

[総説]

物理的特性を中心とした骨材の評価と問題点

REESTIMATION TO PHYSICAL SPECIFICATIONS FOR CONCRETE AGGREGATES

岩崎 孝*

By Takashi IWASAKI

1. はじめに

骨材の需要が数億トンを超えるに至った直接的原因はいうまでもなく高度経済成長の波に乗った建設ブームである。その間、天然砂利・砂資源の枯渇化、採掘制限の強化などの付随的要因もあって、骨材の種類も多岐多様化するに至った。細骨材としての海砂の大量導入、石灰石碎石の進出、人工砂(砕砂)の生産増などの現状を考えると、骨材の品質管理方法、機能の把握や適用方法など、従来の砂利・砂時代より遙かに複雑化し、対応の変化が必要になってきている。

わが国の骨材の将来を考えると、岩石資源をできるだけ有効に利用することと併せて、廃棄物の骨材化などにも適用できる評価法の確立が強く望まれるところである。このような情勢に鑑み、資源・素材学会では「建設用原材料部門委員会」を設置し、骨材の物理・化学的性状と、その利用拡大を調査研究することを目的として活動している。具体的には、三つのワーキンググループ、すなわち「骨材のアルカリ反応性」、「石灰石骨材」、および「廃棄物の骨材化」について研究を行い、本論文集の創刊号として「廃棄物の骨材化」をとりあげた。

本号では、「骨材のアルカリ反応性」と「石灰石骨材」について、これまでにワーキンググループを中心に得られた成果を特集するが、本稿では、コンクリート用骨材の物理的特性だけに限って、評価のあり方とその問題点につき概説する。

2. コンクリート用骨材の物理的特性と評価

2.1 概要

コンクリートは、セメントと骨材の複合材料であるから粗細粒骨材(粗骨材及び細骨材、後者は砂とも言う)が適当に混合し、その間隙をセメントペーストが埋めて、緻密な混合体(コンクリート)を作り上げることが必要である。

骨材はコンクリート体積の約70%を占め、コンクリートの性質に多大の影響を与える。コンクリート用骨材として要求される性質としては、

- (1)セメントと反応するものではなく、強度・耐久性に優れていること、
- (2)コンクリート中に骨材が緻密に入り、固まらない状態では適度な流動性を有すること、
- (3)コンクリートに悪影響を及ぼすような不純物を含まないこと、

などである。このような性能を満足するか否かを調べるための試験法及び規格は、表1に示すとおりで、以下に述べる物理的性質が不適切であれば、コンクリートに欠陥を生じやすくなり、強度が不足したり、耐久性が低下する。

表1 骨材試験方法一覧

試験項目	試験名称	規格番号
粒度ふるい分け	・骨材ふるい分け試験法(ふるいはJIS Z 8801を使用)	JIS A 1102
比重・吸水量・表面水量	・細骨材の比重及び吸水試験法	JIS A 1109
	・粗骨材の比重及び吸水試験法	JIS A 1110
	・骨材の含水率試験方法及び含水率に基づく表面水率の試験方法	JIS A 1125
単位容積重量・実積率 有害物質	・骨材の単位容積重量及び実積率試験方法	JIS A 1104
	・骨材の洗い試験法	JIS A 1103
	・細骨材の有機不純物試験方法	JIS A 1105
	・細骨材の塩化物定量分析試験方法	JIS A 5002
強度・すりへり抵抗	・骨材中に含まれる粘土塊量の試験方法	JIS A 1137
	・骨材中の比重1.95の液体に浮く粒子の試験方法	JIS A 5308 附属書2
	・モルタルの圧縮強度試験による砂の試験方法	JIS A 5308 附属書3
	・粗骨材中の軟石量試験方法	JIS A 1126
	・ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験方法	JIS A 1121
骨材のアルカリシリカ反応性	・骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(化学法)	JIS A 5308 附属書7
	・骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)	JIS A 5308 附属書8

