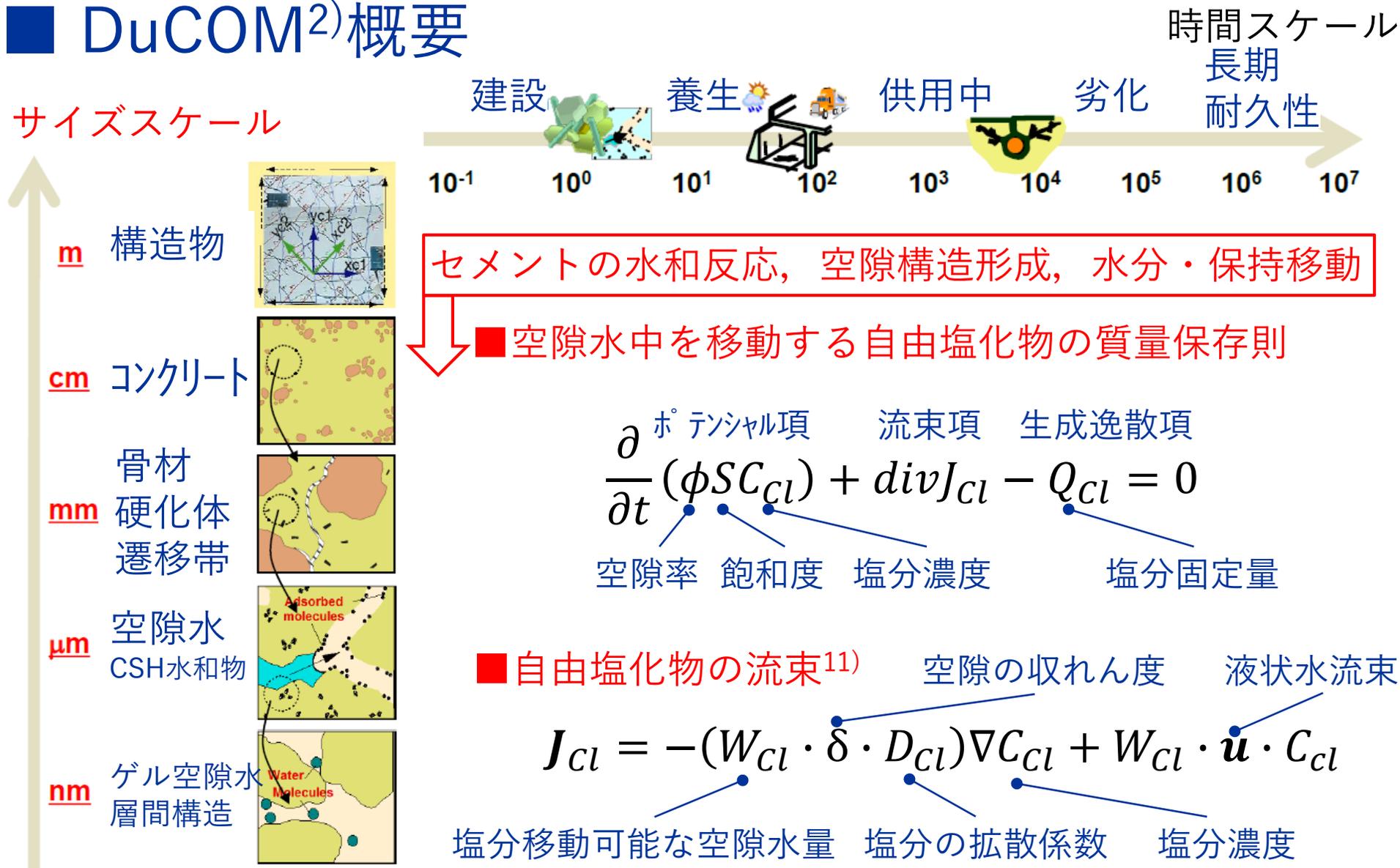


\*横関康祐先生

Yokozeki K., Motohashi K., Okada K., Tsutsumi T.

