

北海道大学工学部

学生員

桑 島 隆 一

//

正 員

藤 田 嘉 夫

//

正 員

高 田 宣 之

1. まえがき

コンクリート構造物が、海洋にその適用範囲を広げるに伴って、海水と凍結融解作用を受けるコンクリートの耐久性が、重要な課題となっている。凍結融解作用を受ける海洋コンクリート構造物の損傷は、材料、施工、環境などの条件によって異なった形で表われる。しかし基本的には、含水状態に強く影響を受け、水分がない状態では、凍害が起こらないのは勿論である。従来の代表的な耐久性の試験法としては、ASTM の方法と RILEM が提案している方法があるが、前者は一般的に含水条件を一定とした凍結融解回数による耐久性の評価であり、後者は比較的少ない一定の凍結融解回数下の異なる水分量での耐久性の評価の方法である。そこで本研究では、RILEM の方法に準じて、海水を用いてのコンクリート中の水分量に着目して強度および変形能力としての圧縮終局ひずみ、静的ヤング係数を測定することにより、水分量と凍結融解作用によるコンクリートの力学的劣化性状を検討し、耐凍害性および海洋構造物の設計のための基礎的資料を求めたものである。

2. 材料および実験方法

(1). 材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを用い、骨材は表- 1 に示す

ものを用いた。

(2). 実験方法

a) 配合

水セメント比 $\frac{W}{C} = 55\%$ 、単位水量 $145 \frac{Kg}{m^3}$ 、細骨材率 $\frac{S}{a} = 45\%$ とし、AE 剤を用いスランプは7 cm、空気量は5%を目標とした。

b) 供試体および養生

供試体は、 $15cm \times 15cm \times 55cm$ の桁で、28日間 $20^\circ C$ で水中養生を行った。供試体のうち真空装置による抜気状態後、海水中に所定の時間浸しておくものは、その時間だけ28日以前に水中養生を終わらせた。

c) 乾燥、抜気および吸水

養生後、供試体を $105^\circ C$ で2日間乾燥させて供試体中の水分を除き、真空装置により1日間抜気状態（20torr）にした後、海水を注入し、1時間は装置を運転のままにした。その後大気圧に戻し、海水から取り出す時間を変化させて、強制的に所定の飽水度の供試体を作成した。

d) シール

凍結融解サイクル中、供試体の水分状態を一定に保つため供試体をシールした。シールは、供試体に膜養生剤サランラテックスを2度塗り、その上からビニールで密閉した。

e) 凍結融解

凍結融解の温度およびサイクルは、供試体中央において $-20^\circ C \sim 10^\circ C$ 、1日1サイクルで、試験時のサイクル数は、0,10および60とした。

表-1 骨 材 の 性 質

種類	産 地	最大寸法 (mm)	比重	吸水率 (%)	単位容積重量 ($\frac{Kg}{m^3}$)
細骨材	錦岡産海岸砂	—	2.75	1.12	1873
粗骨材	静内川産砂利	25	2.78	1.18	1680

f) 曲げ試験および圧縮試験

試験時の供試体の状態は、凍結（-20℃）、融解およびサイクルをかけない常温で行った。曲げ試験は、3等分点載荷で行ない、その破壊片で圧縮試験を行った。またこの圧縮載荷中、供試体の温度を変化させないためにベークライト板を載荷板とし、上下の載荷板間の変位を測定することにより圧縮ひずみを求めた。

g) 飽水度試験

図-1のフローチャートにあるように、Ⅰ、ⅡおよびⅢの状態での飽水度試験を行った。Ⅰは、28日養生後そのまま海水中に浸した場合、Ⅱは、養生後乾燥し海水中に浸した状態、Ⅲは、養生後乾燥し真空装置で抜気後海水中に浸した状態である。ⅠおよびⅡは、自然環境の状態を、Ⅲは、最大飽水度（S=100%）あるいは、全間隙量を調べるためのものである。供試体の重量測定は、105℃で2日間乾燥後、シールする前および飽水度試験時で行ない、その値を飽水度の計算に用いた。

