

土 木 研 究 所 資 料

海洋構造物材料・維持管理に関する フイージビリティースタディー報告書

平成3年2月

建設省土木研究所
地質化学部化学研究室

Copyright © (1991) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

海洋構造物材料・維持管理に関する フィージビリティースタディー報告書

化学研究室 室 長 片 脇 清

佐々木 徹

部外研究員 根本 正幸

(現 日鉄防食株式会社)

要 旨

海域制御構造物などの海洋構造物に用いられる構造材料およびその維持管理技術について、新材料や非破壊検査等を含めた現状の技術動向と研究課題を調査し、とりまとめたものである。

キーワード：海洋構造物，材料，維持管理，フィージビリティースタディー

まえがき

公共事業を中心に、海洋スペースの利用について多くの計画（たとえば、MMZ計画、CCZ計画、オーシャンフロント、ウォーターフロント、湾横断道路、海上空港など）が立案されており、既にその一部は着工している。

海洋利用空間を有効に形成するための構造物は、より進んだ機能形式とデザインを持っている。そのため、海洋構造物に用いる材料も海洋条件にふさわしい高性能で耐蝕性に優れた素材を用いることが望ましい。また、構造物に関する維持管理水準もより高水準であることが要求される。

本研究は、総合技術開発プロジェクト『海洋利用空間の創成・保全技術の開発』の課題である「材料及び維持管理技術の開発」として行ったものであり、最新の技術成果をもとに、海洋材料、防食技術および維持管理技術について、各技術の現状と今後の課題をまとめたものである。

平成3年2月

化学研究室 片脇 清

目 次

まえがき

1. 材料および維持管理技術の開発目標	
1.1 海洋環境	1
1.2 海洋構造物の例	1
1.3 海洋環境の腐食性	4
1.4 海洋構造物に用いる材料	4
2. 構造材料の動向	
2.1 鋼, 金属系	7
2.1.1 高張力鋼	7
2.1.2 低温用鋼	8
2.1.3 耐候性鋼と耐海水性鋼	8
2.1.4 チタン合金	8
2.1.5 アルミニウム合金	9
2.1.6 その他	10
2.1.7 参考文献	10
2.2 コンクリート, コンクリート系	11
2.2.1 概要	11
2.2.2 コンクリートに要求される特性	14
2.2.3 耐海水性コンクリート	15
2.2.4 海中コンクリート	27
2.2.5 まとめ	30
2.2.6 今後の課題	31
2.2.7 参考文献	32
2.3 ゴム, 高分子系	33
2.3.1 構造材料用ゴム	34
2.3.2 構造材料用プラスチック	36
2.3.3 使用上の注意事項	38
2.3.4 ゴム、高分子系新材料	38
2.3.5 使用指針(案)	53
2.3.6 まとめ	55
2.3.7 今後の課題と提案	56
2.3.8 参考文献	57
2.4 繊維系	58
2.4.1 複合材料用強化繊維	58
2.4.2 膜材料用強化繊維及び基布	62
2.4.3 係留ロープ	64
2.4.4 FRC用強化繊維	72
2.4.5 ジオテキスタイル	79
2.4.6 人工海草	83
2.4.7 まとめ	84
2.4.8 今後の課題と提案	85
2.4.9 参考文献	86

3. 被覆・防食材料の動向	
3.1 有機系被覆	87
3.1.1 塗装材料	87
(1) ジンクリッチペイント	
(2) エポキシ樹脂塗料	
(3) タール系塗料	
(4) ポリウレタン樹脂塗料	
(5) ガラスフレーク塗料	
(6) 機能性塗料	
3.1.2 有機ライニング材料	91
(1) ポリエチレンライニング	
(2) レジンモルタルライニング	
(3) ポリウレタンライニング	
(4) 水中硬化型ライニング	
(5) FRPライニング	
(6) ゴムライニング	
(7) ペトロラタムライニング	
3.1.3 まとめ	93
3.1.4 今後の課題と提案	93
3.2 金属, 無機系被覆	94
3.2.1 耐食性金属ライニング	94
3.2.2 アルミ溶射	97
3.2.3 重防食鉄板巻	97
3.2.4 モルタルライニング	99
3.2.5 電着工法	101
3.2.6 耐海水性鋼巻 (高性能被膜との組合せ)	101
3.2.7 参考文献	102
3.3 電気化学的防食	103
3.3.1 総論	103
3.3.2 海域における土木鋼構造物の電気防食指針 (案)・同解説の概要	103
3.3.3 最近の電気防食の施工例	105
3.3.4 他機関の基準・規格	106
3.3.5 コンクリート構造物の電気防食	108
3.3.6 まとめ	108
3.3.7 今後の課題	109
4. 維持管理技術に関する報告	
4.1 維持管理に対する考え方	110
4.1.1 鋼構造物の維持管理	110
4.1.2 コンクリート構造物の維持管理	111
4.1.3 ゴム、高分子系構造物の維持管理	112
4.2 鋼構造物の診断技術	113
4.2.1 調査診断	113
4.2.2 鋼材の健全度評価	119
4.2.3 参考文献	121
4.3 防食材 (塗覆装) の劣化診断技術	122
4.3.1 有機被膜の劣化診断方法	122
4.3.2 無機被覆の劣化診断方法	131
4.3.3 金属被覆の劣化診断方法	133
4.3.4 参考文献	134

4.4	鋼構造物の補修技術	1 3 5
4.4.1	鋼材の補修	135
4.4.2	防食補修	135
4.4.3	ドライ工法	139
4.4.4	参考文献	139
4.5	コンクリート構造物の維持管理	1 4 0
4.5.1	総論	140
4.5.2	海洋コンクリート構造物の耐久性, 維持管理に関する規格・基準	141
4.5.3	点検技術の現状	150
4.5.4	補修技術の現状	164
4.5.5	まとめ	167
4.5.6	今後の課題と提案	167
4.5.7	参考文献	169
4.6	ゴム, 高分子材料の維持管理技術	1 7 0
5.	生物付着に関する報告	1 7 2
5.1	総論	172
5.2	付着の実態と影響	172
5.2.1	付着の実態調査結果	172
5.2.2	生物付着の影響	177
5.3	付着除去・防止および促進技術	178
5.3.1	付着除去技術	178
5.3.2	付着防止技術	179
5.3.3	付着促進技術	182
5.4	まとめ	182
5.5	今後の課題	182
5.6	参考文献	183
6.	まとめ	1 8 4
7.	今後の課題と提案	1 8 7

あとがき

1. 材料および維持管理技術の開発目標

1.1 海洋環境

日本の周囲はぐるっと海であるが、波浪さかまく外洋、波穏やかな内海、そして内湾、河口、浜辺等、海といってもさまざまである。

昔から広く親しまれた海であるが、それを利用する立場に立つと、海をとりまく自然環境が大変厳しいことに気付く。深い海中における巨大な水圧と暗黒の世界、海面に荒れ狂う大波、速い潮流、広い海原を吹き抜ける風などである。

海の表面は大小の差はあるものの、常に波立っている。通常目にする波の高さはせいぜい2 m程度であるが、台風や冬季の季節風によって来襲する波では8~10m程度になることがある。波力の大きさはいろいろな条件により異なり一概には言えないが、波高が2 mの場合で1 m²あたり2~3 tになる。厳しい条件下では、20mもの波が発生することもある。このような大きな波が海中の構造物に当たった場合、その波力は、場所や形状でも異なるが、1 m²あたり20~30 tもの大きな力となる。

このほか海には、潮位の変化に応じて海水が移動する潮流がある。潮流の流速は、海峡部の幅が狭く、干満の差が大きいところほど速く、最大で10ノット（1ノット=時速1海里=1852m/hrの速さなので、10ノットでは約5 m/sの速さとなる）に達するところもあり、海底や構造物の基礎のまわりを大きく洗掘する。

また、障害物のない大海原で、台風や低気圧が通過する場合では、風速が80m/sにも達することがあり、海上の構造物を支える力（風力）も大きく、位置や形で異なるが1 m²あたり0.1~0.6 t程度になる。

このように、海洋における自然環境が非常に厳しいため、構造物は陸上のものに比べて形や重量が大きく、海上で行う作業を非常に困難なものにしている。

海水について言えば、暖流、寒流の2つに取り囲まれているが、水温、含有栄養類、魚類も異なる。近海においては、水質も問題となる。

1.2 海洋構造物の例

MMZ、ウォーターフロント、マリフロント計画等、海岸・海洋空間の利用が進むに伴い、海洋環境下に設置される構造物は、その種類が多くなっており、これまでの海洋構造物の概念だけでは捉えにくくなっているため、計画構想を含めていくつかを紹介する。

現在の海の利用は、

- ① 港湾・都市・工業用地としての埋め立てや海上石油備蓄基地等、海を空間として利用する海洋空間利用
- ② 波浪や潮風や海面と海底の温度差を利用して発電等をする、海洋エネルギー利用
- ③ 採る漁業から育てる漁業へ向かう海洋生物資源利用
- ④ 深海のコバルトやマンガン塊の採取に代表される海洋鉱物資源利用

の4分野に分類される。

海の利用を具体的な施設で紹介すると、海洋空間利用としては、海域制御構造物（図-1.2.1）消波構造物、沖合人工島、渡海橋、沈埋トンネル、シーバース等と、海底鉱物資源の採取を目的として海底石油掘削用プラットフォームが代表的なものである。このような代表的な海洋構造物のほとんどが、昭和30年代になってから建設されている。

昭和40年代後半から、国民生活の多様化により海洋レクリエーションのニーズが起り、マリーナリゾートランド、海中展望塔や海釣り公園が出現している。

昭和50年代の後半から現在にかけては、本四連絡橋、関西国際空港、東京湾横断道路のような本格的な海洋開発プロジェクトが進められつつあり、また沖合人工島も実現化の段階にある。

海洋構造物は、いろいろな用途のものが、さまざまな環境のもとで建設され、その種類も実に多岐にわたっている。構造物を支える海底との結びつきによって、着底式、有脚式、浮体式に大別できる。

(1) 重力式構造物（着底式構造物）

着底式とは、コンクリートの塊のように重量が非常に大きなものを海底に設置し、重さで構造物を安定させるものである。

着底式構造物は普通、陸上のヤードなどで製作し、目的の場所まで運搬して、あらかじめ整形した海底面に据え付ける。本体はコンクリート製あるいは鋼性で、形は目的によりいろいろであるが、一般に箱形のものが多く、底面は平らで安定をよくしている。この形式は、重量が非常に大きいので、船などに積んで運搬するより水の浮力を利用して浮かせて運ぶ場合が多い。着底後、中に砂、コンクリート、海水などを詰め重さを増して安定させる。

この形式の構造物としては、防波堤や岸壁などの港湾構造物、埋め立て地の周囲を囲む護岸、コンクリート製石油掘削プラットフォーム、橋梁基礎などがある。

また特殊な構造として、矩形のコンクリートの箱を海底に据え付け、これを連結し、自動車などを通す沈埋トンネルがある。

(2) 有脚式構造物

有脚式構造物とは、海底地盤に打ち込んだ柱状の脚（一般には杭）により構造物を海底に固定するものである。この構造物では支える柱の大きさの限界があるので、極端に重い構造物に適用することは出来ない。また、水深が深いところで海底面から突出した長さが長くなると、わずかの水平力により大きく変形する。このため一般には、杭と杭を横桁や斜桁（ブレース）でつなぎ、全体としての剛性を高めている。構造物の重量は杭により、地中の深いところにある基盤（硬い岩盤）に伝えられるので、地盤が軟弱なところでも建設が可能である。

有脚式構造物を建設する場合は、目的の場所にまず基礎となる杭を海上から打ち込み、これを結合し、全体を一体のものとする。その後、その上に目的とする構造物を建造する。船舶を係留する栈橋、橋梁基礎、石油掘削プラットフォームなどは、この形式が多い。特殊な例として、栈橋の上を空港として利用している例もある。

(3) 浮体式構造物

浮体式構造物とは、密閉した箱形の浮体（ポンツーン）を海面に浮かべ、構造物の重さは浮力とバランスさせ、波などによって構造物に動く水平力はチェーンなどを通して海底に設置したアンカーで受け持つ形式である。この形式の難点は、波など外力を受けた場合上下、左右の動揺が大きく、使用目的によっては、適用不可能となることもある。しかし、水深が深い場所では、他の形式と比較して、経済的となる場合が多い。

浮体式も着底式と同様に、陸上のヤードなどで製作し目的の場所まで浮かせたまま運搬（曳航）し、あらかじめ設置しておいたアンカーに、チェーンまたはワイヤーロープなどで係留する。

浮体はコンクリートや鋼性のものが多い。この形式は構想中のものを含めると、いろいろ変化に富んだユニークな用途のものがあ、観光ホテル、ヘリポート、海上空港、業務用ビル、係船岸、防波堤、浮橋、石油掘削プラットフォームなどがある。

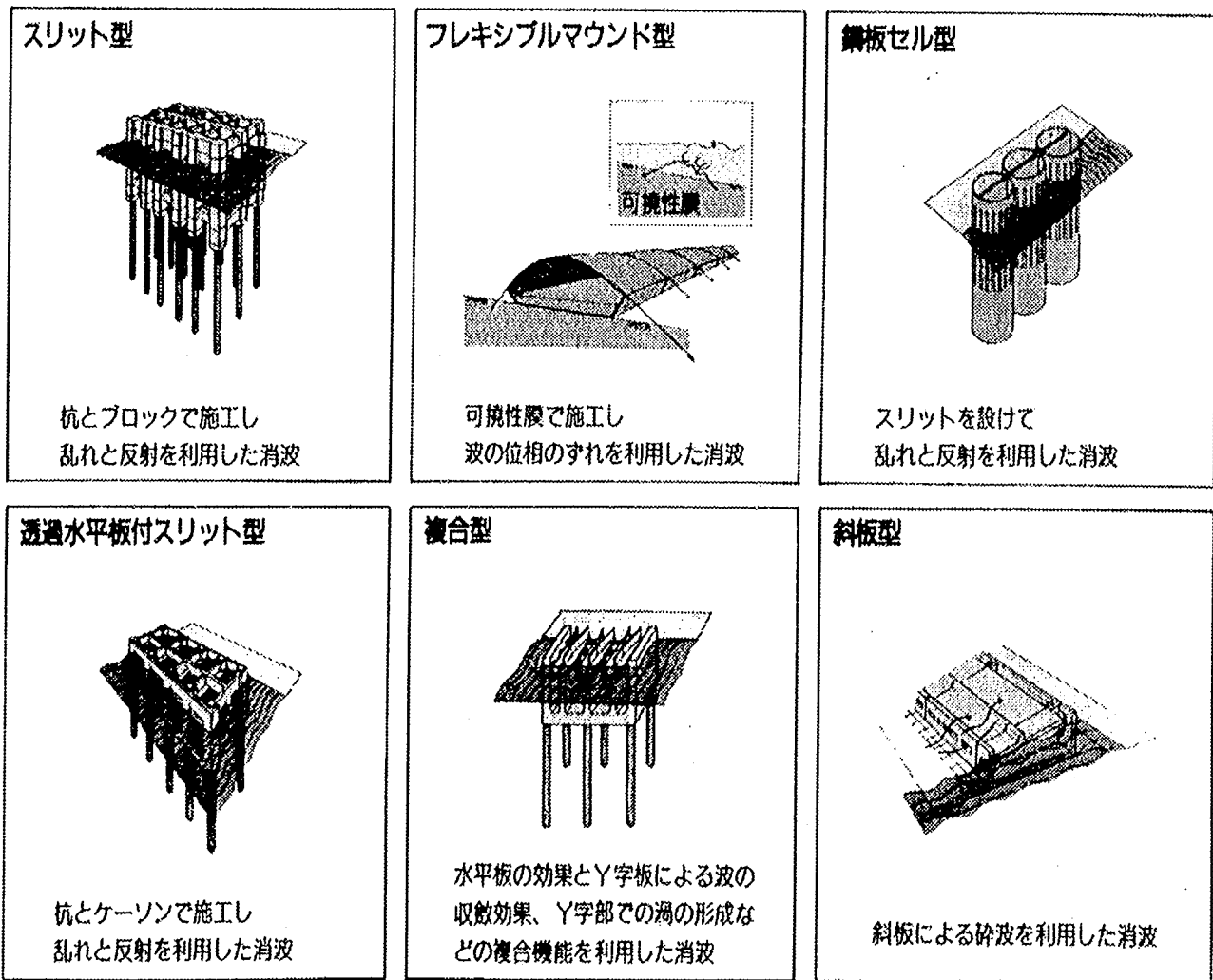


図-1.2.1 海域制御構造物の構想例

1.3 海洋環境の腐食性

海洋環境は、その垂直方向によって下記のように環境の腐食性が区分される。

(1) 海上大気部

海上大気部は飛来塩分量が多く、しかも海面よりの水分蒸発を受けて高湿度である。このため、鋼材は極めて腐食しやすく、海上はまたオゾン量や紫外線が多く、塗膜の劣化を促進する環境でもある。

(2) 飛沫・干満部

飛沫部は、海水の飛沫を直接浴び、また水中酸素量も豊富なため、腐食の最も著しい部分である。しかも、流木、漂流物、船舶等による衝撃、海洋生物の付着等、物理的影響を最も強く受ける。

(3) 海水中・海底土中部

海中部は、水線直下を除けば比較的海洋環境は穏やかな腐食条件である。しかし、点検が難しく、異常の発見が迅速に出来ないこと等、陸上環境とは全く異なる。海底面近くでは、海底砂によるエロージョン（すりへり）を受ける場合がある。

以上が各区分毎の腐食傾向であるが、橋梁の下部のように、大気中 — 飛沫帯 — 海水中 — 海底土中と複数の異なる環境に連結して接している場合には、それぞれ単一な環境に接している場合と異なる腐食挙動を示すことが知られている。

大型構造物においては、上部と下部とに大きく分けられる。上部では、大気中にのみあることが一般的である。しかし、下部は、前述のように種々の環境に接することから、その構造形式によっては、適用すべき防食方法が変化することがある。

1.4 海洋構造物に用いる材料

海洋構造物に用いる材料は、まず壊れ難いことが必要である。構造物として用いた場合は、強い波浪による衝撃や直接外力を受けるので、強い強度だけでなくねばりや耐衝撃性に優れる材料である必要がある。また、耐久性や耐海水性に優れることはもちろんであるが、海底近くに用いる場合には耐摩耗性に、また、海面近くで用いる場合には耐生物付着性も良好でなければならないであろう。

海洋条件が厳しいことは、そこでの施工も難しいことであるから、現地での施工をなるべく少なくするデザイン設計や施工方法が必要である。将来のメンテナンスを考慮すると、壊れ難いようにするか、あるいは発想を変えて壊れる部分は交換しやすいようにする、補修しやすい部分を弱点部分にする等の配慮が必要となる。このため、材料自体の寿命が明らかであるとともに、補修が可能な材料、交換しやすい材料である必要もある。

波浪が厳しいことから、剛構造の構造物の場合には重くてがっしりとした構造が用いられる。一方、ブロックを接合したような浮体形式の柔構造では、軽くて変形に追従する耐疲労性能に優れた材料が用いられる可能性がある。

この点、高耐久性コンクリート、高性能鋼材、新素材等の利用が期待される。

メンテナンスについて言えば、メンテナンスフリーが「何もしない」という意味であるならば、メンテナンスフリーは、實際上非合理的な考え方である。良好な機能を維持するとともに、不可避的な事故損傷を防ぐためには、定期的なインスペクションは不可欠である。たとえば、100年寿命の構造物を対象とする場合には、少なくとも年に一度の保守点検は必要となるであろう。

海洋作業においては、構造物に大きな変更が事実上難しいことから、程度が悪くならないうちに、損傷がひどくならないうちに手当てをすることが必要であるが、海中部や飛沫部の点検は、安全上人間が直接行うのが難しい（たとえば、潜水時間の制限、海水中の透視度の低下、飛沫部での足場や作業安全性の確保の難しさ）。このため、人手を要しない点検技術や点検機械の開発、生物付着の影響下での点検手法についても必要となる。

表-1.4.1 材料別の機能特性（例）

材 料				複 合 材 料	織 維	高 分 子 樹 脂	セ ラ ミ ッ ク ス	ガ ラ ス	機 能 性 金 属	構 造 用 金 属	コ ン ク リ ー ト	ア ス フ ア ル ト	薬 剤
新材料の 機能分類 項目	構造材的 特性	1. 機械的特性	1. 強 度	○	○	○	○			○	○	○	○
			2. 比強度										
			3. 硬 度										
			4. 制 振										
			5. 弾 性										
			6. 形記憶						○				
			7. 塑 性										
			8. 耐摩耗				○					○	
	機能材的 特性	2. 化学的特性	耐 食	○		○	○			○			
		3. 熱的特性	耐 熱			○				○			
		4. 化学的・生体的機能											○
		5. 電氣的・電子的機能											
		6. 電 氣 的 機 能							○				
		7. 光 学 的 機 能						○					
		8. 放 射 線 機 能											
土木分野 への応用 を考慮し 追加した 項目	耐 久 性 ・ 耐 候 性			○	○	○	○	○		○	○	○	○
	透 水 性 ・ 吸 水 性										○		
	遮 水 性 ・ 防 水 性										○	○	○
	流 動 抵 抗											○	
	密 着 性 ・ 接 着 性												
	施 工 性			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	低 コ ス ト												