* 早稲田大学理工学部 資源工学科 教授(〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

(財)資源・素材学会 建設用原材料部門委員会委員長

有害物質は、セメントの水和反応やセメントペーストと骨材の付着を阻害したり、海砂など塩化物を含む砂を鉄筋コンクリートに使用すると、鉄筋を腐食させる可能性がある。また、近年、セメントの製造工程の変化に伴う一時的なアルカリの増加も加わってアルカリ骨材反応によるひびわれが発生し、これを未然に防止するためにセメントの品質管理と骨材のアルカリ反応性の評価が重要になっている。

2. 2 粒形、粒度分布など

緻密なコンクリートを作る物理的指標としては、粒形判定実績率（単に実績率ともいう）、単位容積重量があり、ときに比表面積が用いられることもある。従って、最大密度を示すような骨材の粒度分布が望ましいわけであるが、コンクリートにした場合は必ずしも最高強度が得られるとは限らない。コンクリートを打設するときの作業性（ワーカビリティ）の良さ、すなわちコンクリートが均質に打設できるか否かが主要要素になるわけで、ワーカビリティは水とセメント量の比、及び粗細骨材の量と形状に左右される。

骨材が最大密度になる粒度曲線についてはフラウ等の提案によるもの（Fuller's maximum density curve）があり、これは次のようである。

$$P = 100 (d/D)^{1/2}$$

但し、P：ふるい通過率、d：ふるい目（mm）

D：骨材の最大粒径（mm）

粒形としては粗細粒ともに丸味のあるもの、または正六面体（さいころ状）に近いものがよく、薄いもの、細長いものがあると空隙が大きくなり、それだけセメント量が増え、良好なワーカビリティを得るために単位水量（コンクリート1m³を練るのに用いられる水量）を増さなくてはならず、硬化後の乾燥収縮を大きくする。

粗骨材の最大寸法が大きいと、セメント量も減り水量も少なくて済むので、コンクリートの耐久性を増すことになるが、練りまぜが困難になるなどの欠陥を招くので、構造物によって次のように最大寸法が定められている。

- ・無筋コンクリート：100mm以下、部材最小寸法の1/4以下
- ・鉄筋コンクリート：50mm以下、部材最小寸法の1/5以下、もしくは鉄筋純間隔の3/4以下
- ・舗装コンクリート：50mm以下、版最小厚さの1/4以下
- ・ダムコンクリート：150mm以下

図1は粗骨材の最大寸法とコンクリートの単位重量との関係を示すもので、粗骨材の最大寸法の増大とともに、コンクリート中の骨材の容積が増加し、セメントペースト分は減少する。また、建築学会及び土木学会の標準粒度分布曲線を図2に示す。粗骨材については、最大寸法25mmの例である。

