

建築維持保全

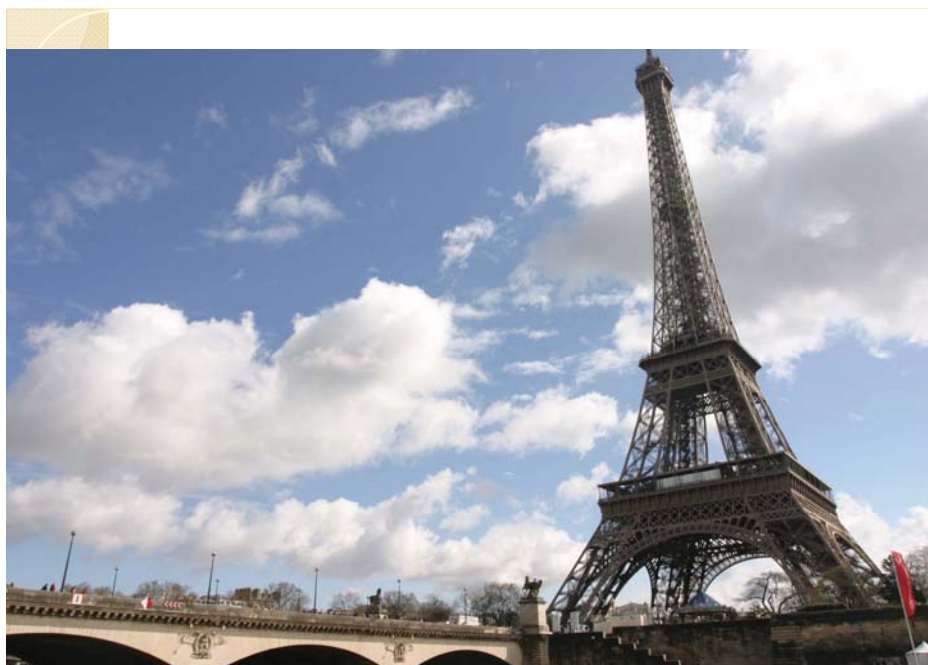
(躯体の維持保全)

日本大学
教授 湯浅 昇

1



2



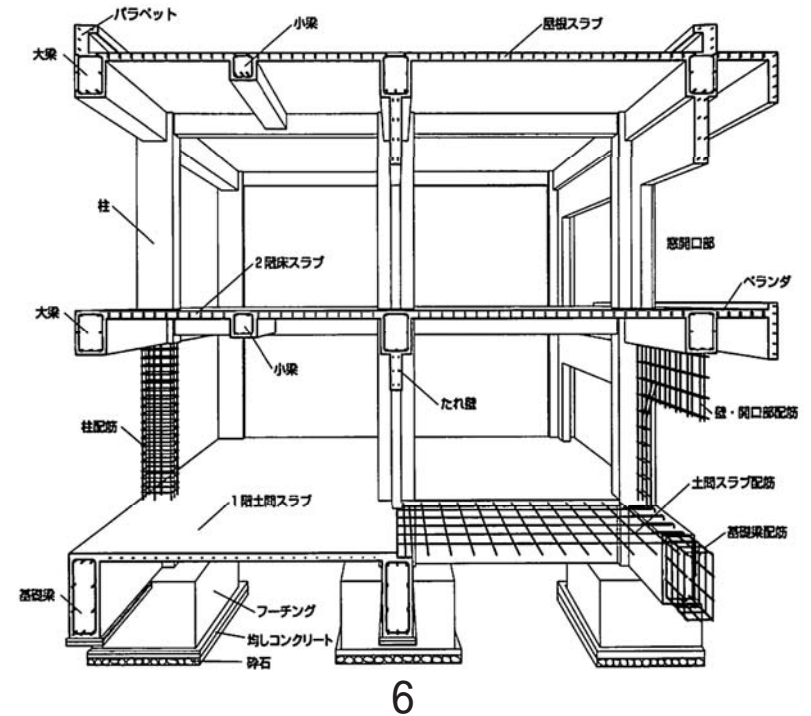
3



4

鉄筋コンクリート構造とは

5



6

鉄筋コンクリート

- Reinforced Concrete Structure
「補強されたコンクリート構造」

ポイント

- コンクリートの圧縮強度は大きい
- コンクリートの引張強度・曲げ強度は小さい
- 鉄筋がコンクリートの弱点を補う

7

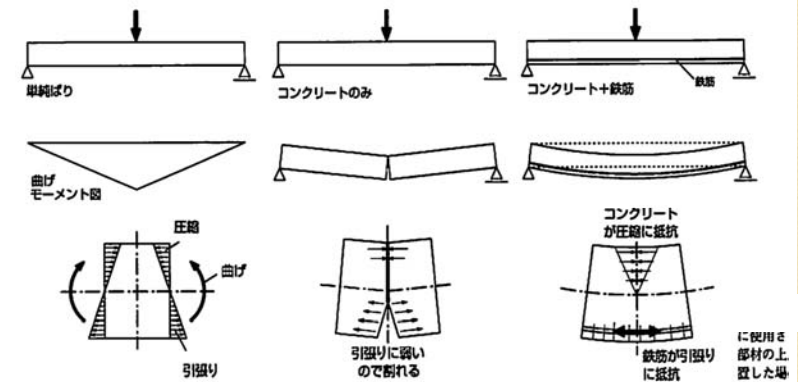


図3-2 鉄筋コンクリート梁の原理[®]

ポイント

- 構造上の引張荷重は鉄筋で受ける
→ 曲げ力はコンクリート圧縮耐力と鉄筋の引張耐力を複合して

8

鉄筋コンクリート造の劣化

9

劣化の種類

- 中性化による鉄筋腐食
(一般環境における劣化)
- 塩分による鉄筋腐食(塩害)
- 凍害によるコンクリートの膨張劣化
- アルカリシリカ反応によるコンクリートの膨張劣化
- 火山性腐食ガスによるコンクリートの劣化
- 酸性土壌・酸性水によるコンクリートの劣化

10

塩害

11

軍艦島



12



日本最古のRC造30号棟(大正15年)¹³

13



14



15



16



21



日本最初の屋上緑化
(昭和40年頃:屋上菜園・水田)

22

沖縄のアパートの廊下崩壊



23



今は供用されていない沖縄の橋梁

24

鉄筋が腐食し、その上の（かぶり）コンクリートが剥落する現象

- コンクリートが空気中の二酸化炭素により、アルカリ性から中性に変化することに起因
= 中性化による鉄筋腐食
- コンクリート中の塩分（内在塩分と外来塩分の別有）に起因
= 塩害

25

中性化による鉄筋腐食

26



写真 20年前に解体した中性化による劣化建物

27



写真 鉄筋腐食に伴ってコンクリートが浮く

28



写真 コンクリートの断面(鉄筋からひびが走っているところに注目)