＊）通商産業省「新素材研究会」の機能分類をもとに再構成した。

表-1.4.2 材料分類

材 料	属 性	材 料 名 (例)
コンクリート	セメント、モルタル、コンクリート、人造石またその類似物 耐久性、強度、耐水性、耐食性、軽量	軽量・耐久性コンクリート、 セメント、モルタル等
構造用金属	高強度、高硬度、強靱、制振、防振、吸振、超塑性、 耐摩耗、固体潤滑、耐食、一方向性凝固、耐熱	熱加工鋼、耐塩性鉄筋 ステンレス、チタン、高強度合金 制振合金、耐食合金等
複 合 材 料	繊維強化材料、FRP、FRM、FRC	繊維強化材料
織 維	人造の糸または繊維、糸；糸またはロープの機械的仕上げ ビームまわり、織成、組みひも、繊維処理ロープ、不織布	繊維、不織布、織布、 シート類
高 分 子 樹 脂	有機高分子化合物（無機高分子化合物）	表面被覆材、塗料、 プラスチック
セラミックス	粘土製品、組成に特長をもつ成形セラミック製品、焼成セラミック物と他の焼成セラミック物品または他の物品との加熱接合、多孔質人造石または多孔質セラミック製品	セラミックス材料
ガ ラ ス	ガラス；鉱物またはガラスウール	ガラス材料
機 能 性 金 属	磁性流体 形状記憶合金 アモルファス金属 { 形状記憶、水素吸蔵、水素吸脱 触媒、超伝導アモルファス、 磁性流体、強磁性、非磁性	形状記憶合金、 非磁性体、アモルファス 等
アスファルト	アスファルト、タール、ピッチ、ビチューメン	アスファルト
薬 剤	土壌改良剤、土壌硬化剤、水・廃水・下水汚水の処理物質 発泡性物質、着色性物質、水溶性高分子、フェノール化合物、 シアン化合物、F化合物	土壌改良剤 地盤強化剤 等
バイ オ 材 料	バイオ、微生物または酵素、その組成物、 微生物または組織の増殖、保存等	バイオマテリアル 等

*) 国際特許分類表に準拠し分類した。

2. 構造材料の動向

2.1 鋼，金属系

海洋構造物の構造材料として使用される材料には、耐食性（耐隙間腐食性を含む）、耐腐食疲労性、耐水素脆性、耐キャビテーション性、耐サンドエロージョン性、耐摩耗性、耐低温脆性などの性能が要求される。もちろん、通常の構造材料に要求される特性（強度、靱性、脆性、加工性、接合性）も必要である。そのような観点から、各種材料を比較したのが表-2.1.1であり、鉄鋼はバランスのよい優れた材料であることがわかる。鉄鋼の欠点の一つは、その耐食性にあるが、被覆法や電気防食法によってその解決を図っている。

表-2.1.1 材料特性の比較¹⁾

	鉄 鋼 (高張力鋼)	チタン合金	高分子材料	セラミックス	複合材料 (FRP)
成 熟 度	◎	△	○	△	△
強 度	○	○	×	△	○
ヤング率	○	△	×	◎	△
比 強 度	△	○	○	○	◎
延 性	◎	○	△	×	△
加 工 性	○	△	◎	×	△
高 温 強 度	○	△	×	◎	×
耐 食 性	△	◎	○	◎	○
力学特性の バラツキ (均質性)	○	△	△	×	△
量 産 性	◎	△	○	×	×
リサイクル	◎	○	×	×	×
コ ス ト	◎	×	○	×	×

2.1.1 高張力鋼

- (1) 海洋構造物に使用される主な鋼材は、40～50kg/mm² クラスのものであり、それぞれJ I S規格によって規定されている。（40～50kg/mm² 級鋼材のJ I S規格、S S材、S M材、S M A材およびS T K材のJ I S規格）

船舶に使用される鋼材は溶接性と耐脆性に優れていることが必要であるが、それらの規格はA B船級協会規格、日本海事協会船体用鋼材規格、高張力鋼に関する船級協会国際統一規格などに定められている。

- (2) 近年、海洋鋼構造物が次第に大型化する傾向にあるが、それにつれて構造物の重量を軽減することや、その部材寸法を低減する必要に迫られきた。そのため、いわゆる高比強度鋼と呼ばれる高張力鋼が石油掘削用リグやプラットフォームなどに使用されるようになった。これらに使用される鋼材は50～100kgf/mm²のものであり、60kgf/mm²以上の高張力鋼は溶接性とじん性を考慮し、溶接施工技術が検討され、その化学成分が決められている。これらの鋼材は鉄鋼各社の社内規格に定められている。上記、石油掘削装置などの他、海底探査船「しんかい2000」の耐圧殻に100kgf/mm²級の高張力鋼が使用されている。
- (3) 海洋構造物は波浪の影響を考慮して、鋼管を使用したジャケット構造が採用される例が多いが、いわゆるノード部など溶接集中部（格点部）の母材部を含む溶接部周辺の損傷が問題となる。そのため、化学成分や溶接性に注意した材質選定が必要となり、格点部は通常JIS B種、C種（SM50B、50Cなど）が使用される。

2.1.2 低温用鋼

寒冷地や液化ガス用構造物では、その溶接施工技術を十分検討し、-30℃でもじん性を失わない低温用鋼が使用されることがある。低温用鋼の規格には日本海事協会規格、鉄鋼メーカー社内規格などがある。

2.1.3 耐候性鋼と耐海水性鋼

海洋構造物は、その設置環境が厳しい腐食環境にあるため、いかに防食するかが重要な課題である。そのため、海洋構造物は通常、塗覆装や電気防食によって防食されている。また、海洋構造物は一旦海洋に設置されると、その補修や点検が困難であるため、可能な限り長期の耐食性を有することが望ましい。その目的のために、鋼材自体の耐食性を向上させた材料が使用されることがある。それらは、耐海水性鋼や耐候性鋼と呼ばれるもので、耐海水性鋼は飛沫帯や干満帯に、耐候性鋼は大気部に使用されるのが普通である。いずれも、無防食で使用するよりも、防食塗装など防食手段を講じることによって、その長期耐久性を図る方が得策である。塗装との併用による耐海水性鋼の長期耐久性確認試験が、建設省土木研究所を中心として、実スケールの海洋構造物を用いて行われている。

2.1.4 チタン合金

チタン合金の特性例を表-2.1.2に示す。

チタン合金は海水環境での耐食性に優れており、軽量（鉄の1/2の比重）で比強度が高いため、海水淡水化装置の熱交換器、深海潜水船などに使用されている¹⁾。また、プラットフォーム部材、マリンライザ等にも採用されており³⁾、炭化水素類の深海生産、電解次亜塩素酸イオン発生や、海洋熱エネルギー変換システムなどへの使用が検討されている⁴⁾。

表-2.1.2 チタンおよびチタン合金の引張特性

	合 金 名 (組成%)	熱処理	引張性質 (室温)			備 考	溶接性
			引張強さ kgf/mm ²	耐 力 kgf/mm ²	伸び (%)		
α 型 near α	C PチタンJIS 1種(0<0.15)	加工材	28~42	>17	>27	数値の幅は不純分と加工度	有
	C PチタンJIS 2種(0<0.20)	加工材	35~52	>22	>23		有
	C PチタンJIS 3種(0<0.30)	加工材	49~63	>35	>18		有
	Ti-Pd Pd(0.12~0.25)	焼 鈍	43	32	26	耐食性良	有
	Ti-5Ta	焼 鈍	40	30	6	耐食性良	有
	5-2.5(5Al-2.5Sn)	焼 鈍	87	83	18	α 型の初期開発	有
	5-2.5ELI	焼 鈍	78	65	20		有
	8-1-1(8Al-1V-1Mo)	焼 鈍	112	105	15	高強度	
	6-2-4-2-S(6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si)	焼 鈍	91	—	15	耐熱・耐クリープ	
	IM1685(6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si)	焼 鈍	108	90	12	耐熱・耐クリープ	
$\alpha + \beta$ 型	6-4(6Al-4V)	焼 鈍	101	93	14	汎用性大	有
	6-4(6Al-4V)	時 効	119	113	10		
	6-4ELI	焼 鈍	91	84	15	極低温靱性	有
	6-2-4-6(6Al-2Sn-4Zr-6Mo)	時 効	129	120	10	高温強度大, 焼入性	
	6-6-2(6Al-6V-2Sn)	時 効	130	119	10	高温強度大, 焼入性	
	IM1679(11Sn-5Zr-2.5Al-1Mo-0.25Si)	時 効	130	116	11	高温特性良	
β 型	13V-11Cr-3Al	時 効	130	125	8	初期の開発	
	β III(11.5Mo-4.5Sn-6Zr)	時 効	141	134	11	加工性良・強力	有
	β C(4Mo-8V-6Cr-3Al-4Zr)	時 効	147	140	7	加工性良・強力	
	10V-2Fe-3Al	時 効	125	118	8	加工性良・強力	
	8Mo-8V-2Fe-3Al	時 効	133	126	8	加工性良・強力	
	15-5(15Mo-5Zr)	時 効	160		7.5	加工性良・耐食性(要 ω 注意)	有
	15-5-3(15Mo-5Zr-3Al)	時 効	150	147	14	加工性良・強力	

2.1.5 アルミニウム合金

軽量で耐食性が良いので、漁船など小型船舶や水門、潜水船の耐圧殻、石油掘削装置やヘリコプター台等を使用されている。潜水船の耐圧殻に使われる主な材料の例を表-2.1.3に示す。

表-2.1.3 潜水船の耐压殻に使われる主な材料の例⁵⁾

材 料 の 種 類		密度 ρ g/cm ³	0.2%耐力 kgf/mm ²	引張強さ kgf/mm ²	ヤング率 kgf/mm ² $\times 10^{-4}$	比 強 度 耐力/ ρ	使 用 例
超 高 張 力 鋼	HY-100	7.85	≥ 70	—	2.1	8.9	ALVIN (建造時)の耐压殻
	HY-140	7.85	≥ 91	—	2.1	11.6	DSRVの耐压殻
	NS 90	7.85	≥ 90	約100	2.1	11.5	しんかい2000の耐压殻
	10Ni-8Co	7.85	≥ 120	約130	2.1	15.3	—
	18Ni-Maraging	8.04	≥ 140	≥ 148	1.9	17.4	Deep Quest耐压殻
チ タ ン 系	Ti-6Al-2Cb-1Ta-0.8Mo	4.49	70	80	1.20	15.6	ALVINの耐压殻
	Ti-6Al-4V (焼鈍)	4.43	≥ 84	≥ 91	1.15	19.0	ALVINの浮力球 DSRVの外殻骨組
	Ti-6Al-4V (焼鈍BLI)	4.43	81	88	1.15	18.3	しんかい2000の耐压容器
アルミ合金 7079-T6		2.74	47.8	54.8	0.7	17.4	ALUMINAUT の耐压殻

2.1.6 その他

最近、石油掘削が次第に深海に移りつつあり、そのため固定式のプラットフォームではなく、いわゆる柔構造を有するテンションレグプラットフォーム (Tension Leg Platform) が建設されるようになり、その係留部材として、平行ワイヤーが採用されている。海上長大橋である本州四国連絡橋には 160t/kg/mm²以上のパラ

レルワイヤーストランドが使用されており、明石大橋には 180t/kg/mm²以上のものが使用される計画である。また、これら平行ワイヤーは、浮魚礁の係留部材として実用されている。チェーン用に95kgf/mm²級丸鋼、テンションレグ用に 3.5%

Ni-Cr-Mo-V 鋼が使用された例もある。また、海底マンガング塊採掘用揚鋼管に 105t/kg/mm²の高張力鋼の使用が計画されている。

2.1.7 参考文献

- 1) 角田 他：科学技術庁材料技術研究所 研究報告集 9, P.327~338, 昭和63年度版 2)
木村啓造：鉄と鋼, Vol.72, P.113, 1986
- 3) HANSON, C, F: Int. Conf. Adv. Corros. Resist. Steels Met.,
Alloy of Offshore, P150~158, 1987
- 4) LUNDE, L : Int. Conf. Adv. Corros. Resist. Steels Met.,
Alloy of Offshore, P109~149, 1987
- 5) 浜田 馨：鉄鋼界, Vol. 8, P.60, 1984

2.2 コンクリート，コンクリート系

2.2.1 概要

コンクリートは、表-2.2.1に示す構成材料からなる複合材料であり、利用目的に応じ、構成材料の選択、配合設計でその特性を幅広く変えることができる。また、型枠の中に流し込み、締固めることにより、自由な形状に加工することができ、内部に鉄筋またはP C緊張材を配して引張りに弱いというコンクリートの欠点を補い、鉄筋コンクリートまたはプレストレストコンクリートとして構造材料に使用される。強度、耐久性に優れ、安価であるため通常の陸上構造物と同様、海岸・海洋構造物においても主要な建設資材として用いられている。

表-2.2.1 コンクリートの構成材料

① セ メ ン ト	コンクリートをつくる材料のうち骨材を結合するという最も重要な役割をもつ。セメントの種類には次のようなものがあり、目的に合致した使用が必要である。 ・ポルトランドセメント（普通，早強，中庸熟，超早強，耐硫酸塩） ・混合セメント（ポルトランドセメントにポゾラン反応物質を混和材料として加えたもの）→高炉セメント，シリカセメント，フライアッシュセメントなど ・その他→アルミナセメント，超早硬セメント，白色セメントなど
② 骨 材	セメントおよび水と練り混ぜる砂，砕砂，砂利，碎石，その他これに類似の材料をいう。不活性材料であり，アルカリ骨材反応などのないものを選定する必要がある。骨材はその粒径により粗骨材と細骨材に分類される。また，生産される場所により，天然骨材（川砂，川砂利，海砂，海砂利，山砂，山砂利など），碎石（岩石碎石，玉石碎石），人工骨材（高炉スラグ碎石，砕砂，人工軽量骨材など）に分類される。 注）・粗骨材：5mmのふるいに重量で85%以上とどまる骨材 ・細骨材：10mmのふるいを全部通り，5mmのふるいを85%以上通過する骨材
③ 水	コンクリート中のセメントは，水と結合して水和物を生成し，硬化する。また，コンクリートの施工時の流動性を与える。セメント（ポルトランドセメント）が完全に水和すると，その重量の約1/4の水と化学的に結合し，結合するとその水は容積が3/4に減少するといわれている。コンクリートに使用される水は，塩分や有害物質を含まないことが肝要である。
④ 各 種 混 和 材 料	混和材料は，セメント，水，骨材以外の材料としてコンクリートに特別な品質を付加することを主目的に用いられる。一般に，混和材料は所要の性能を得るための使用量の多少によって，混和剤と混和材に大別される。 ・混和材：使用量が比較的多くて，それ自体の容積が配合の計算に関係するもの ・混和剤：使用量が比較的少なく薬品に用いられ，それ自体の容積がコンクリートの配合の計算において無視されるもの。

コンクリートの各構成材料の技術的変遷の概要を表-2.2.2に示す。セメントについては、現在既にその特性がかなり調べられており、各種基準類もかなり整備されている。また、骨材や水については、コンクリートの品質に悪影響を与えるようなものを使用しない注意は必要であるが、コンクリートに新しい特性を付加できる余地は小さい。それに比べて、混和材料は近年最も技術進歩が著しく、今日ではほとんどあらゆるコンクリートに何等かの混和材料（混和剤および混和材）が用いられており、その技術開発動向については注目すべきものがある。各種混和剤の種類と特徴を表-2.2.3に示す。

海洋構造物材料としてコンクリートに要求される最も重要な特性として、ここでは耐海水性を取り上げ、耐海水性コンクリートを作るための各種混和材料を中心とした技術の現状と動向について述べる。

なお、広い意味のコンクリートの定義では、骨材を結合材（セメント）で固めた材料を指すので、例えばアスファルト・コンクリートやレジン・コンクリート（結合材として鉱物質の物質を使用せず熱硬化性ポリマーを用いたもの）等までも含まれるが、ここではセメント（結合材）としてポルトランドセメントまたは混合セメント（ポルトランドセメントにポゾラン反応物質を混和材料として加えたもの）のみを取り扱う。

表-2.2.2 コンクリート各構成材料の変遷一覧表

年 代	セメント	骨 材	水、混和材料
明治	(8) セメント生産開始 (38) 日本ポルトランドセメント試験法告示		(32) 佐世保軍港ポゾラン使用
大 正	(2) 高炉セメント使用 (14) 高炉セメント試験方法告示		
昭和 (1926)	(5) ポルトランドセメント JES 高炉セメント JES	(4) 建築学会仕様書（骨材規定） (6) 土木学会示方書（骨材規定）	
10	(13) 早強セメント JES (16) ケイ酸質セメント JES (16) セメント軟練り試験 JES		(13) アメリカで AE 剤、減水剤使用 (15) アメリカでフライアッシュ使用 (19) ACI-212 混和材料
20	(25) ポルト、高炉、レリカセメント JIS (28) 中熱セメント JIS	(25) 火山性コンクリート実施 (28) 砕石利用研究 (29) 海砂の研究開始	(23) AE 剤導入 (26) 減水剤導入 (29) 建築用セメント防水材 JIS
30	(32) 真密度試験 (JASS 5). (35) フライアッシュセメント JIS	(30) 軽量骨材 JIS (32) 海砂塩分 0.01% 以下 (JASS 5) (36) 砕石 JIS (37) この頃から河川規制 山砂、海砂使用 (39) 人工軽骨構造基準 (建設省)	(31) AE 剤規格案 (土木学会) (33) フライアッシュ JIS
40	(48) 超早強セメント JIS 強度値アップ	(41) 河川砂利基本対策 (建設省) (48) 人工軽骨性能判定基準 (建設省)	(40) 膨張材市販 (42) 化学混和剤規格案 (材料学会)
50	(53) 耐硫酸塩セメント JIS (54) セメント混入物比率変更 JIS	(50) 骨材品質等級 (JASS 5) (52) 海砂使用規定 (建設省) (52) 高炉スラグ粗骨材 JIS (53) 生コン JIS 骨材付属書 (55) 砕砂 JIS この頃から AAR 発生 (56) 高炉スラグ細骨材 JIS	(50) 流動化コンクリート実施 (50) 表面活性剤品質規格 (JASS 5) (50) 回収水使用規程 (JCI) (53, 54) 膨張剤指針 (建築、土木) (55) 膨張材 JIS (57) 鉄筋コンクリート用防せい剤 JIS (57) 化学混和剤 JIS (58) 流動化コンクリート指針 (JASS 5)
60	(61) 低アルカリ形セメント JIS	(61) 塩分総量 AAR 規制 (建設省)	

