

# 論文 75 年間水中に晒された鉄筋コンクリート橋脚の耐久性

迫田 惠三\*<sup>1</sup>・渡邊 晋也\*<sup>2</sup>・小野秀一\*<sup>3</sup>

**要旨:** 本研究は感潮河川に建設され、75 年間経過した鉄筋コンクリート製の水管橋のコンクリートおよび鉄筋の物性に関する報告である。調査は先ず、コンクリート躯体の目視観察、リバウンドハンマー試験、その後、コンクリートコアおよび鉄筋を採取した。コア供試体の実験は縦波伝播速度、縦振動による動弾性係数、圧縮強度、中性化深さおよび塩化物イオン量の試験を行った。鉄筋の試験は腐食面積率、腐食度および引張試験を行った。その結果、75 年間、淡水、海水の相互作用を受けた橋脚下部の圧縮強度は 45MPa を越え、鉄筋の腐食は見られるものの引張強度は、当時の規格内に入っていることが明らかになった。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート、感潮河川、圧縮強度、炭酸化、塩化物イオン、鉄筋の腐食

## 1. まえがき

我が国には陸域でダムや橋脚、海洋環境下で防波堤、栈橋および岸壁など多くの鉄筋コンクリート製の水理構造物が存在する。これらの水理構造物においてコンクリートに影響を及ぼす要因は、位置する場所の気候や構造物の部位によって異なることが考えられる。例えば水中でのコンクリート構造物は、各種要因によって表面から徐々に劣化することが知られている。淡水中ではコンクリート内部からの水酸化カルシウムの溶出、海水中では各種塩類の浸透によって水酸化カルシウムの溶出による多孔質化、エトリングタイトの生成による膨張などが考えられる。海洋環境下におけるコンクリート構造物の耐久性については、暴露実験や既設構造物の調査など幾つかの報告がなされている<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.</sup>。しかしながら、淡水中、海水中に長年月晒されたコンクリート構造物の耐久性については報告が少ない<sup>12, 13.</sup>。

本研究は汽水域に設置され、約 75 年間水中に晒された鉄筋コンクリート製橋脚のコンクリートや鉄筋の物性についての報告である。

## 2.1 構造物の概要

水管橋の概要を図-1 に示す。調査した水管橋は、静岡県静岡市清水区（旧清水市）の巴川に 1928 年に竣工された鉄筋コンクリート製の水管橋で、約 75 年間供用されてきたが 2006 年に倒壊した。構造物は図に示すように下部から木製の杭、基礎土台、フーチング、橋脚および上部工から構成されている。橋脚に使用された鉄筋の直径は 25mm、コンクリートのかぶり厚は 75mm で、計 12 本の鉄筋が使用されている。橋脚は直径 0.98m、高さ 3.56m である。

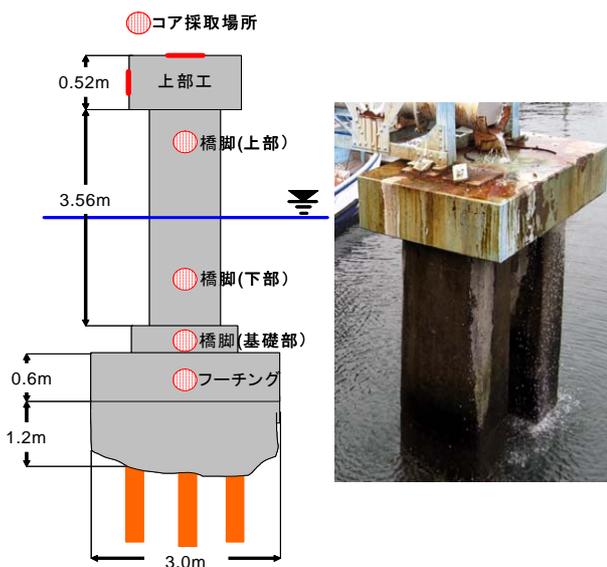


図-1 水管橋の概要

## 2. 実験方法

\*1 東海大学 海洋学部海洋建設工学科 博士(工学) (正会員)