29



写真 打放しコンクリートのはつり調査(屋外側が屋内側よりも鉄筋の腐食が激しい)

30

中性化の進行、雨掛かりと、鉄筋の腐食の進行

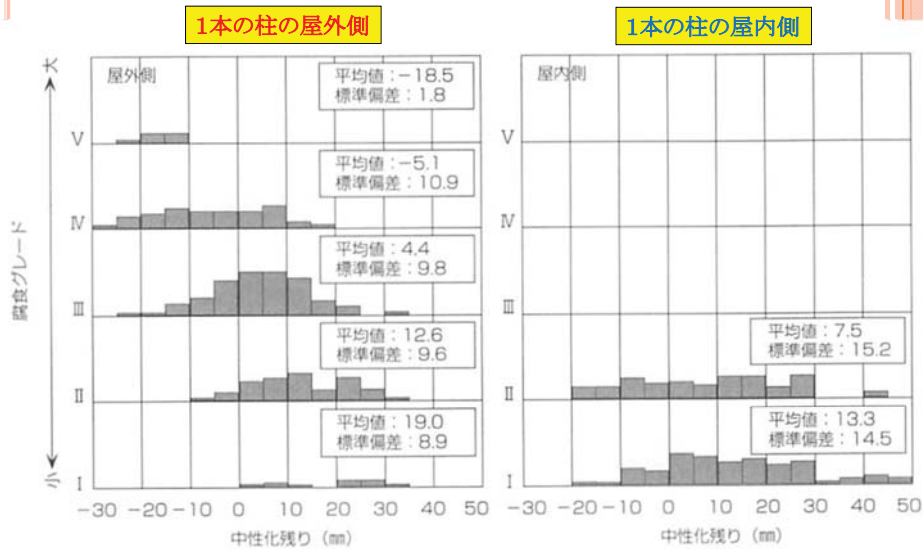


図 外側鉄筋と内側鉄筋の「中性化残りと腐食度の関係」の相違

31



32



33

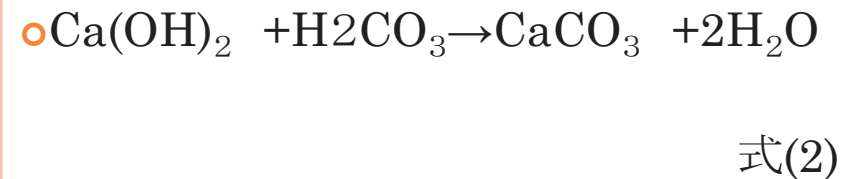
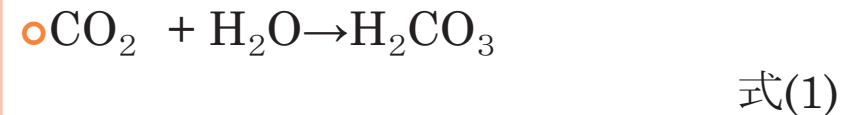


34

中性化による鉄筋腐食とコンクリートの剥落

- コンクリートは、セメントの水和生成物である水酸化カルシウム($\text{Ca}(\text{OH})_2$)によってpHが12~13の強アルカリ性を示し、コンクリートの中の鉄筋の表面には、厚さ2~6nm厚の水和酸化物($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)の酸化皮膜(一般に不動態皮膜と呼ばれる)が形成される。
- このような状態では、鉄筋はこの被膜により保護されるため腐食はみられない。
- しかし、空気中の二酸化炭素(大気中の濃度はおよそ400ppm、室内の濃度は1,000ppmを超えることもある)と水との反応によって、式のように生成した弱酸である炭酸が、コンクリート表面より徐々に水酸化カルシウムを侵して中性化し、中性物質である炭酸カルシウムを生成する。

35



- こうしてコンクリートはアルカリ性を失う

36



37

中性化予測式

$$C = A\sqrt{t}$$

C: 中性化深さ

t: 経過時間

A: 中性化速度係数(コンクリートの材料や水セメント比
仕上げ材等の要因によって変化する係数)

水セメント比が大きいとA大

含水状態小さいとA大

仕上げ材無し及びその密閉度が低いとA大

38

- この中性化が鉄筋の位置に到達すると、鉄筋表面の水酸化物の皮膜が破壊され、**酸素と水**の供給があれば、鉄筋は腐食する。



39

- 鉄筋が腐食すると、発錆によりおよそ**2.5倍の体積膨張**が生じる。
- ここで発生する膨張圧は、写真に示すように、かぶりコンクリートを押しだす。
- その結果、コンクリートには鉄筋まで貫通するひび割れが発生する。
- 更にひび割れを通して、酸素と水は直接鉄筋に供給され、ますます腐食は進行し、いつしか剥落することになる。

40



かぶりコンクリートが鉄筋の腐食時の膨張圧で押し出される

(中性化による)
鉄筋腐食の可能性

- 中性化の進行？
- 塗膜による二酸化炭素の遮断？
- かぶり厚？
- 水の存在？
- 塗膜による水の遮断？
- 酸素の存在？
- 塗膜による酸素の遮断？

(建設時に気をつける) 鉄筋の腐食を防ぐための基本

- ① 塩化物イオンを混入させない。
= 海砂の除塩、セメント・混和剤の塩化物量にも注意
- ② 二酸化炭素・塩分が透過しにくいコンクリートをつくる。
= 塩分浸透の抑制が期待される
高炉セメント・フライアッシュセメントを使う。
= 水セメント比の小さいコンクリートを使う。
- ③ 鉄筋のかぶりを十分とる。
- ④ コンクリート表面に気密性の塗装あるいはモルタルで覆う。

表 6.1 一般環境地域における設計かぶり厚さ (mm)

		設計耐用年数				
		30年	65年	100年		
土または水に 接しない	床スラブ	屋内	仕上げあり	20	30	30
			仕上げなし	20	30	40
	屋根スラブ 非耐力壁	屋外	仕上げあり	20	30	40
			仕上げなし	30	40	50
	柱 梁 耐力壁	屋内	仕上げあり	30	40	40
			仕上げなし	30	40	50
		屋外	仕上げあり	30	40	50
			仕上げなし	40	50	60
土または水に 接する	土または水に接する柱・梁・床スラブ・耐力壁		40	50		
	基礎・擁壁		60	70		

[注] 「仕上げあり」は、コンクリートに密着する耐久性上有効な仕上材を原則とする。

注2) 設計耐用年数30年のかぶりは最小かぶり厚を示す

塗膜による 鉄筋コンクリート構造物の保護

- ただ塗ればよいわけではない!!!
塗膜の品質により効果は異なる

分類	中性化率	
複層塗材	0.32	
薄付け仕上塗材	1.02	外装薄付塗材(樹脂リシン)
厚付け仕上塗材	0.35	
塗膜防水層	0.10	アクリルゴム系
塗料	0.81	
下地調整材	0.87	