表-2.2.3 混和剤の種類と特性

種 類	主 要 成 分	機 能	効 果
1. AE 剤	樹脂せつけん、合成界面活性剤 (アニオン、カチオン、両性)	界面張力低下とセメント疎水化に より安定微細空気を進行	ワーカビリティ改善、材料分離低減、 耐凍結融解性改善、フィニッシュビ リチー改善
2. 凝 結 調 整 剤 2.1 促 進 剤 2.2 遅 延 剤	塩素系、非塩素系、その他注1) 有機、無機化合物注2)	セメントと水との反応促進 セメントと水との反応遅延	早期強度増大、寒中コンクリート、 早期成型、打設可能時間拡大、コー ルドジョイント防止、暑中コンクリ ート、マスコンの初期水和熱低減
3. 減 水 剤	リグニンスルホン酸塩、グルコン 酸塩、界面活性剤、ポリオール、 NSF注3)、MSF注4)	セメント表面に吸着し、セメント を分散させ凝集を防ぐ。	単位水量を低減し、強度・耐久性を 向上し、またはセメント量の低減が 可能で、水和熱による収縮ひびわれ 防止
4. 高性能減水剤	3. 減水剤と同じ	3. 減水剤と同じ 使用増による効果増大	大幅に単位水量を低減、高強度コン クリートの製造
5. AE 減 水 剤 5.1 標 準 形 5.2 遅 延 形 5.3 促 進 剤	3. 減水剤、1. AE 剤、2.1 促進剤 3. 減水剤、1. AE 剤、2.2 遅延剤 3. 減水剤、1. AE 剤、2.2 促進剤	3. 減水剤と 1. AE 剤の両機能 3. 減水剤、1. AE 剤と 2.2 遅延剤 の3機能 3. 減水剤、1. AE 剤と 2.1 促進剤 の3機能	3. 減水剤と 1. AE 剤の両効果を示 す。 3. 減水剤、1. AE 剤と 2.2 遅延剤 の3効果 3. 減水剤、1. AE 剤と 2.1 促進剤 の3効果
6. 高性能 AE 減水剤 6.1 標 準 形 6.2 遅 延 形	5.1 AE 減水剤または新規合成化 合物注5)	5. AE 減水剤の機能向上または 4. 高性能減水剤のスランプ保持	大幅に単位水量低減、高強度コンク リート、高耐久コンクリートの製造
7. 流動化剤 7.1 標 準 形 7.2 遅 延 形	NSF注3)、MSF注4)、1. AE 剤 NSF、MSF、ポリカルボン酸系化 合物、その他新規合成化合物、1. AE 剤	3. 減水剤、5. AE 減水剤の後添 加による性能向上	単位水量同一でスランプ増大
8. 増粘剤・保水剤	水溶性高分子化合物注6)	水の増粘による粒子間の粘着凝集 力と保水性向上	プラスチシティー増大、材料分離低減
9. 特殊水中コンクリ ート用混和剤	8. 増粘剤、消泡剤、流動化剤	粒子間の粘着凝集力と保水性向 上、流動性付与	コンクリートの水中での打込み時の 分離防止
10. 超 遅 延 剤	2.2 遅延剤と同じ	2.2 遅延剤の機能向上	コンクリートの凝結時間の大幅な遅 延
11. 収 縮 低 減 剤	合成界面活性剤注7)	水の表面張力の大幅低下	乾燥収縮の低減
12. 耐 寒 剤	塩素系の凝結促進剤、NSF また は MSF	凍結温度の低下、低温時のセメン ト水和の促進	低温時の強度発現
13. 急 結 剤	1) 無機塩類注8) 2) アルミン酸カルシウム、CSA	1) 間隙水中の水酸化カルシウム と反応して不溶性化合物を析出 2) 水と急速に反応して硬化	凝結時間を数秒～数分に短縮
14. 発 泡 剤	金属アルミニウム粉末	セメントから溶出するアルカリと 反応して水素ガスを発生	セメントペースト膨張による充填性 向上、発泡コンクリートの製造
15. 起 泡 剤	1. AE 剤またはたんぱく分解物	1. AE 剤と同じ	軽質または断熱コンクリートの製造
16. 防 水 剤	1) 親水剤(高級脂肪酸系) 2) 微粉末鉱物 3) 高分子エマルジョン 4) 凝結促進剤	1) 吸水性の低減 2) 毛管空隙の充填 3) 不透水層の形成 4) 水和反応促進(ゲル生成促進)	コンクリートの吸水・透水性の低減
17. 鉄 筋 防 せい 剤	亜硝酸カルシウム	鉄のイオン化抑制	鉄筋の腐食防止
18. ポリマーコンクリ ート用混和剤	セメント混和用ポリマーディスパ ージョン	コンクリート中にポリマー層を形 成	不透水性の向上、接着力の増大
19. プレパックドコン クリート用混和剤	発泡剤、減水剤、増粘剤、遅延剤	水素ガス発生および粘性、保水性 付与	膨張による充填性向上、流動性改善
20. 水和熱低減剤	デキストリン	セメントと水との反応を抑制	コンクリートの水和熱の低減

注1) 塩素系として塩化カルシウム、非塩素系として亜硝酸塩、硝酸塩、硝酸塩、硝酸塩、硝酸塩、硝酸塩等の無機化合物、有機化合物、トリエタノールアミン等の有機化合物がある。

注2) リグニンスルホン酸塩、オキシカルボン酸塩、糖、糖酸化合物、ケイフ化合物

注3) ナフタリンスルホン酸とホルマンリン化合物の塩

注4) メラニンスルホン酸とホルマンリン化合物の塩

注5) 高性能 AE 減水剤として特殊リグニン、カチオンまたは両性化合物、陰性化合物等を添加したものが最近開発された。

注6) メチルセルロース、エチルセルロース、ヒドロキシエチルセルロース等のセルロース誘導体とポリエチレンオキサイド、アクリル系の高分子化合物等がある。

注7) 水の表面張力を低下させ空気進行性のない非イオン系の界面活性剤

注8) アルミン酸ソーダ、ケイ酸ソーダ、炭酸ソーダ等の化合物

2.2.2 コンクリートに要求される特性

一般にコンクリートは構造材料として表-2.2.4に示す特徴を有している。構造材料としてコンクリートの品質に対する要求は近年ますます多様化高度化しており、強度特性、耐久性、施工性、経済性等に優れた品質が期待されており、また、そのために必要な研究、開発が進められている。

表-2.2.4 コンクリートの構成材料としての特徴

長 所	短 所
①繰返し荷重による疲労に強く、耐衝撃性に優れる。 ②透水性、透油性、通気性が比較的小さく、内部に配した鋼材を保護することができる。 ③低温環境でもかえって強度が増し、凍結融解作用にも比較的強い。	①曲げ荷重の作用する引張側のコンクリートは、引張に弱いめかぶりの剝落、ひびわれ等が生じ易く、内部の鉄筋が腐食する原因になる。 ②材料の選択、配合、練り混ぜ、運搬、打込み、締固め、養生といった一連の施工管理が重要であり、出来上がりの品質が施工に大きく影響される。

コンクリート構造物は、その長所を生かし、短所を克服するような用い方をすれば、本来耐久性に優れメンテナンスが不要であり、50～100年といった寿命も想定できる。しかしながら、海洋という厳しい環境下では、維持管理、補修は陸上に比べて著しく困難なこと、また今日社会資本の長寿命化が叫ばれていることから、海水に対しての耐久性は、海洋構造物材料としてのコンクリートに求められる最も重要な特性である。

海岸・海洋の構造物は陸上の物に比べてはるかに苛酷な気象条件、海象条件（波浪、波しぶき、潮風、潮の干満による乾湿の繰返し、化学的な腐蝕、海生物の付着など）にさらされており、コンクリート構造物の寿命も陸上構造物と比べてある程度短くなることはやむを得ない。ところが近年海岸近くの内陸部構造物に10～15年程度といった著しく短い年数でコンクリートに何等かの劣化が見られる現象が発生し、その発生機構の解明と補修対策が問題となっている。この原因として、①塩害、②アルカリ骨材反応、③不適切な設計・施工等が考えられており、現在では、各種基準も整理されて、塩分量の総量規制、反応性骨材の使用制限などの対策が取られるようになったので、今後コンクリート構造物の早期劣化は少なくなるものと考えられる。

海水環境におけるコンクリート構造物の主な劣化の要因を表-2.2.5に示す。構造物の劣化要因としては、コンクリート自身の劣化と、内部鉄筋の腐蝕による劣化があるが、鉄筋の腐蝕によるものが支配的である。従って、コンクリートの耐海水性を向上するためには、水密なコンクリートの打設を行ない、コンクリート中への海水浸透を極力押さえ、鉄筋を海水から保護することが重要である。

表-2.2.5 海水環境におけるコンクリート構造物の劣化要因

項 目	種 類		原 因	コンクリート・鉄筋への影響
コンクリート自身の劣化	化学作用	水酸化石灰の溶出 硫酸塩による浸食	接する海水への溶解、 キャピラリー水への溶解 海水中の硫酸塩の作用	コンクリート表層からの多孔質化 pHの低下 セメントパチルスの形成と結晶体の内部膨張
	物理作用	凍結・溶解作用 摩耗・損傷作用	気象作用 漂砂、流水、流木	
鉄筋の腐食に関連する劣化	コンクリート中腐食	炭酸化 塩分の作用	水酸化石灰と炭酸ガスの反応 使用材料（海砂、混和剤など）に含まれるもの。海水からの浸透	コンクリートのpHの低下 塩素イオンの解こう作用による不動態皮膜の破壊
	ひびわれ断面における腐食		荷重・外力・乾燥・収縮	塩分・湿分の浸透と鉄筋腐食

2.2.3 耐海水性コンクリート

コンクリート構造物の耐久性を向上し、劣化を防止する対策として現在表-2.2.6に示すような方法が取られている。この中で、Aの方法はコンクリート構造物の耐久性を向上するための基本であり、コンクリートに関する各種基準類にも記されている通りである。Bのさまざまな方法は既にAの方法が採用されており、施設の重要度、構造物の設置されている環境条件等により、更に耐久性を増す必要がある場合に用いられる。これらの方法は、新材料、新工法等によって積極的に鋼材の腐食を防止するものであり、各種機関によって研究開発が進められている。

ここでは、これらのコンクリートの耐海水性向上対策の中で、直接コンクリートの品質自体を改善し、水密性を高める方法1.について述べる。他の2つの方法、2.および3.も非常に有力なものであるが、これらについては2. 1節および3章を参照されたい。

表-2.2.6 その1 コンクリートの耐海水性向上対策の分類

第 1 種防食法 コンクリートがもともと持っている防食効果のみを利用する方法	
・従来のコンクリートの材料、配合、施工法を見直す。 ・かぶりを大きくとる。 ・コンクリートのひびわれ幅を制限する。	
第 2 種防食法 第1種防食法以外に防食対策を行い耐久性向上を期待する方法	
1.	コンクリートの品質を改善し密実性を高める事により海水の侵入を抑制する方法
①	水セメント比の小さいコンクリート コンクリートの水セメント比を小さくすることでコンクリートの気密性、水密性を向上させて、海水のコンクリート中への侵入を抑制 ・混和剤→A E 剤、減水剤、高性能減水剤、A E 高性能減水剤、流動化剤等
②	混合セメントを用いたコンクリート ポゾラン活性あるいは潜在水硬性を有するコンクリート混和材を用いて、コンクリートの組織を緻密化させて、海水のコンクリートへの侵入を抑制 ・混和材→高炉スラグ、フライアッシュ、シリカフェーム等
③	低発熱型セメント 水和時の発熱をおさえてひびわれの発生を抑制
④	ポリマーセメントコンクリート ポリマー混和剤を混入し、コンクリートの気密性、水密性を向上させて、海水のコンクリートへの侵入を抑制
⑤	繊維補強コンクリート コンクリートに不連続な短い繊維を混入させて、コンクリートの引張強度を増し、ひびわれを抑制することにより、海水のコンクリートへの侵入を抑制 ・繊維→炭素繊維、鋼繊維、ビニロン等

表-2.2.6 その2 コンクリートの耐海水性向上対策の分類（つづき）

2.	コンクリートの表面を処理し、海水の侵入を阻止または抑制する方法
①	表面塗装 コンクリートの表面に防護膜を形成して海水の侵入を抑制 ・塗料→主に樹脂塗料
②	含浸塗装 コンクリート表面に含浸剤を浸透させてコンクリート内の空隙部を充填したり、撥水性を付与し、海水の侵入を抑制 ・含浸剤→シリコン系、アクリル系等
③	モルタル被覆 コンクリート表面に厚さ数mm以上のモルタルを被覆する方法 ・モルタル→ポリマーセメントモルタル、レジンモルタル等
④	永久型枠 遮蔽性に優れたパネルを構造物の永久型枠として用いる方法 ・型枠材料→判マ-含浸コンクリート（P I C）、ガラス繊維補強コンクリート（G R C）等
3.	海水がコンクリート中に浸透してきても、鉄筋が腐食しないように鋼材自身に防食性をもたせる方法
①	被覆防食：鋼材を錆びないように被覆する方法 a. 特殊鋼（表層部の材質が異なる）→ステンレス、クラッド鋼 b. 非金属被覆→有機物被覆：エポキシ鉄筋
②	電気防食 a. 外部電源方式：被防食体を直流電源装置の－側に、電解質中（海水）に設置した耐久性電極を電源装置の＋側に接続して、防食電流を連続して流す方法 b. 流電陽極方式：電解質中の被防食体に対して卑な電位を有する合金陽極を電気的に接続し、両者の電位差による電池作用を利用し連続的に防食電流を流す方法
③	耐塩性鉄筋：化学成分を調整することで耐食性能を備えた鉄筋 通常の異形棒鋼にC u－WあるいはN iを添加して錆抑制効果を持たせたもの→C u－W系高純度鋼鉄筋、3.5 %N i系高純度鋼鉄筋等
④	プラスチック補強材 a. F R P ロッド：カーボン繊維系、ガラス繊維系、ガラス/カーボン繊維系、アラミド繊維系、ビニル系 b. メッシュ状成形F R P、立体成形F R P
⑤	P C材料：定着具の耐食性にも配慮する必要あり a. 鋼製シース b. プラスチックシース（シースとコンクリートの付着離れが問題） ・ポリエチレン、ビニール、硬質ポリプロピレン等のシース c. エポキシコーティッドP Cストランド（エポキシ粉体塗装P C鋼材） ・ストランド、ゲビンデ棒鋼（異形ネジ鋼棒）に用いられている d. シースとP Cストランド（グリース等充填アンボンド工法） ・P C鋼より線にグリースおよび高密度ポリエチレンを連続的に被覆した鋼線

(1) 水セメント比の小さいコンクリート

一般にコンクリートは、水セメント比 W/C （コンクリート配合時の水とセメントの重量比）を小さくすることにより、ブリージングによる空隙や毛細管空隙が減少しコンクリートの水密性が向上する。また、水セメント比が減少した結果、コンクリートの強度、耐摩耗性も向上し良質なコンクリートをつくることができる。

コンクリート中のセメント粒子が水和反応するのに実際に必要な水分量はセメント量の約 $1/4$ 程度と言われており、それ以上水分を加えているのはワーカビリティ（作業性）を向上させるためである。従って、所定のワーカビリティが得られる範囲で、できるだけ単位水量を少なくすることが密実な良いコンクリートを打つための条件となる。

水セメント比の小さいコンクリートをつくるためには、表-2.2.7に示す各種混和剤が用いられる。これらは、一種の表面活性剤であり、セメント粒子に対する湿潤、分散作用により、コンクリートの流動性を良くしワーカビリティを改善し、所定のコンシステンシー、強度を得るのに必要な単位水量および単位セメント量を減少させることができる。

表-2.2.7 水セメント比を小さくするための混和剤

名 称	特 徴
A E 剤	コンクリート中に独立した微細な空気泡を連行し、ワーカビリティの改善や凍結融解に対する耐久性向上のために用いる。化学成分としては、アニオン（陰イオン）系およびノニオン（非イオン）系の界面活性剤が用いられている。
減 水 剤	空気を連行することなく、セメント粒子に対する湿潤、分散作用により、コンクリートのワーカビリティを向上させ、所定のコンシステンシーおよび強度を得るのに必要な単位水量、単位セメント量を減水させるために用いる。
A E 減水剤	A E効果と減水効果を合せ持つ混和剤。化学成分は、①固体－液体間での界面活性作用によってセメント分散効果を発揮する成分、②液体－気体間で作用して微小空気泡を連行する界面活性剤の成分、③セメントの水和反応に関与して凝結効果速度の調節作用を持つ成分から構成されている。
高 性 能 AE減水剤	A E減水剤の減水効果を高めたもので、スランプの経時変化が少ない特徴がある。
流動化剤	あらかじめ練り混ぜられたコンクリートに添加し、これを攪拌することによって、その流動性を増大させることを主とする混和剤。化学成分的には高性能減水剤とほぼ同じ。

① 材料

混和材料としては、表-2.2.7に示す各種混和剤があげられる。これらの化学混和剤の効果は、コンクリートの単位水量、単位セメント量の低減、ワーカビリティの改善、耐凍害性の改善、凝結時間の調整などが含まれている。これらの混和剤は、1930年代に米国でAE剤の発見がなされて以降、下記に示す順で開発が進められてきている。初めは、コンクリートのポンプ打ちによる急速施工、良質な骨材の不足によるコンクリートの品質の低下に対する対応として開発されてきたが、優れた特性を生かし、コンクリートの高強度化、水密化のために利用されている。表-2.2.8、表-2.2.9にAE剤、減水剤、AE減水剤の主な特性を示す。

なお、AE剤、減水剤、AE減水剤の品質については、JIS A 6204「コンクリート用混和剤」（AE剤、減水剤、AE減水剤）に、流動化剤の品質については、土木学会「コンクリート用流動化剤品質基準（案）」に規定されている。

表-2.2.8 表面活性剤の主要効果一覧表（日本建築学会指針より）

表面活性剤の種類		A E 剤	減 水 剤			A E 減水剤		
			標準形	遅延形	促進形	標準形	遅延形	促進形
フレッシュコンクリート	単位水量の減少	○	△	△	△	◎	◎	◎
	単位セメント量の減少	—	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	空気連行性	◎	—	—	—	◎	◎	◎
	ワーカビリティの改良	◎	○	○	○	◎	◎	◎
	ブリージングの減少	◎	△	△	△	◎	◎	◎
	コンクリートの凝結の遅延	—	—	◎	×	—	◎	×
	コンクリートの凝結の促進	—	—	×	△	—	×	△
	ポンパビリティの改良	○	◎	◎	◎	○	○	○
	フィニッシュビリティの改良	○	○	○	○	○	○	○
スランプ低下の防止	—	○	◎	—	○	◎	—	
硬化したコンクリート	初期強度の増大	—	○	—	◎	○	—	◎
	水和熱の低減	—	○	◎	×	○	◎	×
	水密性の増大	○	○	○	○	◎	◎	◎
	中性化に対する抵抗性の増大	○	○	○	○	◎	◎	◎
	凍結融解作用に対する抵抗性の増大	◎	—	—	—	◎	◎	◎
	化学的侵食作用に対する抵抗性の増大	○	○	○	○	◎	◎	◎
	すりへり・摩耗作用に対する抵抗性の増大	—	○	○	○	○	○	○

◎：効果大、○：効果あり、△：効果ややあり、×：使用不可、—：関係なし

* 単位セメント量 300 kg/m³の場合、CaCl₂を添加したものは、塩素イオン量として標準形で80～100 g/m³、促進形で200～600 g/m³程度である

表-2.2.9 減水剤、AE減水剤の減水効果

条 件	配 (調) 合			効 果	
	単位水量 (W)	単位セメント量 (C)	W/C	スランプ	強 度
スランプ一定 セメント量	↘	→	↘	→	↗
スランプ一定 W/C	↘	↘	→	→	→
セメント量一定 W/C	→	→	→	↗	→

→ 変化なし ↘ 減少 ↗ 増加

② 配合

配合は、耐久性および水密性の観点から、作業に適するワーカビリティーをもつ範囲内で、できるだけ水セメント比、単位水量を小さく設定する。一方、水セメント比を小さくすることは、防食に対しては有効であるが、その反面コンクリートの粘性が増大するので、施工性が悪くなり、結果的にかえって、品質の悪いコンクリートになりやすい。そこで、水セメント比や単位水量を減少できる高性能減水剤あるいはA E減水剤と、適当な作業性を確保できる流動化剤を組合わせて使用し、更に所要の空気量を確保するためにA E剤を併用する。

流動化剤を混入したコンクリートはスランプ・ロスが大きく製造後早めに打設するのが原則であり、長時間に渡る打設等で施工性が低下した場合には流動化剤の再添加を行う。ただし、過剰添加は、材料分離や硬化遅延を引起すので注意が必要である。

③ 練り混ぜおよび運搬

低水セメント比コンクリートは、通常のコンクリートに比べて、ミキサーへの負荷が大きくなり、均一に混ざりにくいので、練り混ぜ時間や練り混ぜ量を良く検討し、練り上がりコンクリートが均質になるまで充分練り混ぜる必要がある。検討は、JIS A 1119「ミキサで練り混ぜたコンクリート中のモルタルの差および粗骨材料の差の試験方法」または土木学会基準「連続ミキサの練り混ぜ性能試験方法（案）」等による。

④ 打込みおよび養生

低水セメント比コンクリートは一般に極めて粘性が高いため、打込み、締固め、仕上げが迅速に行えるように装置、器具、人員等の能力に通常のコンクリート以上の余裕が必要である。また、低水セメント比コンクリートの場合、高性能減水剤を用いて極端に減水しても通常のコンクリートに比べるとセメント量が多くなりがちである。従って、水和熱による温度上昇が大きくなるので、ひびわれには十分注意が必要である。

表面仕上げは、ブリージングがまったく期待できないので、時期を逸しないように注意し、また、プラスチックなひびわれが発生しやすいので、タッピングまたは再仕上げを行うのが好ましい。流動化コンクリートの場合は、施工指針としては、土木学会「流動化コンクリート施工指針（案）」等がある。

(2) 混合セメントを用いたコンクリート

一般に、ポゾラン反応物質をコンクリートに混入すると、コンクリートの中にカルシウムシリケート水和物が形成されコンクリートの組織は緻密化する。ここでは、混和材料として高炉スラグ、フライアッシュおよびシリカフェームを用いたものを取りあげる。

