

## コンクリートの耐久性

### 第1節 コンクリートの塩害

#### 1. はじめに

コンクリート中の塩化物には、コンクリート混練時に混入したもの（海砂の使用、塩化物を多量に含んだ混和剤の使用等）と、周囲の環境から侵入したもの（海水との接触、融雪剤の散布等）とに分けられます。いずれの場合も鉄筋コンクリート中の鉄筋を錆させ、かぶりコンクリートの剥落や構造物の耐力の低下を引き起こします。ここでは、特にコンクリート構造物が海岸地域にあり、海塩粒子が飛来・侵入して内部鉄筋を腐食させる塩害について解説します。

#### 2. 海塩粒子の飛来距離

海水中には3～4%（NaCl換算）の塩分が含まれています。鉄筋が最も錆びるNaCl濃度は約3.6%ですから、海水が付着すると非常に錆びやすくなるのが分かります。この海水の気泡や水滴が砕ける際に発生する海塩粒子は風に乗って内陸まで飛来します。一般に大気中の塩分量は海岸から200m付近まではかなり多く、それより内陸部では激減する傾向にあります（図1）<sup>1)</sup>。従って海岸から200m付近までの鉄筋コンクリートは特に塩害を受けやすくなるといえます。

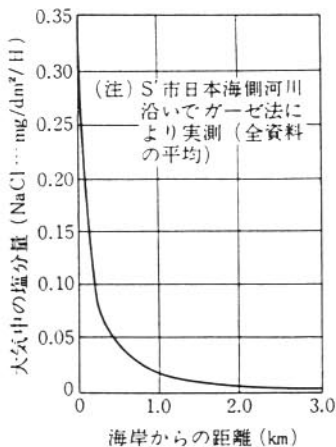


図1 海岸からの距離と飛来塩分量

#### 3. 塩分のコンクリートへの侵入深さ

表1にコンクリート供試体を干潮時には露出する状態で10年間海水中に浸漬した実験結果を示しました<sup>2)</sup>。これによると塩分は表面部分に5年で0.30%、10年経過すると0.94%侵入していることが分かります。これは1m<sup>3</sup>のコンクリート中に約20kgのNaClが含まれている計算になります。また、6～10cm部分では、5年で0.03%、10年で0.39%侵入していることが分かります。鉄筋付近のコンクリートに0.03%以上の塩分が含まれていると錆びるといわれていますので、このコンクリートは確実に塩害が発生すると考えられます。

表1 コンクリート中の塩分含有量

表面からの深さ (cm)	塩分含有量(NaCl%)		
	5年	7年	10年
0～3	0.30	0.59	0.94
3～6	0.10	0.28	0.54
6～10	0.03	0.13	0.39

#### 4. 鉄筋発錆メカニズム

コンクリート中に存在する鉄筋はセメントの強アルカリ性によりpH=12.5程度の強アルカリ環境下にあります。このような強アルカリ環境下において鉄筋の表面には厚さ0.002～0.006μmの酸化皮膜 $[\gamma\text{-Fe}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}]$ が形成されており不動態化しているため、腐食から保護されています。

ところが、塩分が付着し、コンクリート内部に侵入していくと、簡単にこの酸化皮膜が破壊され、酸化皮膜を失った鉄筋の表面では鉄がイオン化し溶解するアノード反応と、酸素が還元するカソード反応が生じます（図2）<sup>2)</sup>。この結果、鉄筋は表面に赤錆を発生します。このように塩分自体は腐食反応に直接関与しませんが、酸化皮膜を破壊するために鉄筋にとっては大敵となります。また、鉄は錆ると元の体積の約2.5倍に膨張するため、この膨張圧によってコンクリートにひび割れやかぶりコンクリートの剥落が生じ塩害はさらに深く進行していきます。