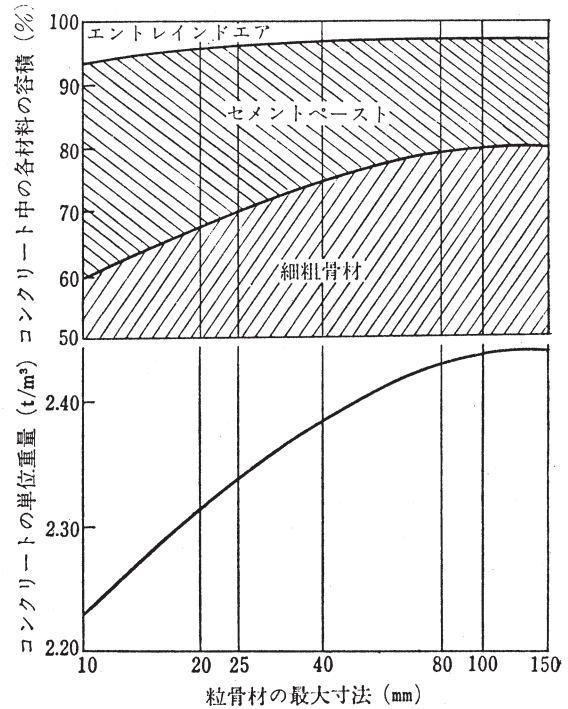


図1 粗骨材の最大寸法とコンクリートの単位重量の関係¹⁾

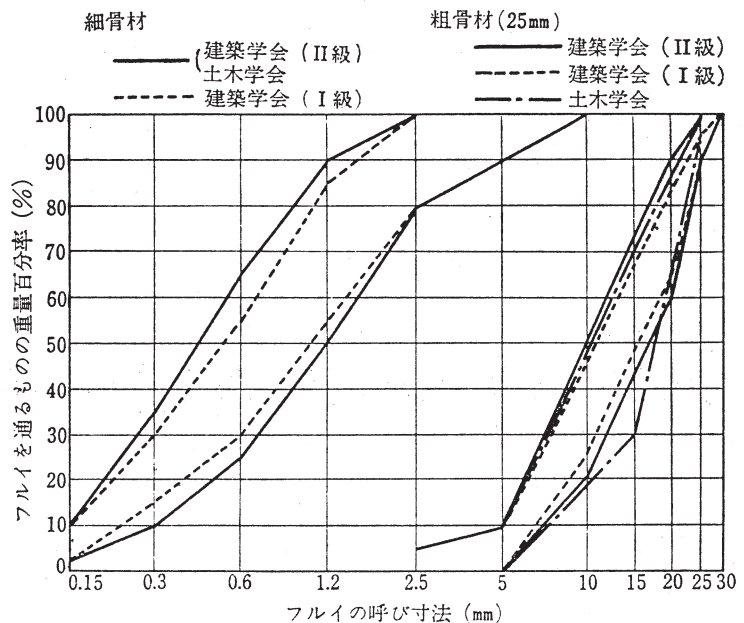


図2 骨材の標準粒度分布

骨材の形状を判定する実際の方法としては、粒形判定実績率がある。これは、単位容積重量 W (kg/l)、比重 ρ (表面乾燥内部飽水状態の比重、表乾比重という) [水中重量を B 、骨材を水中から引上げ、表面付着水を拭った状態の重量を C とすると、 $\rho = B / (B - C)$]、吸水率 q (%) [表乾状態試料、すなわち表面付着水分を拭った状態のものを乾燥したとき、骨材から離脱した水量の骨材重量に対する比率]とすると、

$$\text{実績率}(\%) = (100 + q) W / \rho$$

一般に常用されている実績率は粗細粒とも55~70%程度である。かつて天然砂利・砂の実績率は、碎石、砕砂よりも5%程度高いといわれてきたが、破碎技術の進歩向上により、むしろ低い傾向がある。

2. 2 比重, 吸水率など

日本建築学会標準仕様書(JASS), 土木学会標準示方書, 及びJISのコンクリート用碎石(A 5005)では、表乾比重でいずれも2.5以上である。また、吸水率は粗骨材で3.0以下、細骨材で3.5以下である。