① 材料

ポゾラン活性あるいは潜在水硬性を有する混和材としては表-2.2.10 に示す次のものがある。高炉スラグ微粉末の品質規格は土木学会基準に、フライアッシュの品質規格に J I S に規定されている。

表-2.2.10 ポゾラン活性あるいは潜在水硬性を有する混和材

名 称	特 徴
高炉 スラグ	高炉スラグには除冷スラグと急冷スラグがあり、前者は熔融スラグを徐々に冷却することによって結晶が発達し、硬質で安定したものになるので、コンクリート用骨材や道路用資材として用いられている。一方、後者の急冷スラグは、熔融スラグを水で急冷することによって、組織が結晶化していないガラス質で化学反応を起こしやすい状態になっている。 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、アルカリ骨材反応の抑制効果、耐海水性としての硫酸塩に対する抵抗性、海洋環境における塩化物の浸透抑制効果マッシブなコンクリートの温度抑制効果があることが知られている。
フライ アッシュ	フライアッシュは、大半が石炭火力発電所からの副産物であり、その発生量はエネルギー事情の影響を受けやすい。良質なフライアッシュを使用すると単位水量の低減、ワーカビリティの改善、水和発熱量の低下、長期強度の増進、水密性の改善、化学抵抗性の向上などの効果がある。
シリカ フューム	フェロシリコンやシリコンメタルを製造時に発生する廃ガスを集塵することによって得られる超微粒子の産業副産物であるが、大量の電力を必要とするため前二者ほど安価に供給されるものではない。しかし、コンクリート混入した場合、材料分離に対する抵抗性、強度発現性、水密性、耐久性が著しく改善できることが分かってきており需要が拡大されてきつつある。 シリカフュームは完全な球形であり、セメント粒子の間に入り込んでボールベアリングの作用をし、また、セメント粒子で囲まれた空隙に超微粒子のシリカフューム粒子が浸入して空隙を充填し、水を追い出す作用をする（マイクロフィラー効果）。

② 配合

これらの混和材を用いる場合の配合の表わし方としては、

- a. 内割混合：コンクリートの単位セメント量の一部を混和材量で代替する方法
 - b. 外割混合：単位セメント量を変えずに骨材の一部として混合する方法
- の2つがある。

これらの混和剤は、適切に用いることで、コンクリートのワーカビリティ、均一性の改善、長期強度の増進、水密化による塩素イオンのコンクリート中への浸透防止、硫酸塩や海水に対する化学的抵抗性を改善、アルカリ・シリカ反応の抑制など優れた効果を持っている。しかし、これらの効果は用いる材料の品質、使用量、配合条件によってかなり相違するので、あらかじめ試験によってこれらを確認し、配合を決める必要がある。

シリカフュームの混合率は、一般に 5～20%（内割混合）の範囲であり、既往の研究成果および施工実績から、10%程度が目安と考えられている。

③ 練りませおよび運搬

練りませは、特に練りあがり品質が均等になるまで十分に行なう必要がある。材料投入方法、練りませ時間、練りませ量などは、JIS A 1119に従う。

使用するAE減水剤、高性能減水剤により水セメント比の小さいコンクリートではスランプ経時変化が大きいので、あらかじめ信頼できる資料などにより運搬時間の検討を行う必要がある。

④ 打込みおよび養生

これらの混和材量は潜在水硬性およびポゾラン反応によって硬化するので、初期の湿潤養生が特に大切である。

シリカフェームを用いたコンクリートでは、単位セメント量とシリカフェーム量が増加するにしたがって、粘性が大きくなり、ブリージングも顕著に減少するため、プラスチックひびわれが生じやすくなる。特に、夏期、風が吹いている場合などは床スラブの仕上げが難しく、このような場合には、ただちにほうき、はけ仕上げなどによりコンクリート表面をできるだけ早く仕上げ、養生剤を塗布する。

(3) ポリマーセメントコンクリート

ポリマーセメントコンクリートは、結合材としてセメントとゴムあるいはプラスチックなどの有機高分子材料（ポリマー）を用いて、骨材と結合したコンクリートをいい、ポリマーフィルム形成により緻密化されたコンクリートをつくることができる。

① 材料

コンクリートに混入するポリマー混和剤は、セメント用ポリマー、セメント混和用ポリマーなどと呼ばれ、通常のAE剤、減水剤などの混和剤に比べてかなり多量に用いられる（セメントに対して重量で5%以上）。

ポリマー混和剤には、表-2.2.11に示すような種類がある。これらの中で最も多く使われているのは、水溶性ポリマーディスパーションに属するもので、ゴムラテックス系としてスチレン・ブタンジェン・ゴム（SBR）、樹脂エマルジョン系として熱可塑性タイプのポリアクリル酸エステル（PAE）、ポリ酢酸ビニル（PVAC）、やエチレン酢酸ビニル（EAC）等がある。これらの品質は、JIS A 6203「セメント混和用ポリマーディスパーション」に規定されている。

混入されたポリマーによるコンクリートの品質向上は、セメントの水和とポリマー相形成とによる一体化したマトリックス相が骨材を強固に結合することに起因する（図-2.2.1参照）。このため、水密性や耐中性化、遮塩性などコンクリート中の鋼材の腐食抑制に有利な性質が付与される。

表-2.2.11 ポリマー混和剤の種類

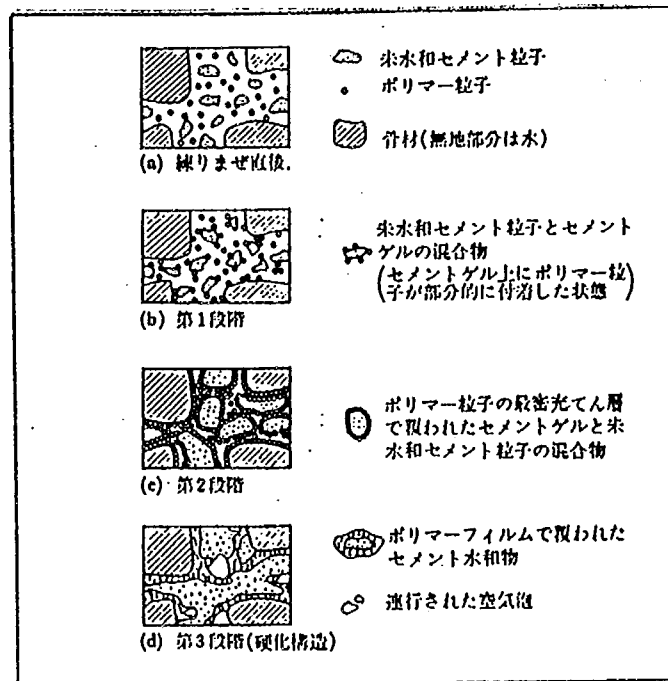
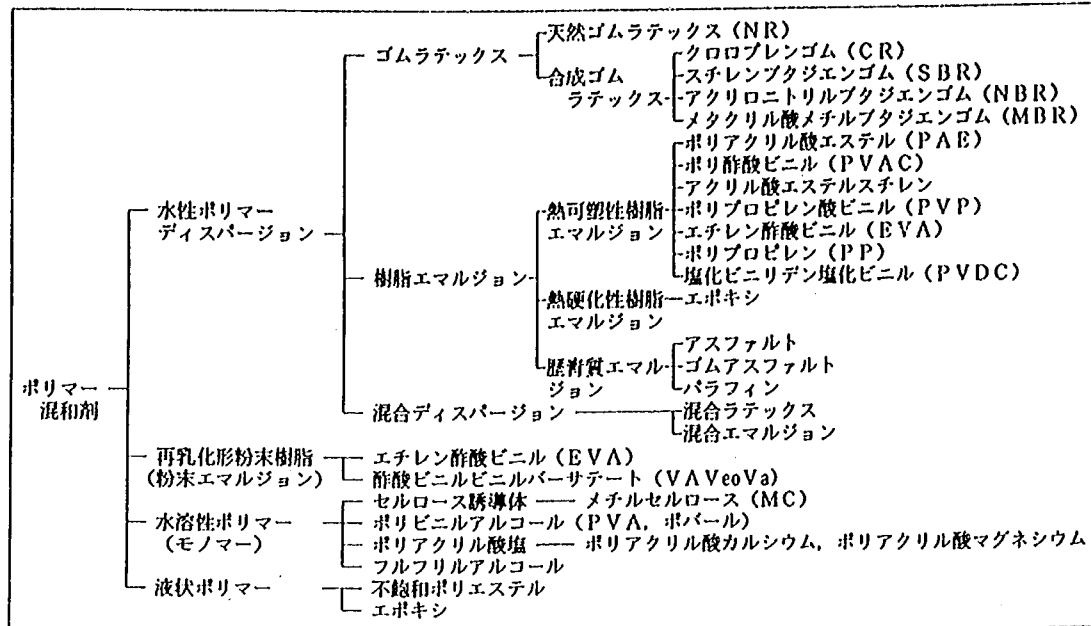


図-2.2.1 co-matrix 相の形成過程モデル

② 配合

ポリマーセメントコンクリートは、水セメント比、骨材セメント比、およびポリマーセメント比によって性質が変化するので使用目的にあった配合設計をする必要がある。ポリマーセメント比は、セメントに対するポリマーディスパージョン中の全固形分の重量比である。性質は一般に、水セメント比よりもポリマーセメント比によって支配され、その値は通常 5～30%の範囲である。水セメント比は、要求されるワーカビリティの一つの指標であるフロー値またはスランプ値から定める。通常、水セメント比の計算には混和するセメント用ポリマーディスパージョン中の水分量と別に加えた水の量の和を水分量として用いる。一般に水セメント比は30～60%の範囲で用いられているが、なるべく小さいほうが良い。

③ 練りませおよび運搬

ポリマーディスパージョンを用いる場合は、その所要量を練りませ水に加えて良く混合し、ミキサの中の空練りしたものに入れすぐによく練りませる。

練りあがったコンクリートについては、練りませ後45分～1時間以内に施工する必要がある。大量のコンクリートの練りませではレディーミックスコンクリートを利用できるが、練りませ後45分～1時間以内に施工する必要があるので運搬距離が短い場合を除いて、現場で練りませるのが好ましい。

④ 打込みおよび養生

セメントコンクリートと同様に打込み、振動機などを用いて締固める。ポリマーセメントコンクリートは、接着性が優れるので型枠に用いる剥離剤としては、セメントコンクリート用のものは好ましいとはいえず、シリコン系グリースやワックスが推奨される。

養生方法は、初めに湿潤養生してセメントの水和を促進した後乾燥し、ポリマーフィルムの強度を発現させる。従って、現場では施工後少なくとも2～5日間は施工面が温度変化や風によって急激に乾燥しないように覆いをかけ、その後はセメントコンクリートと異なり、できるだけ乾燥状態になるように養生する。

セメントコンクリートとはほぼ同様に硬化するので、施工後速ければ2～3日後、遅くとも7～10日経過すれば、脱型が可能である。

(4) 繊維補強コンクリート

繊維補強コンクリートは、不連続な短い繊維をコンクリート中に一様に分散させることによって、コンクリートの曲げ強度、引張強度、剪断強度、靱性、ひびわれ抵抗性などの改善を図った複合材料である。硬化した繊維補強コンクリートの主な特性には次のようなものがある。なお、補強用繊維についての詳細な記述は2.4.4で行う。

- ・引張り強度が大きく、ひびわれが生じにくい。
- ・ひびわれ発生後も高い耐荷力を示し、靱性（タフネス）および変形性能が大きい
- ・曲げ強度、せん断強度、衝撃強度、疲労強度などが大きい
- ・ひびわれが生じにくいため、一般に耐久性が良い。

① 材料

コンクリート用繊維材料としては、表-2.2.12 に示すようなものがある。繊維補強コンクリートの品質ならびに特性は、その構成材料であるマトリックス（コンクリート）と繊維の品質ならびに両者をどのように複合させたかによって規定される。重要な影響因子としては、次のものがあげられる。

(繊維) : 繊維の品質および形状, 繊維混入, 繊維の分散および配向
 (マトリックス) : マトリックスの品質, 骨材寸法と細骨材率

主な補強繊維の力学的特性を表-2.2.13、図-2.2.2に示す。これらの中で実績のあるものは鋼繊維補強コンクリート (SFRC) および炭素補強コンクリート (CFRC) ものは、現在まだ研究開発段階にある。

表-2.2.12 コンクリート用繊維材料

有機系繊維	金属繊維	鋼繊維、ステンレス繊維、他
	非金属繊維	石綿 (アスベスト) 繊維、ガラス繊維、炭素 (カーボン) 繊維、他
有機系繊維	合成繊維	ポリエチレン繊維、ポリプロピレン繊維、ナイロン繊維、アクリル繊維、ビコン繊維、アラミド繊維、他
	天然繊維	ココヤシの実繊維、竹繊維、他
(鋼繊維) 材料→冷間圧延鋼板 (JIS G 3141)、鉄線 (JIS G 3532) 一般構造用圧延鋼材 (JIS G 3101) 製造方法 (切断または切削) →カットワイヤー、せん断・切削ファイバー、 メルトエクストラクションファイバー		

表-2.2.13 各種セメントコンクリート補強用繊維

種類	直径 (μm)	長さ (mm)	密度 (kg/cm^3)	ヤング係数 (kg/mm^2)	引張強度 (kg/mm^2)	容積混入率 (%)
鋼繊維 炭素鋼 ステンレス鋼	200~600	10~60	7.85	20000	40~200	1~2
	200~600	10~60	7.85	16000	40~200	1~2
耐アルカリガラス繊維	5~20* ¹	20~40	2.78	7000	250	2~8
ポリエチレン繊維	800~1000	30~50	0.96	250	20	0.5~4
ポリプロピレン繊維 monofilament fibrillated	100~600	5~50	0.9	100	40	0.1~6
	500~4000	20~70	0.9	100	40	0.2~1.2
カーボン繊維 ピッチ系* ² HT HM PAN系 HT HM	7		1.78	22000	250	~10* ³
	7		1.9	37000	200	~10* ³
	9		2.0	21000	250	~10* ³
	8		2.05	28000	210	~10* ³
アラミド繊維 Kevlar-29 Kevlar-49	12		1.44	6350	280	< 2
	12		1.45	13300	280	< 2
アスベスト chrysotile crocidolite	0.0025	~40	2.4~2.6	16500	60~80	10
	0.1	~70	3.2~3.4	19000	70~100	10

*1 ストランド (204フィラメント) としての換算径は $110 \times 650 \mu\text{m}$ となる。

*2 ポリアクリロニトリル系

*3 連続繊維としての利用

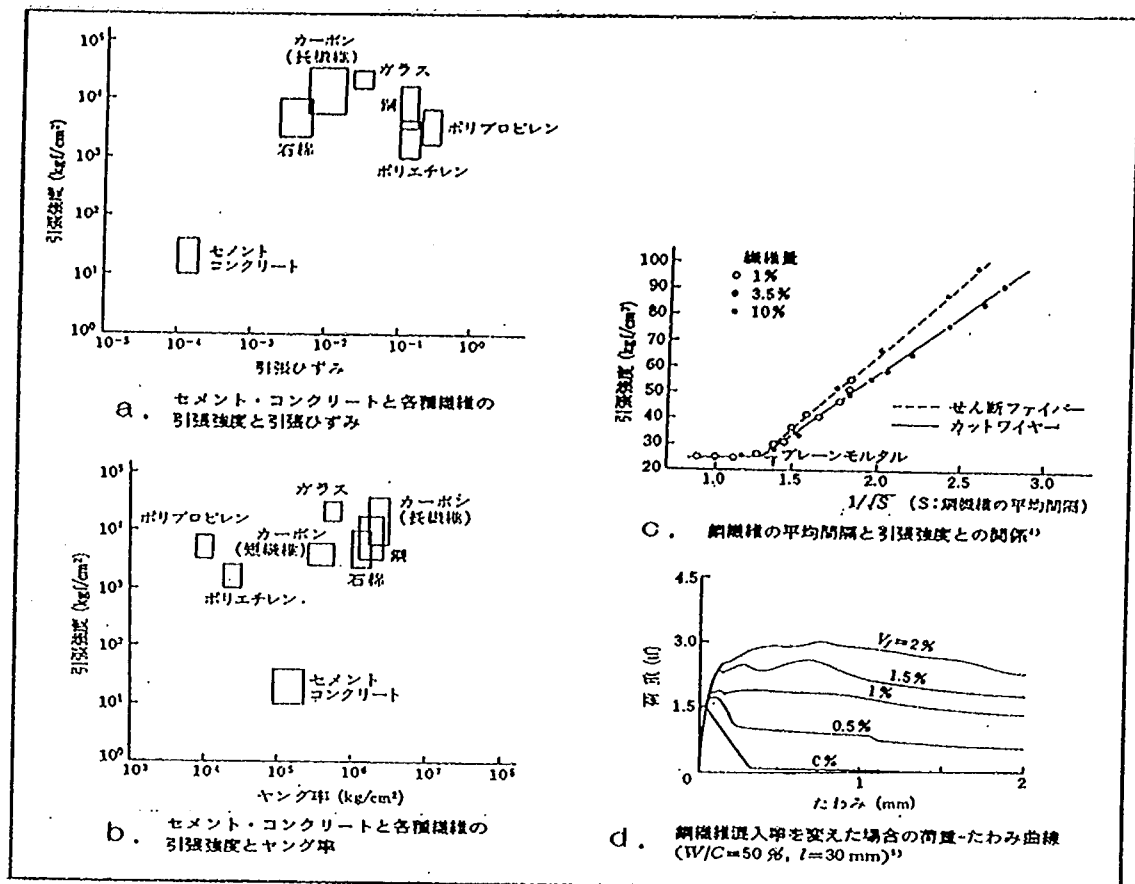


図-2.2.2 補強繊維の力学特性

② 配合

SFRCは、圧縮強度だけではその品質を規定することができず、曲げ強度およびタフネスも基準にして配合をきめる。SFRCの曲げ強度、せん断強度は、鋼繊維の混入率に左右される。一方、圧縮強度は、水セメント比の変化に依存し、鋼繊維の混入率にはほとんど影響されない。従って、この性質を利用して適切な水セメント比および鋼繊維混入率を求める。特に、耐久性が要求される場合は、最大水セメント比が45%以下にすることが望ましい。鋼繊維混入率と曲げ強度およびタフネスの関係は、使用材料、施工方法によって大きく変化するため、試験によって適切な混入率を定める。

フレッシュなコンクリートに鋼繊維を混入すると、そのコンシステンシーは混入率の増大に伴って著しく低下するので、所要のコンシステンシーを得るためには、一般に単位水量が多くなる。従って、コンクリートの作業性、品質の改善を目的として、AE剤、AE減水剤、流動化剤、膨脹剤材の混和剤量が用いられることが多い。これらの材料の適否は試験あるいは既往の使用例などによって判断することが必要である。特に、海洋環境下では、耐食性が要求されるので、AE剤、減水剤、または高性能減水剤などを用いて単位水量を減ずる必要がある。

③ 練りまぜおよび運搬

SFRCの施工で最も重要な過程は練りまぜである。この過程においてファイバーボールの生成や鋼繊維が折れ曲がったりすると、鋼繊維が一様に分散することが不可能になって、品質が保証されなくなるので注意が必要である。

④ 打込みおよび養生

S F R Cの打込みは、コンシステンシーが同一の普通のコンクリートと同様な方法で打込むことができる。しかし、内部振動機を用いてS F R Cを移動させると、材料分離ばかりでなく、鋼繊維の配向や分布にも悪い影響をもたらす。また、一般に振動締固めによって、鋼繊維は打込み方向と直角な平面内に2次元配向する傾向があるが、局所的には、振動機に沿って配向したり、型枠に沿った面内に配向する傾向がある。このため通常、締固めには、型枠振動機を使用することが多い。

(5) その他

耐海水性コンクリートとして、他に注目すべきものとして次のようなものがある。

① 膨張コンクリート

コンクリートの引張強度が小さいことに起因するコンクリート構造物のひびわれは、コンクリートの歴史的かつ宿命的な課題である。中でも、水和熱による温度ひびわれとならんで、乾燥収縮に起因するひびわれは発生頻度が高く、機能、美観かつ耐久性上種々の障害をもたらす適切な対策を要求されることが少なくない。

膨張性を有する材料の使用は古くからあるが、現在最も使われているのは、エトリンガイトあるいは水酸化カルシウムの結晶膨張圧を利用した膨張性混和材（膨張材）である。膨張材を用いたコンクリートの最大の特徴は、硬化初期に大きな膨張を発現することにある。コンクリートの膨張量は、膨張材の使用量に鋭敏に支配され、使用量を増すと指数関数的に増大する（図-2.2.3）。圧縮強度は反対に低下するが、拘束力を大きくして見掛けの膨張量を小さく抑えれば強度低下を小さくすることができる。膨張反応をうまく利用すれば、その後起こる収縮を補償し、ひびわれの低減を図ることができ、更に膨張力を何らかの方法で拘束することで圧縮応力を貯え、曲げ耐力の向上を図ることができる（ケミカルストレス）。