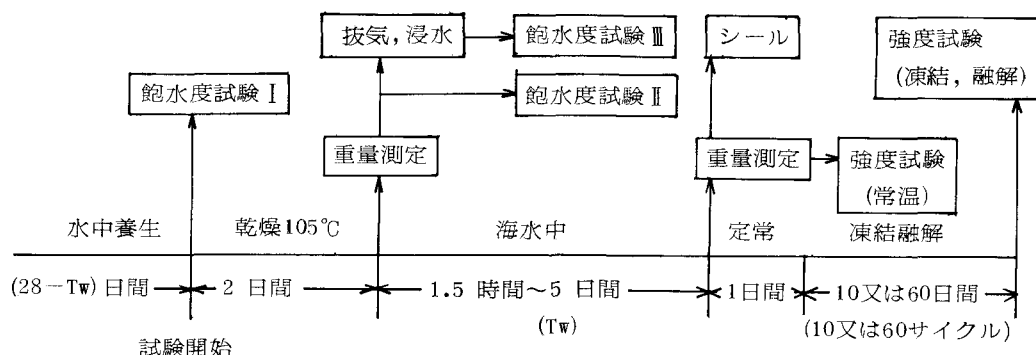


図-1 実験方法のフローチャート

3. 実験結果と考案

(1). 飽水度の定義と計算法

コンクリート中の水分状態を表わす尺度として（S: Degree of Saturation）を用いた。飽水度は、次のように定義される。

$$S = \frac{V_w}{V_p} \times 100 \quad (\%)$$

V_w: ある状態の供試体を105℃で乾燥した場合の全蒸発量
V_p: 全間隙量

具体的には、V_pを飽水度試験Ⅲより求め、この値を基に各々の供試体の飽水度を次式より算定した。

$$S = \frac{W - W_0}{\alpha W_0} \times 100 \quad (\%)$$

W: 試験時の供試体重量
W₀: 2日間105℃で乾燥後の供試体重量

ここで $V_p = \frac{\alpha}{100} W_0$ で、この実験では、 $\alpha = 6.69\%$ であった。

(2). 飽水度による力学的な耐久性の評価

コンクリートは、ある飽水度を限界として、それ以下では凍結融解による損傷を受けず、それ以上では損傷を受ける飽水度の限界点が存在する。これを限界飽水度（S_{cr}）という。これを用いてコンクリートの力学的な耐久性の指標（F）として次式を用いた。

$$F = S_{act} / S_{cr}$$

S_{act}: 実際のコンクリートの飽水度
S_{cr}: 限界飽水度

このFを用いて、力学的劣化性状を評価すると

F ≥ 1 凍結融解による損傷を受ける

F < 1 凍結融解による損傷を受けない

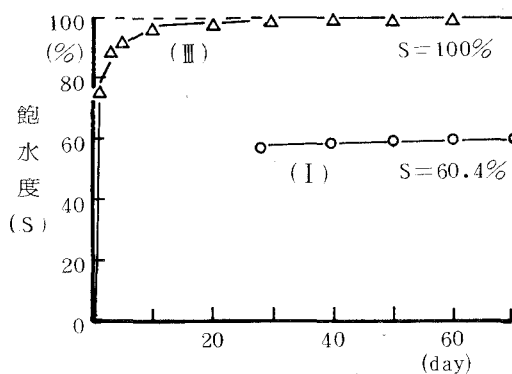


図-2 飽水度試験 (I, III)

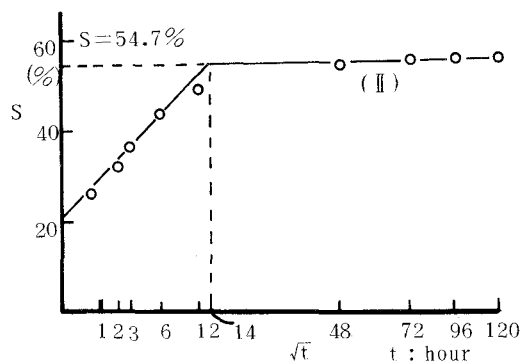


図-3 飽水度試験 (II)