: A rational model to predict the service life of RC structures in marine environment, Forth CEMENT/ACI International Conference on Durability of Concrete, SP170-40, pp.777-798, 1997

## DuCOM<sup>2)</sup>概要



1)1990- 東京大学コンクリート研究室

2)高橋佑弥, 石田哲也, 岸利治: 微小空隙中の塩化物イオン・液状水移動に着目したセメント硬化体の遮塩性能評価モデル, 土木学会論文集E2, Vol.70, No.1, pp.118-133, 2014

# 熱力学連成解析システム DuCOM 1)

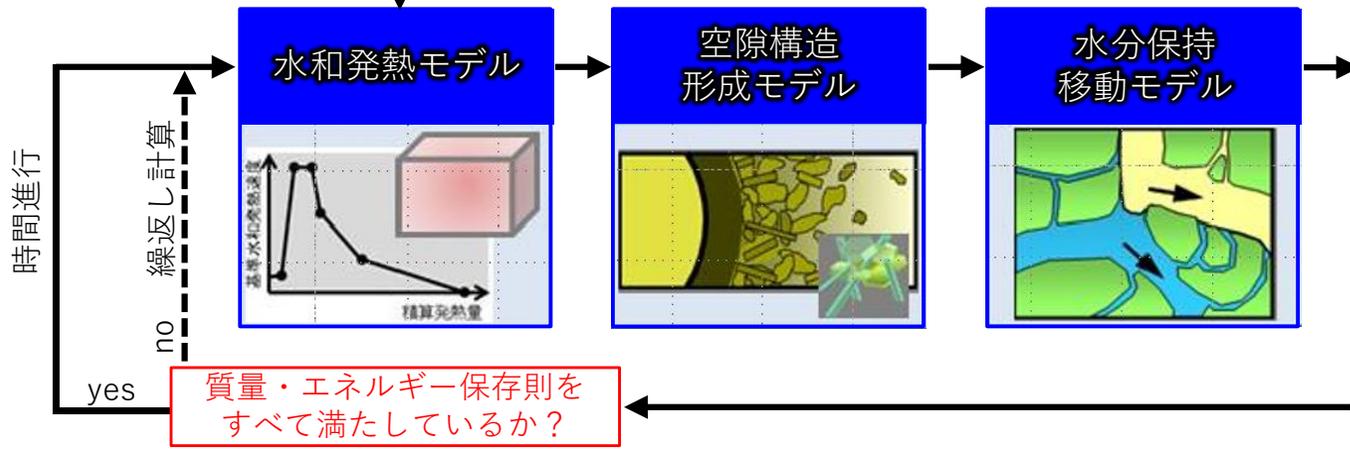
本解析モデルを対象に検討を実施した

## ■入力情報

寸法, 形状, 配合打込み温度  
養生・環境条件

## ■各自由度の支配方程式

$$\frac{\partial S(\theta_i)}{\partial t} + \text{div} J_i(\theta_i, \nabla \theta_i) - Q(\theta_i) = 0$$



塩化物イオン移動モデル

Cl-拡散係数

Cl-濃度

$$J_{cl} = -(\underbrace{W_{cl} \cdot \delta \cdot D_{cl}}_{\text{拡散項}}) \nabla C_{cl} + \underbrace{W_{cl} \cdot \mathbf{u} \cdot C_{cl}}_{\text{移流項}}$$