45



46

極めて安価であるが
リシンは全く効果がないと言われている



47

塗膜の寿命≪コンクリートの寿命

塗膜＝高分子材料は
光に弱い (ただし塗膜の種類に
より程度は異なる)



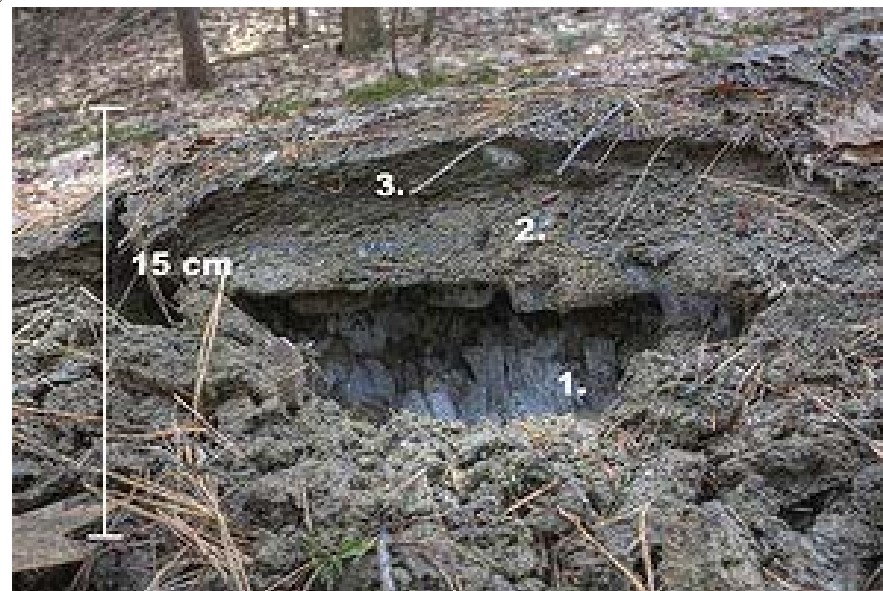
塗膜は適度の
塗り直しが必要
種類が違ってても
基本的に重ね塗りOK

紫外線によって、塗料の中の顔料(着色料)を結合している樹脂層が劣化すると、顔料(着色料)の離脱が起こり、チョークの粉のように塗膜の表面が粉状になる。これがチョーキング。

48

寒い地域のコンクリート 寒中施工と凍害

49



土壌の凍上

50



51

初期凍害

- 寒中コンクリートとは、コンクリートの打ち込み後の養生期間で凍結するおそれのある場合に施工されるコンクリートである。
- コンクリートが凝結・硬化の初期段階で凍結すると、硬化しなかったり、所定の強度が得られないなどの障害が生じる。これが初期凍害。
- 初期凍害の防止のため、圧縮強度で $5.0\text{N}/\text{mm}^2$ （メカニズム的には引張強度で $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ ）が得られるまでコンクリートを凍結させないように初期養生（ 5°C 以上を保つ）を行う。

52

■簡易的な養生



鉄骨にワイヤーを張りシートにて囲い、採暖(オイルファーンレス+ビニルダクト)。



単管支柱にワイヤーを張りシートにて囲い、コンクリート打設時は採暖。

53

■在来(パイプ+足場板+シート)



54



55

■採暖器具



56

コンクリート構造物の凍害

Frost damage of reinforced concrete structure

57

凍害の劣化形態と原因

- コンクリート組織の膨張
→水分凍結によるセメントペースト組織の膨張ひび割れ
- スケーリング
→凍結融解、塩分と凍結の複合、ブリーディング水
- ポップアウト
→吸水性の高い骨材の使用、海水と凍結の複合

58

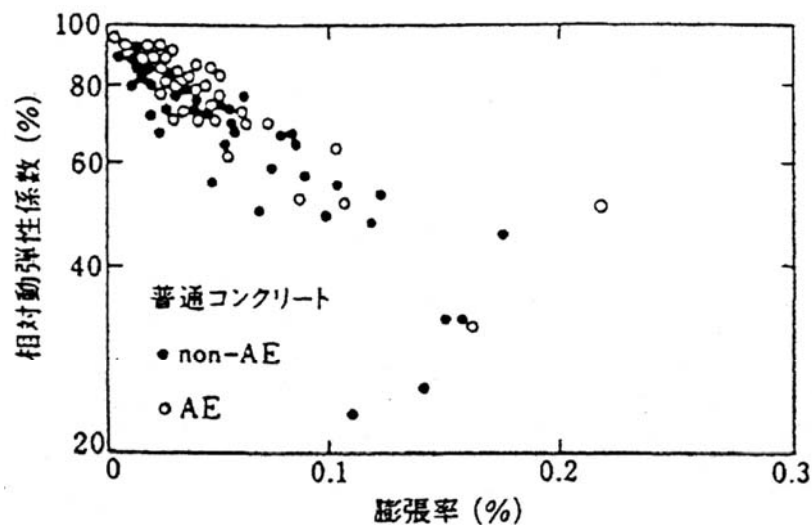
凍害の定義と種類



海岸構造物の凍害

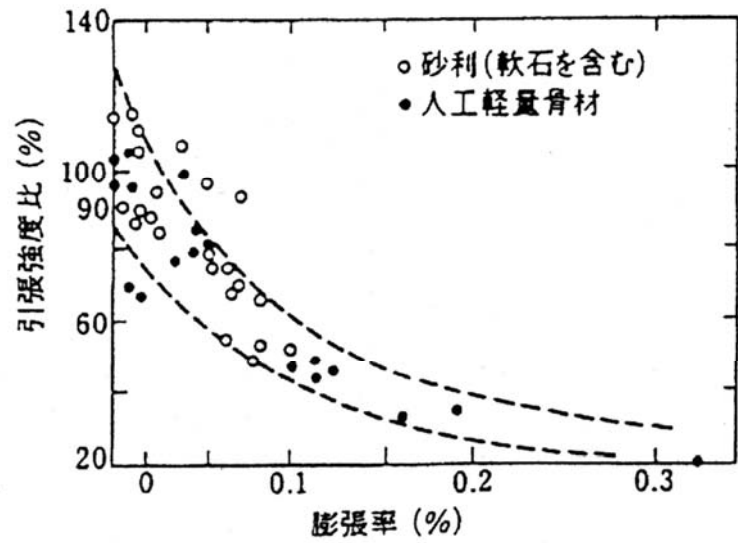
59

凍害による膨張と相対動弾性係数の低下との関係



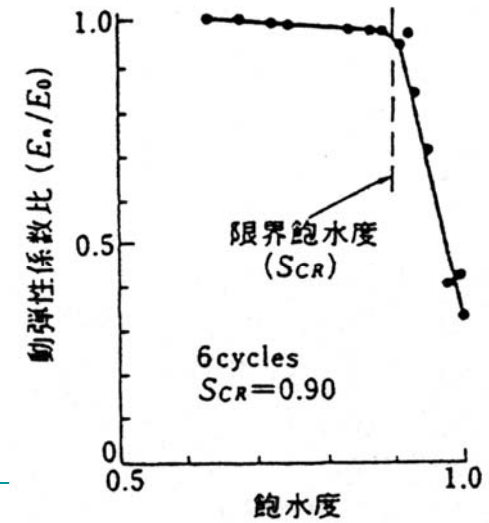
60

凍害による膨張と引張強度の低下との関係



61

限界飽水度
(その値以上の飽水度で凍害が生じる)