\*2 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)

\*3 社団法人 施工技術総合研究所 研究第二部 博士(工学) (正会員)

## 2.2 気象および周辺環境

旧清水市の1978～2003年の25年間の年平均をみると、年間平均気温は16.7℃、冬季においても氷点下になることは稀である。また、年間降雨量は少ない年でも1400mmを越え、25年間の年間降水量は2193mmで、この値は亜熱帯地方である沖縄県の降水量と大差ない。

この水管橋は清水市街を縦断し、清水港に注ぐ2級河川の巴川に設置された。この巴川は感潮河川で水管橋が位置する場所も汽水域である。従って、基礎土台、フーチングおよび橋脚は満潮時では海水の影響を干潮時では淡水の影響を受ける。表-1に1979～2003年、および2005年の水管橋付近の河川水の水質<sup>14)</sup>を示す。

## 2.3 現地調査および試料採取

ワイヤソーで解体されたコンクリートをヤードまで運搬し、概観調査および寸法の測定を行った。水管橋の各部位から直径15cmのコア供試体を採取した。試料採取位置は、図-1に示すように上部工では縦、横方向、橋脚は通常、水と接しない上部、常時、水中に没している下部、フーチングおよび橋脚基礎である。また、橋脚部分から長さ約3.5mの鉄筋をはつり取った。

## 2.4 試験方法

試験方法を表-2に示す。超音波伝播速度試験はJCI-SND2「超音波パルス伝播速度の標準測定方法(試案)」、動弾性係数試験はJIS A 1127「共鳴振動法による動弾性係数試験」、圧縮強度試験はJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験」、静弾性係数試験はJIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験」に準拠した。中性化試験は円柱供試体を割裂し、その断面にフェノールフタレイン1%エタノール溶液を噴霧する方法で求めた。鉄筋の引張り試験はJIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に準拠した。鉄筋の腐食面積率は、鉄筋に生じた錆を鉄筋腐食スキャナーで読み取り、画像解析を行って腐食面積率を求めた。鉄筋の質量減少率はJCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」によって求めた。塩分含有量は電位差滴定法によって求めた。

表-1 水管橋付近の水質<sup>14)</sup>

	1979年～2003年および2005年		
	最高値	最低値	平均値
水温(℃)	30.0	7.5	18.8
流量(m <sup>3</sup> /s)	39.8	0.9	8.3
pH	7.7	6.4	7.0
DO(mg/l)	9.0	1.1	3.5
BOD(mg/l)	7.9	0.6	3.4
COD(mg/l)	8.7	3.0	5.5
SS(mg/l)	22.5	2.0	6.1
T-N(mg/l)	6.5	1.3	4.4
T-P(mg/l)	0.9	0.1	0.4
Cl(mg/l)	8560.0	285.0	3466.0

表-2 試験方法

試験名	方法
単位容積質量試験	重量/体積
動弾性係数	JIS-A-1127
静弾性係数	JIS-A-1149
縦波伝播速度試験	JCI 超音波パルス伝播速度標準測定方法
圧縮強度試験	JIS-A-1108
リバウンドハンマー試験	JIS-A-1155
塩化物イオン量	JIS-A-1154
鉄筋の腐食面積率	画像解析から算出
鉄筋の腐食度	JCI コンクリート中の鋼材の腐食評価方法
鉄筋の引張強度	JIS-Z-2241