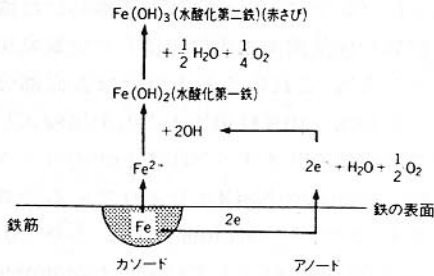


図2 鉄筋の腐食反応機構

### 5. 塩害の防止方法

塩害を防ぐには以下のような方法があり、単独または組み合わせて適宜用いられています。

#### (1) コンクリートを新設する場合<sup>3)</sup>

- ①耐硫酸塩セメントを用いる。
- ②コンクリートの水セメント比を小さくし、かぶり厚さを大きくする。
- ③塩分の侵入に対し抵抗性のある表面仕上げを施す。
- ④樹脂塗装鉄筋を使用する。

#### (2) 既設コンクリートの場合

一般的に塩分が侵入し既に劣化してしまったコンクリートを、補修により打設当初と同じ状態にまで回復させることは非常に困難です。コンクリート中に相当量の塩分が存在する限り鉄筋は錆び続けます。また、1度侵入した塩分をコンクリートから抜き取ることも不可能に近いと考えられています。しかし、近年実用化されつつある電気防食技術により鉄筋の腐食反応

(錆の進行)を停止することが出来ます。

#### ①電気防食<sup>2)</sup>

米国において凍結防止剤の大量散布による塩害対策として実用化され、欧米では多くの施工実績を有する技術です。国内においても実用化を促進するための委員会等が設置され検討が進められています。図3に電気防食の原理を鋼材の自然電位および防食電位に基づき概念的に示しました。電気防食の防食電流は、まず貴な電位のカソード部に流れ、電流密度の増加に伴いカソード部の電位を徐々に卑な方向へ変化させます。電流密度をさらに増加させ、適性な大きさの防食電流を供給するとカソード部の電位とアノード部の電位がほとんど等しくなり腐食電位が消滅し、鉄筋の腐食反応を停止することになります。

#### [参考文献]

- 1) 岸谷孝一、西澤紀昭他 編、コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害 (I)、技報堂(1988)
- 2) 峰松敏和、電気化学的防食、セメント・コンクリート、No.552, p44, Feb.(1993)
- 3) セメント協会、セメント・コンクリート化学とその応用

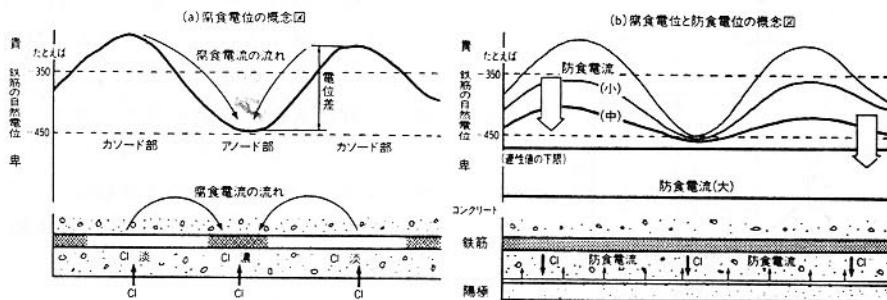


図3 腐食電位と防食電位の概念図

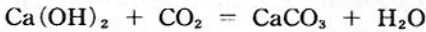
## コンクリートの耐久性

### 第2節 コンクリートの中性化

#### 1. メカニズム

鉄筋コンクリートの耐久性を論じる上で、コンクリートの中性化は大きな問題です。

コンクリートの内部はセメントの水和により析出した水酸化カルシウム (Ca(OH)<sub>2</sub>) によって、強いアルカリ性を呈しています。コンクリートの中性化はこの水酸化カルシウムが空気中の二酸化炭素と以下のように反応して、



炭酸カルシウム (CaCO<sub>3</sub>) を生成し、アルカリ性が失われて、中性になることにより起きます。コンクリートの中性化は、特に、鉄筋コンクリートではコンクリート内部の鉄筋の発錆が大きな問題となります。