(3). S_{act} および S_{cr} について

飽水度試験の図-2、図-3に S_{act} の一例を示す。図-2では、70日間海水中にあるような海水に対して厳しい環境条件が想定されるような場合で、 $S_{act}=60.4\%$ である。図-3では、 $S_{act}=54.7\%$ となり、絶乾後約14時間で定常に達し、その後の吸水の進行は遅い。この場合は、短時間の吸水が問題となるような乾湿の繰り返しが行なわれる環境条件に適合すると考えられる。

S_{cr} は、凍結融解を受けた後の凍結状態および融解状態で試験した場合の圧縮強度および曲げ強度の飽水度による性状変化からその限界点を求め決定した。その値は「(4)圧縮強度および曲げ強度」のところで述べている。

(4). 圧縮強度および曲げ強度

凍結融解10サイクル後と凍結融解をかけない無サイクルで、飽水度のみを変化させた場合の圧縮強度および曲げ強度を図-4、5に示している。試験時の供試体の状態は、凍結融解後、凍結および融解で行ない、無サイクルの場合は常温で行った。

融解状態の試験では、圧縮強度および曲げ強度ともに $S=50\%$ 程度から強度が低下している。それ以下の飽水度では、強度の変化はあまりない。凍結状態の試験では、 $S=50\sim60\%$ から強度が低下している。飽水度がそれ以下では、飽水度が高くなるほど強度が増している。これは、コンクリート中の水分が、凍結することによって、その内部の欠陥を補うように働いているためと考えられる。凍結融解をかけないで飽水度の変化のみによる場合は、凍結融解をかけた場合とはほぼ同じ飽水度から、わずかに強度の低下がみられる。

図-6、7に凍結融解60サイクル後の圧縮強度および曲げ強度を示した。試験時の供試体の状態は、10サイクル後と同様に、凍結および融解状態である。この場合試験値が、少ないため、

飽水度 $S=0$ での値に対する比(β)として、圧縮強度、曲げ強度、圧縮終局ひずみ、静的ヤング係数を示した。以下に各々の $S=0$ での値を示す。		
	図-4,5,8,10	図-6,7,9,11
圧縮強度	298 $\frac{N}{mm^2}$	322 $\frac{N}{mm^2}$
曲げ強度	40 $\frac{N}{mm^2}$	41 $\frac{N}{mm^2}$
圧縮終局ひずみ	4028×10^{-6}	3450×10^{-6}
静的ヤング係数	$1.85 \times 10^5 \frac{N}{mm^2}$	$2.14 \times 10^5 \frac{N}{mm^2}$
(記号) ○: 凍結状態 △: 融解状態 ●: 無サイクル常温状態		

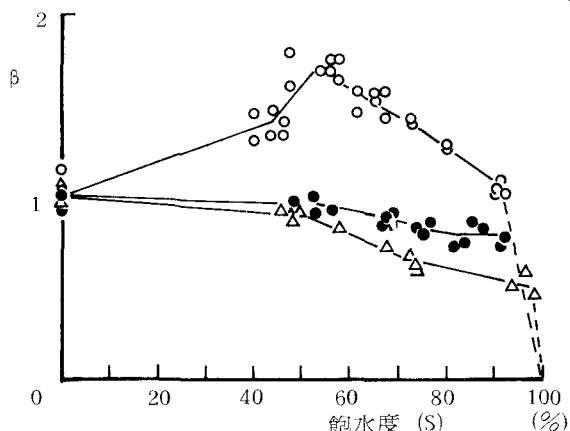


図-4 圧縮強度
(無サイクル, 10サイクル)



写真-1 S=100%の供試体

はっきりしたことはいえないが、10サイクル後と同じような強度性状を示し、数値的にもほとんど同じような値を示している。

以上より、この配合では、限界飽水度 $S_{cr}=55\pm5\%$ 程度と考えられる。そこで $S_{cr}=55\%$ として、先に述べた力学的耐久性の評価の式を用いて、飽水度試験より求めた S_{act} から F を計算すると、図-2、Iのような十分な海水の供給を受ける厳しい環境条件では、 $F=1.1$ となりコンクリートは、劣化を受ける。また図-3のように、海岸から離れ、海水の供給もあるが乾燥する期間もあるような環境条件では、 $F=0.98$ となりコンクリートの損傷は、計算上免れている。