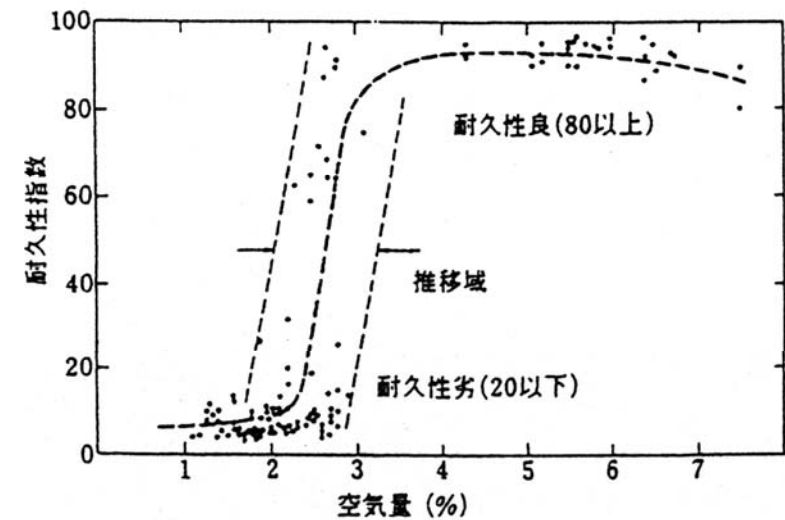
62

海岸倉庫の凍害



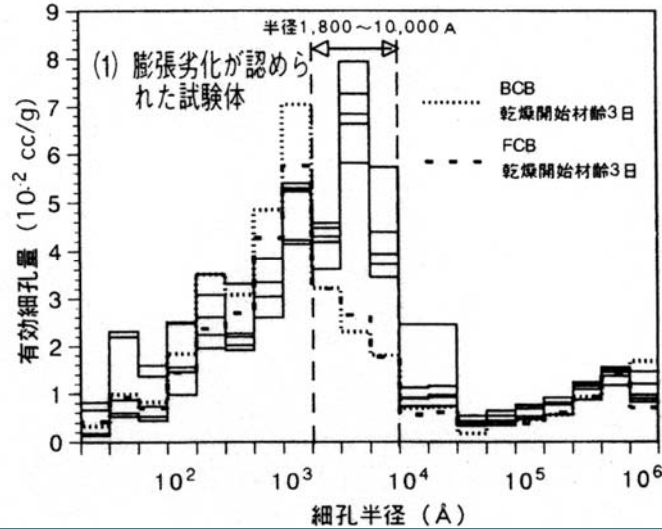
63

空気量と耐凍害性の関係 (Cordon and Merrill)



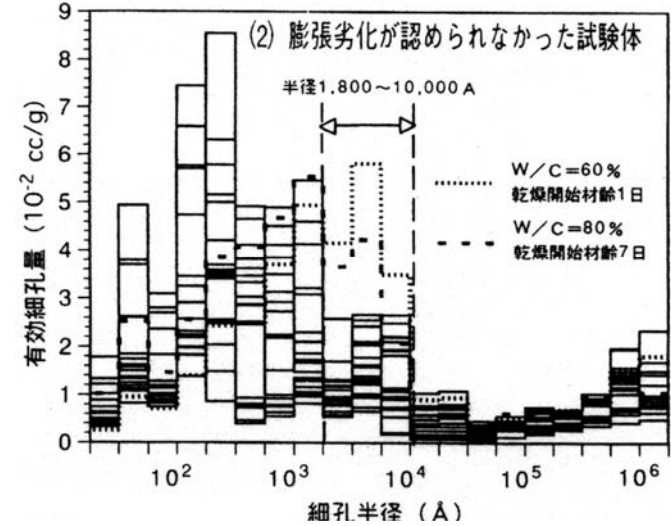
64

膨張劣化の有無と細孔径分布



65

膨張劣化の有無と細孔径分布



66

凍害危険度の分布図

1. ○内の数値は凍害危険度。

凍害危険度	凍害の予想程度
5	極めて大きい
4	大きい
3	やや大きい
2	軽微
1	ごく軽微

2. 凍害重み係数 $t(A)$ 一良質骨材, または AE 剤を使用したコンクリートの場合。
3. コンクリートの品質が良くない場合には、内の地域でも凍害が発生する。



67

凍害を受けやすい建物部位とその原因

部 位	凍害発生 の主な原因
突出部	軒先、バルコニー、玄関ひさし、パラペット(笠石など)、外廊柱(はり、下屋周) 凍結融解が多い、凍結温度低い、水切り不良、材質不良 (写真3、5、8)
外壁面	集合煙筒 温度ひび割れ、凍結融解が多い
	開口部周(特に下部、窓台) 水切り不良、結露水の凍結
	パラペット周 防水層伸張の膨張によるひび割れ、打継ぎ部欠陥
	多湿室の外壁部 結露水の凍結
床 面	隅角部 温度応力によるひび割れ、凍結温度低い (写真4)
	排気口の下部 結露水、凍結融解が多い
	斜め外壁 水切り不良
屋 外 階 段	防水層伸張 材質不良(初期凍害も多い)、含水高い (写真6)
	材質・施工不良、凍結融解が多い、水切り不良 (写真7)

68

庇の凍害



69

隅角部の凍害



70

融雪水のたまりやすい場所での劣化



71

防水押さえの凍害



72

屋外階段の凍害



73



軽井沢の縁石
(2015.4)

74



北海道・タウシュベツ橋梁(2011.6)

75

耐凍害性に関する設計施工指針 (コンクリートの調合)

① 水セメント比の最大値

準凍害地域・一般凍害地域では55%
重凍害地域では50%とする。

② 計画調合における空気量

5%とする。ただし、その空気泡は、AE 剤、
AE 減水剤または高性能AE 減水剤を用いる
ことにより導入されたコンクリート中に均質に
分布した空気泡(エントレインドエア)でなけ
ればならない。

76

日本における空気量の測定方法

測定は、ISO 4848(Concrete- Determination of air content of freshly mixed concrete- Pressure method)に準じ、JIS A 1128(フレッシュコンクリートの空気量の圧力による方法—空気室圧力方法)による。



77

耐凍害性に関する設計施工指針 (コンクリートの骨材)