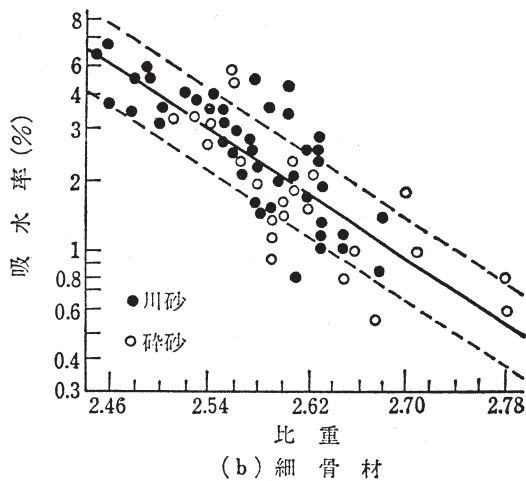
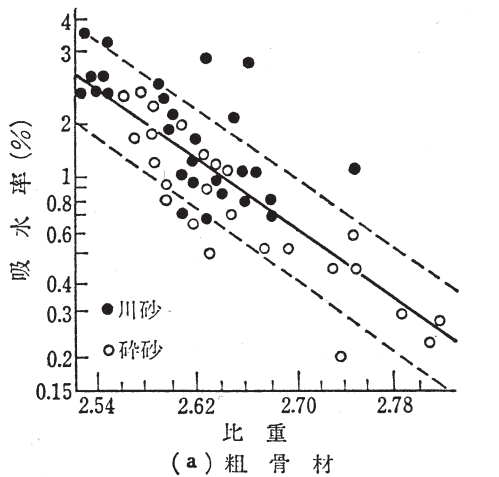


図3 骨材の比重と吸水率の関係²⁾

JASSでは骨材を比重によって3種類に分類し、最も使用範囲の広い比重2.4~2.6程度のを普通骨材と呼び、その前後の比重をもつものを軽量骨材、及び重量骨材とした。重量骨材は主として放射線遮蔽壁などに用いられる鉄鉱石、重晶石などの比重4~5のものをいうが、2.8~3.0程度のかんらん岩、蛇紋岩などもこの分類からすれば重量骨材に含まれる。また、遮蔽壁用骨材には、比重2.4程度の灰泡石などの硼素含有骨材も使用されるところから、ほかに遮蔽コンクリート用骨材の分類をもうけるのが妥当であろう。

吸水率は、建築学会標準仕様書によれば粗骨材は3.0%以下、細骨材は3.5%以下であり、吸水率と表乾比重の間には、極めて明確な相関性(図3)がある。また、コンクリートの圧縮強度は、比重の大きなものを使ったものほど、吸水率の小さい骨材を使ったものほど大きくなる傾向(図4)がある。

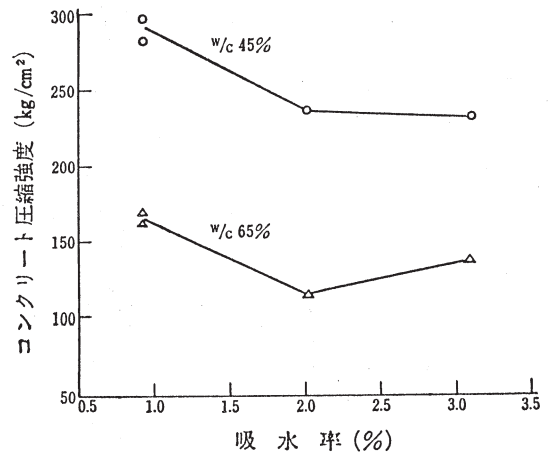
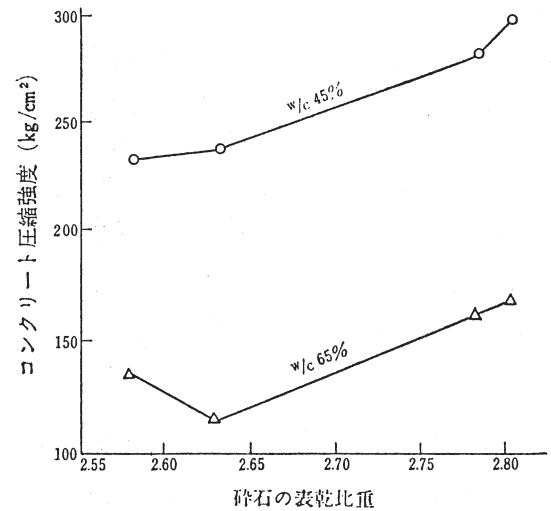