流束

収れん度

速度ベクトル

空隙体積

空隙分布

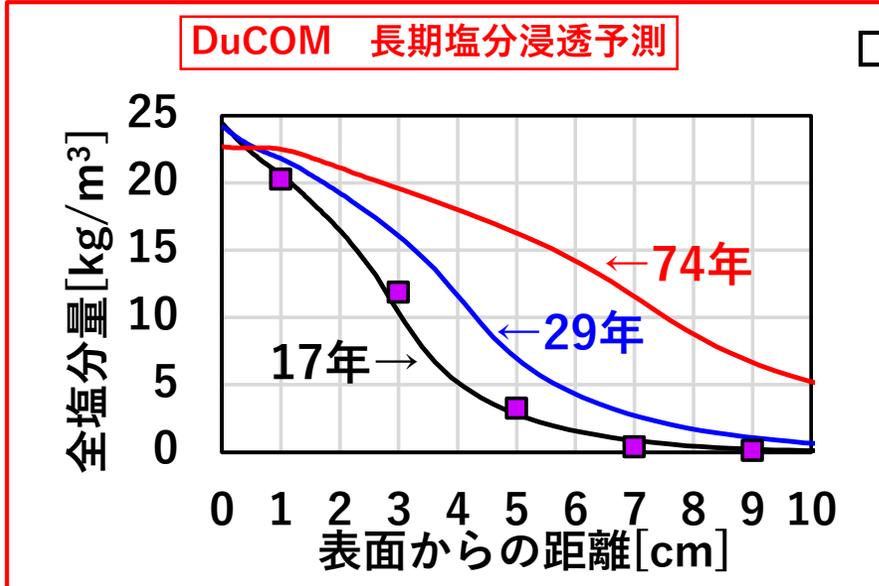
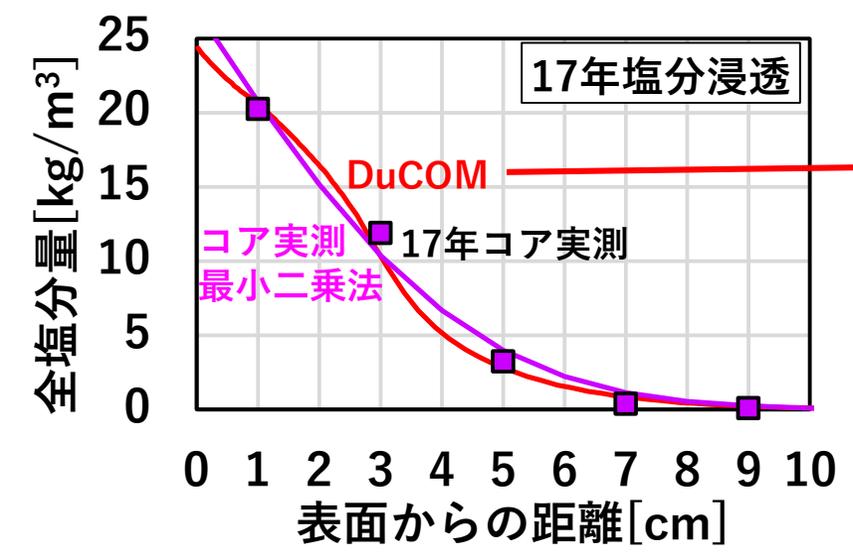
$W_{cl}$  : 塩分移動可能水量

空隙径

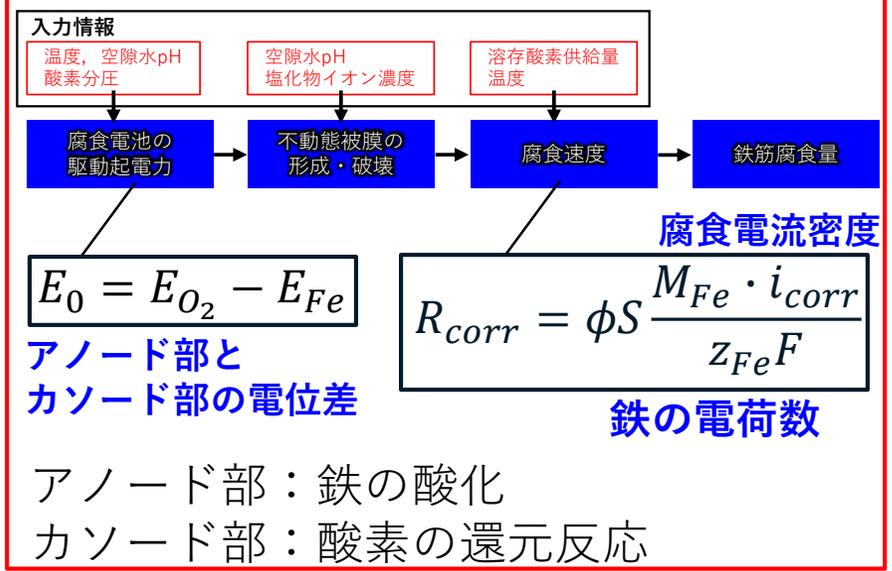
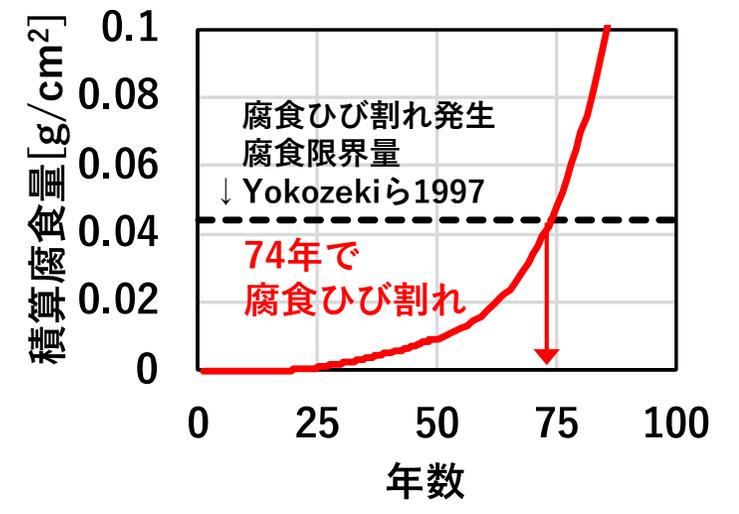
存在する構造物はコア採取により  
限界状態予測が可能  
今回は、長寿命化対策のケースの限界状態を  
予測してLCCを算出するために解析予測を実施

