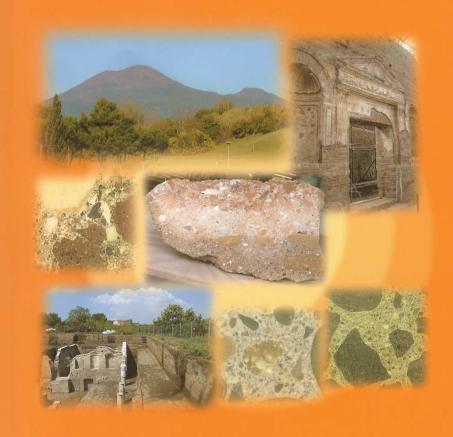
大学院 維持管理工学特論

ローマンコンクリートと分析技術

芝浦工業大学 伊代田 岳史

古代ローマコンクリート

ソンマ・ヴェスヴィアーナ遺跡から発掘されたコンクリートの調査と分析



土木学会

古代ローマコンクリート

• 発掘された遺跡は約2000年前のもの

• しかし、いまだにコンクリートとして存在

→ これを学ぶことは超長期コンクリートの実現 につながるもの・・・

古代ローマコンクリートの研究

- ローマ市内にあるフォロローマの遺跡
- ナポリ近郊にあるポンペイ遺跡、エルコラーノ 遺跡
- ソンマ・ヴェスヴィアーナ遺跡
 - 「東京大学 ローマ時代遺跡調査プロジェクト」
 - ・・・ナポリ近郊にある活火山"ベスビオ火山"の麓 に埋没している古代ローマ遺跡

遺跡の位置・・・





ソンマ遺跡とベスピオ火山

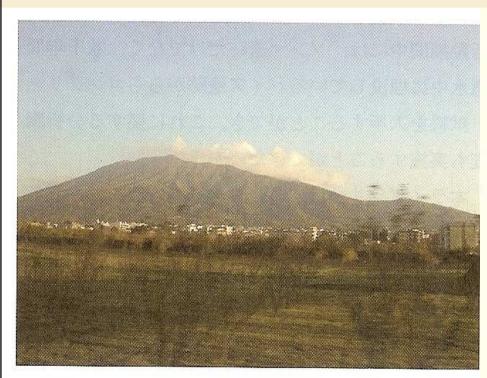


写真 1.1 ソンマ遺跡近郊から見たベスビオ火山



写真 1.2 発掘調査中のソンマ遺跡

古代と現代の材料比較

表 2.2.4 古代ローマと現代の材料の比較

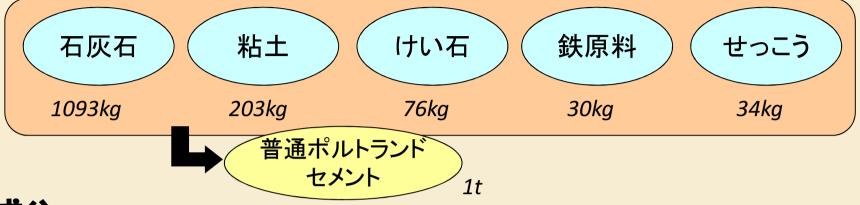
	古代ローマ	現代
	石灰石を焼成して得た生石灰を水和さ	エーライト(Ca ₃ SiO ₅)とビーライト
	せた消石灰が主原料. 消石灰と骨材間	(Ca ₂ SiO ₄)を主成分とする. ケイ酸カル
セメント	で生じるゆっくりとしたポゾラン反応	シウムの水和反応を利用し, セメント
	と,消石灰の炭酸化硬化が利用された.	それ自体で硬化する.
	山砂,海砂,川砂.	砂,砂利,砕石,砕砂,人工軽量骨材,
		スラグ骨材. またはこれらとほぼ同じ
細骨材		粒径の粒子からなる材料.おおむね5mm
		以下のもの ²⁾ .

製造

現代セメントの製造と主成分

凝結調整のため

30 ±±



成分

	主要な成分は	SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	
と日代ル今物				34	. 	