① 吸水率

準凍害地域では、
細骨材3.5%以下 粗骨材3.0%以下
一般凍害地域・重凍害地域では、
細骨材3.0%以下 粗骨材2.0%以下とする。

② 骨材の安定性損失質量

細骨材10%以下 粗骨材12%以下とする。

78

日射量の多い面が融解数が多いので
劣化が激しい



79



熊本・阿蘇山の凍害

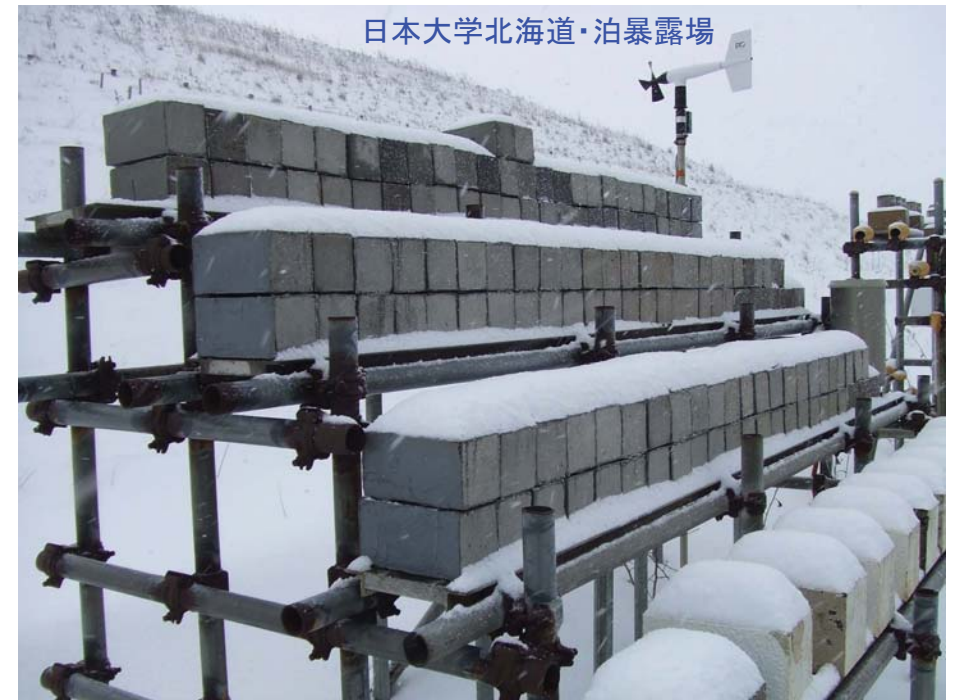
80

凍害を防ぐための基本

- ①微細な独立気泡(エントレインドエア)を適度に連行するとともに水セメント比をできるだけ小さくし密実な組織とする。
- ②吸水率が大きく耐凍害性が小さい骨材を使わない。
- ③水をコンクリート中にしみ込ませない。

81

81



日本大学北海道・泊暴露場

82

アルカリシリカ反応による劣化



83

アルカリ骨材反応への注目例

NHK「クローズアップ現代」

2003年4月10日(木)放送

鉄筋破断の衝撃

～問われるコンクリートの安全性～

鉄筋コンクリートの安全性を脅かす現象「鉄筋の破断」が、近畿や北陸の道路橋脚15カ所で見つかった。原因は、アルカリ骨材反応というコンクリート内部の膨張によって、鉄筋が引きちぎられたためと考えられる。

砂などに含まれる珪物とセメントが化学反応を起こし、膨張する現象である。従来は鉄筋があるから構造上は問題ないとされてきたが、今回の調査結果を受け「建築物が条件によっては崩壊してしまう危険性もある」と専門家は語る。今回の発見は、別目的の補修作業中の偶然にすぎない。事態を重く見た国土交通省は3月、緊急調査を指示した。しかし外見からの破断発見は難しく、その補強法も模索中だ。社会インフラ全体の見直しに繋がりがかねない「鉄筋破断」について考える。



84

アルカリ骨材反応とは

アルカリ骨材反応にはアルカリシリカ反応とアルカリ炭酸塩反応の2種類の反応がある。コンクリート中のアルカリは、セメントに由来するものがほとんどだが、長石などの骨材や化学混和剤から供給されるアルカリ、また海水や融雪剤など外部からの供給もある。

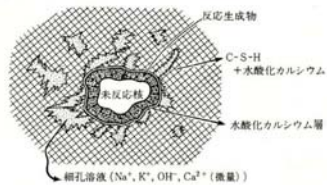
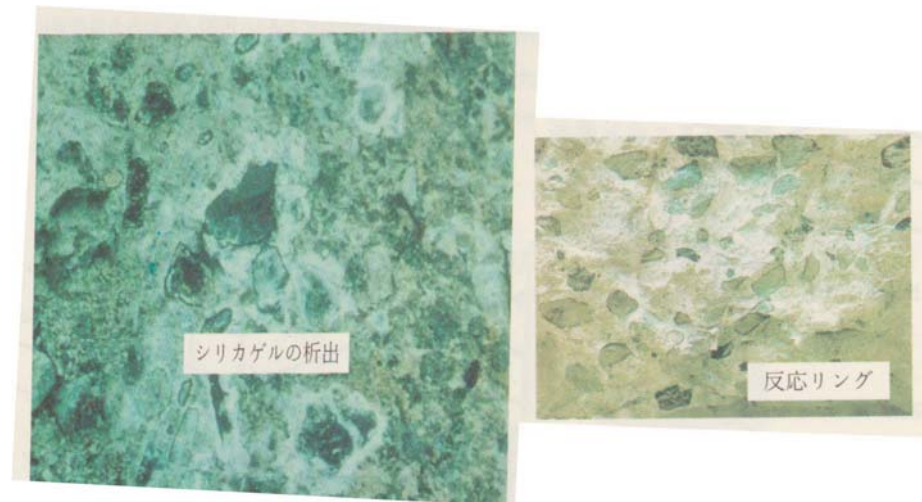


図-3.7 モルタル中で反応進行中の反応性シリカ粒子の模式図

●アルカリシリカ反応 反応性シリカ鉱物であるトリディマイトやクリストバライト、非晶質なシリカガラス、および潜晶質石英などが、コンクリート中の水酸化アルカリと反応することをいう。アルカリシリカ反応は、骨材とセメントペーストの界面で起こる反応により生成されたアルカリシリケートゲルが吸水することによって起こる膨張である。アルカリシリカ反応による劣化過程は、1) 化学反応によってアルカリ・シリカゲルが生成される過程と、2) ゲルが吸水する物理化学的な過程に分離される。