健全なコンクリートの内部は強いアルカリ性を呈しているため、鉄筋の表面には不動態と呼ばれる安定な膜が形成されており、この状態で鉄筋は発錆しません。ところが、コンクリートが中性化されると、この不動態の膜が破壊されて錆が発生し、鉄は体積が2.5倍に膨張して、コンクリートにひび割れを発生させ、ひびが表面まで達すると、そこから二酸化炭素・水が入り込み、さらに中性化・錆の発生が進行します。

コンクリートの硬化体中には図1に示すように多くの細孔が存在し、二酸化炭素がこの細孔を通過して入り込んでゆき、水酸化カルシウムと反応して中性化が引き起こされます。

つまり、コンクリートの中性化の防止にはコンクリート内部でセメントの水和によって生ずる水酸化カルシウムの量を多く、細孔径を小さく、細孔量を減らして、二酸化炭素がコンクリート硬化体中に入りにくくする事が重要となります。

#### 2. 中性化に及ぼす要因

##### 2.1 セメントの種類

表1に示すように、セメントの種類によって中性化は大きく異なります。

早強セメントは普通セメントに比べて、中性化しにくくなります。これは、早強セメントは硬化が早いので、二酸化炭素がコンクリート硬化体中に入りにくくなり、また、水酸化カルシウムの生成量が多くなるからです。逆に、中庸熱セメントは普通セメントに比べて硬化が遅く、水酸化カルシウムの生成量が少ないために、中性化が起こりやすくなります。また、高炉セメントやフライアッシュセメントなどの混合セメントは、混合材の分だけ普通セメント量が少なく、中性化は早くなります。

表1 セメントの種類による中性化の比較<sup>2)</sup>

セメントの種類	中性化比率		C <sub>3</sub> S量
	範囲	平均	
早強ポルトランドセメント	0.5~0.9	0.65	62~66
普通ポルトランドセメント	1.0		45~52
フライアッシュセメント	1.0~1.3	1.15	
シリカセメント	1.0~1.6	1.31	
高炉セメント	1.1~2.2	1.41	
普通ポルトランドセメント (2,800)*	1.1~1.2	1.13	45~52
(3,300)	1.0		
(3,800)	0.8~1.0	0.94	
中庸熱ポルトランドセメント	1.2~1.4	1.28	30~48
耐硫酸塩ポルトランドセメント	1.0~1.3	1.12	37~39

\* プレーン値 (cm<sup>3</sup>/g)

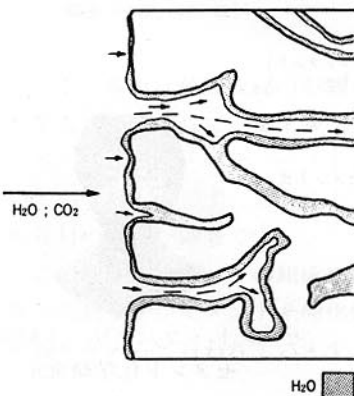


図1 セメント硬化体の細孔と二酸化炭素および水の拡散の模式図<sup>1)</sup>

## 2. 2 単位セメント量、水/セメント比

図2・図3に示すように、単位セメント量が多く、水/セメント比が小さい場合、中性化しにくくなります。単位セメント量が多いほど生成する水酸化カルシウム量が多くなるため、また、水/セメント比が小さいほど緻密になり、二酸化炭素がコンクリート硬化体中に入りにくくなるためです。

## 2. 3 骨材の種類

骨材の種類によって中性化は大きく異なります。図4に示すように、川砂・川砂利などは二酸化炭素の透過性が非常に低いが、火山砂・火山砂利・軽量骨材は空隙が多く、二酸化炭素が透過しやすいために中性化しやすくなります。