写真-1は、飽水度 $S=100\%$ の供試体を凍結融解7サイクル後、人力で破壊した状況を示している。

(5)．圧縮終局ひずみ

凍結融解10サイクル後と無サイクルの圧縮終局ひずみを、図-8に示した。試験時の供試体の状態は、前述の強度試験で述べた場合と同様に凍結および融解状態、無サイクルでは常温状態で行った。無サイクルで常温状態の試験では、圧縮終局ひずみは、変化なくほぼ一定の値を示したが、凍結および融解状態の試験では、共に $S=55\pm5\%$ で最小の値を示し、それ以上の飽水度による圧縮終局ひずみの増加は、それ以下の圧縮終局ひずみの減少に比べて、はるかに大きくなっている。特に凍結状態においては、その増加は著しく、これは飽水度が100%に近づくにつれて、供試体中の水分の凍結が、コンクリ

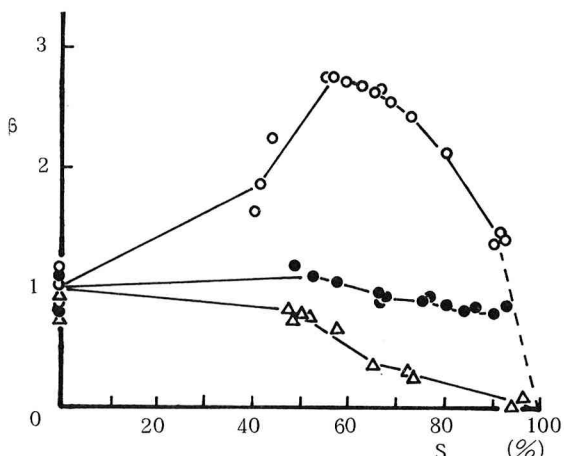


図-5 曲げ強度
(無サイクル, 10サイクル)

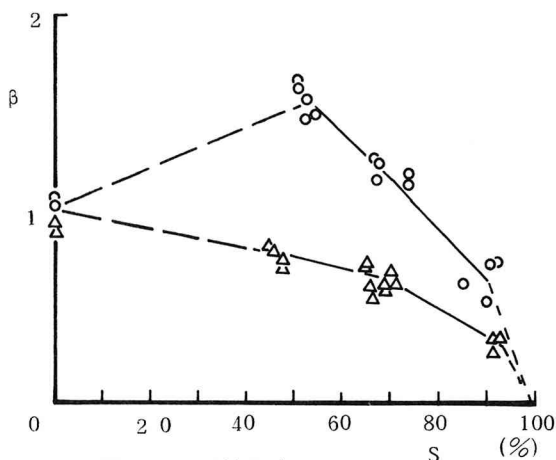


図-6 圧縮強度
(60サイクル)

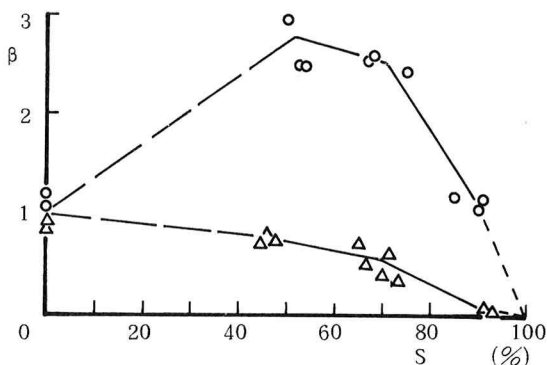


図-7 曲げ強度
(60サイクル)

ート中に占める割合が増加し、このため圧縮終局ひずみが、水のひずみに支配されるような状態になっているためと考えられる。また圧縮終局ひずみの最小値を示した $S=55\pm5\%$ の値は、先の圧縮強度および曲げ強度より求めた限界飽水度と一致している。

