

論文 海洋環境下に10年間暴露した低品質骨材コンクリートの性質

迫田恵三*1 竹田宣典*2 十河茂幸*3 山口一生*4

要旨： 比重の小さい、吸水率の大きい低品質骨材を用いたコンクリートを海洋環境下に10年間暴露し、低品質骨材がコンクリートの耐久性に及ぼす影響について考察した。その結果、以下のような知見が得られた。①海中に暴露したコンクリートの圧縮強度は、骨材にかかわりなく暴露3年目あたりから低下するが、海上大気中に暴露したものは暴露前の強度と大差ない。②海上大気中に暴露したコンクリートの塩分含有量は、低品質骨材のほうが多い。③海上大気中に暴露したコンクリート中の鉄筋の腐食量は、低品質骨材を用いたほうが大きい。

キーワード： 低品質骨材、海洋環境、耐久性、塩化物イオン、鉄筋腐食、圧縮強度

1. まえがき

骨材の比重、吸水率においてJIS A 5005 「コンクリート用砕石及び砕砂」の規格を下回るいわゆる低品質骨材がコンクリートの品質に及ぼす影響については、力学的性質及び耐久性の面からこれまで数多くの研究報告がなされている。力学的性質、特に圧縮強度に及ぼす影響については、水セメント比が小さくなるにつれて、骨材品質が影響することが明らかにされている[1]。耐久性については主に凍結融解促進試験の結果について報告がなされているが、それによると低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍結融解性は、良品骨材を用いたものと比較してかなり劣るとされている[2]。しかしながら、低品質骨材を用いたコンクリートの耐久性に関しては、促進試験が中心であり各種の環境下に暴露した研究報告は極めて少ない。著者らは、低品質骨材を用いたコンクリートを海洋環境下に6年間暴露した結果について既に報告した[3]。本研究は海上大気中、水深11mの海中、内陸部において10年間暴露試験を行い、環境条件の差異によって、低品質骨材がコンクリートの品質、塩化物イオンの浸透、鉄筋の腐食に及ぼす影響について検討した結果について述べる。

2. 実験方法

2.1 供試体

コンクリートの圧縮強度や超音波速度試験に用いた供試体は直径10cm、長さ20cmの円柱とした。塩分含有量測定用供試体は直径15cm、長さ15cmの円柱で図-1に示すように塩分が一方方向のみ

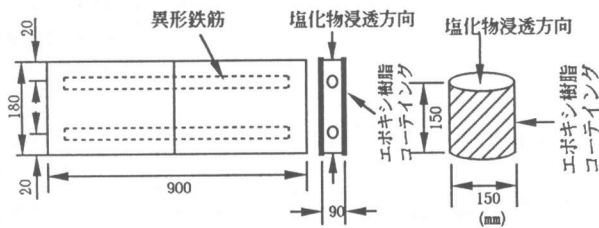


図-1 暴露供試体

*1. 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科、 工博（正会員）

*2. (株)大林組技術研究所 土木第三研究室、 工修（正会員）

*3. (株)大林組技術研究所 土木第三研究室、 工博（正会員）

*4. 日本エルダルト（株）

浸透するように一面を除いてエポキシ樹脂コーティングを行った。鉄筋の腐食量測定のための供試体は幅18cm、厚さ9cm、長さ90cmの角柱供試体とし、直径19mmの異形棒鋼をかぶり2cmの位置に埋め込んだ。塩分、酸素などの劣化因子の浸透は図に示すような方向のみとなるようにエポキシ樹脂コーティングを行った。

2. 2 使用材料及び配合

セメントは普通ポルトランドセメント（比重3.15）を用いた。細骨材は木更津産の山砂を、低品質骨材としては、JIS A 5005の規格値、比重2.5、吸水率3%を下回るものとして伊豆長岡産碎石を用いた。良品質粗骨材としては八王子産の碎石を用いたが、これらの骨材の性質を表-1に示す。良品質、低品質骨材コンクリートの配合を表-2に示す。海洋での使用を考慮して水セメント比を50%、単位セメント量を332kgとした。

2. 3 養生及び暴露環境条件

供試体は材令14日まで湿空養生を行い、その後乾燥させ塩分浸透用、鉄筋腐食用供試体に塗装を行い、気中乾燥後材令50日において海洋暴露を開始した。

暴露場所は海洋環境下として静岡県清水港外港防波堤

とした。海中暴露はこの防波堤の水深11mで行った。内陸部としては東京都の清瀬市とし、これらの暴露地での環境条件を表-3に示す。

表-1 骨材の物理的性質

骨材名	種類	粗粒率	比重	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)
八王子	碎石	6.20	2.65	1.09	1.51	56.8
伊豆長岡	碎石	6.49	2.26	4.66	1.35	60.3
木更津	山砂	2.67	2.58	1.64	1.79	69.3