租成16百	"初	強度	及応	発烈	
C ₃ S	ケイ酸三カルシウム	3 CaO SiO_2	早期	普通	中
C ₂ S	ケイ酸ニカルシウム	2 CaO SiO_2	長期	遅い	小
C ₃ A	アルミン酸三カルシ ウム	3 CaO Al_2O_3	超早期	速い	大
C ₄ AF	鉄アルミン酸四カル シウム	4	寄与しない	超速い	小

古代と現代の材料比較(2)

٠
Ť

現代

	,	
	レンガ屑や石材が利用されている. 石	おおむね 5mm 以上の粒径のものを主な
	材は凝灰岩質のものが多い. また手で	組成としている骨材とされている. JIS
4□,4++	握るこが出来る最低の大きさ以上の石	規格では 20, 25, 40mm のものについて
粗骨材	材と定められており, 直径 10cm を超え	基準が設けられている.
	る大型の骨材も用いられている.	
	・ポッツォラーナ	高炉スラグ、シリカフュームなど目的
混和材	高耐久性や水中施工等急硬性が求めら	に合わせて様々なものが利用される.
化工工工工	れる場合に利用された.	
	・油	分散剤や遅延剤,増粘剤などが目的に
〉月 壬□ 文I	遅延剤として,打継の必要がある場合	合わせて利用される.
混和剤	に利用された.	

古代と現代のコンクリート比較

表 2.2.5 古代ローマコンクリートと現代コンクリートの比較

	古代ローマ	現代
	養生期間についての取り決めは無	15℃以上 : 3 日
	い. ただし「きわめて長年月にわた	5℃~15℃:5 日
養生期間	りそれ自身湿潤状態にとどめる」と	5℃未満 :8日
	あることから、相当な期間を養生期	
	間と見ることもできる.	
	壁体内部で密閉された中で養生が	ビニールシート等を利用し,湿潤状態に
養生方法	行なわれており, 人為的な方法は取	て初期養生を行なう. その後は特に人為
	られていない.	的な手法はとられない.
	レンガ壁でない壁体は 80 年以上も	一般の建築物で50年,高耐久性の建築物
#1 h .kl-	たない, とあることから 80 年以上	で 100 年とされている.
耐久性	の耐久性を見込んでいると思われ	*
	る.	

古代ローマモルタルの配合

表	2.2.	6	古代口	ーマモ	ルタ	ルの配合
---	------	---	-----	-----	----	------

砂の種類または施工の種類	骨材	石灰
山砂	3	1
川砂, 海砂	2	1
砕石床(新規砕石利用)	3	1
砕石床(再生砕石利用)	5	2
砕石床上層部	3	1
貯水槽	5	2
木組床の舗装	5	2

古代の石灰焼成窯

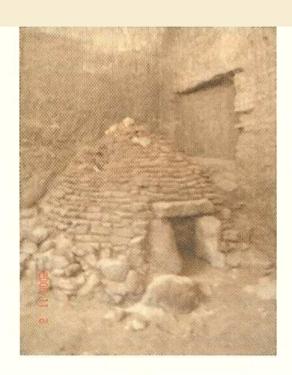


図 2.3.2 ソンマ遺跡で発掘された竈

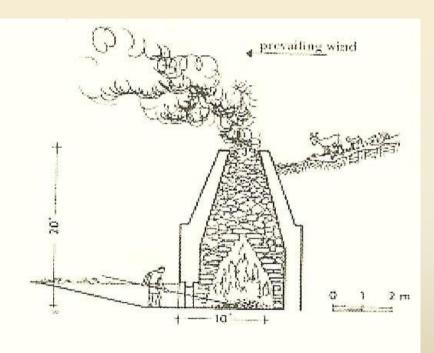


図 2.3.3 傾斜地を利用した石灰焼成窯

歴史的建造物の構成材料

- ① セメント硬化体であるか否かが不明
- ② コンクリートの構成材料(セメント、混合材、骨材)や配合が現代とは大きく異なる
- ③ セメントの性状が現代のものとは大きく異なる
- ④ 経時による変質(セメントペースト、骨材、それらの界面)が進んでいる
- ⑤ 現代の硬化体とは違う性状を持つ
- ⑥入手できる試料の量は少ない場合が多い