図-9では、凍結融解60サイクル後の圧縮終局ひずみを示した。試験状態は、同様に凍結および融解状態である。60サイクル後の場合は、10サイクル後と同様に $S=50\%$ 程度で圧縮終局ひずみの最小値を示し、それ以下の飽水度では数値的にもほとんど10サイクル後の場合と同じである。しかしそれ以上の飽水度では、60サイクル後の方が、圧縮終局ひずみの増加は、約2倍ぐらい大きい。これは、限界飽水度以上の飽水度の場合、圧縮終局ひずみは凍結融解回数に影響を受けていることを示している。

以上より、限界飽水度以上の場合、凍結融解作用を受けたコンクリートは、その内部組織がゆるみ大きなひずみを生じ、凍結融解による影響が大きいことが分った。また同時に、圧縮終局ひずみからも限界飽水度を決定できることも分った。

(6). 静的ヤング係数

凍結融解10サイクル後と無サイクルのヤング係数を図-10に示す。試験時の状態は、前と同様に凍結、融解状態および無サイクルで常温状態で行った。凍結および融解状態共に、そのヤング係数の性状は、圧縮強度および曲げ強度と同じであるが、その変化の割合はそれらと比べてより大きくなっている。特に限界飽水度 $S_{cr}=55\pm5\%$ で凍結状態では、著しいピークを示し、融解状態では急激に低下している。無サイクルで常温状態で試験した場合、飽水度による影響をわずかに受け、飽水度が増加するに従って減少する傾向にある。

図-11に凍結融解60サイクル後の凍結状態および融解状態のヤング係数を示す。その性状は10サイクル後と同様である。

以上よりヤング係数は、先に述べた圧縮強度、曲げ強度および圧縮終局ひずみと同様に限界飽水度 S_{cr} でそれらの性状が、大きく変化した。

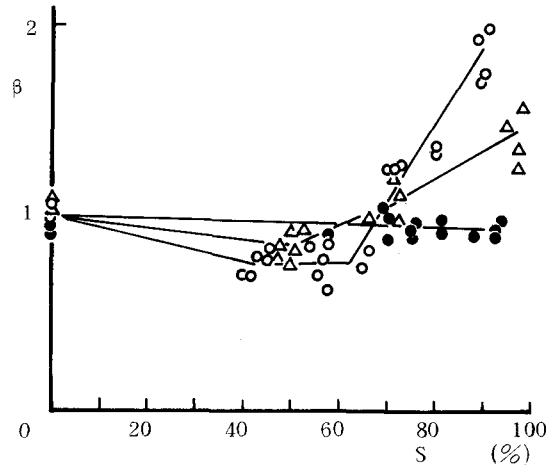


図-8 圧縮終局ひずみ
(無サイクル, 10サイクル)

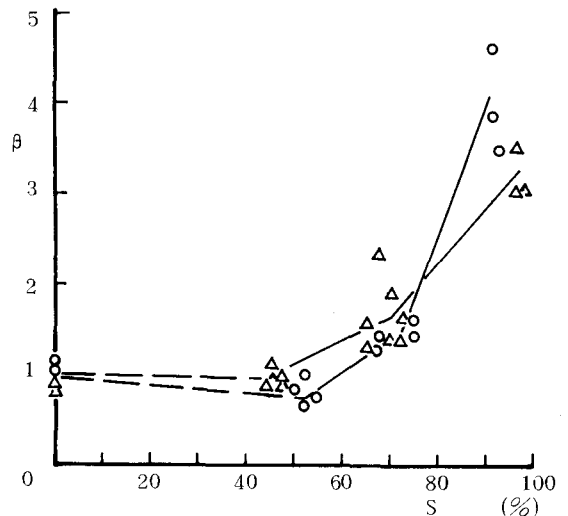


図-9 圧縮終局ひずみ (60サイクル)

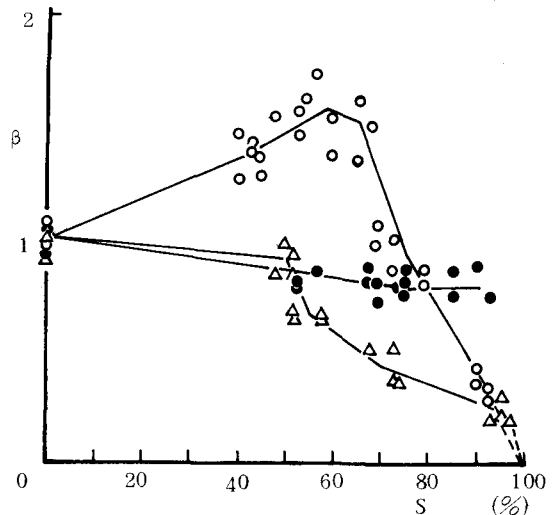


図-10 静的ヤング係数
(無サイクル, 10サイクル)