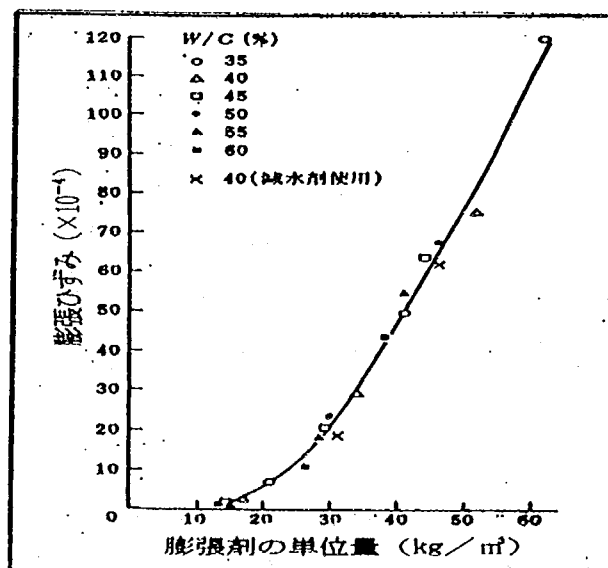


図-2.2.3 膨張剤の単位量と膨張ひずみの関係

② 防錆剤混入コンクリート

防錆剤は、川砂の枯渇を背景に海砂の使用が急増し、海砂中の塩分による鉄筋の腐食を抑制する目的で開発されてきたものである。ただし、これらの防錆剤は塩分量に対して無制限に有効なわけではなく、防錆剤が有効に働く塩分量の限界がある。土木学会コンクリート標準示方書、J A S S等では、細骨材に含まれる塩分量上限として 0.1%を規定している。

海岸近くにあるコンクリート構造物では、海水、しぶき、飛来する海塩粒子により塩分がコンクリートに蓄積し厳しい腐食環境にあることが分かっている。このような供用時に外部から侵入する塩分による腐食からも鉄筋類を保護する目的で、亜硝酸カルシウムを主成分とする防錆剤の大量使用が米国においては検討されており、今後の動向が注目される。

③ その他

コンクリートの耐海水性を改善する方法として、ワックスビーズ混入によるコンクリート組織の緻密化、収縮低減剤によるひびわれの減少、特殊型枠利用によるコンクリート表面組織の緻密化など様々な技術が開発されており今後の動向が注目される。

2.2.4 海中コンクリート

海岸・海洋構造物では、特に下部工事においては水中でコンクリートを打設することが多い。水中でも打設できることはコンクリートの大きな長所であるが、コンクリートが水中を移動するときに分離を生じ易く、品質の均一性、鉄筋の付着、打継目などの信頼性に劣るものとされており、海中（水中）でのコンクリートの打設は特殊な工法と考えられていた。

海中コンクリートの施工法としては

- ①通常のコンクリートを装置を工夫して打設する方法
- ②プレパックドコンクリートを用いる方法
- ③水中でも分離しない特殊水中コンクリートを用いる方法

の3つがある。

通常のコンクリートを打設する方法①としては、トレミー工法、コンクリートポンプ工法、底開き箱工法、バケット工法、袋詰め工法等がある。水中でのコンクリートの打設は、コンクリートが水中を落下し、水洗いの作用を受けないように細心の注意を払う必要があり、打設装置に対する種々の改良が行われてきている（KDT トレミー工法、NUCS工法、ハイドロバルブ工法等）。

プレパックドコンクリート工法②は、型枠内に粗骨材を先に詰め、間隙に特殊なモルタルを注入してコンクリートを作るもので、海中でも比較的信頼性の高いコンクリートが得られる工法として従来から良く用いられている工法である。最近では、本州四国連絡橋下部工に大量のプレパックドコンクリートが用いられている。

注入モルタルは、一般にセメント、フライアッシュ、細骨材、混和剤、水から構成され、その所要品質として、

- ・流動性が良好で、その経時低下が少ない
- ・材料分離が少ない
- ・適度の凝結遅延性を持つ
- ・適度の膨張性を持ち、粗骨材と良好な付着性を持つ
- ・硬化後、所要の強度、耐久性、水密性を持つ

等が要求される。これらの品質を得るには、構成材料の品質、配合条件等の影響もあるが、注入モルタルに混入する混和剤の果たす役割は大きい。混和剤としては、減水剤、凝結遅延剤、膨張剤、保水剤等が用いられるが、適切な混和剤の選定、使用量の決定、現場での計量が煩雑であるため、一般には、各混和剤を適量混合したプレミックスタイプのものがプレパックドコンクリート用混和材あるいは注入モルタル用混和剤として用いられている。

特殊水中コンクリート③は、水溶性有機高分子を主成分とする特殊な混和剤を用いたコンクリートで、粘ちょう性と流動性に富み、水中で希釈されにくく、また水中へのセメントの流出が少なく、ブリージングがなく、充填性にも優れているため、水中においても気中と同じ用に取り扱える特徴がある。特殊水中コンクリートは、水中でのRC部材の施工など新しい工法の可能性を示唆した画期的なものといえ、現在ハイドロクリートを始めとする10指にあまる製品・工法が実用化されており、既に数十万㎡の水中コンクリートが打設されている。以下この特殊水中コンクリートについて説明をする。

① 材料

特殊水中コンクリートとは、セルローズ系あるいはアクリル系水溶性高分子を主成分とする特殊混和剤を添加したコンクリートであり、この混和剤の粘ちょう作用により水中で落下しても水の洗い作用による材料分離が非常に少なくなる。まだ固まらない特殊水中コンクリートは、通常のコンクリートに比べて次のような特徴を有している。

- ・水の洗い作用を受けても優れた分離抵抗性を示す。
- ・粘ちょうでプラスチシチーに富み、セパレーティング性、充填性に優れている。
- ・ブリージングやレイタンスの発生が少ない。
- ・凝結特性は、セルローズ系特殊混和剤を用いたものは遅延し、アクリル系特殊混和剤を用いたものは凝結時間は変わらない。
- ・コンクリートポンプによる圧送の際の抵抗は増大する。

特殊水中コンクリートは、気中施工の普通のコンクリートと同様の強度特性を有している。水中で硬化したコンクリートは、特殊混和剤の添加量の増加とともに圧縮強度が増加する傾向があり、一般に推奨される添加量の範囲では、気中コンクリートの8割程度の強度が確保できる。図-2.2.4に特殊混和剤の添加量と圧縮強度の関係を示す。

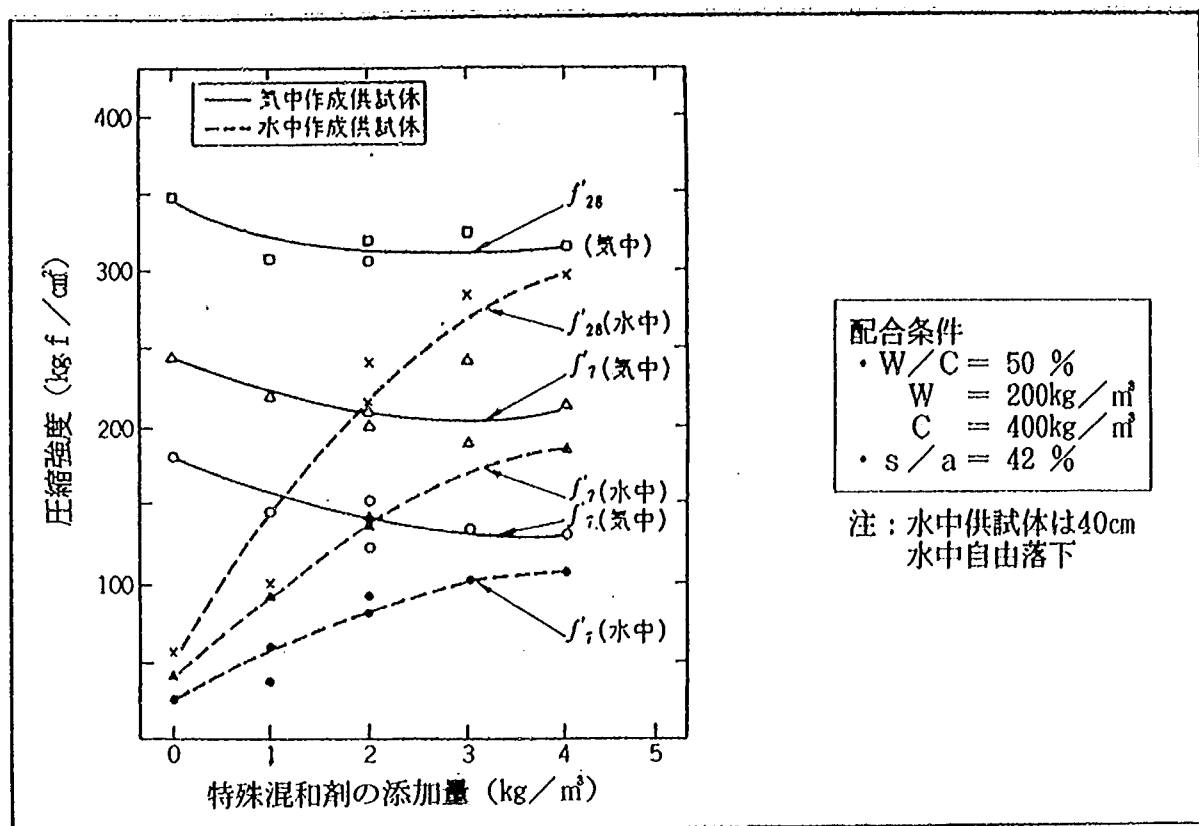


図-2.2.4 特殊混和剤の添加量と圧縮強度の関係

② 配合

特殊水中コンクリートの配合は、所要の強度、水中分離抵抗性、耐久性、充填性、水密性および作業に適するワーカビリティを持つように決められる。海中では、締固め作業が不可能であるため、所定のセルフレベリング性、充填性が得られるように配合計画において注意する必要がある。

③ 練りませおよび運搬

特殊水中コンクリート粘ちょう性が強いいため運搬および打込みによる材料分離やワーカビリティなどの性状の変化が通常のコンクリートに比べて少ない。特殊水中コンクリートの練りませ時間は、普通のコンクリートよりも長くなるので、工事の規模、施工数量に見合った練りませ装置を選択する。

④ 打込みおよび養生

特殊水中コンクリートの打込みには、トレミー、コンクリートポンプ、底開き容器などが用いられる。打込み時の水中落下高さは、30~50cm以下が原則とされている。

特殊水中コンクリートは、施工箇所が水面下であるため、特別な場合を除いて、乾燥や凍結などの原因に対応した養生は考慮しなくて良い。そのかわり、流水、波などに対する養生対策が必要になる。

2.2.5 まとめ

- (1) わが国の今後の海洋開発は、沿岸域から次第に沖合へと展開していくものと考えられる。
現在世界で沖合に建設されている本格的な海洋構造物は、鋼製の海底石油掘削生産用プラットフォームが主流であり、1970年代に入りコンクリート製重力式海底石油掘削生産貯蔵用プラットフォームが建造され始め、北海を中心に世界で約30基が実現している。日本では鋼製プラットフォームは3基あるが、コンクリート製は残念ながらまだ実績がない。これらのコンクリート製プラットフォームは、外洋での厳しい環境下におかれ、維持管理も容易でないため、コンクリートの品質管理に厳しい基準を課し、設計、施工面において細心の配慮がなされている。
- (2) コンクリートは、安価で耐久性に優れた材料であるが、さらにコンクリートの耐久性を向上するための種々の開発が行われている。使用材料、設計、施工方法の改良、改善等により、海洋構造物の主要材料として今後ますますコンクリートが用いられていくものと予想される。
- (3) コンクリートは、本来メンテナンスフリーの材料であるため、定期的な点検、補修などのメンテナンスが必要な鋼材など他の材料と比べて、その耐久性の考え方はおのずから異なってくる。近年、港湾や海岸部でコンクリート構造物の早期劣化が発生し、点検、補修技術の開発が行われている。これらの早期劣化は、欠陥のある材料や良好でない施工法が用いられたためであり、現在ではコンクリート構造物はメンテナンスフリーで設計寿命が全うできるような配慮がされている。
- (4) 海洋環境におけるコンクリートの劣化の最大の要因は、海水の侵入による内部鋼材（鉄筋、PC緊張材）の腐食であり、本文でも述べたような種々の対策が講じられている。さらに、鋼材に変わる新素材を用いたコンクリートの開発が実用化されれば、コンクリートの耐久性は飛躍的に向上するものと期待される。
- (5) 将来、わが国では欧米のコンクリートプラットフォームに代表されるような海洋コンクリートの技術を、実際の施工を通じて修得していく必要がある。さらに、耐震設計技術を考慮した、わが国のわが国独自の海洋コンクリート技術が発展していくことを期待したい。

2.2.6 今後の課題

コンクリート材料に関する今後の課題としては、次のものがあげられる。

(1) 自然環境の中で不活性な硬化体の開発

コンクリートは比較的耐久性に優れた材料として認められており、海岸・海洋構造物においても主要な建設資材であるが、苛酷な海洋環境下においては、長い年月の間に少しずつ劣化していくことは避けられない。このよう劣化を遅らせることにより、半永久的とも言える耐久性のあるコンクリートを作り出すことも可能になる。コンクリート中の硬化体は、海水中の硫酸塩の作用（セメントバチルス形成による内部膨張）、海水中への水酸化カルシウムの溶出による中性化（鉄筋防錆能力の低下）、空気中の炭酸ガスによる炭酸化（中性化）などの化学的侵食によって表層から徐々に変質を受けることが分かっている。

これらの反応は、本文にも述べた通り水密なコンクリートを打つことにより、コンクリート内部への反応が進むことを遅らせることができる。コンクリート自体がこのような海水の作用に対して不活性であれば、大幅に耐久性が向上するので、このようなセメント硬化体を作ることができる混和材料の開発が望まれる。

(2) 収縮しにくく、ひびわれを生じない材料の開発

鉄筋コンクリートが劣化する最大の原因は、コンクリート内部に配置された鉄筋の腐食である。ひびわれは海水の侵入に対して水みちになるので極力無くすることが必要である。セメントは水和反応の際に収縮するため、微細なひびわれが発生することは避け難いが、収縮を抑制してひびわれを極力小さくすることで耐久性の向上を図ることができる。

現在、ポゾラン混和材による単位セメント量の低減、収縮低減剤による収縮抑制、膨張材による収縮量の補償やケミカルプレストレスの導入などの研究が行われている。

(3) 密度が高く、ボイドの少ない材料の開発

できるだけ密度を高く、ボイドを少なくすることが、水密なコンクリートを作るための条件である。コンクリートは、密度の異なる材料を混合した複合材料であるので、ミクロ的には欠陥の多い材料である。セメントと骨材との間に存在する多数の微細なボイドは、コンクリートの引張強度、耐久性を制約する要因となっている。この様なボイドを減少することで、コンクリートの大幅な品質向上が期待できる。

(4) 引張強度と圧縮強度の差が小さい材料の開発

コンクリートの圧縮強度と引張強度との差が大きいことは、コンクリートの宿命と考えられてきた。この欠点を補うために鉄筋コンクリート、プレストレスコンクリートなどの開発がされてきたといえる。しかし、引張強度の大きな材料を開発することで、コンクリートの大幅な品質向上が期待できる。

(5) 施工に左右されない材料の開発

コンクリートの品質は、施工現場での、品質管理に負うところが大きい。コンクリートの配合、練りませ、運搬、打込み、締固め、養生の段階で不都合が生じてもコンクリートの品質を著しく悪いものにする可能性がある。工場で製作し、現場で打込むだけで固まるコンクリートが出来れば、コンクリートの品質は安定した信頼性の高いものになる。

2.2.7 参考文献

- 1) 加賀秀治：(解説) コンクリート材料の変遷とその問題点、
コンクリート工学, Vol. 24, No. 9, 1986. 9
- 2) (財)沿岸開発技術センター：港湾構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書
—劣化防止・補修マニュアル—, 1987. 9
- 3) 山田順治, 有泉昌編：分かりやすいセメントとコンクリートの知識,
鹿島出版会, 1976. 4
- 4) (財)日本コンクリート協会：海洋コンクリート構造物の防食指針(案), 1983. 2
- 5) E C O R日本委員会：海洋構造物を取り巻く環境—防錆・防食並びに付着生物の
除去対策, 1984. 9
- 6) 長滝重義：混和剤の変遷と展望—特集*最近のコンクリート用混和剤/1. 1
コンクリート工学, Vol. 26, No. 3, 1988. 3
- 7) 八木秀夫：減水剤・A E減水剤—特集*最近のコンクリート用混和剤/2. 2
コンクリート工学, Vol. 26, No. 3, 1988. 3
- 8) 国府勝郎：高炉スラグ微粉末—小特集*最近のコンクリート用混和材/2. 3
コンクリート工学, Vol. 26, No. 4, 1988. 4
- 9) 山田有一, 増田和機：フライアッシュ—小特集*最近のコンクリート用混和材/2. 1
コンクリート工学, Vol. 26, No. 4, 1988. 4
- 10) 大濱嘉彦：(講座) 特殊な材料を用いたコンクリート(その22)
—1 ポリマー混和剤, コンクリート工学, Vol. 25, No. 12, 1987. 12
- 11) コンクリート標準示方書(昭和61年制定) 改定資料
コンクリート・ライブラリ第61号
- 12) 出村克宣：セメント混和用ポリマー—特集*最近のコンクリート用混和材/2. 13
コンクリート工学, Vol. 26, No. 3, 1988. 3
- 13) 魚本健人：繊維材料—特集*最近のコンクリート用混和材/2. 5
コンクリート工学, Vol. 26, No. 4, 1988. 4
- 14) 魚本健人：(講座) 特殊な材料を用いたコンクリート(その17)
—1 繊維—概論, コンクリート工学, Vol. 25, No. 5, 1987. 5
- 15) 長滝重義, 富田六郎：(講座) 特殊な材料を用いたコンクリート(その6)
—6 膨脹材と収縮低減剤, コンクリート工学, Vol. 24, No. 2, 1986. 2
- 16) 特殊水中コンクリート・マニュアル(設計・施工)
(財)沿岸開発技術研究センター
(財)漁港漁村建設技術研究所, 山海堂, 1986. 11

2.3 ゴム、高分子系

物質は分子より構成されるが、分子量の大きい物質を高分子物質と呼んでいる。高分子物質は、無機質のものと有機質のものとに大別される。有機高分子物質は、一般に重合反応 (polimerisation) によって合成されるためポリマー (polimer) とも言われている。具体的に使用されている高分子の定義、種類及び分類を、図-2.3.1に示す。

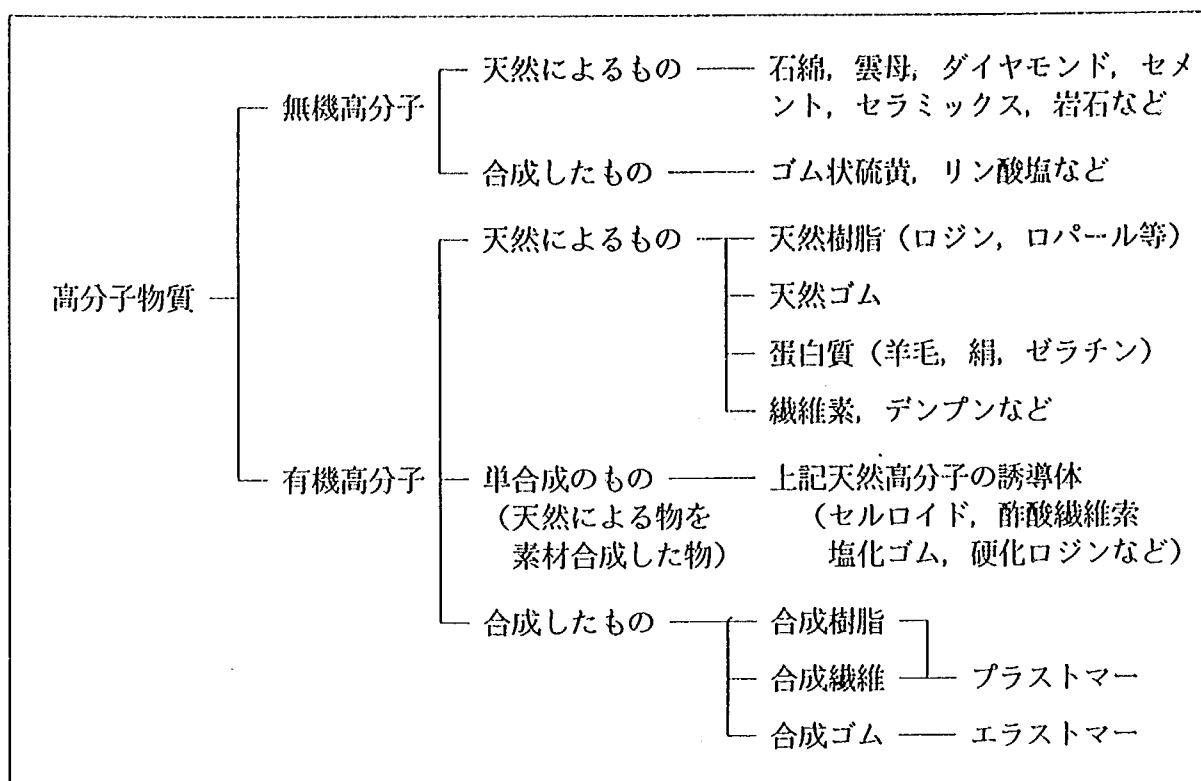


図-2.3.1 高分子の定義、分類及び種類

2.3.1 構造材料用ゴム

ゴム系構造材料は、鉄、セメントにない特性を利用して、性能を高める役割を果たしている。また、堰や消波堤などの膜構造物では主要な構造材料として用いられる。その特徴としては、下記の項目が上げられる。