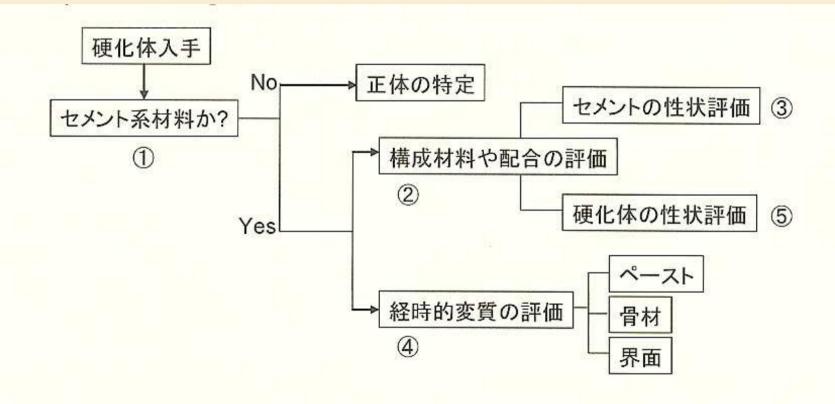


図 3.3.1 歴史的建造物の構成材料を化学分析するための基本的手順 6) 7)

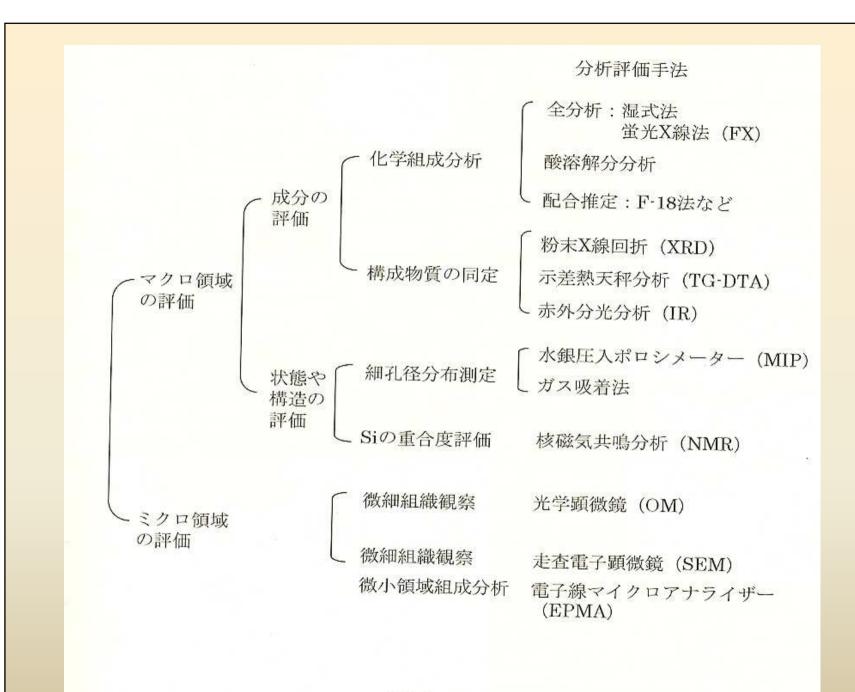


図 3.3.2 化学分析方法 6) 7)

遺跡分析により得られた知見

- 遺跡のコンクリートには消石灰とポッツォラーナを結合材として使用している
- 骨材は、凝灰岩(黄色、黒色)などの軽量でポーラスな岩石やレンガ
- 硬化体はCO₂を固定化し、水和物は炭酸化により生成物が変化
- 火山の噴火により土中において約1500年程 度残存