表-2 コンクリートの配合表

配合名	w/c (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	AE剤 (kg/m ³)
普通コンクリート	50	166	332	847	935	3.32
低品質骨材コンクリート	50	166	332	847	840	3.32

表-3 暴露試験場の環境条件

区分	環境条件	暴露場所
海上大気中 堤防上	H.W.L +1.7mとL.W.L ±0.0mの中間位置	清水港沖500m 年平均気温16.0℃
海中 水深 11m	海水温度 18.4℃、溶存酸素量 7.98ppm ph 8.29、イオン濃度 18.4%	年間降水量 2361mm
内陸	海岸より30km内陸、年平均気温 15.3℃ 年間降水量 1460mm	東京都 清瀬市

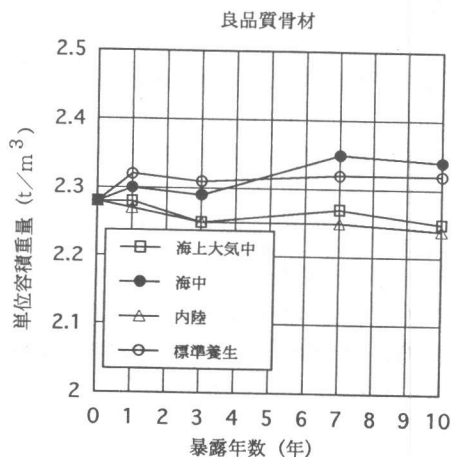
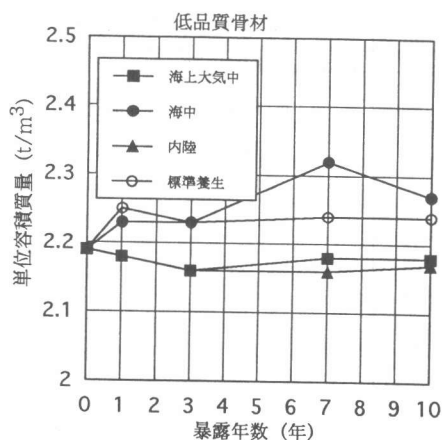


図-2 単位容積質量の経年変化

2. 4 測定項目及び測定方法

暴露開始後、半年、1年、3年、6年及び10年の供試体を暴露地から回収し、以下のような測定を行った。①単位容積質量②超音波伝播速度③動弾性係数④圧縮強度⑤塩分含有量⑥中性化深さ⑦鉄筋の腐食

動弾性係数は縦振動法によって求め、塩分含有量は2cmの深さごとにドリルによって粉末状の試料を採取し、硝酸銀滴定法で求めた。測定された塩化物イオン量からFickの拡散方程式を用いて、塩化物の拡散係数を算出した。鉄筋の腐食はコンクリートを解体後、鉄筋の腐食を写し取り画像処理法によって求めた。

3. 試験結果及び考察

3. 1 単位容積質量の推移

図-2に単位容積質量の結果を示す。骨材にかかわりなく海中暴露や標準養生したものは、暴露前と比較して単位容積質量が大きくなっており、その海中での増加量は良品質骨材で2.6%、低品質骨材で3.5%とになっている。これは海水中の塩類がコンクリートに浸透することによって、エトリンガイトが生成することなどが原因と考えられる。これに対し、海上大気中や内陸部に暴露したものは、暴露前に比べて単位容積質量が減少する傾向がみられる。これは主に乾湿の繰り返しに影響を及ぼしたものと考えられる。

3. 2 超音波伝播速度の推移

超音波伝播速度の結果を図-3に示す。標準養生したものは材令の経過とともに速度も大きくなるが、その他の環境に暴露したコンクリートの速度は、暴露3年目あたりから低下する傾向がみられる。その速度低下の割合は海中で最も大きく、次に内陸、海上大気中の順となっている。