## 2. 4 混和剤の種類

AE剤やAE減水剤を用いたコンクリートは中性化が小さいと言われますが、これは、混和剤を用いて水/セメント比を低くしているためであり、図3に示すように、水/セメント比を一定とした場合には、大きな違いはありません。

## 3. 中性化の防止方法

次のような中性化の防止方法が考えられます。

### (1) 材料

- ① 中性化に有利なセメントを使用する。
- ② 混和剤を使用し、水/セメント比を下げる。
- ③ なるべく透過性の小さな骨材を使用する。

### (2) 設計及び施工

- ① 内部鉄筋のかぶり厚さを大きくする。
- ② 水/セメント比が小さく、単位セメント量が大きな配合とする。
- ③ コンクリート表面に透過性の小さな仕上げ材を施す。
- ④ 締固めを十分に行い、養生時間を長くする。

### [参考文献]

- 1) セメント協会、セメントコンクリート化学とその応用、p.40~52(1987)
- 2) 船戸已知雄、田代利明、コンクリートの耐久性と化学の基礎、セメント新聞社(1991)
- 3) 岩谷孝一、西澤紀昭、コンクリート構造物の耐久性シリーズ、中性化、技報堂出版(1986)

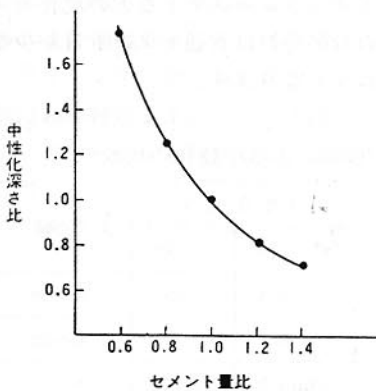


図2 セメント量比と中性化深さ比<sup>2)</sup>

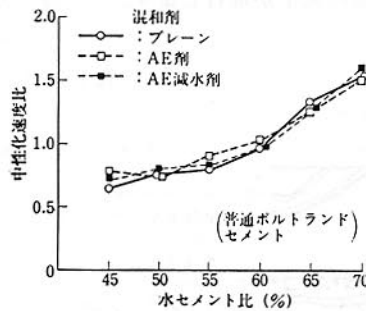


図3 混和剤の種類および水セメント比の影響<sup>3)</sup>

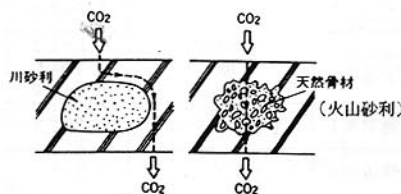


図4 骨材の違いによる二酸化炭素の通り方の模式図<sup>1)</sup>

## コンクリートの耐久性

### 第3節 コンクリートの乾燥収縮

#### 1. 乾燥収縮について

乾燥収縮とは、硬化したコンクリートやモルタルなどが乾燥によって変形して収縮する現象です。

セメント系硬化体の乾燥収縮には様々な要因が関与するとされていますが、特に水セメント比が与える影響が大きいと考えられています。

図1は、水セメント比(W/C) 0.35と0.5とした場合の硬化セメントペーストの乾燥収縮量を比較したものです。これによると、W/C=0.35とした試料の方がW/C=0.5のものに比べて、収縮量が小さくなっているのが解ります。この様に水セメント比が小さくなるほどセメント系硬化体の乾燥収縮量は小さくなります。

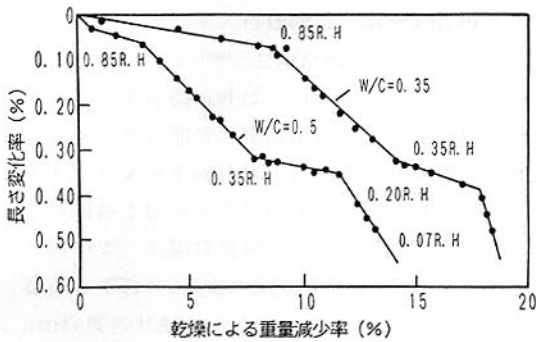


図1 セメントペーストの乾燥による重量減少と長さ変化の関係 (岩崎, 1975 改)<sup>1)</sup>

一方、骨材は乾燥収縮の影響を緩和する役割を果たすと言われています。図2は、コンクリート・モルタル・硬化ペーストの乾燥収縮について示したものです。これによると、細骨材や粗骨材の影響が顕著です。