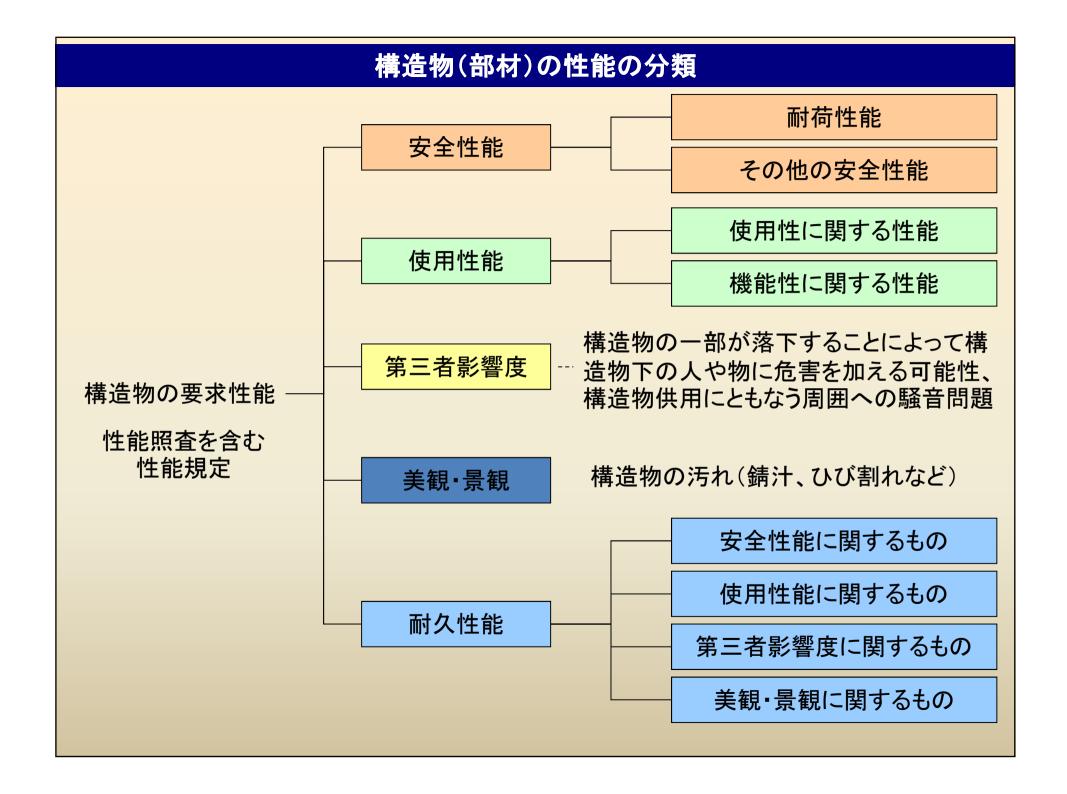
- コンクリート系材料が長期間の使用に耐えう る可能性を示唆
- 古代ローマンコンクリートと同様な材料を用いて再現の可能性を明示
- セメント・コンクリート系材料に炭酸化反応を 利用することで、鋼材の防食を考慮できれば、 きわめて長期の耐久性確保が可能であることが分かった。

維持管理の観点から

- 遺跡としての価値が見出されるとすぐに新しい材料を使用して修復作業が並行して行われることになりかねない。
- 古代ローマ人は、セメント・コンクリートを用いて、最初にインフラ整備を積極的に進め、セメント・コンクリートを利用し、現在でも維持管理されている。
- このとき、古代のものと類似した材料を組み 合わせた補修材料が利用されている。

構造物に要求される性能

- 設計耐用期間において満足すべき性能
 - 耐久性: 材料の劣化により生じる性能の経時的な劣化に対する構造物が有する抵抗性
 - 安全性:構造物が使用者や周辺の人の生命や財産を脅かさないための性能(構造体の安全性と機能上の安全性の両者)
 - 使用性:構造物の使用者や周辺の人が快適に構造物を使用するための性能
 - 復旧性: 地震等の偶発荷重等によって低下した性能を回復させ、継続的な使用を可能にする性能
 - 環境および景観に関する性能



劣化原因ごとの劣化度予測(寿命予測)

コンクリート構造物の寿命

鉄筋の腐食

- ・鉄筋腐食によるひび割れ
- ・ひび割れによる 鉄筋腐食の促進

コンクリートの劣化

- ・コンクリートの圧縮強度
- ・コンクリートのひび割れ
- ・コンクリートの剥離・剥落

原因

塩害

中性化

酸、温泉地等による

化学的腐食

原因

凍害

アル骨

それぞれの劣化原因別の寿命の予測

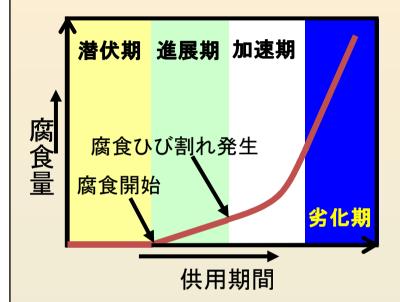
耐荷力

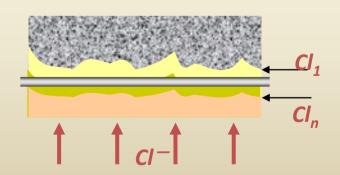
曲げ引張破壊耐力軸方向圧縮耐力

で評価

鉄筋の腐食による寿命予測

塩害





潜伏期

丸屋らの拡散方程式による コンクリート中への塩分浸透

$$C(x,t) = S\sqrt{t} \left\{ exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} erfc \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right\}$$