3. 3 動弾性係数の推移

各々の暴露環境1年の値を基準にした動弾性係数比を図-4に示す。海中に暴露した供試体の動弾性係数比は、暴露10年においても骨材

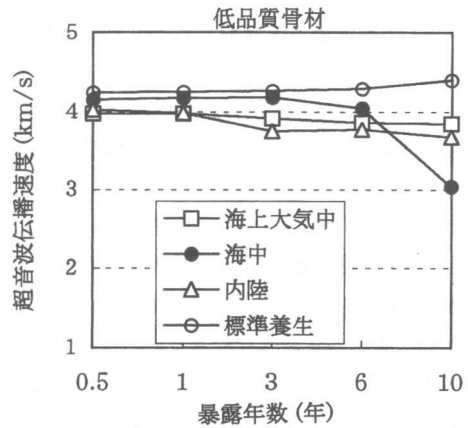
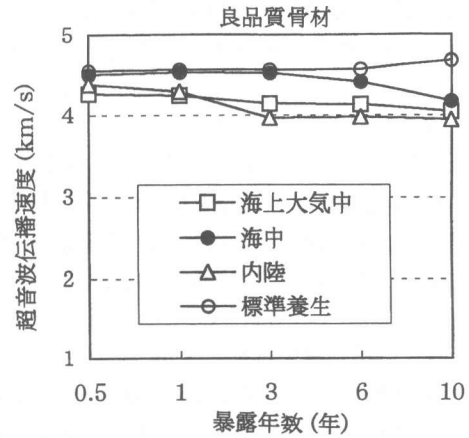


図-3 超音波伝播速度の経年変化

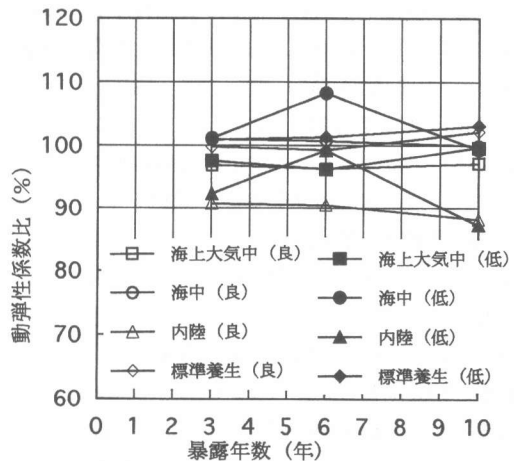


図-4 動弾性係数比の経年変化

にかかわりなく、暴露1年と大差ない結果となった。同様な結果が良品質骨材を用いたコンクリートを海水に10年間浸漬して得られたという報告がなされている[4]。海中に暴露した場合には、海水の化学的浸食によってコンクリートが劣化することは、図-5に示した圧縮強度の結果からも明らかである。しかし、動弾性係数は単位容積質量の結果からも分かるように、海中に暴露した場合には単位容積質量が増えており、これが結果に影響を及ぼしたものと類推される。

3. 4 圧縮強度の推移

各種暴露環境下での圧縮強度の推移を図-5に示す。標準養生したものは養生年数の経過とともに圧縮強度も大きくなっている。海上大気中に暴露したコンクリートの強度は、骨材品質にかかわらず暴露年数によって多少異なるが暴露前と比較してわずかに大きく、暴露10年では標準養生の強度と大差ない。これは暴露地が温暖で降雨量も年間平均2400mmと多いのが原因と考えられる。他方、海中に暴露したコンクリートの強度は、骨材にかかわらず暴露1年目までは増加するが、それ以降は暴露年数の経過とともに減少する傾向がみられる。海中暴露10年と標準養生の強度を比較すると、前者の強度が良品質骨材を用いたもので約17%、低品質骨材で約14%小さくなっている。低品質骨材コンクリートの強度低下がわずかに小さい理由については、明らかではない。このような海水中でのコンクリートの劣化は、海水の化学的浸食による水酸化カルシウムの溶出と、エトリンガイトの生成が原因とみなされる。

3. 5 中性化の進行

中性化の経年変化を図-6に示す。骨材の品質によってはコンクリート中の空隙が大きくなり、中性化速度も異なることが考えられる。低品質骨材を用いたコンクリートの中性化深さは、海上大気中、内陸部においても良品質を用いたものに比較するとわずかに大きくなっている。低品質骨材を用いた場合の中性化深さが良品質骨材より大きいのは、前者のコンクリートの透気性が大きいことが原因と考えられる。また、海上大気中より内陸部

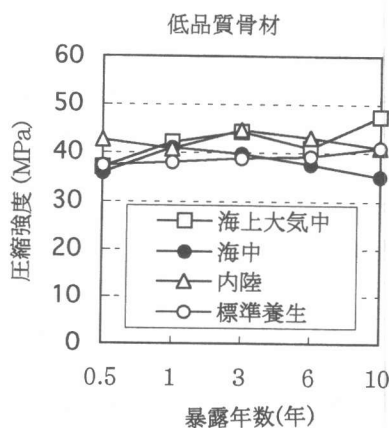
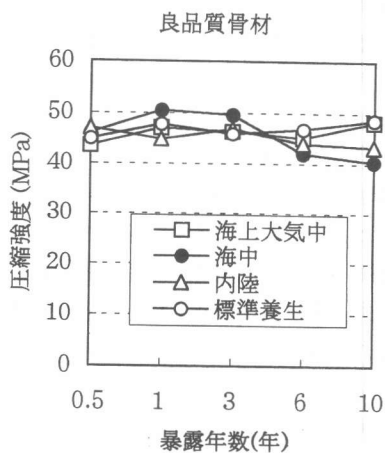


