

## 論文 37 年間海中に暴露したコンクリートの諸性質

渡邊 晋也\*1・迫田 惠三\*2・藤井 文彦\*3

**要旨:** 37 年間海中に暴露したコンクリートの諸性質を明らかにするために水中非破壊試験および破壊試験を行った。その結果、水中で反発度法や超音波法を用いた水中非破壊試験は、コンクリートの性質を水中で簡易に測定でき、コンクリートの品質を判断することが可能であることが判った。破壊試験では、小径コアを用いることでコンクリートの表層強度と内部強度を測定することができ、本研究で用いたコンクリートは表層部と内部に強度差が確認できた。さらに、海中に 37 年間暴露したコンクリートの力学的性質の経年変化を検討した結果、圧縮強度や動弾性係数および静弾性係数の低下などは見受けられなかった。

**キーワード:** 海中暴露, 耐久性, 水中非破壊試験, 圧縮強度, 塩化物イオン量

## 1. はじめに

我が国は、四方を海に囲まれており海洋空間を有効に利用する必要がある。海洋空間を有効に利用するには、人為的に構造物を建造していかなくてはならない。我が国においては、明治時代以降数多くの構造物を海洋環境下に建造してきた。構造物は主にコンクリートと鋼材で建設されている。これらの構造物が海洋環境下でどれだけの耐久性を有しているのかは、完全な解答を得られていないのが現状である。その理由のひとつとして、海洋環境下には、海上大気中・干満帯・海中とまったく異なる環境が存在しており、各環境においてコンクリートの劣化メカニズムが異なるからである。

海中に暴露したコンクリートの性質について、既往の研究では、2 通りの知見が示されている。最初の知見では、30 年間海中に暴露したコンクリートでは、アルミナセメントを用いた場合には若干の強度低下が確認され、普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種においては圧縮強度の低下が見られないという報告<sup>1)</sup>と、もう 1 つの知見では 10 年間海中に暴露した普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、シリカフェームセメントを用いたコンクリートでは、暴露

期間3年目から圧縮強度が低下するという報告<sup>2)</sup>である。海中でのコンクリートの耐久性については未解明な部分が多く、コンクリートの海中での長期耐久性を把握するためには数多くの試験結果を得ることが重要である。

そこで、本研究では 37 年間海中に暴露したコンクリートの、物理・力学的性質について非破壊・破壊試験を実施した。本論文では、その結果を取りまとめ、海中に暴露されたコンクリートの耐久性について考察を行ったものである。

## 2. 実験方法

## 2.1 使用材料

本研究で用いたセメントは、普通ポルトランドセメントである。細骨材および粗骨材には安倍川産川砂(密度  $2.64 \text{ g/c m}^3$ , 吸水率 1.01%), 安倍川産川砂利(密度  $2.65 \text{ g/c m}^3$ , 吸水率 0.96%)を用いた。セメントの物理的性質を表-1に示す。

## 2.2 配合および供試体

コンクリートの配合を表-2に示す。水セメント比は 54%, スランプを 7.5 cm, 空気量を 4.5%とした。

試験体の形状は、暴露期間 28 日から暴露期間

\*1 東海大学連合大学院 理工学研究科総合理工学専攻 修士(工学) (正会員)

\*2 東海大学 海洋学部海洋建設工学科 博士(工学) (正会員)

\*3 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻 (正会員)

表-1 セメントの物理的性質

セメントの種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結試験 (h-min)		圧縮強さ (MPa)			曲げ強さ (MPa)		
			2-09	3-11	3日	7日	28日	3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	3.16	3150	2-09	3-11	12.8	21.5	40.7	3.18	4.65	6.79

表-2 配合

W/C	s/a	W	C	S	G	AE剤
(%)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )				(g/m <sup>3</sup> )
54	37	159	297	700	1198	21

5年までは、15cm×15cm×53cmの角柱試験体を用いて暴露試験を行った後、直径75mmのコア供試体を採取した。暴露期間37年においては、15cm×15cm×180cmの同一配合の角柱試験体2本(以下No.1, No.2と称す)を用いて、2.4に示す供試体を採取した。