ある濃度のCI-が鉄筋下面に到達したとき腐食開始

── 腐食開始時期の推定

進展期

森永による塩化物イオン濃度による 鉄筋腐食速度

$$q = \frac{d}{c^2} \left[-0.51 - 0.76N + 44.97(W/C)^2 + 67.95N(W/C)^2 \right]$$

加速期

鉄筋の総腐食量>限界腐食量(森永)

$$Q = \sum_{i=0}^{n} q_i \cdot \Delta t_i$$
 > $Q_{cr} = 1.204 \left(1 + \frac{2c}{d}\right)^{0.85} \cdot \frac{d}{2}$

── 腐食ひび割れ発生時期の推定

劣化期

曲げ引張破壊耐力(JCI)

$$Mu_{(corr)} = As_{(corr)}fy_{(corr)}d\left(1 - \frac{0.60 p_{(corr)}fy_{(corr)}}{fc'}\right)$$

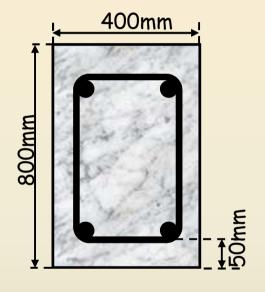
→ 曲げ耐力比の算定

解析結果

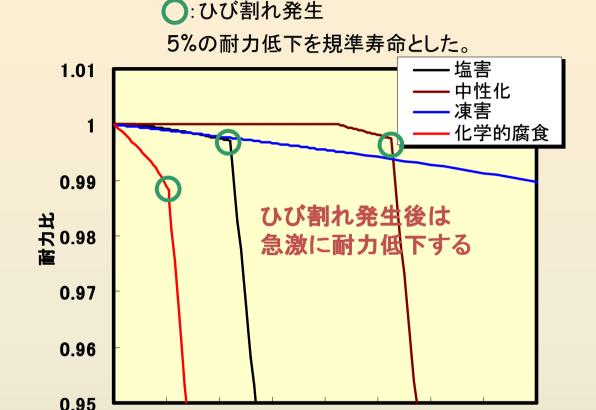
(2-b) 優位性判定(複合劣化に対する考え方)

はりの仮想断面

40×80cm断面 かぶり5cm D13 4本



主鉄筋のみを考慮して解析



80

供用年数(years)

100

120

140

160

化学的腐食は最も早期に耐力低下を起こしている。 腐食を起こす劣化原因である塩害,中性化が先行する。

20

0

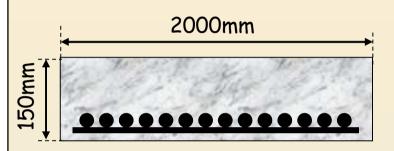
40

──── 先行する劣化原因に注目し点検する必要がある

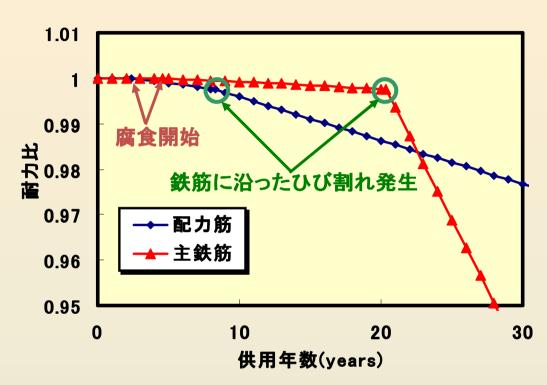
60

(2) 劣化度判定(鉄筋腐食のみ)

(配力筋を持つスラブの場合)