図-5 圧縮強度の経年変化

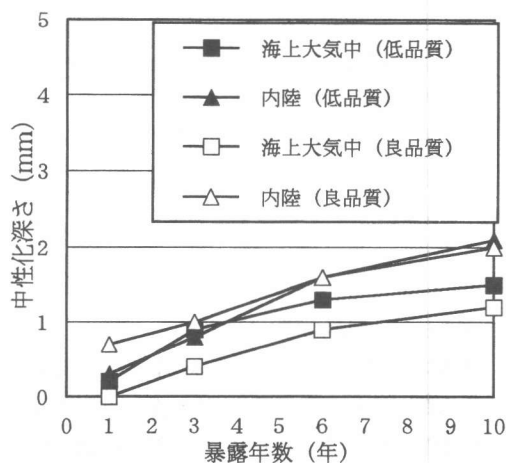


図-6 中性化深さの経年変化

の中性化深さが大きいのは、前者の降雨量が多いのと後者の二酸化炭素の濃度が高いことが影響しているものと考えられる。海中、標準養生の場合には両骨材とも中性化は認められなかった。

3. 6 塩化物イオンの浸透

水深 11m の海中と防波堤上の海上大気中に暴露したコンクリート中への塩化物イオンの浸透状況を図-7、8 に示す。暴露年数の経過とともに塩分量も増加する傾向がみられ、特に暴露 1 年から 3 年にかけて急速な塩分量の増加が認められる。しかし、表層部においては暴露 3 年目以降の塩化物量に大きな変化はみられない。海中に 10 年間暴露すると、コンクリート表面からの深さ 9cm にも塩分が浸透しているが、骨材による差異はほとんどみられない。

防波堤上に暴露したコンクリート中の表層部の塩分含有量は、骨材品質にかかわらず暴露 3 年において鉄筋を腐食させるに十分な塩分量が存在する。すなわち、暴露 10 年では良品質骨材でコンクリート重量に対し、約 $4.1\text{kg}/\text{m}^3$ 、低品質骨材で約 $6.1\text{kg}/\text{m}^3$ の塩分量が浸透している。この防波堤上のコンクリート供試体は、時々消波ブロックによって碎波された波しぶきと、飛来塩分によって塩分浸透が影響を受けることが考えられる。しかし、一方では降雨によっても表面の付着塩分が洗い流されることも考えられる。その結果、表面からの深さが 3cm より深いところでの塩

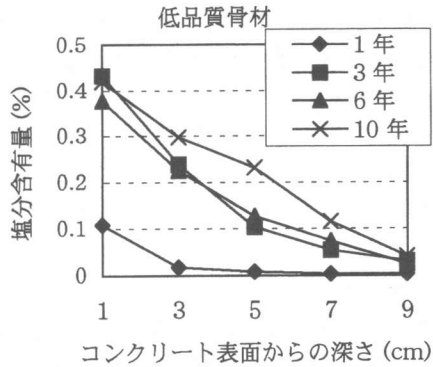
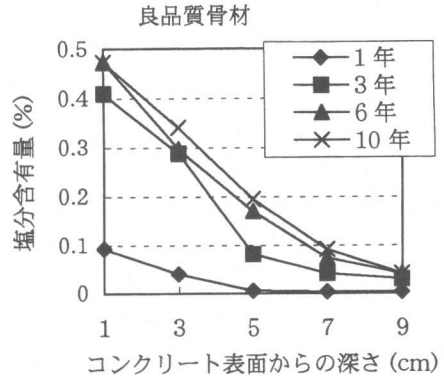


図-7 コンクリート中の塩分含有量 (海中)