85



86



87



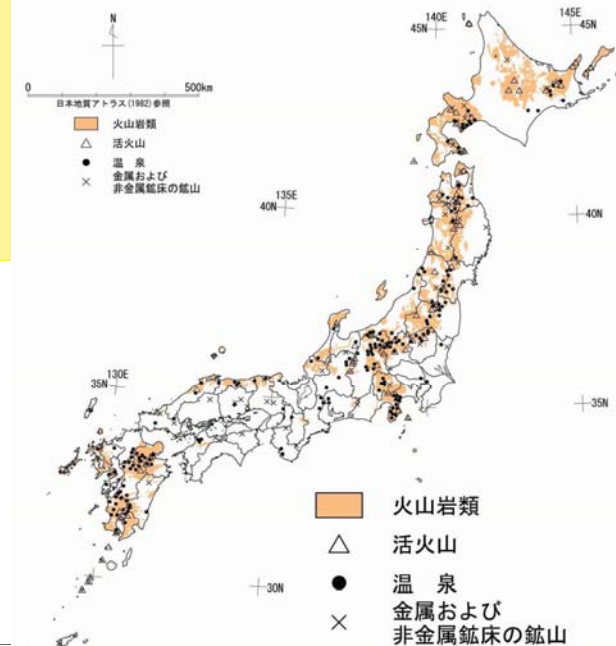
88

特殊な環境

火山性腐食ガス・地盤

89

火山活動 および 鉱床による 腐食性地盤



90

火山活動および鉱床による劣化要因

【火山活動による】

地熱
噴気ガス
温泉水
(pHが低い)
(析出物多い)

【鉱床による】

野積みした鉱滓
坑道からの廃水
表流水の多少

コンクリート

91

三宅島



92



93



94



95



96



97



98



99



100



101



102



103



104



105



106



107



108



109

雲仙・塗膜の垂れ



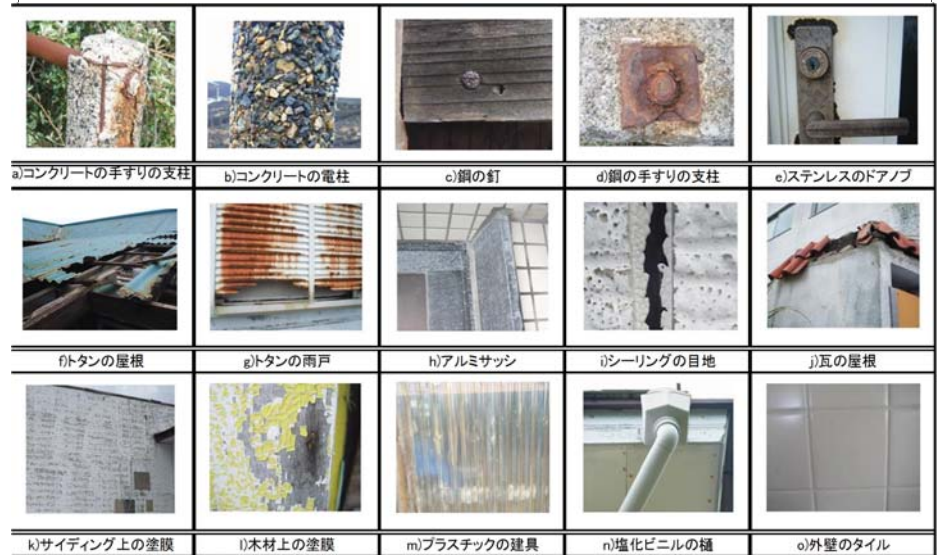
110

北海道川湯温泉：塗膜のふくれ



111

三宅島



112



pHが3以下の強い酸性温泉地の下流に位置する砂防ダムの腐食例

【土壌環境とコンクリート】

113



pHが3以下の強い酸性温泉地の下流に位置する砂防ダムの腐食例その2

【土壌環境とコンクリート】

114

草津の温泉



115

草津の温泉



116

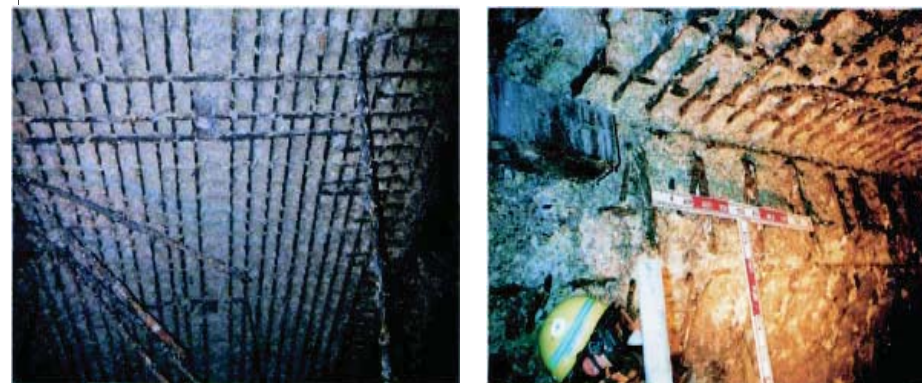


ぼた造成地盤に建った住宅基礎の腐食例

【土壌環境とコンクリート】

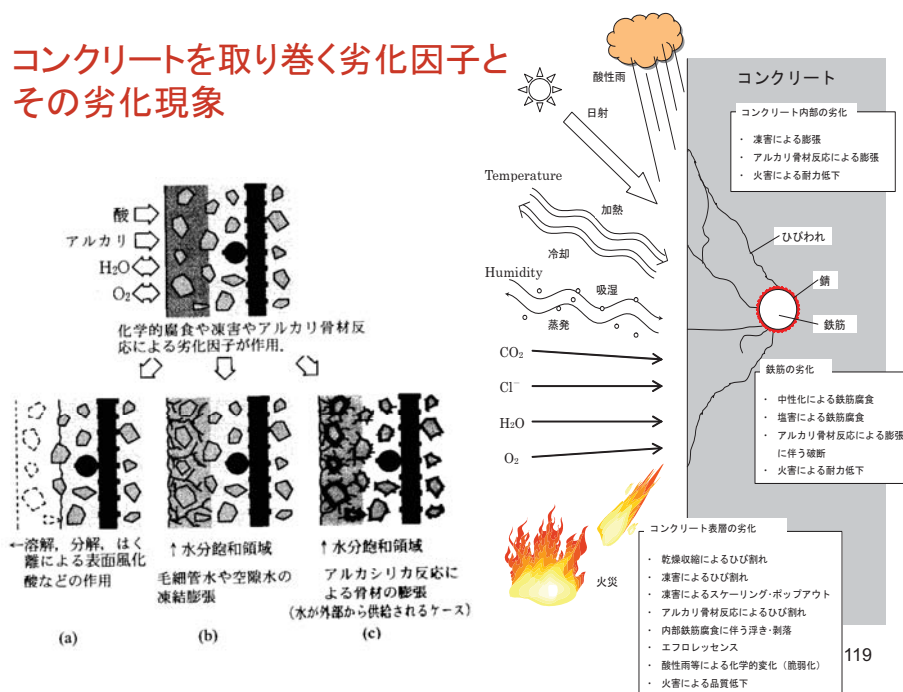
117

下水道の化学的浸食（硫酸）



118

コンクリートを取り巻く劣化因子とその劣化現象



119

日大の暴露試験体制

- 沖縄・辺野喜
- 九州・霧島
- 九州・屋久島
- 千葉・日大
- 三宅島
- 北海道・泊
- イギリスにも

120

建物躯体の劣化と水

EFFECT OF WATER ON BUILDING DETERIORATION



日本大学
教授 湯浅 昇
Noboru YUASA

121



写真-1 軍艦島の惨状(廃屋となった後、窓・外壁の崩壊により内外装材が散乱、内部コンクリート躯体の劣化が進行)