### 2.3 暴露環境

暴露場所は、静岡県静岡市折戸湾に位置する東海大学臨海実験場の水深1.5mである。折戸湾の平均水深および流速は、それぞれ約3.5mおよび50mm/sec以下であり河川水が流入していることから陸水の影響を受けやすい海域である。折戸湾の2000年～2001年の水質は、既往の研究<sup>3)</sup>より水温は最高27℃、最低13℃、実用塩分は陸水の影響により大きな変動を示すが、底層および表層ではそれぞれ32～27(psu)と報告されている。

### 2.4 試験概要

本研究では、暴露海域で水中非破壊試験を行った後、コンクリート試験体から各寸法、形状の供試体を採取し物理・力学的性質を検討した。各試験概要を以下に示す。

#### (1) 水中非破壊試験

筆者らが試作した水中超音波試験機、水中リバウンドハンマー試験機<sup>4)</sup>を用いて測定を行った。非破壊試験を実施する前処理として、コンクリートに付着した貝類などの海洋付着生物を除去した後、エアージェルを用いて表面を平滑にした。水中超音波法は、陸上で行われている超音波法に用いられる超音波測定装置を簡易

防水した後、コンクリートの縦波伝播速度を透過法および表面波法を用いて計測を行った。透過法は試験体中央部および左右の端から40cmの3箇所測定を行った。また、表面波法については、試験体4面を用いて中央から対称に5cm刻みに50cmまで、測定距離としては10cmから100cmの距離で測定を行った。

反発度法は水中で使用できるリバウンドハンマー試験機を用いて、水中にて反発度を計測した。測定方法は、水中超音波試験を測定した後、陸上の反発度法と同様に、JIS A 1155に準拠し各50点以上測定した。

#### (2) 各寸法、形状で採取した供試体の圧縮強度

構造体からコンクリート供試体を採取するには、コア採取機を用いることが一般的である。コア供試体の直径は、一般に粗骨材の最大寸法の3倍、高さは直径の1.9～2倍とされている。また、このコア供試体から得られた結果を真値とみなす場合が多い。しかし、コアを採取する時様々な要因が存在し、コンクリートの性質に影響を与えると考えられる。そこで、本実験では、直径75mmのコア供試体(以後φ75mmと称す)と15cm×15cm×15cmの立方体供試体(以後立方供試体と称す)の圧縮強度を測定することにより、コア採取による影響を検討する目的で行った。φ75mmはJIS A 1107に準拠し、採取したコア供試体を各8本用いて試験を行った。立方供試体はコンクリートカッターを用いて、立方供試体を3個採取し試験を行った。

また、直径 25mmのコア供試体では（以後φ25mmと称す）、表層から徐々に劣化するコンクリートの性質を圧縮強度から検討する目的で表層部と内部の圧縮強度の測定を行った。φ25mmのコア供試体は、表面から5cm（以後表層部と称す）と内部の5cm（以後内部と称す）の2箇所から採取した。採取した供試体の端面は鏡面研磨機を用いて平滑にした。圧縮試験には、コア供試体を各15本用いて行った。この試験方法は、ソフトコアリング協会の試験方法とは異なることを付記する。

### (3) 暴露37年後のコンクリートの諸性質

暴露経過に伴うコンクリートの力学的性質はφ75mmのコア供試体を用いて測定を行った。

塩化物イオン含有量は、試験体からドリルを用いて表面から2cmごとにコンクリート粉末を深さ8cmまで採取した。その後、JIS A 1154に準拠し、電位差滴定法により塩化物イオン量を求めた。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 水中における各種非破壊検査

#### (1) 水中超音波試験

水中縦波伝搬速度試験の測定結果を図-1 および図-2 に示す。透過法では両試験体ともに4.5km/sec以上の縦波伝播速度であった。表面波法では、No.1とNo.2の両試験体ともに到達時間には差異は見受けられなかった。本研究では、表面波法の評価方法として測定した表面波の結果をプロットした後、切片が0を通る直線回帰を行いその傾きを算出した。この傾きは、見かけ上の縦波伝播速度を表している。このことから、傾きの値が大きければコンクリートの品質が良いと判断できると考えられる。37年間海中に暴露したコンクリートの結果、No.1は2.2、No.2は1.8になった。また、No.1とNo.2の傾きの差は0.4とあまり差異が見られなかった。水中縦波伝搬速度試験の結果をまとめると、1) 透過法の結果より、本研究で使用するコンクリート試験体の品質は既往の研究報告によると優であ