また、その変化の割合が他と比べて大きい
ためヤング係数から S_{cr} を決定した方が、有効といえる。ヤング係数は、限界飽水度時において凍結融解作用を受けていない場合に比べて、凍結状態で約1.7倍、融解状態で約1.0倍となり、凍結時と融解時でコンクリートの変形挙動が、違うことを示している。

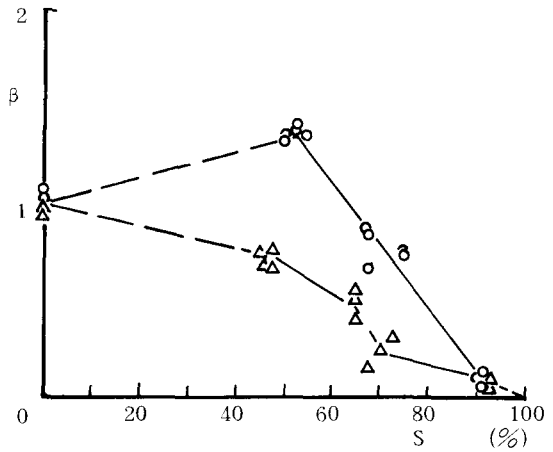


図-11 静的ヤング係数
(60サイクル)

4. まとめ

(1). 凍結融解作用を受けた後のコンクリートの損傷は、その含水状態に強く影響を受け、ある水分状態を限界として、それ以下では凍結融解による損傷を受けず、それ以上では損傷を受け

る水分状態の限界点が存在する。水分状態を表

わす尺度として飽水度を用いて、この限界点を限界飽水度という。この限界飽水度により凍結融解作用を受けた後のコンクリートの力学的な耐久性を評価できる。

(2). 凍結融解作用を受けた後の凍結状態で試験した場合、コンクリート中の欠陥を少なくする方向に働いて圧縮強度、曲げ強度および静的ヤング係数は増加し、圧縮終局ひずみは減少した。しかし限界飽水度以上では、圧縮強度、曲げ強度および静的ヤング係数は著しく減少し、圧縮終局ひずみは著しく増加した。また凍結融解回数による影響は、圧縮終局ひずみにおいて顕著にあらわれた。

(3). 凍結融解作用を受けた後の融解状態で試験した場合、限界飽水度以下ではあまり圧縮強度、曲げ強度および静的ヤング係数は、変化しなかったが限界飽水度以上では3つとも著しく減少した。なお終局ひずみは、凍結状態で試験した場合とほとんど同じ性状を示し、限界飽水度で最小値を示した。

(4). 無サイクルの常温状態で試験した場合（飽水度のみ変化させた場合）限界飽水度以上では、圧縮強度、曲げ強度および静的ヤング係数は、わずかに影響を受け減少する傾向を示した。

(5). 限界飽水度の決定は、圧縮強度および曲げ強度同様に、圧縮終局ひずみおよび静的ヤング係数から決定でき、特にその性状変化の激しい静的ヤング係数から決定することが有効である。

5. あとがき

限界飽水度は、コンクリートの力学的な耐久性を評価するのに有効な基準となり、骨材の不足などが呼ばれている昨今では、本論文で用いた限界飽水度の概念により、この飽水度以下では低品質の骨材の使用が、かなり柔軟に検討されてもよいと考えられる。今後は、実際に低品質の骨材や異なるセメントを用いての影響の解明が課題である。

(参考文献)

- 1) TECHNICAL COMMITTEES: An introduction to RILEM methods of testing resistance of concrete to freezing and thawing and the international co-operative tests on the critical degree of saturation method, Vol 10, No 58, PP 205~215
- 2) G. FAGERLUND: The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete, Vol 10, No 58, PP 217~229