この他にもセメントの組成や粉末度および石膏添加量などがセメント系硬化体の乾燥収縮に影響を与えていると言われています。

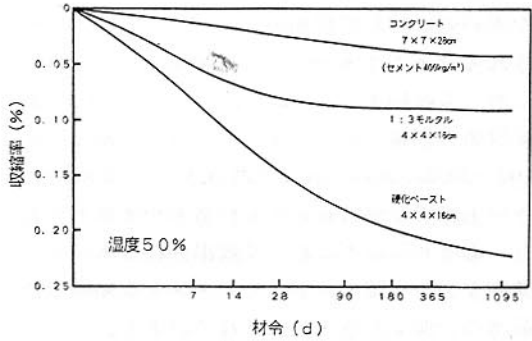


図2 硬化ペースト・モルタル・コンクリートの乾燥収縮 (M.Venuat, 1960 改)<sup>2)</sup>

#### 2. 乾燥収縮のメカニズム

このように様々な要因が複雑に影響を及ぼすため、乾燥収縮のメカニズムの解明はかなり困難です。現段階ではセメント系硬化体中の毛細管水に働く表面張力に、乾燥収縮の原因を求める毛細管張力理論が有力です。

毛細管張力は図3に示すように、細孔直径が小さなものほど単位面積当たりの表面張力は大きくなります。毛細管水が乾燥する際には、より大きな細孔をもつものから順に乾燥していくと考えられるので、乾燥するに従い張力が作用する細孔が、大きなものから小さなものへと変化していきます。それに伴って、単位面積当たりの張力と細孔量との積の大きさとして表される毛細管張力は、乾燥が進むにつれて変化すると考えられています。

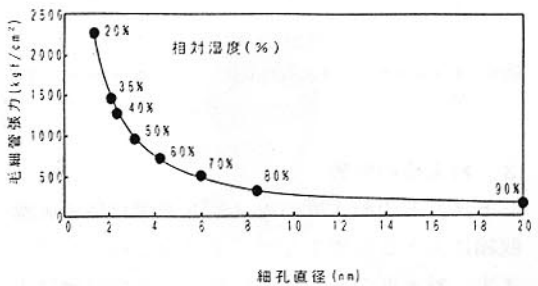


図3 各相対湿度における毛細管張力と細孔直径との関係 (後藤ほか, 1989 改)<sup>3)</sup>

図4は、水分の放出量と収縮率について示したものです。湿度100～30%までは水分の放出量が多いのに対して収縮率は0.2%と小さいが、湿度30%以下では水分の放出量が極めて少ないのに対して収縮率はほぼ2.6%に達しています。毛細管張力理論に基づけば、この様な相違は湿度100～30%において放出される水分が、比較的大きい毛細管空隙に存在する付着水や吸着水であり、湿度30%以下において放出される水分が、微細なゲル空隙の付着水やセメント水和物の結晶水の一部であると説明されています。