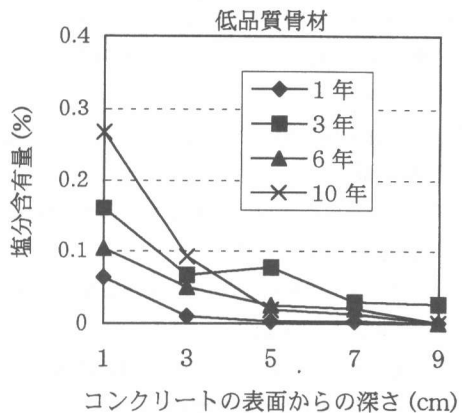
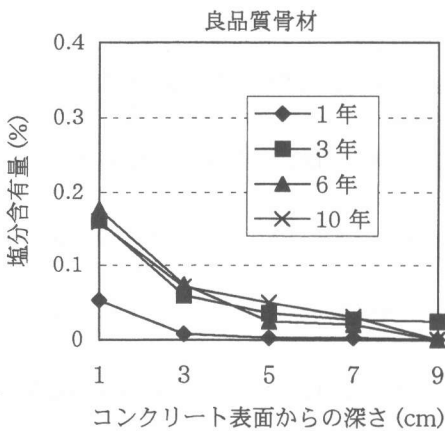


図-8 コンクリート中の塩分含有量 (海上大気中)

分含有量は、暴露年数が経過してもあまり増加しない。Ficksの拡散方程式で求めた塩分の拡散係数を図-9に示す。拡散係数は暴露年数の経過とともに小さくなる傾向がみられる。暴露環境別でみると、海中暴露のほうが海上大気中に比べて拡散係数が大きくなっている。骨材で比較すると、海中暴露の場合には低品質骨材を用いたほうが大きく、海上大気中では大差ない結果となった。

3. 7 鉄筋腐食の経年変化

各種の環境下に暴露した鉄筋腐食の結果を図-10に示す。海中に暴露したものは暴露後1年から骨材品質にかかわらず腐食がみられ、その後、年数の経過とともに緩やかに腐食が進行している。腐食が急速に進展しないのは海水中の溶存酸素量が影響しているものと考えられる。これに対し、海上大気中、内陸部に暴露した低品質骨材コンクリートの鉄筋腐食は、良品骨材を用いたものに比較して大きく、特に海上大気中では暴露10年で前者の腐食が約2倍大きい。このように低品質骨材を用いたものは、腐食の開始時期が早く、その腐食速度も早い傾向がみられる。これはコンクリート表層部の塩分量と酸素透過度が、低品質骨材を用いたコンクリートのほうが大きいことが原因と考えられる。

4. まとめ

比重の小さい吸水率の大きい低品質骨材を用いたコンクリートを海洋環境下に10年間暴露した結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 海中に暴露したコンクリートの圧縮強度は、暴露3年あたりから低下するが、海上大気中では低品質骨材を用いたものでも暴露前と大差ない。
- (2) 海洋環境下に暴露したコンクリートの中性化は、骨材品質による差異はみられない。
- (3) 海上大気中に暴露したコンクリートの塩分含有量は、表層部において低品質骨材を用いたほうが大きい。
- (4) 低品質骨材を用いたコンクリートの鉄筋腐食は、腐食開始時期が早く、腐食速度も大きい。

[参考文献]

- [1] 例えば、迫田恵三：低品質骨材を用いたコンクリートの性質，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp277～280，1985
- [2] 例えば、友沢史紀他：低品質の骨材を用いたコンクリートの性質，第4回コンクリート工学年次講演会論文集，pp97～100，1982
- [3] 迫田恵三他：海洋環境下における低品質骨材コンクリートの耐久性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp189～194，1992
- [4] 森好生他：コンクリートの耐海水性に関する研究，セメント・コンクリート，No.417，pp10～17，1981

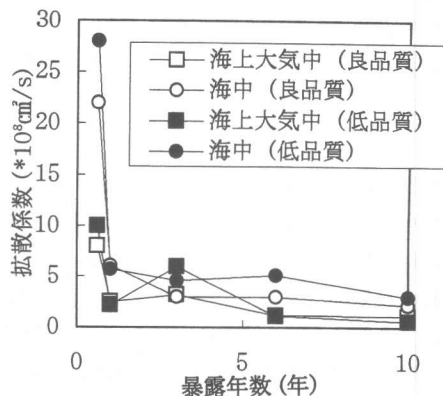


図-9 塩分拡散係数

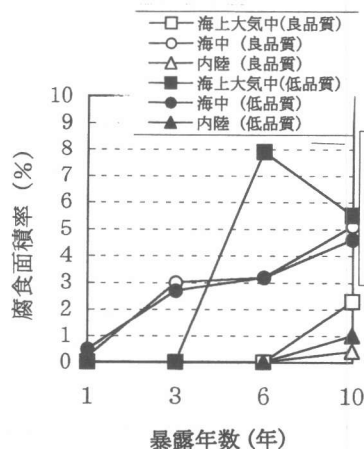


図-10 鉄筋の腐食面積率