主 鉄 筋:D19 配 力 筋:D13

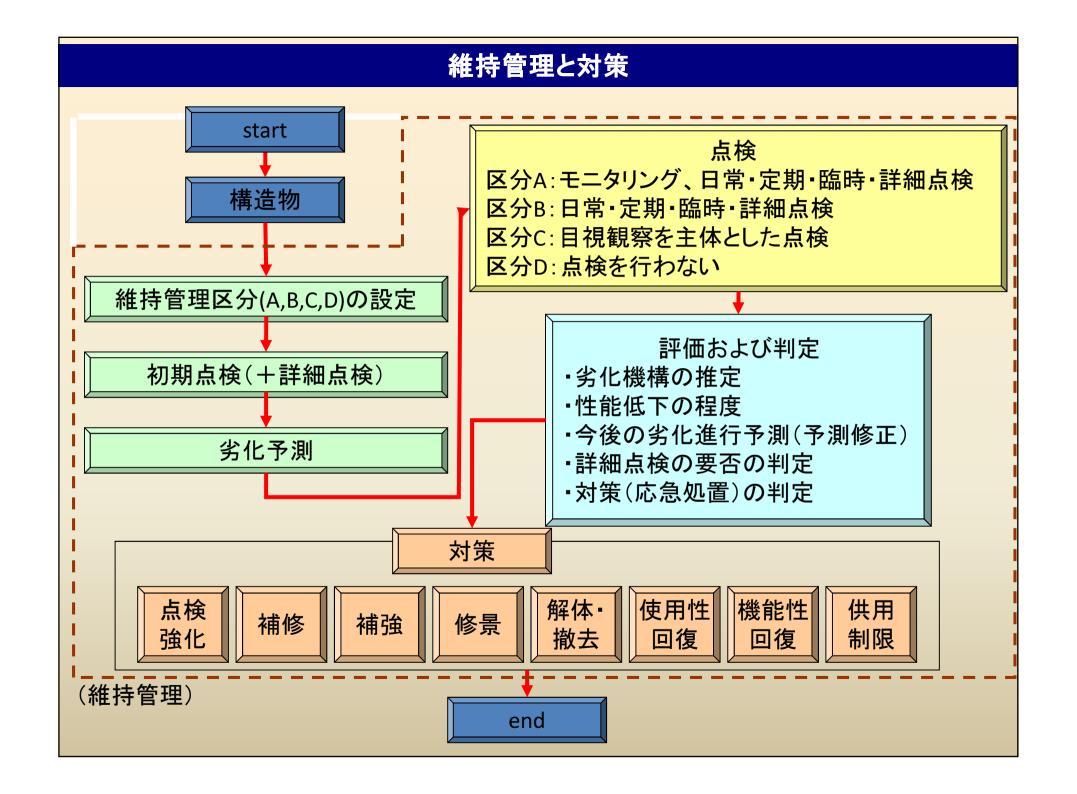


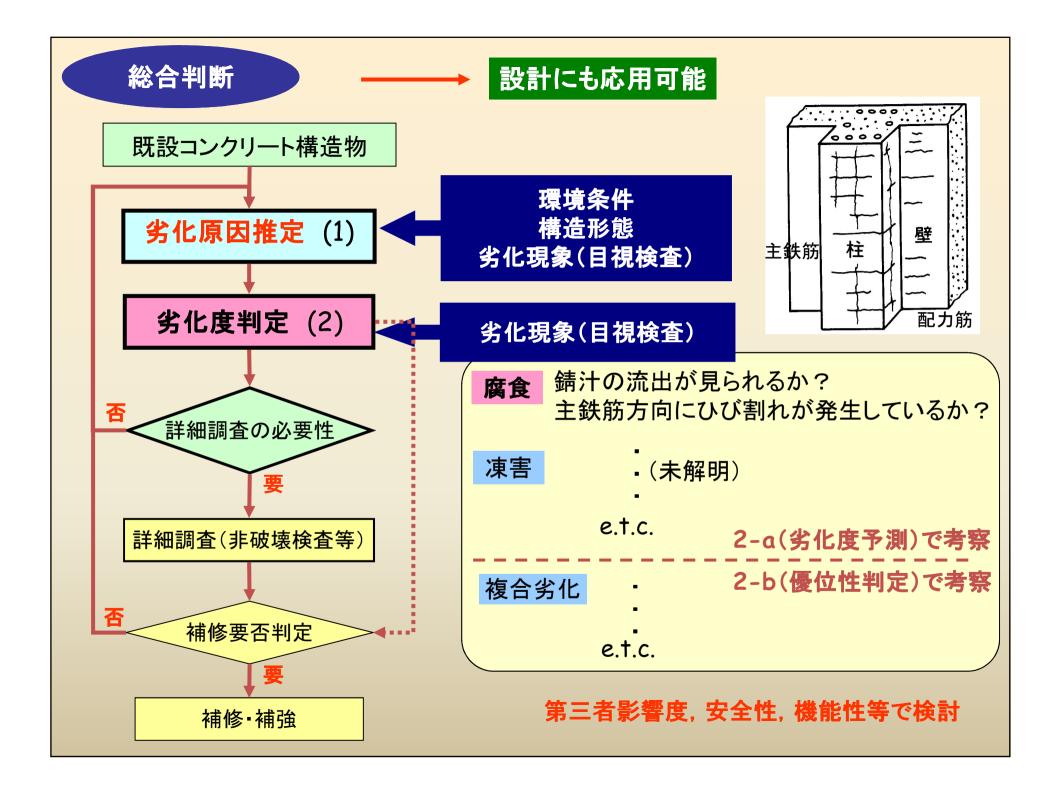