# DuCOMによる塩分浸透予測

## DuCOM予測 コア実測から最小二乗法で算出した設計値による予測の比較

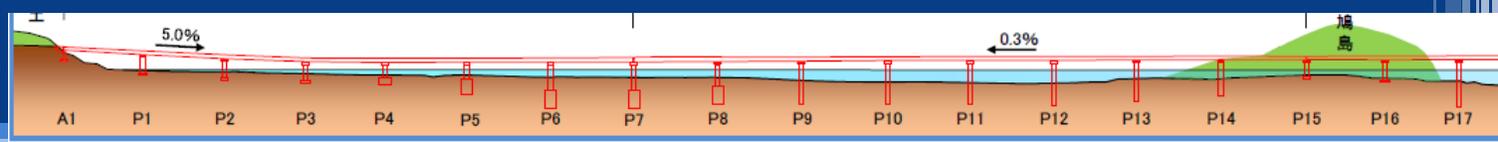


### かぶり鉄筋位置の鋼材腐食量



# LCC算定に必要な建設コスト

# 建設コスト(LCC評価)



■ 残存した資料に基づき算出した各橋脚の施工費と躯体高さあたりの施工費  
(設計時資料は6年間で破棄される)

橋脚No.	1	2・3	4	5	6・7・8	9-14	15・16	18-25
基礎形式	直接基礎	直接基礎	オープンケーソン	ニューマチックケーソン基礎		PCウェル	吊り込み式直接基礎	鋼製水中7-チング
基礎工	¥7,800,000	¥7,100,000	¥41,400,000	¥131,500,000	¥133,500,000	¥63,900,000	¥31,200,000	¥198,800,000
柱躯体	¥15,100,000	¥21,100,000	¥7,100,000	¥29,300,000	¥29,200,000	¥8,600,000	¥11,100,000	¥212,500,000
仮設工	¥11,600,000	¥33,200,000	¥600,000	¥11,600,000	¥51,900,000	¥0	¥2,100,000	¥15,100,000
合計(円)	¥34,500,000	¥61,400,000	¥49,100,000	¥172,400,000	¥214,600,000	¥72,500,000	¥44,400,000	¥426,400,000
合計(万円)	3450万円	6140万円	4910万円	17240万円	21460万円	7250万円	4440万円	42640万円
柱躯体高(m)	13	13.5	10.5	12	20	33.4	11	19
基礎高(m)	2	2	Ave × 1.3 6	11	13	0	2	3
柱躯体工費(/m)	¥1,001,987	¥1,409,320	¥478,650	¥2,268,819	¥1,356,291	¥1,913,174	¥820,530	¥11,184,211
柱躯体+仮設工費(/m)	¥2,053,846	¥4,022,222	¥733,333	¥3,408,333	¥4,055,000	¥2,170,659	¥1,200,000	¥11,978,947