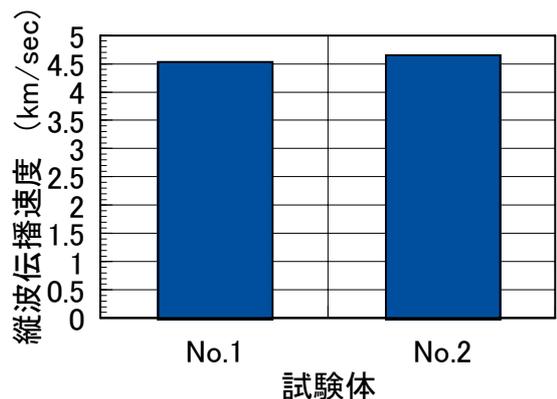


図-1 水中縦波伝播速度試験（透過法）

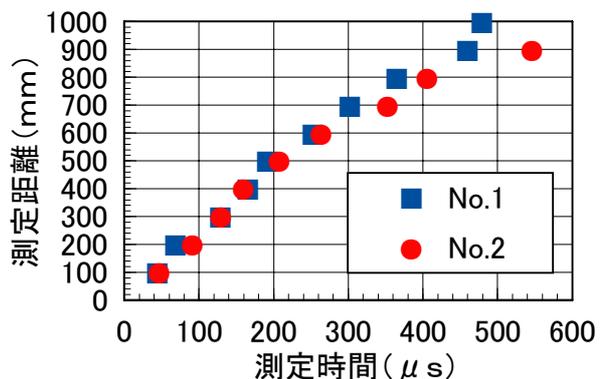


図-2 水中縦波伝播速度試験（表面波法）

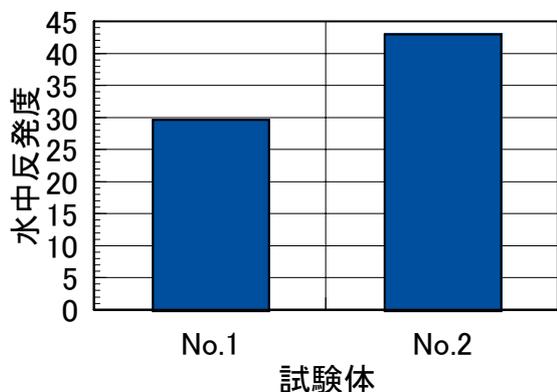


図-3 水中リバウンドハンマー試験

ると推測できる。2) 表面波法を用いたコンクリートの伝播速度基準は無いが、構造物を調査する場合、通常透過法を用いることが困難であるため、表面波法を用いることが有効であると考えられる。よって本研究で検討した評価基準をさらに検討する必要があると考えられる。

#### (2) 水中リバウンドハンマー試験

水中リバウンドハンマー試験は、水中にてコンクリートの表層部の評価を簡易に行えるという特徴を有している。コンクリートは、表層部

から徐々に劣化を起こすことから、表層部のコンクリート品質を測定することは重要であると考えられる。図-3に水中反発度の測定結果を示す。水中反発度は、No.1では30、No.2では43となった。No.2の試験体はNo.1の試験体に比べて、水中反発度が大きい結果が得られた。

水中非破壊試験の結果、水中超音波法では、両試験体に差異がみられなかったが、水中反発度では、両試験体に差異がみられた。後述する各試験体の圧縮強度は、水中反発度の結果と類似することから、水中超音波法について更なる検討が必要であると考えられる。

### 3.2 各寸法、形状で採取したコンクリートの圧縮強度

#### (1) φ75mmおよび立方体供試体の圧縮強度

φ75mmと立方体供試体による圧縮強度の結果を図-4に示す。両試験体に関らずφ75mm供試体より立方体供試体の方が若干圧縮強度は大きくなった。これは供試体の寸法が同じであれば、円柱供試体より立方体供試体の方が圧縮強度は大きくなるという報告と同様の結果が得られた。また、コア供試体は供試体を採取する際に様々な因子が影響を及ぼしていることも圧縮強度が小さくなった理由のひとつと考えられる。