配力筋方向に先に腐食ひび割れを発生し、

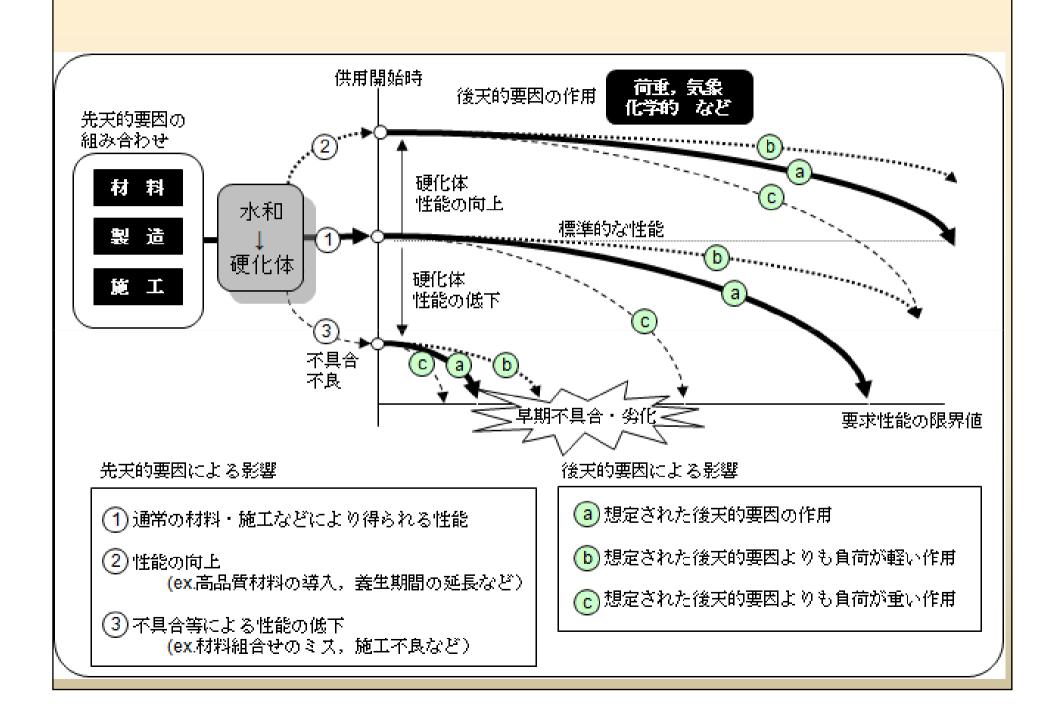
その後主鉄筋方向にひび割れを発生する二段階ひび割れが発生。配力筋方向のひび割れは耐力的に大きな影響はない。