- ① 構造物の伸縮部等の止水ができる。
- ② 構造物の伸縮の吸収ができる。
- ③ 構造物の衝撃を吸収できる。
- ④ 構造物の変形吸収ができる。
- ⑤ 構造物の振動防止ができる。

(1) 分類及び特性

具体的に使用されているゴムの定義、種類及び分類を、図-2.3.2に示す。

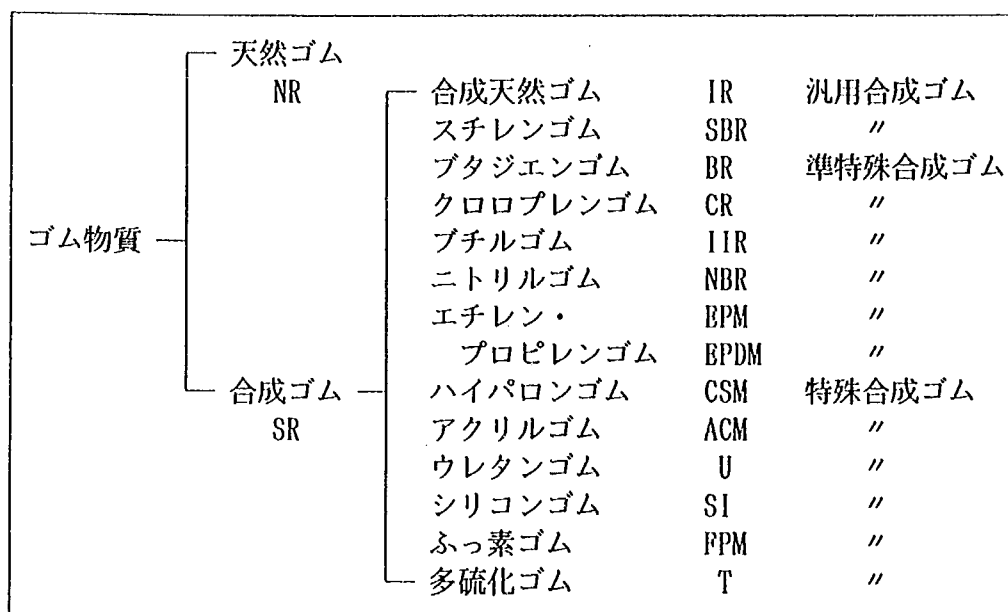


図-2.3.2 ゴムの分類および種類

(2) 構造用材料としてのゴム

ゴム系構造用材料を、表-2.3.1に示す。

表 - 2. 3. 1 ゴム系構造用材料

分類	名称	使用目的	代表的使用実績	ゴ ム 材 質				
				天然ゴム	クロロブレンゴム	ブチルゴム	ウレタンゴム	その他
				NR	CR	IIR	U	
構造用材料	1) ゴム伸縮継手	構造物の伸縮部の、止水材の役割を果たす。						
	①道路用 ゴムジョイント	高架高速道路の走行性改良と、桁間継ぎ目の止水の役割を果たす。	高架道路で20年		○			
	②沈埋函 ゴムガスケット	沈埋函のエレメントの接取部に使用され、エレメント間の変形を吸収させる。	ジナガスケットで25年以上	○				
	③軟弱地盤用 トンネル継手	軟弱地盤に作られるシールドトンネルの、地盤沈下に対応する伸縮継手に使用される。トンネルの耐久性にも寄与する。	鉄道トンネルで10年	○	○			
	2) 支承	PCおよび鋼床板の桁の荷重を支え、振動を軽減する。						
	①ゴム支承	一般の高速高架道路の桁を支える。	20年以上	○	○			
	②耐震支承	地震対策に使用される。		○	○			○
	3) 止水板	コンクリート構造物のコンクリート打ち継ぎ目の止水効果を果たす。						
	①ゴム止水板	コンクリート打ち継ぎ目の、割れ間隙が大きいと予測される部位の止水に使用される。						○
	②スチールエッジ ゴム止水板	高水圧に耐えるコンクリート打ち継ぎ目に使用し、止水する。		○				
	4) 防水シート	コンクリート構造物の外周構造に組込み、止水の役割を果たす。						
	①地中トンネル用	低水圧のトンネルの止水に使用する。	アスファルト系で25年以上			○		○
	②沈埋トンネル用	高水圧のコンクリート構造物の止水に使用する。	ブチルゴム系で15年以上			○		○

2.3.2 構造材料用プラスチック

高分子プラスチック材料は、ゴム系構造用材料と異なり、鉄、セメントに追加される新しい代替構造材の役割を果たす。その特徴としては、下記の項目があげられる。

- ① 軽量で強靱である。
- ② 目的に応じて、いろいろ品質性能を持つものが製造できる。
- ③ 耐水性、耐湿性、耐薬品性が優れている。
- ④ 成型が自由で加工性がよい。

(1) 構造用材料としてのプラスチック

高分子系構造用材料としてのプラスチック材料の分類およびその例を図-2.3.3に示す。また表-2.3.2には高分子系構造用材料の適用を示す。

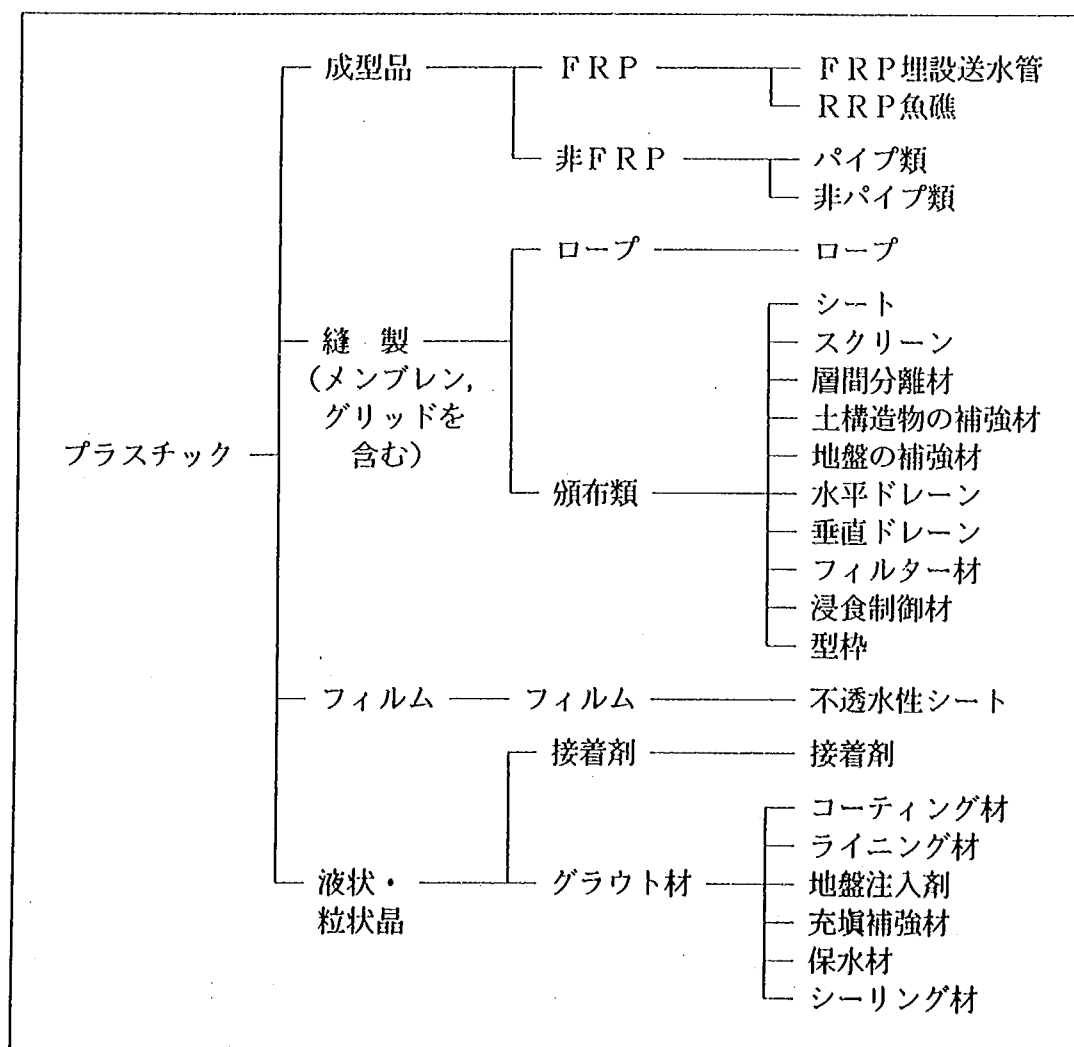


図-2.3.3 プラスチック材料の分類およびその例

表 - 2. 3. 2 高分子系構造用材料

分 類	名 称	使 用 目 的	材 質												備 考
			熱 可 塑 性 樹 脂						熱 硬 化 性 樹 脂						
			ポリ酢酸ビニル	ポリ塩化ビニル	ポリエチレン	ポリスチレン	ポリアミド	その他	フェノール樹脂	ユリア樹脂	メラニン樹脂	エポキシ樹脂	不飽和ポリエステル樹脂	ウレタン樹脂	
海 洋 土 木 材 料	①FRP魚礁	魚礁や浮魚礁として、コンクリート製、鋼製、ゴム製などと共にFRP製のものが耐食性向上を目的として使用される。	○	○	○						○	○			
	②FRP浮棧橋	ヨットハーバー等浮棧橋に、FRP浮体を杭に係止したものが使用される。		○							○	○			
	③FRP浮消波堤	コンクリート製、鋼製などとともに、養殖施設水域等の静穏化のために使用される。									○	○			
止 水 材 料	①止水板	ゴム系の止水板と同様に、コンクリート構造物の打ち継ぎ目の止水に使用される。	○												
	②遮水板、止水矢板	河川堤防などの土壌堤体において、堤体の湿潤線を低下させ透水係数を引き下げる目的で、遮水コアを形成させる。	○												
	③防水シート	各種トンネルの防水や、貯水池、産業廃棄物処理場、フィルダム、堤防の防水や遮水に使用される。	○	○	○			○						アスファルト系、ゴム系、塩素化ポリエチレン、ポリエチレン酢酸ビニル	
バ イ ブ 類	①パイプ	上水道、下水道、高架橋排水トイ、基礎補強材、農業土木導水管、トンネル等の、水抜き管に使用される。	○	○											
	②斜張橋ケーブル防食カバー	斜張橋ケーブル防食用カバーに使用される。ポリマーセメントやブタジエン系高分子注入剤との併用もある。	○										○	○	
	③鋼管杭、鋼矢板防食カバー	水中の鋼管杭や鋼矢板の、防食カバーに使用される。ペトロラダムテープやモルタルを併用する。		○							○	○	○	○	ポリプロピレン

2.3.3 使用上の注意事項

(1) 設計

海洋ゴム製品は、厳しい自然環境条件の下で使用されるので、下記事項について留意する必要がある。

- ① 耐候性……………飛沫滞では、酸素、オゾン、日光、海水、波浪等による、繰り返し応力が複合的に作用するので、ウェザーメーター試験、オゾン劣化試験、屋外暴露試験などによって十分評価しておく必要がある。識別のため、黄・橙・赤に塗装されることが多いが、外面保護にも有効である。
- ② 波浪等による繰り返し応力……………波浪等の気象海象外力は、製品周辺の構造物や地形の影響もあり、推定が難しい。フィールド実験や水理模型実験を行うとともに、十分な安全率を確保することが望まれる。
- ③ 海洋生物の付着……………ゴムは浅い海中においては、鋼、コンクリートと同様、海中生物が非常に良く付着する。ソナードームのように海洋生物付着が性能に及ぼす影響が大きい場合は、付着防止剤を配合した防汚性ゴムも使用されている。
- ④ 保守、点検、修理の困難性……………海上や海中での作業は多くの制約を受ける。フィールド実験や既往例の結果を見て、システム的なメンテナンス方法を設定して、使用する必要がある。
- ⑤ 境界層の技術の充実……………海洋土木技術とゴム技術の境界層における技術を充実させて、海洋土木用ゴム製品の信頼性、安全性を高めていく必要がある。

(2) 施工

使用する時に特に注意を要する事項は、下記の項目である。

- ① 引張りを出来る限り与えないような、取り付け方法とする。
- ② 気密性、水密性を要するものは、使用前に必ず確認する。
- ③ 劣化の進行度を定期的に確認する。計画的なサンプルによる確認が、必要である。

2.3.4 ゴム、高分子系新材料

(1) 新材料の概要

海洋構造物の構造用材料に使用可能であると考えられる、ゴム、高分子系新材料は図-2.3.4に示すようなものがある。しかし、これらの材料は多くのものが複合材料として使用される場合が多い。この様なときに注意しなければならない事項は、下記の項目である。

- a) 要求特性に対応する、ミクロのベンチテストの実施。
- b) 経験工学的な欠落要求特性（施工との相関）の確認。
- c) フィールドにおける耐久寿命の予測、及び補修方法等について、できる限りの注意をしておく。特に、複合して使用する場合が多いので、異なる材料の物理的特性による境界層の技術について、よく検討する。

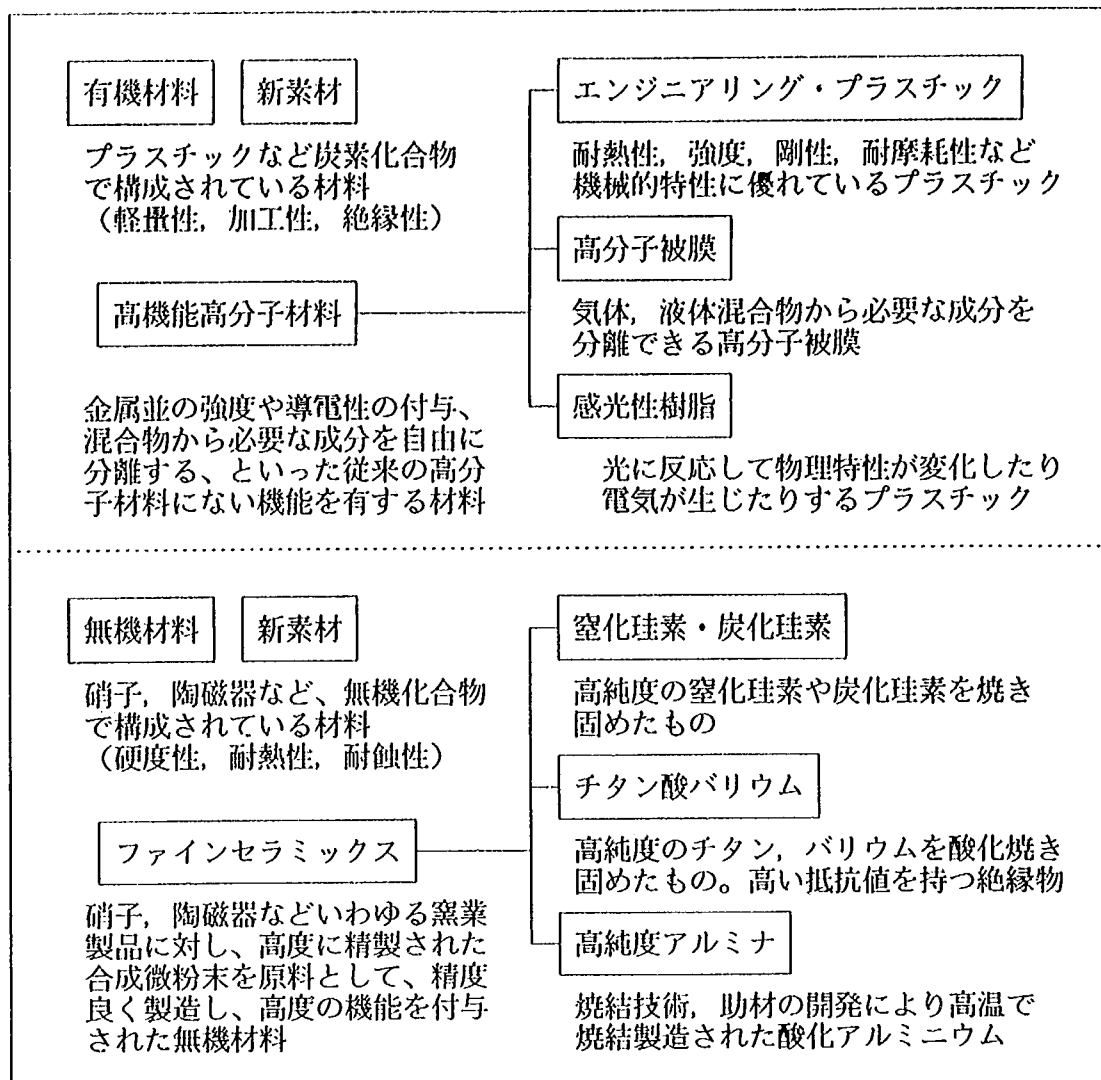


図-2.3.4 ゴム, 高分子系新材料の概要

① 高機能高分子材料 (機械的・熱的機能)

既存のエンブラ (ポリエステル, ポリアセタール, ポリカーボネート, ポリアミド等) の着実な伸びの他に、ポリエーテルケトン, ポリエーテルサルホン, ポリフェニレンスルフィド, アラミド超高分子量ポリエチレンなどのスーパーエンブラへの参入が盛んである。

② 高機能無機材料 (機械的・熱的機能)

炭化珪素, 窒化珪素, 立方晶窒化ホウ素, ジルコニア微粉末部分安定化ジルコニア焼結体, アルミナ, 超高密度黒塩, サイアロン等がある。

③ 新素材開発支援原材料

接合剤, 潤滑剤, コーティング剤, カップリング剤, 離型剤, 界面活性剤, 防湿コート剤, 洗浄剤, 半導体用特殊ガス等がある。

④ 複合材料

炭素繊維, ガラス繊維, アラミド繊維, ウィスカーなどで強化したプラスチック, 強化コンクリート, 強化金属, プラスチック系ハニカム, プリプレグ (炭素繊維, アラミド, 強化エポキシ, ナイロン), 炭素繊維 3 次元織物, 人造木材, ガラスペーパー等がある。

(2) 現状の実績

新ゴム、高分子材料を海洋構造物の構造用材料として使用するためには、少なくとも類似性のある施工実績または、フィールドテストの裏付けが必要である。したがって、ここにあげる新材料もその範囲に属するものを上げた。単一材料として、防食注入剤、アセチル化木材、そして複合材としてプラスチック系ハニカム、アセチル化木材複合材を上げる。これらは使用条件、環境に合わせて材料、施工の適合性の確認及び設計上の調整が必要であろう。

ゴム系構造用新材料としては、その用途を海洋構造物の範囲に限定して考えると次のような物が上げられる。

① 反応硬化型注入防食材

ケーブル防食注入材として使用されたウレタン系の特殊ゴムで、微細な間隙までよく浸透する。長いケーブルの外周管と鋼線束の間に注入すれば、素線の隙間にも良く入り込み、優れた防食効果を持つ。特に、大きな繰返し荷重を受けるケーブルに対しては、その効果が大きい。また、構造物の継ぎ目の変形による水の漏れ防止にも、確実な効果が期待出来る。この新しいゴム材料はすでに、長い径間を有する斜張橋のケーブルに 500トンの使用実績を持っている。さらに、材料の品質を維持し、材料の組み合わせによってコストダウン出来る方法の開発のめどがついてきた。

a) 特徴

反応硬化型注入防食材の内の、2液常温硬化型ウレタン系低粘度注入剤の特徴を、以下に示す。

- i. 広い温度範囲での貯蔵、作業安定性を持っている。
- ii. 無溶剤タイプで、安全性に優れている。
- iii. 低粘度で、狭い間隙への注入と浸透性に優れている。
- iv. 卓越した耐加水分解性を有する、ゴム状弾性体を得られる。
- v. 亜鉛メッキに悪影響を及ぼさず、防錆効果が優れている。