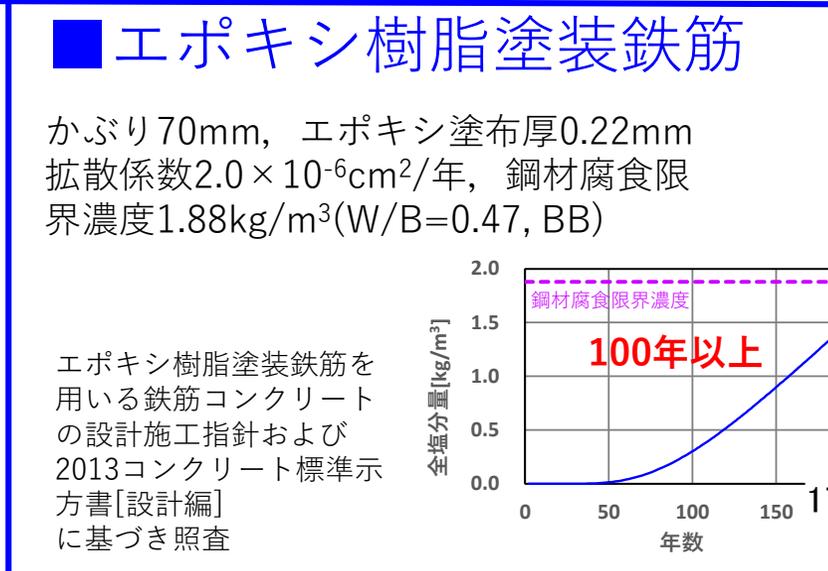
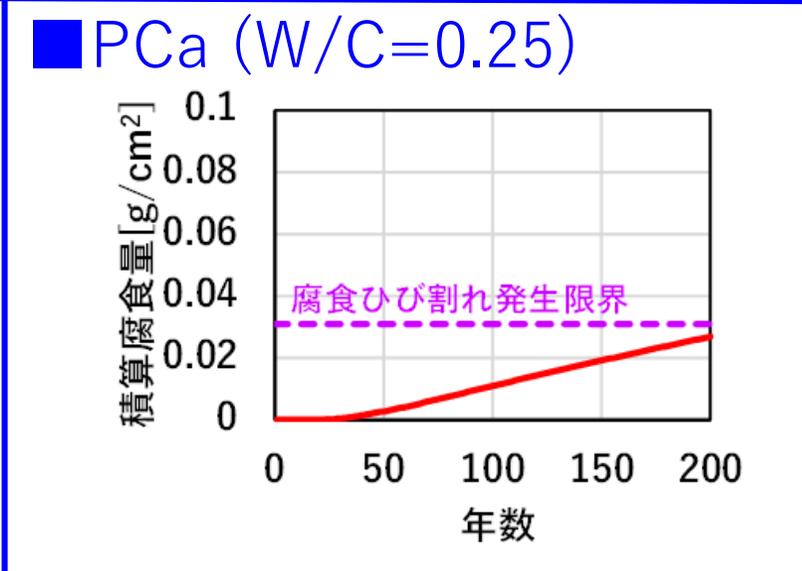
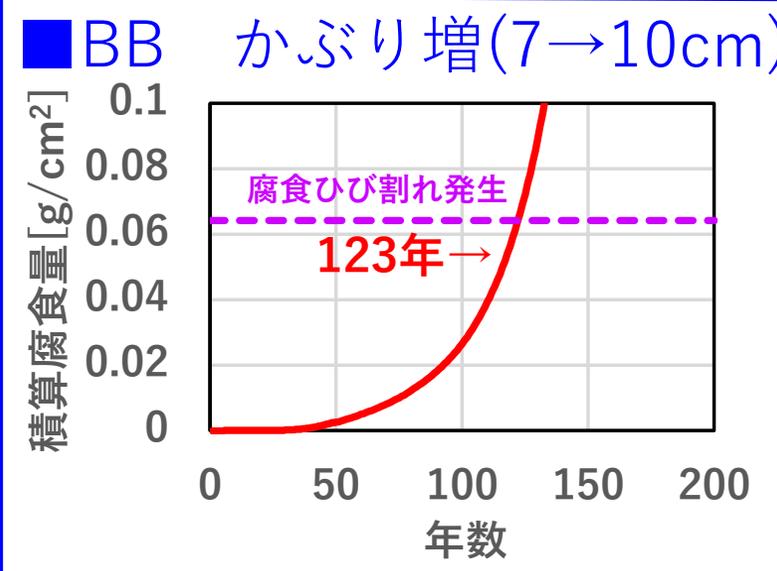
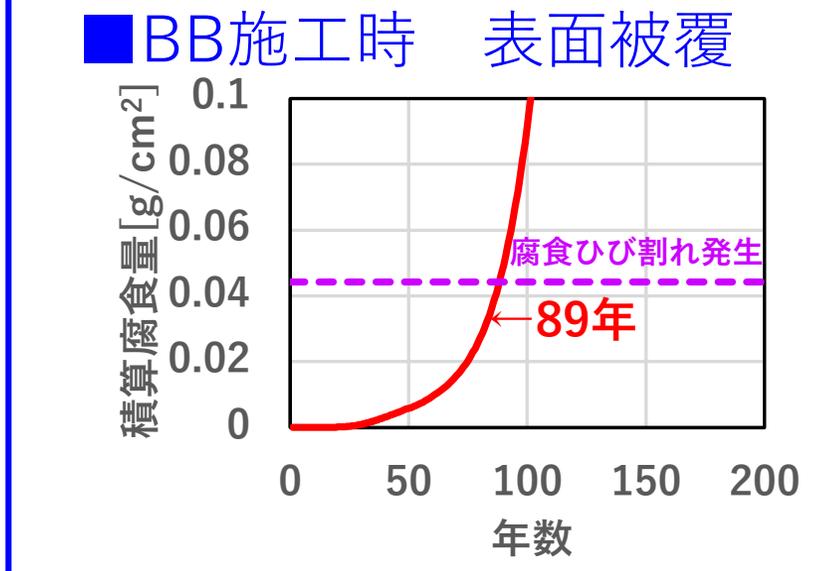