#### (2) φ25mmを用いた表層強度と内部強度

φ25mmのコア供試体を用いたコンクリートの表層部と、内部の圧縮強度の結果を図-5に示す。No.1の試験体では、表層の圧縮強度と内部の圧縮強度に約5MPaの強度差が確認できた。また、表層部と内部の平均圧縮強度には統計的に有意な差が確認された(Welch *t* test  $P=0.05$ )。No.2の試験体では、No.1の試験体と同様に、表層部の方が圧縮強度は小さい結果が得られた。この結果から、長期間海水と接しているコンクリート試験体の表層部は海水の化学的腐食を受け劣化を起こし、圧縮強度が低下したと考えられる。また、試験体内部には海水による化学的腐食の影響は表層部に比べ小さいことから圧縮強度は表層部に比べ大きい結果となったと考えられる。

### 3.3 暴露37年後のコンクリートの諸性質

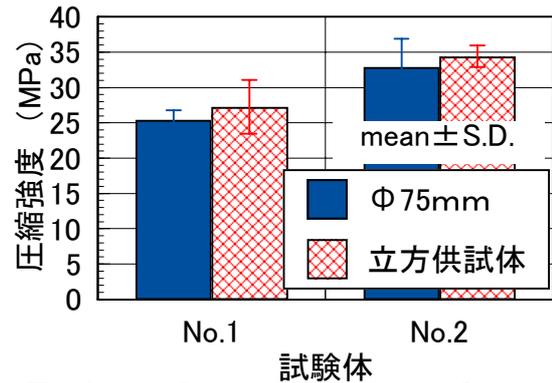


図-4 圧縮強度 (φ75mm, 立方体供試体)

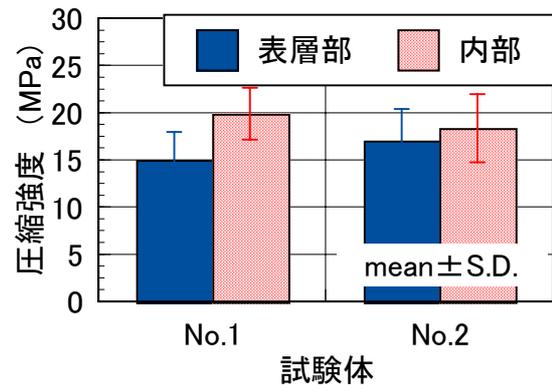


図-5 表層部と内部の圧縮強度 (φ25mm)

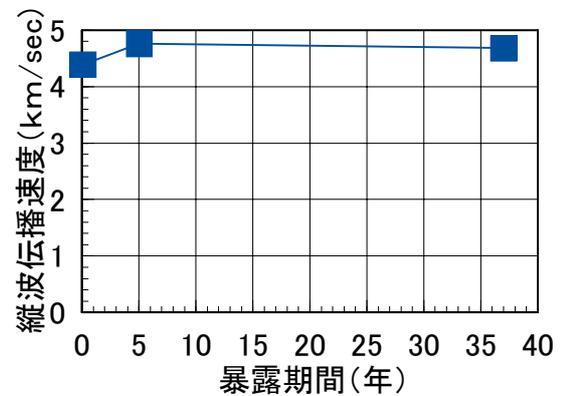


図-6 暴露期間に伴う縦波伝播速度の変化

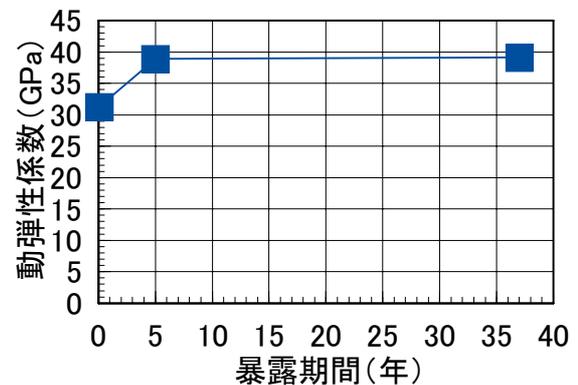


図-7 暴露期間に伴う動弾性係数の変化

海水中に37年間暴露したコンクリートについて、暴露37年目の結果を暴露28日目および5年目の結果と比較検討を行った。暴露期間28日目および5年目の結果は、 $\phi 75\text{mm}$ のコア供試体5本を用いて測定した結果の平均値を用いた。また、暴露期間37年目の結果は、No.1, No.2の両試験体から採取した $\phi 75\text{mm}$ のコア供試体16本を用いて測定した結果の平均値を用いている。