なお、施工は配合調整により 5~40℃まで可能である。

b) 一般性状

反応硬化型注入防食材の、2液常温硬化型ウレタン系低粘度注入剤の一般性状を、表-2.3.3に示す。

c) 硬化物の性能

反応硬化型注入防食材の、2液常温硬化型ウレタン系低粘度注入剤の硬化物の性能を、表-2.3.4に示す。

表-2.3.3 2液常温硬化型ウレタン系低粘度注入剤の一般性状

特 性 項 目	単 位	特 性 値		試験方法, 特記事項
		主 剤 (A液)	硬化剤 (B液)	
i. 外 観	原 色	淡黄色透明液状	緑 色 透 明 液 状	
ii. 比 重		0.972	1.072	25°C, JIS K2249
iii. 粘 度	cps	550	750	B型粘度計
iv. 貯蔵安定性	低温側	-5°C×6ヶ月 異常なし	0°C×2ヶ月 異常なし	低温固型物の 発生チェック
	高温側	60°C×6ヶ月 異常なし	40°C×6ヶ月 異常なし	高温固型物の 発生チェック

表-2.3.4 反応硬化型注入防食材の硬化物の性能

特 性 項 目	単 位	特 性 値	試験方法・特記事項
i. 硬 度		30	25°C, JIS A 型
ii. 比 重		1.01	25°C
iii. 引張り強さ	kg/cm ²	16	25°C, JIS K6301
iv. 打継ぎ性: 伸び引張り強さ	% kg/cm ²	210 ~ 270 12 ~ 16	25°C, 打継ぎ間隔 0 ~ 7 日 25°C, 打継ぎ部の引張り試験
v. 耐熱老化性 (硬度保持率)	%	89	80°C乾熱× 170日
vi. 耐湿熱劣化性 (硬度保持率)	% % %	94 81 64	60°C×95%RH×170日 70°C×95%RH×170日 80°C×95%RH×170日
vii. 耐水性 (引張強さ保持率) (伸び保持率)	% %	91 100	50°C温水×72H
viii. 吸 水 率	%	0.14	50°C温水×72H
ix. 透湿係数	g cm/ cm ² sec cmHg	400×10 ⁻¹²	40°C, 90%RH

d) 施工（標準施工法）

i. 連続混合注入システム

A液とB液とを所定の混合比で定量的に混合ヘッドへ圧送し、ヘッド部で混合注入する方式。

ii. バッチ混合注入システム

A液とB液とを所定の混合比で計量、混合した後、圧送注入する方式。

e) 施工実績

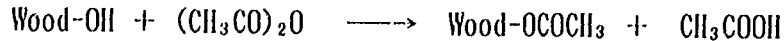
反応硬化型注入防食材の施工実績を、表-2.3.5に示す。

表-2.3.5 反応硬化型注入防食材の施工実績

	名 称	場 所	年/月	納入量	備 考
1	岩黒島橋	本四連絡橋Dルート	61/10 ~ 61/12	約 254m ³	斜張橋ケーブル 防食
2	櫃石島橋	本四連絡橋Dルート	61/11 ~ 62/2	約 239m ³	斜張橋ケーブル 防食
3	青岸橋	和歌山市下津港	61/3	約 701m ³	ロッドコイルロー ープと接合部止水
4	新門司2号橋	北九州市門司区	62/2	約 1 m ³	PE被覆ケーブル 定着部防食
5	雑炊橋	長野県	62/3	約 2601m ³	PE被覆ケーブル 定着部防食
6	呼子大橋	佐賀県呼子町	62/2~62/3 , 63/8	約 10m ³	PE被覆ケーブル 定着部防食
7	防食ケーブル	“大阪見本市会場テントハウス” 展張押さえケーブル “本四公団南備讃瀬戸大橋7A工事区域標識ブイ” 係留ケーブル			

② 高耐久性アセチル化木材

木材のアセチル化は、無水酢酸を用いて次の様な反応を進める。



この処理は、木材成分中の親水性のOH基を疏水性のアセチル基(CH_3COO^-)に置換するとともに、アセチル基の導入によるかさ効果により、寸法安定性を与え防腐性などの改質をするものである。

a) 特徴

- i. 寸法安定性が向上する。
- ii. 防腐効力が抜群によい。
- iii. 防蟻効力を高める。
- iv. 耐候性を増し屋外で長期間使用できる。
- v. 無害(毒)無公害であり性能を恒久的に持続できる。
- vi. 木材の材質感、加工性は元の材料と変わらない。
- vii. どんな樹種でもアセチル化でき、効力を高める事が出来る。

b) アセチル化木材の特徴を生かした使い方

木材をアセチル化すると、従来の木材では考えられなかった使い方ができる。

- i. 寸法安定性から屋外、水中でも大きなサイズで使う事が出来る。普通木材では目スキをつけなければならないが、大きな面積を一枚または突き付けで使う事ができ、出来映えが良い。また水密性が保てる。
- ii. 耐候性の良さから素材のまま屋外に使用でき、木材の情緒性を長く保存出来る。
- iii. 耐腐性、耐候性から、水中、海中でも自由に使用でき、金属やプラスチック、コンクリートなどの表面に複合化して表面劣化を防ぐ用途も考えられる。
- iv. 金属、プラスチック、コンクリート、木材などを使用する上で、性能的またコスト面で問題となっているところの、新素材としても考えたい。

c) 一般性状及び性能

アセチル化木材の一般性状及び性能を、表-2.3.6に示す。

表-2.3.6 アセチル化木材の一般性状及び性能

性質分類	測定項目 (単位・条件)			エゾマツ・カラマツ合板 (厚さ17mm, 5プライ)	
				アセチル化 処 理	無 処 理
物理的性質	比 重	気乾		0.51 ~ 0.54	0.45 ~ 0.47
	含 水 率 (%)	気乾		3.9 ~ 5.0	6.6 ~ 10.4
		吸水		31.7 ~ 39.7	42.0 ~ 51.0
	吸湿, 吸水に対する 膨張収縮係数 (全乾から吸湿また 吸水までの率を示す) (%)	繊維	気乾	0.13	0.16
		方向	吸水	0.12	0.70
		直角	気乾	0.12	0.28
		方向	吸水	0.14	0.80
		厚さ	気乾	0.44	2.19
		方向	吸水	1.29	6.25
	温度に対する線膨張係数			$1.7 \sim 2.5 \times 10^6$	
	熱 伝 導 率 (kcal/mh °C)			0.081	
	絶 縁 抵 抗 (常態)	体積抵抗率 (Ω cm)		3.6×10^{10}	4.0×10^{10}
		表面抵抗率 (Ω)		5.0×10^{10}	3.7×10^{10}
機械的性質	縦 圧 縮 強 さ (kg/cm^2)	気乾		526 ~ 626	442 ~ 479
		吸水		309 ~ 367	148 ~ 171
	曲 げ 強 さ (kg/cm^2)	気乾		795 ~ 1003	570 ~ 801
		吸水		633 ~ 831	376 ~ 525
	曲 げ 弾 性 係 数 ($\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)	気乾		8.6 ~ 11.0	6.6 ~ 10.3
		吸水		7.4 ~ 10.1	4.9 ~ 7.4
	圧縮剪断接着強さ (kg/cm^2)	気乾		74.3 ~ 103.3	65.6 ~ 90.2
		吸水		63.5 ~ 87.6	33.0 ~ 44.0
	硬 さ (kg/mm^2)			3.5/0.8	
	使用温度限界 (°C)			-160 ~ +100	

d) 施工

- i. 一般の木材と同一であり、鋸、カンナ、その他の刃物で簡単に加工出来る。
- ii. 接着加工、釘打ち加工が出来る。この場合の接着剤は、耐水性、耐バクテリア性の物が好ましく、釘はアセチル化木材、クサビは耐食性金属材料を使用すると良い。
- iii. 一般的に、加工は化学的接着と物理的締結を併用することが好ましい。

e) 耐久性に関する実暴露試験

- | | | |
|------------|--|---|
| i. 防腐効力試験 | 土中埋設杭試験
岡山市大建工業
開発研究所内 | 昭和58年より6年経過
アセチル化处理 — 全く腐朽無し
無処理 — 全部腐朽して跡形なし |
| ii. 防蟻効力試験 | シロアリの自然巣
に埋設杭試験
鹿児島県
京都大学木材研究所
シロアリ効力試験場 | 昭和59年より5年経過
アセチル化处理 — 喰害は少ない
無処理 — 喰害を受け跡形なし |
| iii. 耐候性試験 | 屋外暴露台で試験 | 昭和58年より6年経過
アセチル化处理 — 風化割れ無し
無処理 — 風化割れ激しい |

f) 使用実績（実際に製品、構造物として使用している物件の例）

- | | | | |
|-------------------|-----------------|------------|---------|
| i. 海洋 | マリーナ桟橋 | 洲本市 | 昭和60年設置 |
| ii. 公園等のサイン、照明ポール | | | |
| | 奈良県飛鳥村公園サイン | 建設省 | 昭和59年設置 |
| | 岡山県吉備吉原サイン | 岡山県 | 昭和60年設置 |
| | 愛知県緑化センターサインベンチ | 愛知県 | 昭和60年設置 |
| | 水戸市宮脇公園照明ポール | 水戸市 | 昭和61年設置 |
| | ゴルフ場ヤード表示 | 倉敷カントリークラブ | 昭和62年設置 |
| | 青年の家照明ポール | 伊丹市 | 昭和61年設置 |

③ アセチル化木材複合構造物

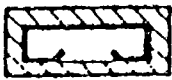
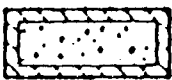
a) 特徴

- i. 防腐、耐候性などの耐久性を必要とした特殊な建物への利用。
- ii. 住宅、別荘などの水廻りで耐久性が問題になっている部位に使い、住宅などの耐用年数の向上を図る。
- iii. 住宅のエキステリアの充実を図る。
- iv. 公園、運動施設、リレーション施設など、人との係わりの大きい分野を豊かにする。
- v. いろいろの産業分野で木材のような素材で耐久性、寸法安定性があれば、新しい使用部位が考えられる。また金属、プラスチックなどの欠点が改良できる。
- vi. 今後開発が促進されていく分野で、新素材としてとり入れる材料に改良された木質素材が適応している部位、製品。

b) 構造（構想）

アセチル化木材複合構造の構想を、表-2.3.7に示す。

表-2.3.7 アセチル化木材複合構造の構想

全 部 アセチル化木材	
普 通 の 木 材 を アセチル化木材で 覆 う	
軽量型鋼, 型鋼を アセチル化木材で 覆 う	
コンクリートを アセチル化木材で 覆 う	
プラスチックを アセチル化木材で 覆 う	

④ 一成分弾性エポキシ系接着剤, シーリング剤

一成分弾性エポキシ系接着剤が、新材料として開発されている。従来の常温硬化型エポキシ樹脂は、主剤と硬化剤とからなる2成分形で、主剤と硬化剤の計量や混合、可使時間など作業性に難点があった。また、硬化時の特性は一般に柔軟性に乏しく、弾性を要求される用途には使用出来なかった。この接着剤はこれらの欠点を解消した、新しい接着剤である。

a) 特徴

- i. 一成分形のため混合の必要がなく、作業性が良好である。
- ii. 適度な弾性を有しており、微少な動きに対する追従性, 耐衝撃性に優れている。
- iii. 常温にて空気中の水分と反応して硬化するので、硬化のための特別な処理を必要としない。
- iv. 各種被着体への接着性に優れている。また被着体への汚染が無い。
- v. 湿潤面のコンクリート, モルタルにも、良好な接着性を保持する。
- vi. エポキシ樹脂特有の匂いが無い。
- vii. 一般のエポキシ系接着剤と異なり、皮膚が被れる事がほとんどなく低毒性である。

b) 物性

一成分弾性エポキシ系接着剤の物性例を、表-2.3.8に示す。

表-2.3.8 一成分弾性エポキシ系接着剤の物性例 (JIS 5758に準拠)

項	目	物 性 値
標 準 養 生 (20℃×14日+ 30℃×14日)	50%引っ張り応力	15 kgf/cm ²
	最大引っ張り応力	18.4kgf/cm ²
	最 大 伸 び 率	100 %
加 熱 老 化 後 (標準養生 + 80℃× 7日)	50%引っ張り応力	23.3kgf/cm ²
	最大引っ張り応力	23.3kgf/cm ²
	最 大 伸 び 率	50 %
水 浸 漬 後 (標準養生 + 50℃水× 7日)	50%引っ張り応力	————
	最大引っ張り応力	9.6kgf/cm ²
	最 大 伸 び 率	25 %
硬 度 (J I S A 型)	標 準 養 生	68
	加 熱 老 化 後	84
	水 浸 漬 後	75
耐 候 性 (W. O. M 1000h)		異常なし

注：被着体 = モルタル（プライマーなし）

c) 接着物性

一成分弾性エポキシ系接着剤の接着物性例を、表-2.3.9に示す。

表-2.3.9 一成分弾性エポキシ系接着剤の接着物性例 (エポソフト)

被 着 体	接着性	被 着 体	接着性
コンクリート・モルタル	○	鉄	○
ス レ ー ト	○	塩 ビ 鋼 板	○
タ イ ル	○	塗板（ソリッド）	△
ネ オ パ リ エ	○	塗板（メタリック）	×
御影石・大理石	○	ポリカーボネート	○
陽極酸化アルミ	○	F. R. P.	○
カラーアルミ	○	A. B. S.	○
ス テ ン レ ス	○	ゴム（NR）	○
銅	○	木 材	○

d) 使用方法

i. 使用方法

施工面の乾燥と清掃は十分行い、レイトンス、油分、離型剤、ゴミなどは接着性を低下させるので十分に除去すること。被着体の状況によりプライマーを使用すること。
(特に水分が乾燥していない場合)

ii. 塗付方法

一成分系で湿気硬化型であるため、空気中の水分と触れないと硬化しない。したがって、全面塗付の場合には櫛目ゴテなどで施工する。

e) 用途

- i. 複合パネル等で、異なる熱膨張係数の部材の貼り合わせ。
- ii. 外壁クラック補修用目地材。
- iii. エポキシ塗り床工事の下地処理材。
- iv. 耐薬品性が要求される用途の目地材。
- v. 湿潤コンクリート、モルタルへの接着が要求される用途の目地材。
- vi. 石材打ち込みP C板の裏面処理用接着剤。
- vii. 生コン打継用接着剤。
- viii. 大型タイル、石材、人工大理石、結晶化ガラス等の接着剤。
- ix. 2成分形弾性エポキシ接着剤の代替え用途。
- x. 車両、保冷車、コンテナ等の構造用接着剤。

f) 施工上の留意点

- i. 施工は 5℃～35℃の環境で行う。
- ii. 外装の施工には、必ず支持金具を併用する。
- iii. 降雨、降雪等の時は、施工を避ける。
- iv. 接着剤の保存は、直射日光を避け湿気の少ない涼しいところに置く。
- v. ガラス、透明プラスチックなどの、接着面に直射日光が当たる部分への使用は避ける。
- vi. 皮膚などに付着した場合は、石鹼などで洗うこと。

⑤ 水中硬化型接着材

エポキシ系水中硬化型接着材で、無溶液常温硬化型のものが開発されている。(例、S T シリーズ) この接着材は、湿潤面や水中でも完全に硬化し、優れた接着性を発揮する。このため、接着面の乾燥が不要になり作業能率が向上する。

a) 特徴

- i. 水中および湿潤面での接着に利用できる。
- ii. 接着材の硬度を広範囲に調整できる。
- iii. ゴムの接着に利用できる。
- iv. 常温硬化型で2液性である。

b) 用途

- i. 海洋ゴム製品の接着および修理
- ii. 水中もしくは湿潤条件下で利用される各種シーリング材, ライニング材

c) 使用方法

i. 接着面の処理

ゴムとの接着の場合は、表面をサンドペーパーなどを用いてバフすること。また、鋼板との接着の場合は、表面をメチルエチルケトンなどの溶剤で脱脂する。

ii. 接着剤の調整及び塗布

所定の混合比に従って採取し、ポリエチレン, 竹, ステンレス製スプーンなどで攪拌する。可使時間は、常温で1～2時間であるため使い切る量の調合を行なう。

d) 種類と物性例

水中硬化型接着材のグレードと物性例を、表-2.3.10 に示す。(STシリーズ)

表-2.3.10 水中硬化型接着材の物性例

		ST-005		ST-006	
		A 液	B 液	A 液	B 液
液 状 時	主 成 分	特殊エポキシ	特殊アミン	特殊エポキシ	特殊アミン
	性 状	黒色高粘土液体	淡褐色ペースト	黒色高粘土液体	淡褐色ペースト
	不揮発分 (%)	100	100	100	100
硬 化 物	外 観	黒色樹脂		黒色樹脂	
	比 重 (g/cc)	1.12		1.19	
A/B 混合比(wt/wt)		1/1		1/1	
T 型 剥 離 強 さ (kg/inch) CR片面 1 week 7 month		6.0 7.0		5.2 —	

海水中で加硫クロロプレンゴム表面をサンドペーパーバフし、これに接着剤を塗布し布補強後、接着剤が片面露出した状態で、海水中で一定期間放置後、剥離強さ測定を行った。
(剥離速度, 50mm/分)

⑥ ハニカムサンドイッチ構造体

プラスチック軽量構造パネルとして、コアにハニカム構造や三角面体、四角面体構造体等を使用したものが、開発され実用化されている。これらは、重量の割に非常に強い強度と剛性があり、さらに衝撃吸収作用もある。実用化されている分野としては、住宅用床材、仕切り板等の建材、テーブル家具類が多い。土木建築分野では、セフティブロック（道路安全防護体）、土砂流失防止柵等いくつか見られる。

a) 構造

i. ハニカムサンドイッチ構造

ハニカムサンドイッチ構造体のハニカムコアは、アルミ箔や紙、プラスチックなどを接着剤で接着して成型した六角柱が、多数集まり蜂の巣状をした構造をしている。このハニカムコアは、空気90～99%、コア材10～1%の容積比率であるため非常に軽く、通常はその表面にアルミ板やFRP板などを接着剤で接着して、サンドイッチ構造を作っている。ハニカムサンドイッチ構造の例を、図-2.3.5、図-2.3.6に示す。

ii. 3面体サンドイッチ構造

3面体サンドイッチ構造の例を、図-2.3.7、図-2.3.8に示す。

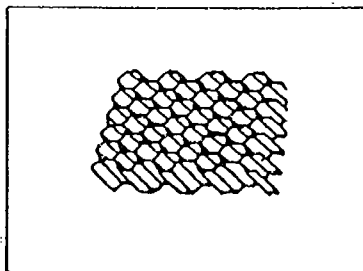


図-2.3.5 ハニカムコア

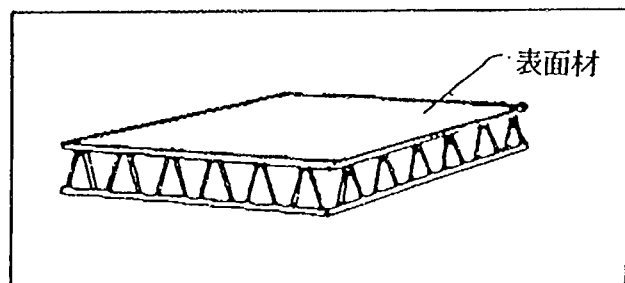


図-2.3.6 サンドイッチパネル

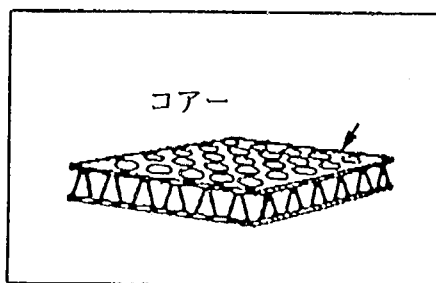


図-2.3.7 コア

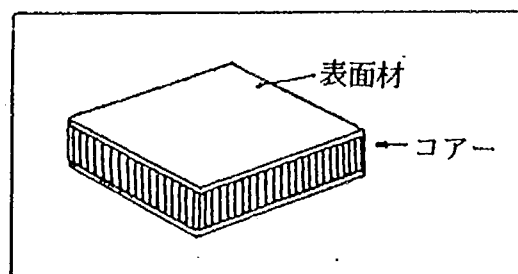


図-2.3.8 サンドイッチパネル

b) 材料性状

i. 材質 — コア材：PE、ABS、PP、PC、PS等

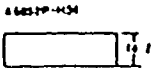
表面材：コア材と同一及び金属、不織布等

ii. 特性 — コア構造、コア膜厚、コア材質、表面材質厚さ、パネル厚等の種々の条件により特性が大きく影響される。（剛性、衝撃性、寸法安定性、耐光性、化学薬品性、耐熱性等）

c) 物性

アルミハニカムパネルの物性を、表-2.3.11 に示す。

表-2.3.11 アルミハニカムパネルの比強度（他材料との比較）

パネルの種類	パネルの断面構造 (厚さ: mm)	単位幅当たりの 曲げ剛性(kgcm ³ /cm)	パネル重量 (kg/m ³)	重 量 比
アルミ ハニカム パネル		1.55×10^3	5.40	1.0
アルミ・バルサ サンドイッチ 構 造		1.55×10^3	6.60	1.2
合 板		1.55×10^3	20.9	3.9
耐 食 アルミ板		1.55×10^3	38.1	7.1

d) 加工性

接合 : 直接融着, 接着剤

切断 : ボトワイヤ, ノコギリ

⑦ 新素材複合支援原材料（構造用接着剤）

ここでは複合材料に使用される構造用接着剤をあげる。特に複合材を作る場合には複合される材料の特性に合わせた接着剤を選ぶ必要がある。また、木材料としては水分、アルカリ、バクテリア等の耐久性にも注意を要する。

a) 特徴 — 異なる材料，同一材料に対し高度の接着性を保持させる事ができる。

b) 一般性状

構造用接着材の一般性状を、表-2.3.12 に示す。

表-2.3.12 構造用接着材

		ナイロン エポキシ	ビニル フェノ リック	変性 ニトリル エポキシ	ニトリル フェノリ ック	弾性エポ キシフェ ノリック	ポリ イミド
硬化 条件	温 度 (°C)	168 ～175	165 ～175	105 ～120	177	165 ～195	280 ～290
	時 間 (分)	60	60	60 ～90	30	60	90
	圧 力 (kg/cm ²)	0.35	14	0.17	7	0.28	0.28
最高使用温度 (°C)		95	105	120	177	260	370
備 考		剝離強さ 大	剪断強さ 中	低温硬化	耐熱性 中	耐熱性 大	耐熱性 大