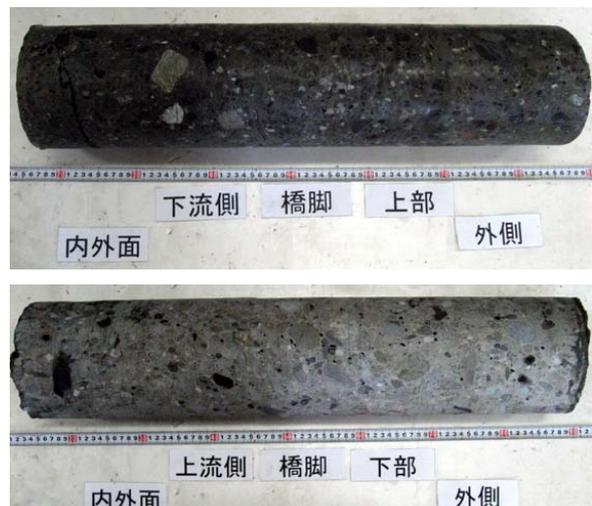


図-2 コア供試体

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 コア供試体の概観

橋脚から採取したコア供試体の状態を図-2に示す。図からも明らかなようにジャンカは存在せず密実なコンクリートであった。粗骨材は川砂利でその寸法は40mm以下が大半を占めている。常時、水と接するコンクリート表面は変色しており、脆弱化が認められた。

### 3.2 縦波伝播速度

縦波伝播速度の結果を図-3に示す。図中のFはフーチング、Pbは橋脚基礎部、Plは橋脚下部、Puは橋脚上部、Usは上部工の横、Uuは上部工の縦を表している。縦波伝播速度に及ぼす要因は、水セメント比、骨材の密度、容積およびコンクリートのジャンカなどが考えられる。また、経年変化による縦波伝播速度の変化も考えられる。縦波速度の結果は4.18~4.73 km/s、平均4.44 km/sが得られた。常時、水中に晒されている橋脚下部と、気中に晒された橋脚上部を比較すると、前者の速度が後者の速度より約0.4 km/s大きい。これは橋脚下部の劣化がコンクリートの表層部に限定され、内部は健全であることが考えられる。これは図-6の圧縮強度の結果からも明らかなように、橋脚下部の圧縮強度が上部のそれよりかなり大きいことから類推できる。

### 3.3 動弾性係数

動弾性係数の結果を図-4に示す。動弾性係数に及ぼす要因は、縦波速度と同じようなことが考えられる。動弾性係数の結果は2.66~4.29、平均 $3.51 \times 10^4$  MPaが得られた。橋脚下部と上部を比較すると、下部のほうが上部より約 $1.26 \times 10^4$  MPa大きい。縦波速度の結果と同様な理由で下部の動弾性係数が大きくなったものと考えられる。

### 3.4 反発度

リバンドハンマーを用いたコンクリート表面の反発度を図-5に示す。常時、水中にある橋脚下部と常時、気中にある橋脚上部を比較すると、前者の反発度は30、後者のそれは58と大きな差異がみられる。これは橋脚上部が炭酸化によって反発度が大きくなったのに対し、橋脚下部では淡水や海水の作用にコンクリート表層部から劣化し脆弱化したことが考えられる。

### 5 圧縮強度

圧縮強度の結果を図-6に示す。図からも明らかなように圧縮強度は橋脚の部位によって大きく異なる。圧縮強度は23.2~49.1 MPa、平均37.8 MPaが得られた。橋脚下部と上部を比べると、下部の強度が約17.8 MPa大きくなっている。