図4 骨材の比重, 吸水率とコンクリートの圧縮強度の関係³⁾

骨材の吸水率はまた、すり減り量（後述する）や安定性試験による損失率、及び凍結融解に関する抵抗性¹⁾に関係する。安定性試験とは、硫酸ナトリウム飽和溶液の分解作用に対する抵抗性（試験前に所定のふるい網上で試験後のふるい網下量の百分比、すなわち損失率）を示すものである。凍結融解に対する抵抗性は寒冷地で使用する骨材の評価につながるものであるが、試験法等の規格は現在ない。

次に、吸水率に係わる問題点について述べてみよう。吸水率を骨材の品質の評価の一つの指標とした場合、次の2点で問題がある。その一つは現行の吸水率測定法に対するものであり、他の一つは、それが現実には他の品質的要素との相関関係を示すだけに留まっているということである。

測定方法に関する問題としては、測定方法が粗骨材と細骨材とでは異なり、かつそれらの方法と結果との間に理論的な根拠があまりないことであろう。まず粗骨材に対する場合には、水中に1昼夜浸漬後表乾状態とし、乾燥による脱水分の原試料に対する比率とするのに対し、細骨材では、湿潤状態の試料をコーンに詰め、コーンを上げた時にそのコーンがスランプした時点（又は湿潤開始後、コーンが完成した時点）の試料を、粗骨材同様に乾燥・脱水処理によって求めていることである。表乾状態が、骨材表面から内部に発達する微細間隙に水を含んだ状態、すなわち内部吸水状態であるとしても、細骨材のコーンのスランプ（又はコーンを形成する）状態が粗骨材の表乾状態に等しいとすることには問題があると言えよう。

他の一つの問題は、コンクリート強度を支配する大きな要因としての水セメント比（W/C）、または単位水量から考えなければならない点である。すなわち水、セメント、骨材を混練する際、骨材による水分吸収量が的確に把握されていなければ、所定の強さのコンクリートを作るのに必要な単位水量なり、水セメント比が理論的にきまらないはずである。1 m³のコンクリートを作るのに要する粗骨材量は、通常単位水量の10倍（重量）以上であるから、吸水率に僅かな誤差が生じて、水セメント比の変化は極めて大きい。

実際のコンクリート混練時では、骨材をあらかじめ飽和吸水状態にして使用するが、飽和状態であるか否かを判定する方法は事実上なく、また骨材が吸水した水がセメントペーストに加算されたり、ペーストの水分（必ずしも通常の水とは

限らない）と置換しない、という保証はないから、初期の水セメント比は影響を受けることになる。いずれにせよ、吸水率がペースト水分を吸水する量の指標なのか否かを明確にする必要がある。

2. 3 すりへり減量、堅硬性など

すりへり減量試験は、粗骨材なかんずく砕石について行われるもので、骨材と鋼球を入れたドラムを回転させることによって、鋼球による打撃力、摩滅力を骨材に与える機構のロサンゼルス試験機が主に用いられている。

骨材のすりへり減量と硫酸ナトリウム飽和溶液の分解作用に対する抵抗性（安定性試験）との間には、図5のような関係があり、安定性試験損失量の大きいものほどすりへり減量が多い。JISではその損失量（1.7mmふるい通過量の百分比、すりへり減量）を40%以下としている。

このすりへり減量は岩石本来の堅硬性（圧縮、引張り強度など）とはあまり関係ないように考えられているが、原石試料の圧縮強度とすりへり減量との相関性は極めて大きい。骨材そのものを圧縮強度試験の試料とすることはできないから、もしも圧縮強度を骨材の堅硬性の指標とするならば、圧裂引張り試験のような簡便法を採用せざるを得ない。しかしバルクの骨材から試験数をいくらに選定するか、などの問題を検討するよりも、バルクの試験が可能なすりへり減量法のような方法がはるかに実用性が高い。