以上のように、セメント系硬化体の乾燥収縮には、硬化体中の細孔量や細孔径分布性状の与える影響が大きいと考えられています。

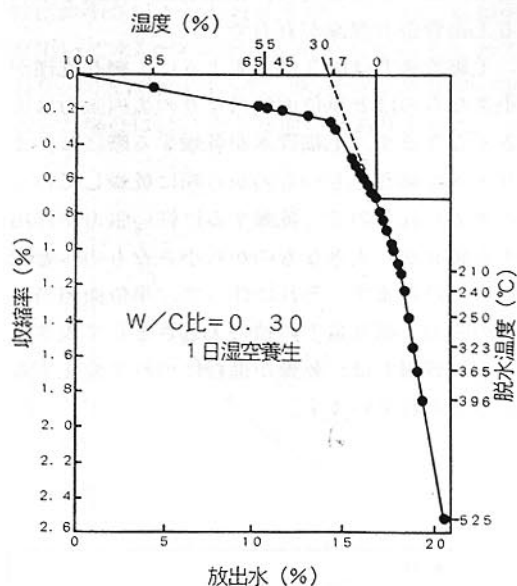


図4 セメントペーストの乾燥収縮 (G.J.Verbeck et al., 1968 改)<sup>4)</sup>

### 3. 粉末度の影響

セメントの粉末度がセメント系硬化体の乾燥収縮に大きな影響を与える事は良く知られています。粉末度が高くなるに従って乾燥収縮は大きくなります。その理由としては、粉末度が高

くなると微粉量が多くなり、微粉量が多いと生成される水和物の量が多く、より小さな細孔径が多く存在するためと考えられます。

### [参考文献]

- 1) 岩崎訓明 硬化したコンクリートの物理的な特性；乾燥収縮，コンクリートの特性，コンクリート・セミナー①，p.123～131，共立出版（1975）
- 2) 荒井康夫 ポルトランドセメントの凝結と硬化；乾燥収縮，セメントの材料化学，p. 195～196，大日本図書（1984）
- 3) 後藤誠史ほか セメント硬化体の乾燥収縮，セメント・コンクリート No.508，p. 18～25（1989）
- 4) Verbeck, G., and Helmuth, R., Principal Paper Structures and Physical Properties of Cement Paste, Proc. 5th Int'l Symp., Chem. Cement, Tokyo 1968, Vol. III p.1～32, (1969)

## コンクリートの耐久性

### 第4節 コンクリートの凍結融解

(凍結融解のメカニズムと細孔構造の影響)

#### 1. 凍結融解とは

寒冷地において、コンクリート中の水分が凍結及び融解を繰り返し、劣化してゆく凍害と呼ばれる現象が認められる場合があります。コンクリートの凍害は、コンクリート内部の空隙に含まれる水が凍結し、体積膨張することによって生じます。このため、凍害によるコンクリートの劣化は、水に接する状態で凍結融解作用を多く受ける箇所に起き易いという特徴をもっています。

参考までに、凍結融解作用によるコンクリートの劣化事例を写真1に示します。

#### 2. 空気の連行による凍結緩和機構

コンクリートの凍結により内部に発生する膨張圧は、コンクリート中の自由水の凍結による約9%の体積増加と、氷塊の成長にともなうコンクリート中の水の移動によって発生すると考えられています<sup>1)2)3)</sup>。このため、コンクリートの凍害に対する抵抗性は、コンクリート中のセメントペースト部分の空隙構造に大きく影響されます。セメント硬化体中の空隙は、気泡、毛細管空隙およびゲル空隙によって構成されます。この中で、毛細管空隙およびゲル空隙中に水が存在しており、通常的气象条件下では、直径0.01  $\mu\text{m}$ 程度の比較的大きな毛細管空隙中に存在する水が凍結に関与していると考えられます。

以上のような凍害の発生機構は、T.C.Powersの「水圧説」<sup>4)</sup>と呼ばれる理論に基づくものであり、図1に示す空気連行による凍結緩和機構を説明することができます。

#### 3. 気泡組織の影響

一般には、コンクリート中に微細で独立した気泡が存在する場合に、自由水の凍結にともなう膨張圧の緩和が起き易いことから(図1)、AE剤を使用しコンクリート中に空気を連行することによって、凍結融解抵抗性を向上させる方法がとられます<sup>2)</sup>。また、気泡と気泡の間隔が小さ