### (1) 縦波伝播速度

図-6に暴露期間の経過に伴う縦波伝播速度の試験結果を示す。暴露期間5年目までは縦波伝播速度が速くなる傾向が見られる。暴露期間37年目と暴露期間5年目を比較すると、暴露期間37年では縦波伝播速度は $0.08\text{km/sec}$ とわずかに遅くなっているが、顕著にコンクリートが劣化したとは考えられない。よって縦波伝播速度の結果から、37年間海中に暴露したコンクリートは劣化していないものと考えられる。

### (2) 動弾性係数

図-7に暴露期間の経過に伴う動弾性係数の試験結果を示す。暴露5年から37年目まで、動弾性係数はほとんど変化ない結果となった。この結果から、縦波伝播速度と同様にコンクリートは劣化をしていないと考えられる。

### (3) 圧縮強度

図-8に暴露期間の経過に伴う圧縮強度の試験結果を示す。暴露期間5年目までの圧縮強度は、強度発現が大きく水和反応が継続的に続いたことがわかる。暴露期間37年目を経過したコンクリートは、暴露期間5年目と比較して圧縮強度に差異は見られなかった。このことから、コンクリートは劣化をしていないことが考えられる。しかし、 $\phi 25\text{mm}$ コア供試体で行った圧縮強度試験の結果、表層部分では劣化が生じていることが判明している。 $\phi 75\text{mm}$ コア供試体で圧縮強度を測定した場合、表層部分の劣化は圧縮強度に直接影響を及ぼしていないと考えられる。圧縮強度を測定するコア供試体の寸法により結果が異なると考えられることから、測定供

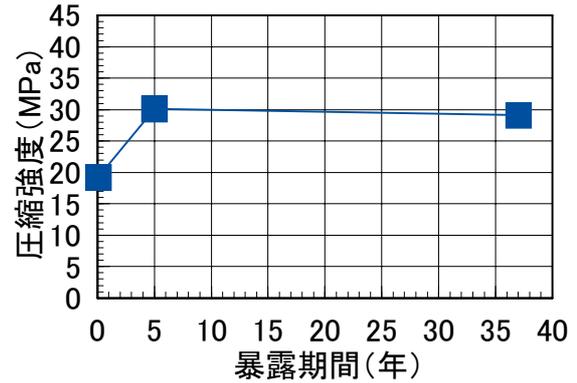


図-8 暴露期間に伴う圧縮強度の変化

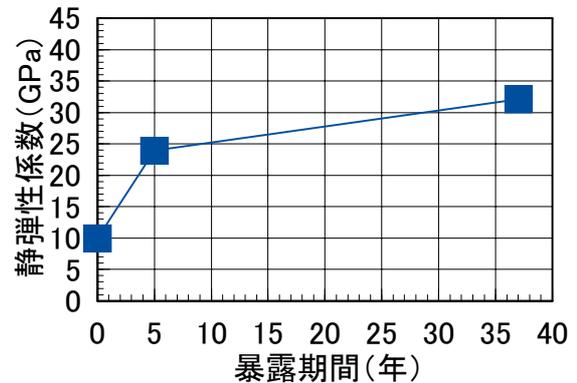


図-9 暴露期間に伴う静弾性係数の変化

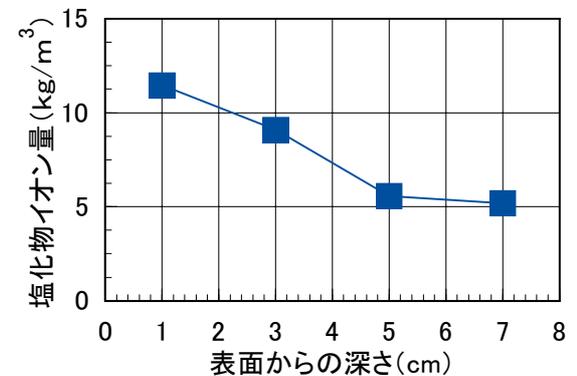


図-10 塩化物イオン量

試体寸法の影響を検討していく必要があると考えられる。

本研究で用いたコンクリートは、既往の報告<sup>1)</sup>と類似する結果が得られた。ただし、筆者らが行っている研究で海中に暴露したコンクリートの力学的性質が既往の研究<sup>2)</sup>と類似する結果も得られていることから、海中におけるコンクリートの耐久性についてさらなる検討を行いたいと考えている。