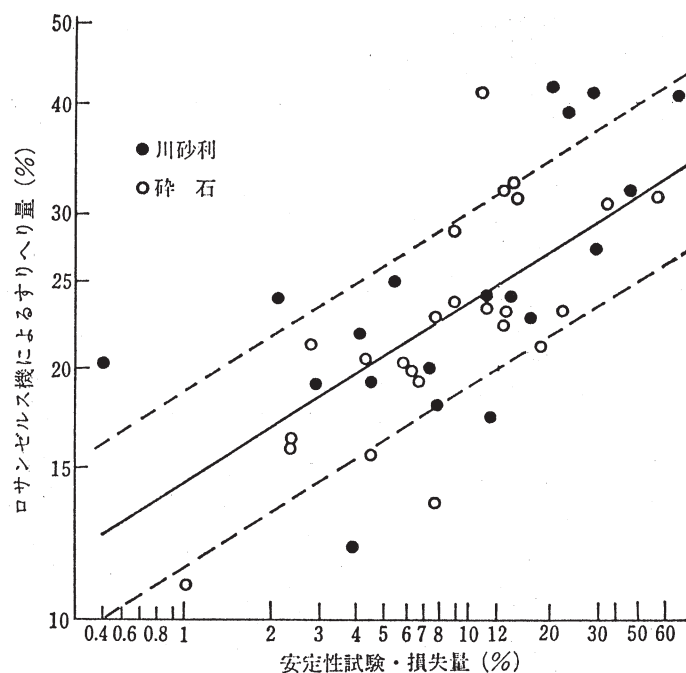
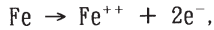


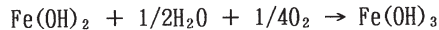
図5 骨材のすりへり減量と安定性試験損失量の関係¹⁾

3. 骨材に混入する塩分と除塩の問題

塩分等による電解質水溶液中における鉄筋の腐食は、鉄と電解質との間で局部電池を形成することに始まる。すなわち、第一段階では、



により水酸化第一鉄の生成である。これがコンクリート外部から空気と水の補給があると第二の反応が起こり、赤錆（水酸化第二鉄）を生じる。



従って、塩分による鉄筋の腐食を理論的に防止するには、水、空気の侵入をできるだけ遮断できる工法、施工法をとればよいことになる。

わが国で、骨材に塩分または海水が含まれるケースとしては主として海砂使用の場合で、砕石および天然砂利などの粗骨材ではほとんど考えられず、また海砂利についても、骨材重量に対する付着塩分量は相対的に少ないと考えてよい。そのため、行政上の規制は細骨材に対してのみ行われ、土木用は絶乾重量に対しNaCl換算で0.1%以下（標準示方書ではプレテンション部材で主構造に用いるもの、またはポストテンション部材のPCグラウトは0.03%以下）、建築用は0.04%以下と規定している。

こうした塩分限界量の決定は、当然種々の実験結果が勘案されてのこと（図6）であり、砂中の塩分量0.04%までは腐食速度は小さいがそれを超えると急激に増加することが示されている。いま、海砂の比重を2.5、採取して水切りした状態の含水率を30%（比重）、海水中の塩分量を3%として、海砂に付着してくる塩分量を単純に計算すると約0.03%になり、この値は明らかに規則値を下廻るものである。しかし水洗いを充分しないで海砂を貯蔵していけば、貯蔵部分下部の砂には当然のことながら塩分が次第に濃縮・蓄積されていくことになり、単純な計算通りにはいかないことはいうまでもない。つまり、海砂には常に平均0.1~0.3%程度の塩分を含んでいると考えておくべきであろう。

また水洗用の水、及びセメント混練用の水も、水道水以外の井戸水や河川水などを使う場合には、その塩分量のチェックを怠ってはならない。

現在、除塩法には水洗いのほかに無塩砂と混ぜて使用する混合法がある。この場合、海砂粒子表面に付着した塩水の一部は、無塩砂粒子に移行して、物理的な希釈が行われるが、海砂粒子内部に潜在する塩水まで、除去・希釈することは困難なはずである。従って海砂に随伴する塩分が本質的に有害とするならば、混合除塩法は当を得た方法とは思えない。