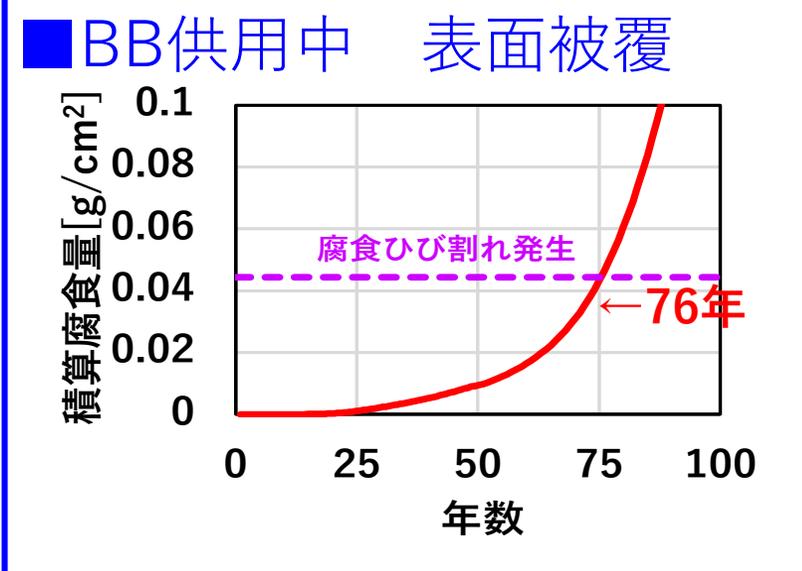
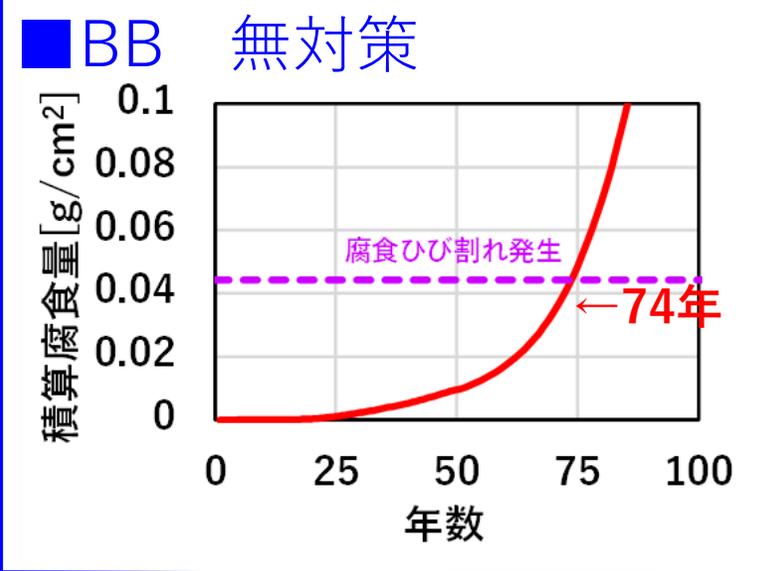
平均値を13m橋脚の標準的な施工費と仮定し、一般および現場管理を考慮するために1.3倍 = 6,283万円  
さらにデフレータ変動で  
**1.45倍 = 9,111万円**  
**↑ 場所打ち橋脚の施工費**