いほど未凍結水の移動距離が短く、圧力が緩和される(図2)ことから、適切なAE剤を選定したり、水セメント比を小さくすることによって(図3)、凍結融解抵抗性の向上がはかられます<sup>3)</sup>。

このように、コンクリート中に適量の空気を連行することにより、凍結融解抵抗性を向上させることができますが、過度の空気連行はコンクリートの物性を損なう原因となってしまいます。一般には、図4に示すように空気量4~6%とすることが、耐久性の両面から望ましいと考えられます<sup>2)5)</sup>。



写真1 凍結融解による劣化事例  
(コンクリート研究室 片山参事 提供)  
(現:セメント化学研究室)

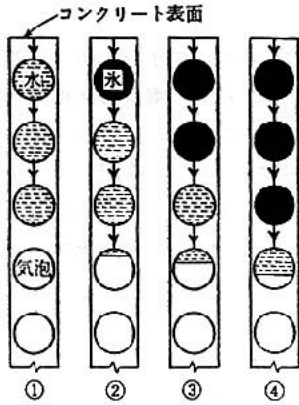


図1 空気運行による凍結緩和機構<sup>2)</sup>

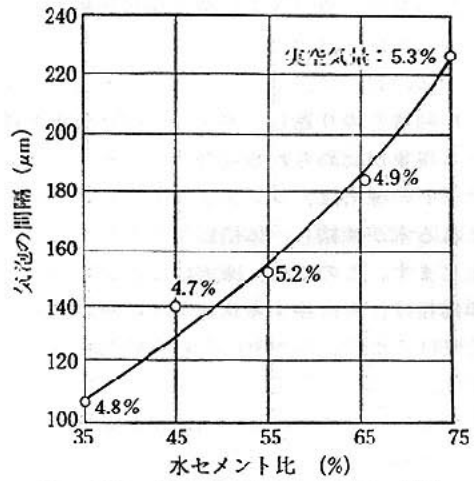


図3 気泡の間隔に及ぼす水セメント比の影響<sup>2)</sup>

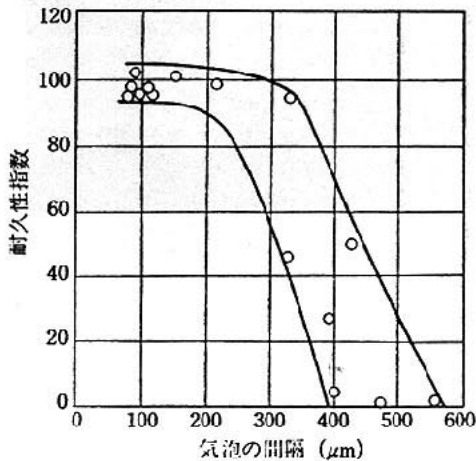


図2 気泡の間隔と耐凍害性との関係<sup>2)</sup>

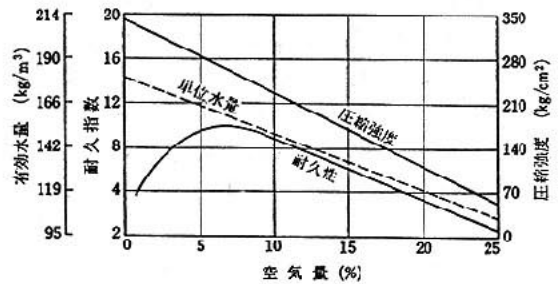


図4 空気量と圧縮強度、耐凍害性との関係<sup>2)</sup>

[参考文献]

- 1) Powers, T.C., A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistans of Concrete, Proc. of ACI, Vol.41 (1945)
- 2) 岡田清, コンクリートの耐久性, 朝倉書店 (1986)
- 3) 長谷川寿夫, 藤原忠司, コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害, 技報堂(1988)
- 4) 小林正凡, コンクリート・ジャーナル, Vol.7, No.9, p.13-20(1969)
- 5) 米国開拓局(近藤泰夫訳), コンクリートマニュアル, 国民科学社 (1978)