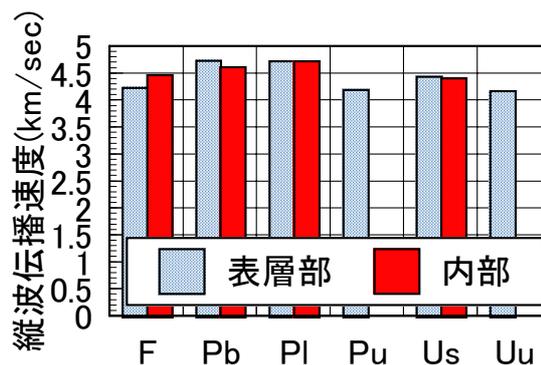


図-3 各部位の縦波伝播速度

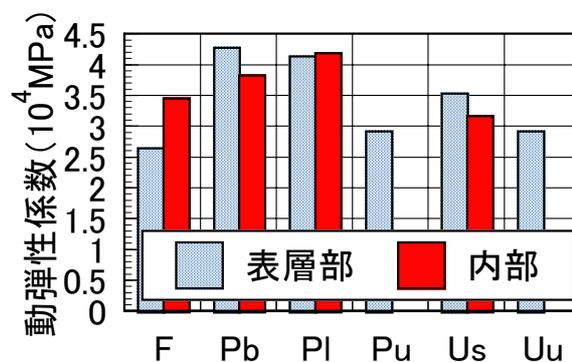


図-4 各部位の動弾性係数

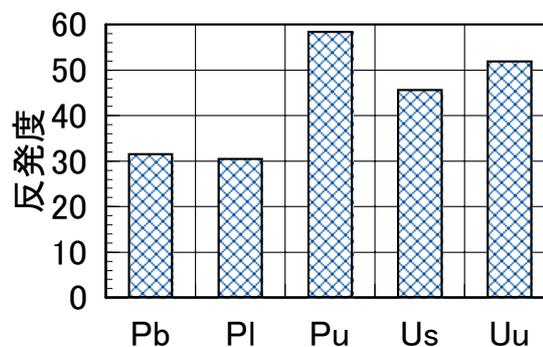


図-5 各部位の反発度

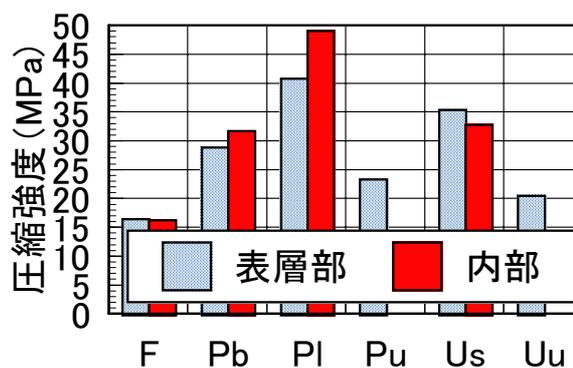


図-6 各部位の圧縮強度

これは図-8 に示した中性化深さの結果からも明らかのように、橋脚上部のコンクリートの炭酸化と、乾湿繰り返しの影響を受けたことが原因と考えられる。常時、水中で淡水、海水の作用を交互に受ける橋脚下部の圧縮強度は、75年経過しても45MPa以上の強度を有している。橋脚下部および橋脚基礎部の表面部分の強度と内部の強度を比較すると、いずれも内部の強度が大きくなっている。これは表層部分のコンクリートが水酸化カルシウムの溶出やエトリンガイトの生成によって脆弱化したものと考えられる。これはリバウンドハンマーによる反発度が橋脚上部で58に対し、下部の反発度が30という結果からも表層部が海水や淡水の影響を受けたものと考えられる。

### 3.6 静弾性係数

静弾性係数の結果を図-7 に示す。橋脚の静弾性係数は $2.30\sim 3.35\times 10^4\text{MPa}$ 、平均 $2.85\times 10^4\text{MPa}$ が得られた。橋脚下部と橋脚上部の表層部分の静弾性係数を比較すると、下部の値が約 $1.09\times 10^4\text{MPa}$ 大きくなっている。一般に圧縮強度と静弾性係数は相関があるとみなされているので、橋脚下部の圧縮強度が大きいことから静弾性係数も大きくなったものと考えられる。