平均値の1.3\*1.45倍 = **236万円**  
**場所打ち部柱躯体1mあたりの施工費**

1.3\*1.45倍 = **360万円**  
**PCa部柱躯体1mあたりの施工費**

# 塩害対策の評価

## 塩害対策について修正塩分移動モデル・鋼材腐食モデルによりひび割れ発生年を予測



橋脚1基の標準建設コスト：**9111万円**

項目	かぶり70⇒100mmによる変更点	増加費用
コンクリート数量	269⇒273m <sup>3</sup>	32.4万円
スペーサ変更	かぶり100mm対応のスペーサへ変更	7.08万円
ひび割れ対策	ひび割れ補強繊維を各リフト基部へ5段配置する	58.8万円
<b>かぶり増に伴う増加コスト合計*1.45⇒</b>		<b>152万円</b>

かぶりを70→100mmに変更した場合の建設コスト：**= 9263万円**

項目	柱躯体を場所打ち⇒PCaによる変更点	増加費用
PCa化	PCaと仮設を除いた場所打ちとの差額	1641万円
仮設	PCa化による型枠支保工費の削減	-794万円
<b>PCa化に伴う増加コスト合計*1.45⇒</b>		<b>847万円</b>

PCa化した場合の建設コスト：**= 9958万円**

# 建設コスト：エポキシ樹脂塗装鉄筋

橋脚1基の標準建設コスト：**9111万円**



項目	数値
D16・D22鉄筋費	¥6,9000/t
エポキシ樹脂塗装費	¥6,6000/t
エポ筋の塗装工場から現場までの運搬費	¥19,901/t (神戸→角島大橋)
エポ筋/鉄筋のコスト比	2.24
柱躯体の鉄筋量	15.5t
躯体鉄筋費	107.1万円
躯体エポ筋費	240.5万円
<b>エポ筋使用に伴う増加コスト合計*1.1⇒147万円</b>	