4. あとがき

阪神高速道路や山陽新幹線の高架橋の構造物に顕在化したコンクリート早期劣化、いわゆるアルカリ骨材反応や塩害は、骨材をコンクリートの単なる増量材とし品質にはあまり注意を払わない考え方に対して、セメント中の成分との化学的反応性も考慮すべきことの重要性を示唆したものである。

さらに最近では、石灰石骨材の耐久性や耐酸性雨性、塗装用蛇紋岩骨材のアスベスト粉塵の問題など、骨材関係者が骨材の物理・化学的、あるいは岩石・鉱物学的基礎知識など、基本的技術の対応にやぶさかであったためと思われる問題も多々発生している。

従って、コンクリート用骨材の評価に関しては、骨材とセメントとの集合体であるがゆえの粒形や粒度分布といった物理的性質はもとより、個々の化学的特性、あるいは鉱物組成などに基づく評価が必要不可欠なものになっていることが改めて認識されよう。

骨材を製造する者として、利用条件に最も適したものを作り出す技術力の向上に努めることは勿論であるが、利用する側も、品質を正しく評価したうえで用法を改善する姿勢が必要であることを記して結びとしたい。

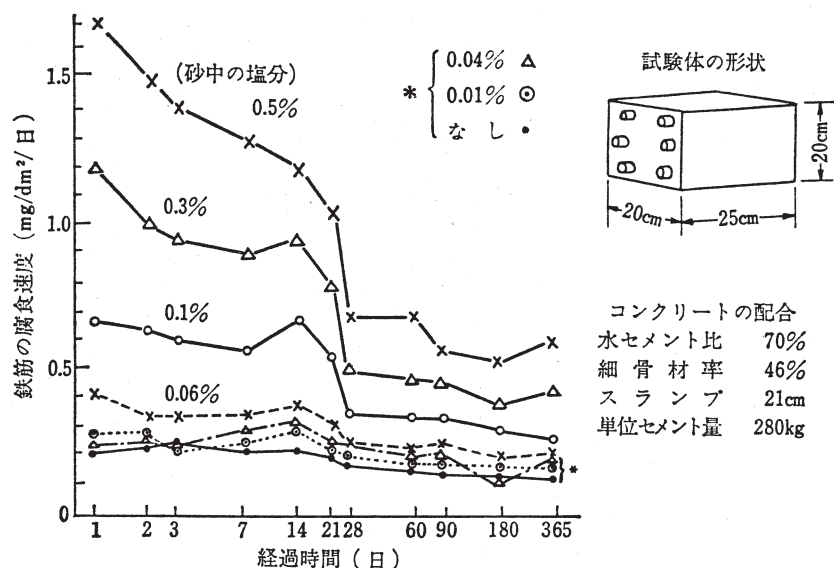


図6 塩分のコンクリート中の鉄筋の腐食速度に与える影響⁵⁾

〔参考文献〕

- 1) 西沢紀昭：骨材の品質がコンクリートの性質に及ぼす影響，セメント工業，No. 89, 1967
- 2) 西沢紀昭：コンクリート骨材の比重，吸水量，安定性，すりへりの各試験結果相互の関係，電力中央研究所々報，Vol. 9, No. 1 and 2, 1959
- 3) 大島久次：コンクリート用骨材，日本建築学会骨材小委員会資料
- 4) 洪悦郎：コンクリートの凍害と骨材，セメントコンクリート，No. 331, 1974
- 5) 岸谷孝一：海水中の塩分が鉄筋に及ぼす影響と防錆対策，コンクリートジャーナル，Vol. 12, No. 10, 1974

〔その他〕

- 土木学会：「コンクリート標準示方書」
日本建築学会：「建築工事標準仕様書」