122



写真-2 三宅島の一戸建て住居の惨状(三宅島雄山噴火に伴う全島避難中に屋根材、内外装材の劣化が進行、木躯体崩壊寸前)

123

表-1 木材腐朽菌の生育条件

木材腐朽菌の生育必須条件項目	生育条件
酸素	腐朽菌は呼吸作用必須(常水面下では腐朽しない=RCの松杭の成立条件)
水	発育は木材含水率20~50%(湿度85%における木材の平衡含水率は20%程度)
温度	最適温度24~36℃、3℃以下繁殖停止、45℃以上死滅
養分	木材自体が養分

124

写真-3 木材の腐朽



125

表-1 木材腐朽菌の生育条件

木材腐朽菌の生育必須条件項目	生育条件
酸素	腐朽菌は呼吸作用必須(常水面下では腐朽しない=RCの松杭の成立条件)
水	発育は木材含水率20~50%(湿度85%における木材の平衡含水率は20%程度)
温度	最適温度24~36℃、3℃以下繁殖停止、45℃以上死滅
養分	木材自体が養分

126

表-2 鉄の腐食条件

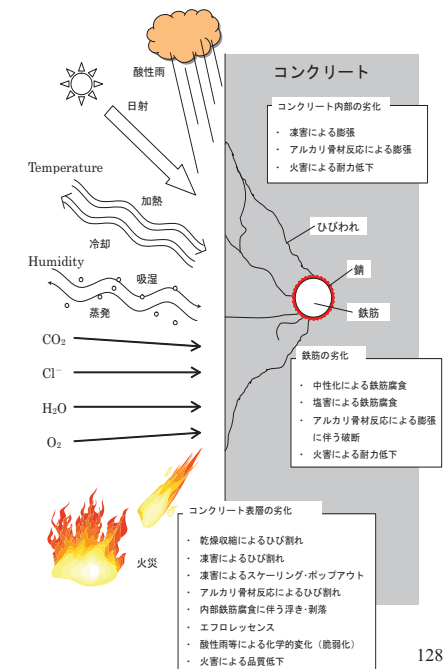
鉄の腐食必須条件
酸素
水

写真-4 鉄骨柱脚部の腐食



127

図-1 鉄筋コンクリート造を取り巻く外的劣化因子とそれらによる劣化現象



128

表-3 各劣化メカニズムにおける水の役割、含水状態と劣化度

劣化現象	劣化過程における水の関わり方	水分と劣化程度
中性化による鉄筋腐食	鉄筋周辺のコンクリートが中性化後、水と酸素があつて鉄筋が腐食する	・水がないと起きない ・含水率が低いと劣化度は低減する
塩化物イオンによる鉄筋腐食(塩害)	鉄筋周辺のコンクリートに許容量以上の塩化物イオンが存在すると、水と酸素があつて鉄筋が腐食する	・水がないと起きない ・含水率が低いと劣化度は低減する
凍結融解作用によるコンクリートの膨張劣化(凍害)	コンクリートの細孔内において、水の凍結による9%の体積膨張による膨張圧によりコンクリートが膨張劣化する	・水がないと起きない ・含水率が低いと劣化度は低減する
アルカリシリカ反応によるコンクリートの膨張劣化	アルカリ反応性骨材とコンクリートのアルカリが反応してできた生成物が、吸水膨張することでコンクリートが膨張劣化する	・水がないと起きない ・含水率が低いと劣化度は低減する

129

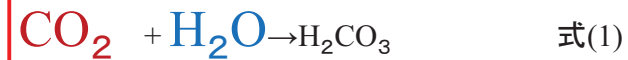


写真-5 中性化による劣化

130



写真-6 中性化による鉄筋腐食とかぶりコンクリートの押し出し(コンクリートの断面)

131

1本の柱の屋外側

1本の柱の屋内側

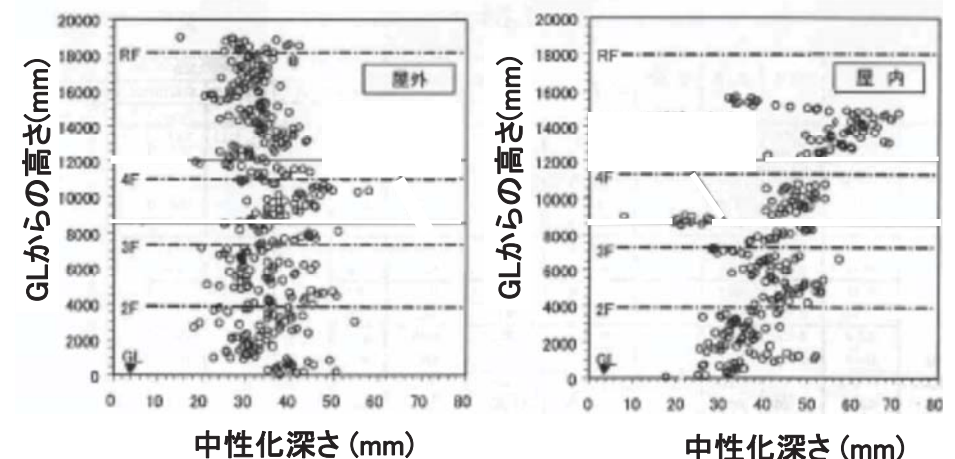


図-2 雨掛かりの有無と中性化深さの分布

132

雨掛かりと、中性化の進行、鉄筋の腐食の進行

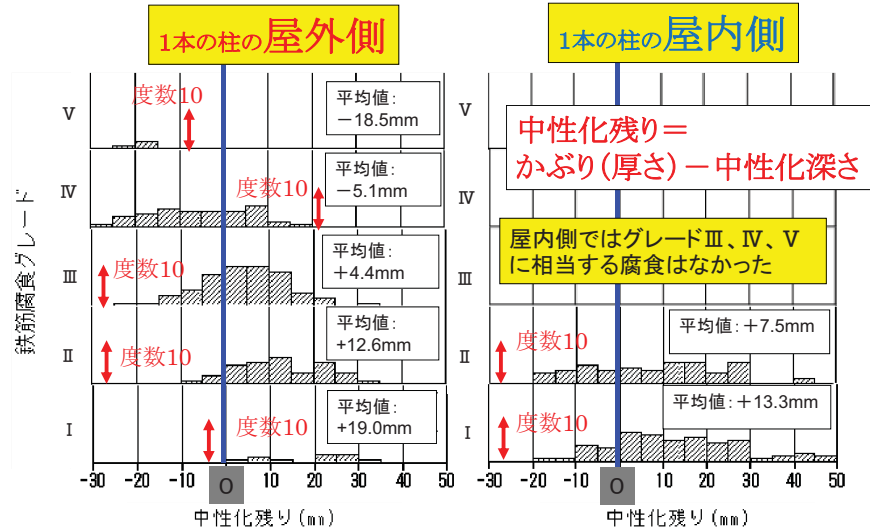


図-3 外側鉄筋と内側鉄筋の「中性化残り」と腐食度の関係」の相違

133



図-7 軍艦島65号棟の塩害

図-8 軍艦島58号棟の塩害(鉄筋は腐食により錆を除くと健全断面はφ5mm程度)