} 建設物価2020.4  
←国土交通省の積算基準2019



柱躯体の鉄筋をエポキシ樹脂塗装鉄筋に変更した場合の建設コスト：**= 9258万円**

# 予防・補修コスト：表面被覆と断面修復

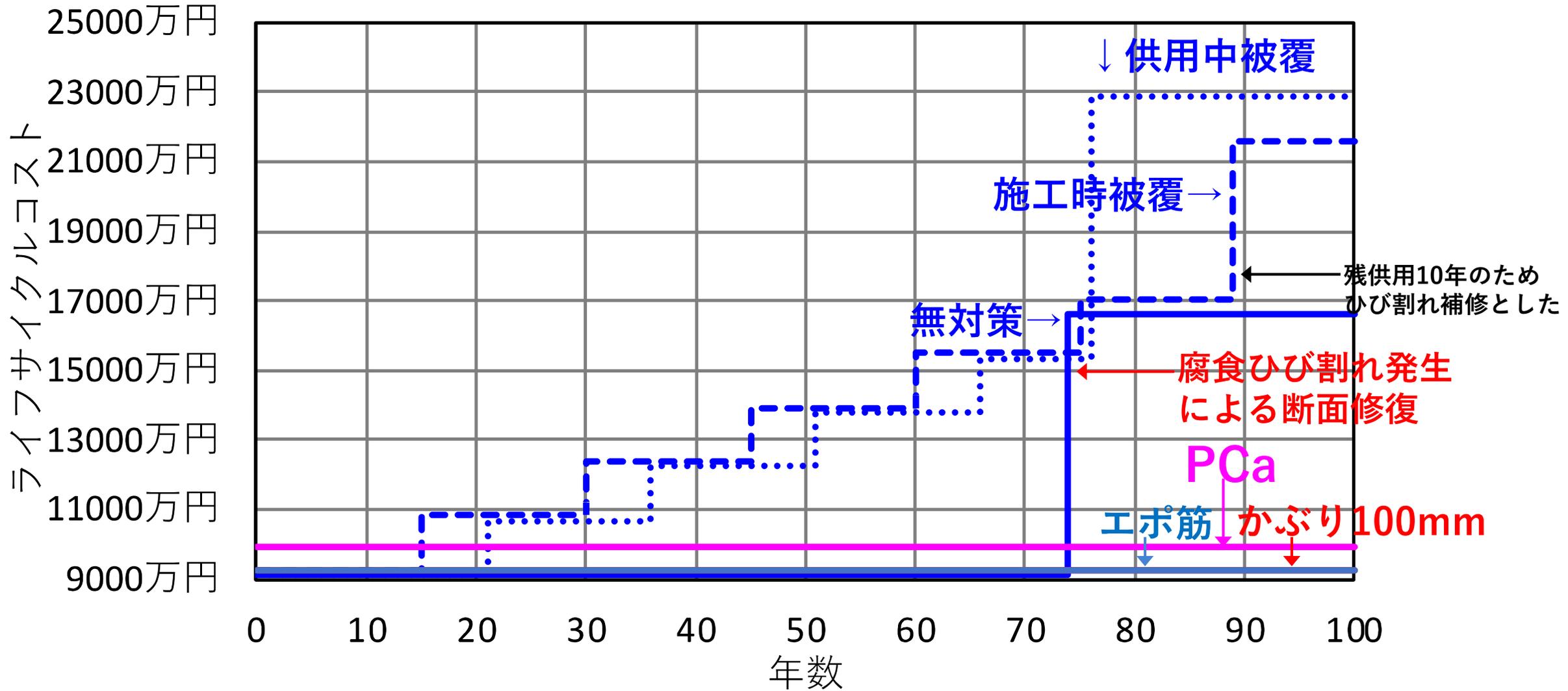
- ・ 2020・2021の角島大橋補修実績から海上橋梁1橋脚あたりの費用を算出

## ■表面被覆の費用(予防対策)

作業項目	単価*	数量	小計
ゴンドラ足場工	—	—	1361万円
交通誘導	¥11,700	一式	48万円
表面被覆	¥16,300	93m <sup>2</sup>	152万円
<b>表面被覆工法1回/1橋脚の費用⇒</b>			<b>1562万円</b>

## ■断面修復の費用(補修対策)

作業項目	小計
ゴンドラ足場工	4084万円
ひび割れ充填工法	18万円
ひび割れ低圧注入工法	29万円
左官断面修復工法	69万円
表面被覆	152万円
ライニング工	2876万円
支承防錆工	156万円
交通誘導	145万円
<b>表面被覆工法1回/1橋脚の費用⇒</b>	<b>7528万円</b>



かぶり増・エポ筋・PCaは建設コストが増加するものの経済的なLCCとなった

## ■ 8橋脚分

表面被覆により延命化されるものの  
100年間では補修を要するためLCCが増大(被覆の定期再塗布+腐食ひび割れ補修)