#### (4) 静弾性係数

図-9 に暴露期間の経過に伴う静弾性係数の試験結果を示す。動弾性係数と同様に、暴露期間37年を経過しても静弾性係数の低下は見受けられなかった。この結果からも、コンクリートは劣化していないと考えられる。

#### (5) 塩化物イオン量

図-10に37年間海中に暴露したコンクリートの表面から深さごとに測定した塩化物イオン量を示す。測定場所は試験体の端から30cmの場所で行った。コンクリートに進入する塩化物イオンは4面から侵入することになる。本研究で暴露した海域の実用塩分は32~27 (psu) と通常の海洋環境 34 (psu) に比べて低い海域であるが、発錆限界塩化物イオン量である  $1.2\sim 2.5\text{kg/m}^3$  を全ての深さで上回った。また、深さ7cmで塩化物イオン量が深さ5cmと差異が見受けられなかった。理由として、供試体寸法が  $15\text{cm}\times 15\text{cm}$  であることから他の3面から塩化物イオンが浸透したと考えられる。本研究で用いたコンクリートの深さ5cmまでの結果を直線回帰した場合の相関係数が0.99であることから、供試体寸法が大きい、または片面のみからの塩化物イオンが浸透すると仮定した場合、深さ7cmの塩化物イオン量は、約  $3\text{kg/m}^3$  と推測できる。また、発錆限界塩化物イオン量である  $1.2\text{kg/m}^3$  に達する表面からの深さは8.1cmになった。

#### 4. 結論

37年間海中に暴露したコンクリートの諸性質を検討した。本研究で得られた結果を総括して以下の知見が得られた。

- (1) 水中非破壊試験は、長期間海水中に暴露されたコンクリートの性質を水中で測定することができる。
- (2) 各寸法、形状で採取したコンクリートの圧縮強度試験の結果、小径コアを用いることにより表面強度と内部強度を計測することが可能であると考えられる。
- (3) 海水中に37年間暴露したコンクリートの

縦波伝播速度、動弾性係数、静弾性係数および圧縮強度の結果から、暴露期間5年と比べ低下は見受けられずコンクリートは劣化していないと考えられる。しかし、表層部は内部と比較して圧縮強度が低下していることから、供試体の寸法、形状などの検討が必要と考えられる。

- (4) 本研究で用いたコンクリートを実用塩分32~27 (psu) の海域に37年間設置した場合、鉄筋のかぶりは10cmあればよいと考えられる。

海中に長期間曝されたコンクリートは、長期間強度を発現するコンクリートもあれば、暴露3年で強度低下を起こすものもある。この異なる結果についてさらに検討を行い、海中に設置されているコンクリート構造物の耐久性について暴露実験や既設構造物の調査を行う必要があるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 濱田秀則, Tarek Uddin Mohammed, 山路徹: 30年間常時海水中に暴露されたコンクリートの諸性質について, 材料, Vol.54, No.8, pp.842-849, 2005.8
- 2) 竹田宣典, 十河茂幸, 迫田恵三, 出光隆: 種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.599/ Vol.40, pp.91-104, 1998.8
- 3) 佐藤義夫ほか: 沿岸・浅海域環境保全のための工学的手法について, 日本海水学会誌, Vol.57, No.6, pp.439-448, 2003.12
- 4) 渡邊晋也, 迫田恵三, 鉄芳松: 水中リバウンドハンマーを用いた水中コンクリート構造物の非破壊検査について, コンクリート構造物への非破壊検査の展開, Vol.2, pp.377-382, 2006.8
- 5) 水上国男: コンクリート構造物の耐久性シリーズ化学的腐食, 技報堂出版, p.143, 1986.12
- 6) 長瀧重義: コンクリートの長期耐久性, 技報堂出版, p.254, 1995.11