134

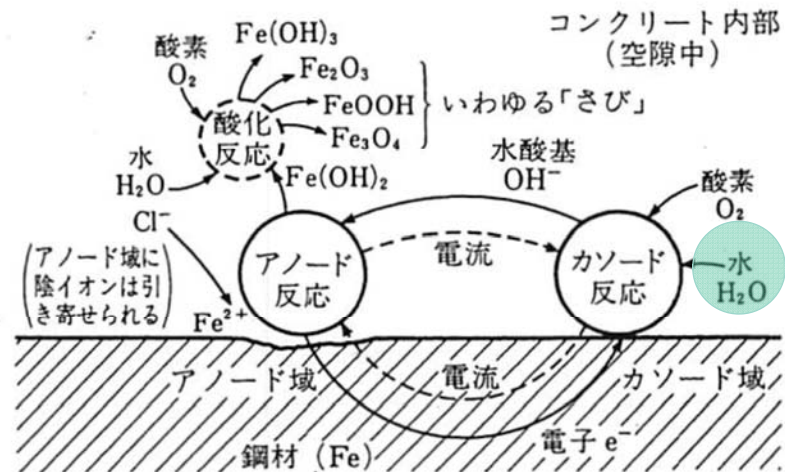


図-4 塩化物イオンによる不動態皮膜の破壊と腐食電池の形成

135



図-7 軍艦島65号棟の塩害

図-8 軍艦島58号棟の塩害(鉄筋は腐食により錆を除くと健全断面はφ5mm程度)



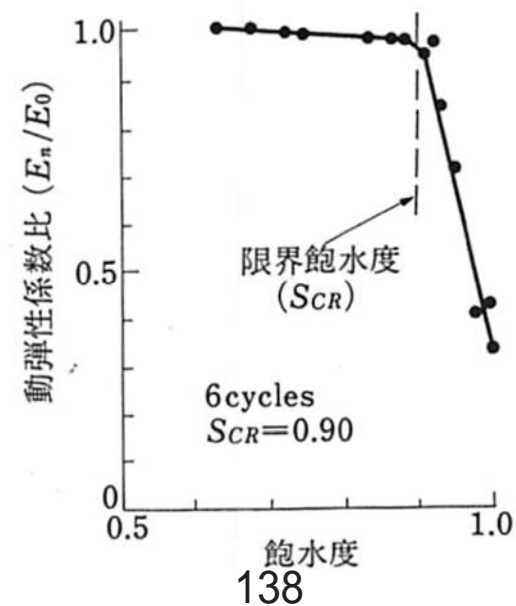
136



写真-11 海岸倉庫の凍害(使用禁止になって10年は経った頃の状況、塩分を含むと凍結温度が下がり厳しくなる)

137

図-5 限界飽水度
(その値以上の飽水度で凍害が生じる)



138



写真-10 庇の凍害(出っ張っている庇は水のたまる場所、温度変化が激しいところ。日射を受ける南、西が劣化大。南よりは西。)

139



写真-12 外階段の凍害(裏側も融けた水が回り凍害が起きる)

140



写真-13 段差のあるところの凍害(段になっているところには雪がたまる。それが融けるので水がたまることになる)

141

写真-17
防水押えの凍害
(昔は安易に
nonAEコンクリ
ートを使ったこと
が多かったこと
もあり凍害を受
けやすい部位で
あった)



142

表-4 凍害を受けやすい建物部位とその原因

部 位		凍害発生の主な原因
突出部	軒先、ベランダ、玄関ひさし、パラペット(笠石など)、外部柱・はり、下屋周り	凍結融解多い、凍結温度低い、水切り不良、材質不良
	集合煙筒	温度ひび割れ、凍結融解多い
外壁面	開口部周り(特に下部、窓台)	水切り不良、結露水の凍結
	パラペット周り	防水層押えの膨張によるひび割れ、打継ぎ部欠陥
	多湿室の外壁部	結露水の凍結
	隅角部	温度応力によるひび割れ、凍結温度低い
	排気口の下部	結露水、凍結融解多い
	斜め外壁	水切り不良
床面	防水層押え	材質不良(初期凍害も多い)、含水高い
	屋外階段	材質・施工不良、凍結融解多い、水切り不良

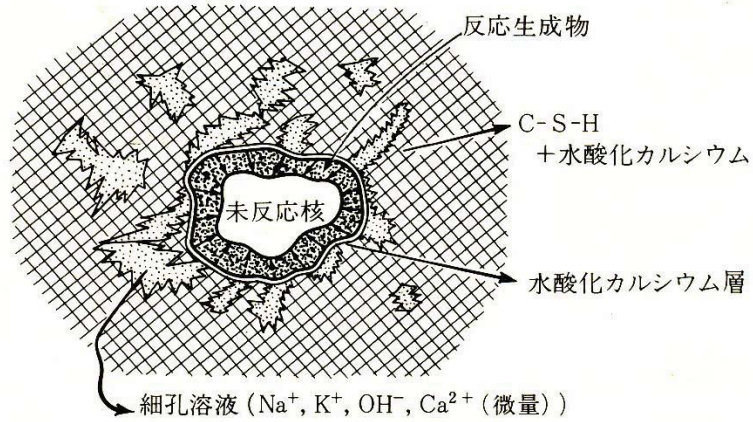
143

写真-18 アルカリシリカ反応による劣化



144

図-6 反応進行中の反応性シリカ粒子の模式図



145

写真-18 アルカリシリカ反応による劣化



146

写真-20 アルカリシリカ反応による鉄筋の破断



147

写真-19 アルカリシリカ反応による主筋方向にひび割れ



148

148



写真-24 中尊寺金色堂(新覆堂の中で更にガラスケースで
囲われ温度・湿度が管理されている)

149

写真-26 新覆堂(平泉金色堂)



150



写真-25 旧覆堂
151

写真-26 新覆堂(平泉金色堂)



152