### 3.7 中性化深さ

割裂コア供試体の中性化深さを図-8 に示す。水管橋の橋脚上部は、気中で75年間経過しているので中性化深さも大きくなることが予想された。この部分での中性化深さは36mmが得られた。この水管橋のコンクリートの使用骨材は川砂、川砂利、セメントが普通ポルトランドセメント、コンクリートはプレーンコンクリートとみなされるので中性化比率は1である。当時の配合が明らかでないので、水セメント比を50%および60%と仮定し、岸谷式<sup>16)</sup>を用いて中性化深さを計算してみる。建設後の経過年数75年では水セメント比50%の場合、中性化深さは17mm、60%の場合には24mmとなる。橋脚上部での実測値は36mmとなっており予測式より大きくなった。これに対し、常時、水中にある橋脚

下部の中性化深さは3mmが得られた。これはこの部位が常時、水中にあるため中性化深さが小さくなったものと考えられる。

### 3.8 塩化物イオン量

コンクリート中の塩化物イオン量の結果を図-9 に示す。この水管橋は汽水域に設置されており、干満作用により海水の影響を受ける。橋脚

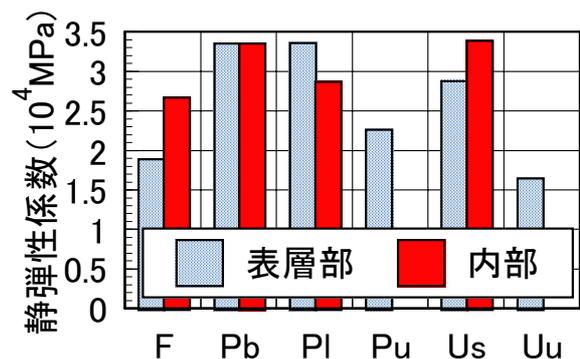


図-7 各部位の静弾性係数

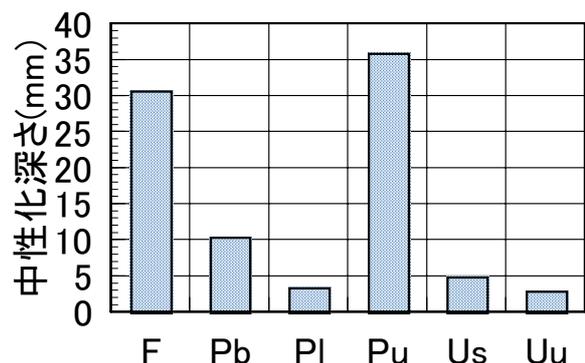


図-8 各部位の中性化深さ

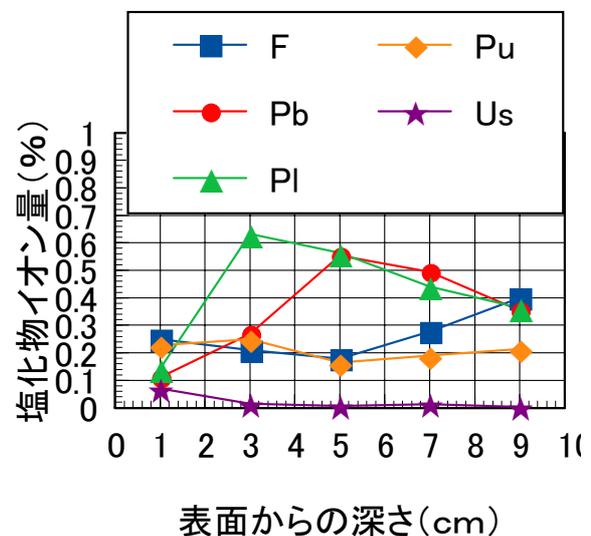


図-9 各部位の塩化物イオン量

下部ではコンクリートの表面からの深さに関係なく、鉄筋を錆びさせるに十分な塩化物イオン量が存在する。これに対し、橋脚上部は通常、気中にあり海水と接しないが、コンクリート表面からの深さに関係なく、塩化物イオン量は約0.2%の値が得られた。これは塩化物イオンが拡散によって橋脚下部から上部へと移動したものと考えられる。