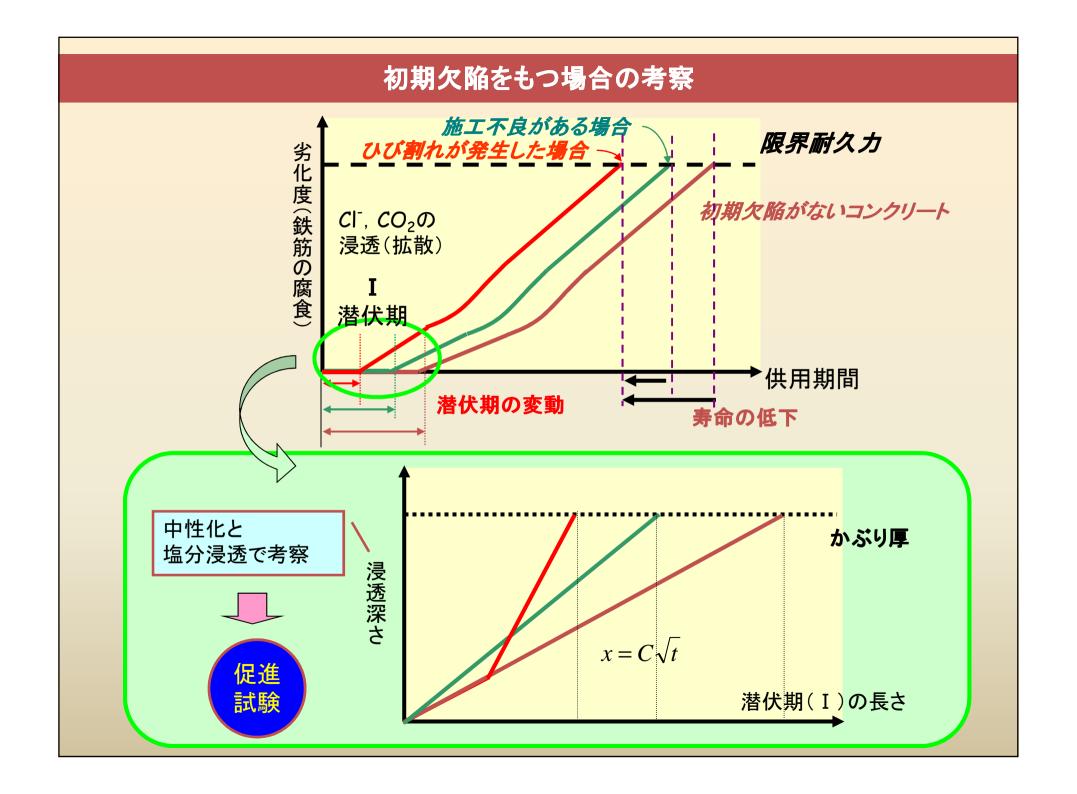


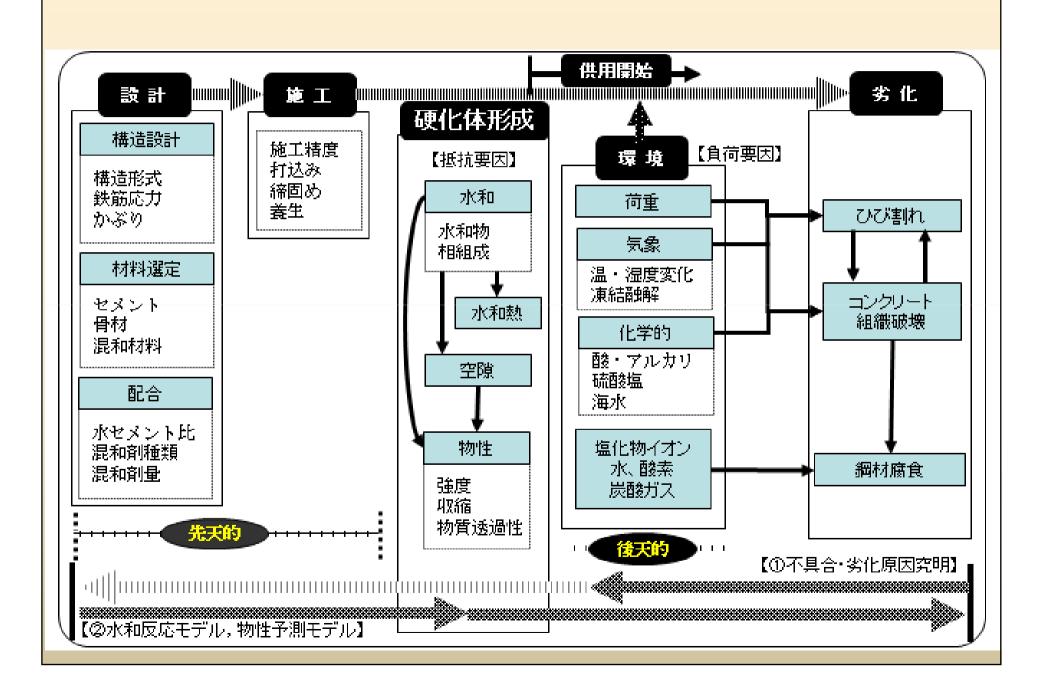
ひび割れを見ることで劣化度を判定できる











維持管理と化学分析

構造体の健全度は非破壊試験、破壊試験で 検討

• 材料の追跡(トレーサビリティー)には、化学的分析の適用

- 古い構造物や構造物の健全度を総合的に検討するためには、二つのアプローチを活用