### 3.9 鉄筋の腐食および強度

コンクリート橋脚から長さ約3.5mの鉄筋をはり取り、長さ60cm間隔で鉄筋の試験を行った。鉄筋の腐食面積率の結果を図-10に示す。図での高さは橋脚下部を基準にした鉄筋の埋込み高さを表している。腐食面積率はコンクリートに埋め込まれた鉄筋の位置により14~36%、平均24%の値が得られた。腐食面積率は図からも明らかなように橋脚下部の鉄筋の方が下部より小さくなっている。これは常時、淡水と海水に接している橋脚下部では鉄筋を腐食させるために十分な塩素イオン量は存在するものの、腐食の一要因でもある酸素が少ないことが原因と考えられる。

鉄筋の腐食度の結果を図-11に示す。腐食度は $2.3\sim 7.3\times 10^{-4}$  (mdd)、平均 $4.3\times 10^{-4}$  (mdd)の値が得られた。鉄筋の腐食度は腐食面積率の結果と同様、橋脚下部の鉄筋より橋脚上部の鉄筋の腐食度が大きくなっている。

鉄筋の引張強度の結果を図-12に示す。橋脚下部と上部の鉄筋の引張強度には差異がなく、その強度の範囲は397~450MPa、平均411MPaが得られた。当時のJESの第20号G.7の規格<sup>17)</sup>における引張強度は3900~5200kg/cm<sup>2</sup>となっている。75年経過した鉄筋の引張強度(411MPa)は当時の規格内に入っているため、腐食は見られるものの引張強度に及ぼすような劣化は生じていないものと考えられる。

## 4. まとめ

鉄筋コンクリート製の水管橋が75年間供用されてきたが、転倒によって解体されることにな

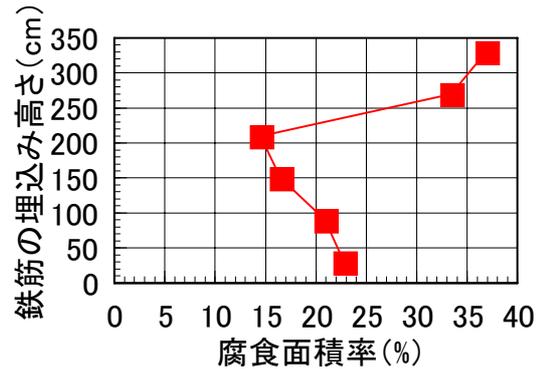


図-10 鉄筋の腐食面積率

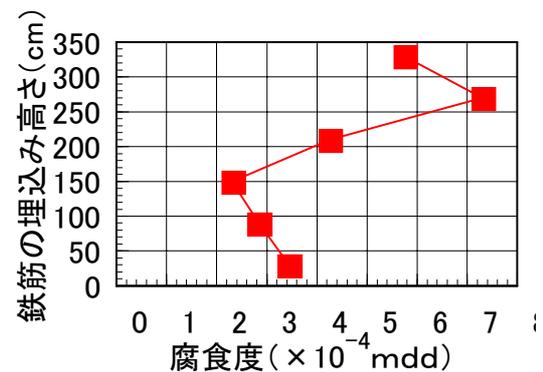


図-11 鉄筋の腐食度

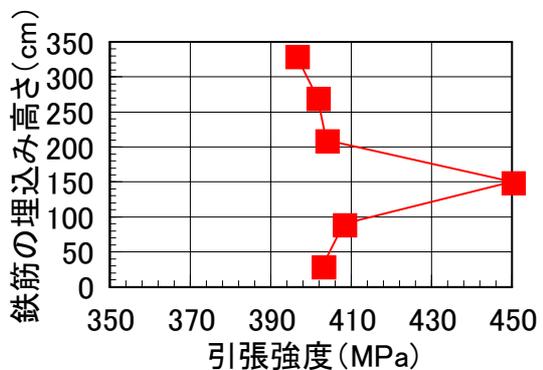


図-12 鉄筋の引張強度

り調査する機会を得た。主に常時、水と接している橋脚下部のコンクリートおよび鉄筋の物性について、以下のような結果が得られた。

- (1) 常時、水と接している橋脚下部コンクリートの縦波伝播速度は、常時、気中にある橋脚上部の速度より大きい。
- (2) 橋脚下部のリバウンドハンマー反発度の結果より、この部位でのコンクリートの劣化、脆弱化が考えられる。
- (3) 橋脚部のコンクリートコア供試体の圧縮強

は、23.2～49.1、平均 37.8MPa が得られた。常時、水と接している橋脚下部の圧縮強度は、コンクリートの表層と内部の強度に差異が見られたが、水中に 75 年間晒されても平均 45.1 MPa が得られた。

- (4) 常時、水中にある橋脚下部においても中性化が見られ、その中性化深さは 3mm、橋脚上部では 36mm が得られた。
- (5) 常時、淡水と海水の作用を受ける橋脚下部の塩化物イオン量は、コンクリートの表面からの深さに関係なく、鉄筋を腐食させるに十分な量である。
- (6) 鉄筋の腐食面積率は 14～36%、平均 24% が得られたが、橋脚下部の鉄筋の腐食面積率と橋脚上部のそれを比較すると、前者のほうが小さい。
- (7) 橋脚下部と上部の鉄筋の引張強度には差異が無く、その引張強度の範囲は 397～450MPa、平均 411MPa が得られたが、引張強度は当時の JES の規格内に入る値が得られた。

以上の結果、75 年間汽水域で淡水、海水の相互作用を受けた橋脚下部コンクリートの圧縮強度は 45MPa 以上、鉄筋は腐食しているものの引張強度は施工当時の規格値を有していることが分かった。

#### 参考文献

- 1)長瀧重義：コンクリートの長期耐久性，技報堂出版株式会社，pp.254，1995
- 2)長崎作治：60 年経過したコンクリートの強度，セメント・コンクリート，No.290，pp.28-31，1971
- 3)迫田恵三：海岸コンクリート構造物の性質について，東海大学紀要海洋学部，第 13 号，pp.113-1328，1980
- 4)外岡政則ほか：亜熱帯環境下におけるプレキャストコンクリート栈橋の調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.1165-1170，2001
- 5)迫田恵三ほか：亜熱帯，温暖および寒冷地域の海洋環境下に暴露したコンクリートの性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 23，pp. 415-420，2001
- 6)谷川 伸ほか：塩害環境下におけるコンクリート中の塩分蓄積量に関する一考察，コンクリート工学論文集，Vol. 18，No. 1pp. 939-944，1996
- 7)谷川 伸ほか：塩害を受ける RC 暴露構造物の劣化評価，コンクリート工学年次論文報告書，Vol. 16，No. 1pp. 953-9581，1994
- 8)大城 武ほか：鉄筋コンクリート構造物の暴露試験について，第 8 回コンクリート工学年次講演論文集，pp. 193-196，1986
- 9)大城 武ほか：塩害による鋼材腐食に関する暴露実験，コンクリート工学年次講演論文集，Vol.11，No.1，pp.569-574，1989
- 10)谷川 伸ほか：塩害環境下における RC 構造物の暴露実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 1，pp. 811-816，1993
- 11)大城 武ほか：塩害を受けた RC 構造物の腐食調査方法について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 1pp. 649-654，1993
- 12)浜田秀則ほか：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
- 13)竹田宣典ほか：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
- 14)水質関連資料集：清水市生活環境部環境保全課
- 15)R.Jone et al.：Testing concrete by an ultrasonic pulse technique，Road Research Tech，Paper No.34，pp.15-16，1955
- 16)岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，pp.165，1963
- 17)福田武雄：鉄筋コンクリート理論，生産技術センター，pp.134，1976