(3) 今後の展開

今後の海洋利用空間の創成等のための海洋構造物には以下のような目的で、ゴム，高分子（プラスチック），高分子系アセチル化木材等が使用され、有効な効果を発揮するものと考えられる。

① 既存技術の拡大

- | | |
|---------------------|---------------|
| a) ケーソン継ぎ目の止水，緩衝 | (外洋対応) |
| b) 大水深シールドトンネル止水，緩衝 | (高水圧，大伸縮) |
| c) 浮栈橋の本体，係留ワイヤー | (景観，防食) |
| d) プレハブ式軽量橋梁 | (軽量，防食，施工合理化) |
| e) 消波構造物 | (耐久性，加工性) |

② 新技術の拡大

- a) 浮体式駐車場
- b) 大深度地下構造物
- c) 洋上生活施設
- d) 海中貯蔵施設
- e) 魚礁

2.3.5 使用指針（案）

(1) 適用範囲

1. 一般

ゴム、高分子材料（プラスチック）を海洋構造物の構造用材料として使用するにあたっては、使用環境の要求特性を満足する設計、施工を行わなければならない。

（解説）

高分子系構造材料にはゴム、プラスチックがある。ゴム系材料は、止水、緩衝、伸縮吸収、振動防止等に使用する。プラスチック系材料は、軽量、高強度、耐食を必要とする部位に使用する。

使用に当たっては、何れも使用環境条件の要求特性を事前に調査し、これに適合した材料配合、加工方法等を検討し、設計を行わなければならない。

施工にあたっては、構造物との取り付け部位の相互適合性を考慮し、できる限りの条件で施工を行う必要がある。

(2) 品質基準

2. 設計・施工

(1) ゴム、高分子材（プラスチック）は、使用環境の要求特性に適合した設計をしなければならない。

(2) ゴム、高分子材（プラスチック）の施工に当たっては、施工の行い易い条件のもとで出来る限り要求特性を満足させる、施工を行わなければならない。

（解説）

(1)高分子系構造材料としてのゴムは配合材料を使用しているので、特性の幅を要求特性に合わせて作る事が可能である。したがって設計する場合に、環境条件の要求特性に合わせた設計、および十分な品質管理の行われた加工条件の基で設計された材料が、作られることが必要である。特に海洋構造物に使用する場合、耐オゾン性を保持する必要がある。材料配合及び設計、施工に当たっては、出来る限り圧縮方向に使用する様に配慮する必要がある。適性な条件が得られれば、ゴム支承で 100年、その他では60年位の寿命を保ちうるであろう。実績としては、30年位のものがある。

(2)プラスチックは軽量、強度、耐食性については、補強繊維樹脂材料の選択によって要求特性に適合した材料を作る必要がある。また、施工に当たっては切断面の処理と締結部の設計を確実にを行う必要がある。以上により、FRPの寿命は、30年以上の実績を有しているものもある。

(3) 維持管理

3. 維持管理

ゴム、高分子材（プラスチック）の維持管理は次の項目によって行う。

- (1) 巡視点検
- (2) 清掃
- (3) 修理

（解説）

維持管理技術としては、施工後の経年フォロー、経年対比の現場暴露試験の実施が必要であるが現状はそこまで至っていない。

従って、巡視点検によって外傷、生物付着、その他有害と思われる事項を目視で判断し、修理を行う。

2.3.6 まとめ

- (1) ゴム、高分子材料（プラスチック、アセチル木材等）を海洋構造物に構造材として利用する場合、その固有特性を有効に利用することが必要である。例えば、ゴムの場合には、弾性を利用することによる構造物継ぎ目の止水や、また構造物に対する緩衝等に有効である。プラスチックは素材単体でも使用できるが、軽く、使用目的に対して幅広い対応ができるため、補強材と複合化して軽量の構造材を作るのに有効である。また、高分子アセチル木材は、その寸法安定性、耐腐食性、加工性が良好で、加えて軽量、肌合いのよさから、今後各種の強度構造材との複合新構造材を作るのに有効であろう。
- (2) 従来の土木構造材としての鉄、セメントにない特性を持つゴム、高分子材料を使用する場合、注意しなければならないことは次のことである。
 - ① ゴム、高分子を海洋構造物に使用する場合、耐オゾン保護と分子間の連鎖を長く保たせるため、設計上張力のかからない状態で使用できる様に配置する。
 - ② 構造物に於ける要求特性を、出来る限り先行事例を調べて明らかにする。ゴム、高分子には配合剤、添加剤等が使用されていることが多い。そのため、物性に大きい幅がとれる場合もあるので、この性質を有効に使う必要がある。このため、要求特性に対応する材料設計を行う。
 - ③ ゴム、高分子、高分子アセチル化木材等を、鉄、セメント等の構造物に単一材、または複合材として使用する場合、鉄、セメント等の構造物との接合設計に注意する。特に完全固定接合の場合は、構造物の温度に対する伸縮との相関性を加味した設計を行う。
- (3) ゴム、高分子系単一材、複合材を海洋構造物に使用する時、信頼性と安全率は大切な問題である。鉄筋コンクリートは1868年に開発され、すでに 120年の実績を持っている。ゴム、高分子の単一材、複合材の実績は、ゴム支承が1889年から使用され約 100年、その他はまだ約30年程度である。したがって多くの場合、促進試験による各種物性値の経年予測が行われている。これら促進試験の多くは、連鎖構造を持つゴム、高分子について起こる幾つかの化学反応の集積としてとらえ、反応速度の温度変化から計算される見掛けの活性化エネルギーを求め、寿命の推定が行われている。（Arrhenius のプロット）しかし、この予測方法では、インプットする値が幅をもつ平均値でありそれらを結ぶ曲線の外挿上の点も不確実さが残る。したがって、安全率はできる限り促進試験の推定寿命より安全側にとるとよい。

2.3.7 今後の課題と提案

(1) 現状の問題点

- ① 現場における、過去の使用材に対して相関出来る材料の評価システムが取れていなかった
ので、安全率を高くとらねばならない。
- ② 現場における、要求特性と材料特性のコーディネイトがシステム化されていないので、現
在の段階では信頼性に不安を残している。
- ③ 構造用ゴム、高分子が広く使い始められているので、先行事例の少ない新材料として寿命
の推定に不安を持っている。
- ④ ゴム、高分子材料は、鉄、セメントに比べて価格が高いので、更に要求特性に合わせてコ
スト、性能の適性化を計る必要が有る。

(2) 研究課題

- ① 緊急を要するもの
 - a) 国内外の先行事例データ調査
 - b) 分析、欠落データの補充実験
 - c) 既存ゴム、高分子材料の利用指針案作り
- ② 中期的課題
 - a) 境界層の複合化技術（構造用強度締結，耐止水）
 - b) 寿命予測システム
 - c) 補修技術の認定

(3) 提案

- ① ゴム、高分子材料を構造材に使用する場合、ゴム、高分子の専門技術の分野と、土木構造
物の技術分野は高度の技術を有しているが、この2つの異なる技術を結びつける境界層の技
術分野が欠落している。構造材料として長所を伸ばし短所を少なくするためには、これら境
界層の技術の向上を計る必要がある。

提案例：テクノロジーコーディネーター，システムによる研究会，委員会，等の活用

- ② 評価，設計技術については、提案例を活用し寿命予測データシステムを作る努力をする必
要がある。
- ③ 耐久性については、境界層の技術による複合性能の向上、および寿命予測が可能となれば、
適当な維持管理のもとではゴム支承 100年とまでは言わないが、60年以上は安心して使用出
来ようになるであろう。
- ④ 具体的な適用としては、ゴムの単一材としてはゴム支承の 100年、また沈埋トンネルのガ
スケットの30年以上、シールドトンネルの15年以上等の実績を有している。また、高分子
（プラスチック）では、新材料であるので使用実績も浅く、船、栈橋、防食カバー等に約20
年未満の実績を有しているに過ぎない。しかし、今後の海洋利用空間の創成のための海洋構

造物等の、以下のような部位には、ゴム，高分子（プラスチック），高分子アセチル木材等が有効な効果を期待出来るものと思われる。

- | | |
|---------------------|---------------|
| a) ケーソン継ぎ目の止水，緩衝 | (外洋対応) |
| b) 大水深シールドトンネル止水，緩衝 | (高水圧，大伸縮) |
| c) 浮棧橋の本体，係留ワイヤー | (景観，防食) |
| d) プレハブ式軽量橋梁 | (軽量，防食，施工合理化) |
| e) 消波構造体 | (耐久性，加工性) |

これらの物以外にも、今後多くの用途が期待出来るであろう。そして、材料の複合化による新複合材の開発が進めば、さらに厳しい要求にも対応が可能になる。総合的には、ゴム，高分子材を利用する場合、2つのポイントが上げられる。

- a) 機能的に、他に代替が無い。
- b) 加工，施工，性能，維持管理等を含めて、トータルコストが安くなる。

このような時は、大きなメリットが期待できる。

- ⑤ 行政的には、設計，品質の基準案を先行実績を基に作り、体系化する必要がある。この場合、異種技術接着の役目をはたす人材の活用も、ゴム，高分子については有効であろう。いずれにしても、土木新材料認定システムの活用を目標に、官，民一体になって利用指針を明らかにする必要がある。

2.3.8 参考文献

- 1) 荒木 透 : 海洋開発新材料の動向
- 2) 小林 辰夫 : ゴム材料，土木施工，26，5，(1985.4 臨)
- 3) 宇佐美民雄，大石不二夫共著 : ゴム材料の選び方・使い方，オーム社，(1985)
- 4) 日本ゴム協会編 : 新ゴム技術入門，日本ゴム協会，(1975)
- 5) 国沢 新太郎他 : ゴム材料選択のポイント，日本規格協会，(1979)
- 6) 古川 淳二 : ゴム産業と先端産業との関係，日本ゴム協会誌，59 (1986)
- 7) 岡田 章 : 日本ゴム協会誌，52，P.502，(1979)
- 8) 山本 新治 : 短繊維強化ゴムの一動向，日本ゴム協会誌，60，(1987)
- 9) 島村 昭治 : これからの高分子系複合材料，日本ゴム協会誌，58，(1985)
- 10) 山下 晋三 : ゴムに対する機能の付与とその発現，日本ゴム協会誌，58，(1985)
- 11) 小林 辰夫 : 大水深大型設置ケーソン刃口モルタル洩れ防止材に関する研究，土木学会論文集，第367号，(1986)

2.4 繊維系

繊維材料を分類すると表-2.4.1（左側）のように、主として衣料に用いる紡織繊維と、主として産業資材として用いる特殊機能繊維とに分けられる。この中で、海洋構造用材料として使用されているもの、あるいは将来使用されると予想されるものを、同表-2.4.1（右側）に示し、対象とする用途別の概要を以下に述べる。

2.4.1 複合材料用強化繊維

海洋構造物、例えばデッキ、フロート、アンカー、消波構造物等にも、今後複合材料（FRP、FRM等）が増々使用されてゆくものと思われる。複合材料の性能を左右するのは、それに用いる強化繊維の性能である。

複合材料用強化繊維として用いられている主な繊維を、表-2.4.2に示す。この中で、FRP（樹脂マトリックス複合材料）用強化繊維としては、炭素繊維、ガラス繊維、アラミド繊維等が、FRM（金属マトリックス複合材料）用強化繊維としては、炭化ケイ素繊維、ボロン繊維、炭素繊維等が多く用いられている。特に炭素繊維、アラミド繊維が、将来の高性能複合材料の主要強化繊維として期待されている。

複合材料の最大の特徴は、軽量性すなわち単位重量当たりの強度（比強度）、弾性率（比弾性率）が高いことである。図-2.4.1に、各種繊維の比強度／比弾性率を、図-2.4.2に、これらの複合材料の比強度／比弾性率を示した。斜線の範囲内のものは、特に最近、先進複合材料（ACM: advanced Composite Materials）として注目されているものである。

表-2. 4. 1 繊維の分類と海洋構造物用の対象となる繊維

繊維の分類			海洋構造物の対象となる繊維				
			複合材料	コンクリート 補強	膜材料	ロープ (ワイヤー)	その他 (ジオテキスタイル)
1. 一般紡織繊維	天然繊維	植物繊維	綿		○	○	
			麻(亜麻, ラミー)				○
		動物繊維	絹				
			羊毛				
	化学繊維	再成繊維	レーヨン				
			(ポリノジック)				
			キュプラ				
		半合成繊維	アセテート				
			トリアセテート				
			プロミックス				
		合成繊維	ナイロン(ナイロン6)		○	○	○
			(ナイロン66)		○	○	○
			アクリル	○			
		(アクリル系)	ビニロン	○	○	○	○
			ビニリデン				
			ポリ塩化ビニル				
			ポリエステル		○	○	○
			ポリエチレン	○			○
			ポリプロピレン				○
			ベンゾエート				
			ポリクラール				
			石綿(クリソライト, アモサイト)		○		
			炭素繊維	○	○		
			セラミック繊維	○			
2. 特殊機能繊維	高強度(高弾性率)繊維 および耐熱性繊維	ガラス繊維(E, S)	○	○	○		○
		炭化ケイ素繊維	○				
		アラミド繊維	○	○	○	○	○
		フェノール系繊維					
		耐炎繊維		○			
	高弾性繊維 耐薬品性繊維 易溶性繊維	ポリウレタン系繊維					
		フッ素系繊維					
		ポリビニルアルコール繊維					

表-2.4.2 主な複合材料用繊維の特性

材 質	商 品 名 (メーカ)	密度 g/cm ³	繊維径 μm	引張強度 kg/mm ²	弾性率 kg/mm ²	伸度 %	組成・製法・特徴など
【炭素繊維・無機系】							
炭素繊維 (PAN系)	トレカ T300 (東レ)	1.76	7	360	24,000	1.5	SiC、ポリカルボクサン繊維の組成 SiC/W、CVD法、多相繊維 B/W、CVD法、多相繊維 Al ₂ O ₃ 、α-アルミナ、単結晶、連続糸 Al ₂ O ₃ (95)/SiO ₂ (5)、θ-アルミナ、多結晶 Al ₂ O ₃ (62)/SiO ₂ (24)/B ₂ O ₃ (14)、非晶質 Al ₂ O ₃ (99.5)/MgO(0.5)、α-アルミナ、多結晶 Al ₂ O ₃ (85)/SiO ₂ (15)、γ-アルミナ、多結晶 SiO ₂ (54)/Al ₂ O ₃ (15)/CaO(17)/MgO(5) /B ₂ O ₃ (8)/Na ₂ O(1) SiO ₂ (65)/Al ₂ O ₃ (25)/MgO(10) SiO ₂ (65)/Al ₂ O ₃ (23)/MgO(11)
	トレカ T800 (東レ)	1.80	7	570	30,000	1.9	
	トレカ M050 (東レ)	1.91	7	250	50,000	0.5	
炭素繊維 (ピッチ系)	Thornel P55 (UCC)	2.00	11	200	38,000	0.5	
	Thornel P100 (UCC)	2.10	10	210	72,000	—	
炭化ケイ素繊維	ニカロン (日本カーボン)	2.55	10~15	300	20,000	1.5	
	— (AVCO)	3.5	100	350	45,000	—	
ボロン繊維	AVCO Dorn (AVCO)	2.6	100	400	42,000	—	
アルミナ繊維	Saphicon (TYCO)	3.99	250	240	46,000	—	
	Saffil (ICI)	3.4	3	100	10,000	—	
	Nextel (3M)	2.5	10~12	152	15,000	—	
	Fiber FP (Du Pont)	3.9	20	142	39,000	0.35	
	住化アルミナ (住友化学)	3.2	9	260	25,000	0.05	
ガラス繊維	E-ガラス	2.6	8~12	357	7,440	—	
	S-ガラス	2.55	8~12	459	8,870	—	
	T-ガラス	2.49	9~13	495	8,600	—	

材 質	商 品 名 (メーカ)	密度 g/cm ³	繊維径 μm	引張強度 kg/mm ²	弾性率 kg/mm ²	伸度 %	組成・製法・特徴など
【炭素繊維・有機系】							
アラミド繊維	Kevlar 29 (Du Pont)	1.44	12	200	6,350	4.4	$\left[\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NHOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO} \right]_n$ 湿式紡糸
	Kevlar 49 (Du Pont)	1.45	12	200	13,300	2.8	
	テクノーラ (帝人)	1.39	12	310	7,000	4.4	
ポリアリレート繊維	エコノール (住友化学/日本エクステル)	1.40	17.4	308	13,600	2.9	液晶ポリマー、溶融紡糸 $\left[\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO} \right]_m \left[\text{O}-\text{C}_6\text{H}_3-\text{CO} \right]_n$ 液晶ポリマー 溶融紡糸
	Vectran (Celanese)	1.40	22	290	7,055	3.7	
ポリエチレン繊維	Spectra 900 (Allied)	0.97	38	264	12,200	3.5	ゲル紡糸、超延伸 Spectra 1000 (Allied)
	Spectra 1000 (Allied)	0.97	28	306	17,500	2.7	
【ウイスキー】							
炭化ケイ素	トーカウイスキー (東海カーボン)	3.19	0.1~1.0	306~1,430	40,000 ~71,400	—	β-SiC、長さ=50~200μm
窒化ケイ素	SNW (タテホ化学)	3.10	0.1~0.6	1,400	30,600	—	α-Si ₃ N ₄ 、長さ=50~200μm
炭 素	グラスカー (日機装)	2.25	0.1~1.0	700~2,100	70,000 ~80,000	—	C、長さ=10~200μm

2.4.2 膜材料用強化繊維および基布¹⁾

膜材は、織物（基布）に軟質熱可塑性樹脂またはゴムを被覆したもので、補強膜、コーティング織物（布）、時には、キャンバス、ターポリン、ゴム引布など様々な名称で呼ばれている。

織物の基本的組織は平織であり、その他引張、引裂強度など機械的特性を改善するために、マット織りなどの変化組織も使われている。

基布は膜材の引張強度、引裂強度などの機械的特性を受け持ち、被覆材は耐候性、防水性、防カビ性、着色の他、接合加工性などを付与する。表-2.4.3に、現在わが国で使用されている膜材の素材の一例を示した。一般に、引張強度 30~150kg/cmの基布が用いられる。

今後注目される被覆材として、ガラス繊維との接着性能が良く、耐寒性、透明性などの優れたシリコンゴムがある。表-2.4.5に、各素材の特長を示した。その中で現在、一般的に用いられている代表的な素材の組み合わせの例を次に示す。

PVC-PET	一般膜構造物（汎用）
PVC-ガラス繊維	一般膜構造物（難燃）
CSM-PET	大型膜構造物
PTFE-ガラス繊維	恒久巨大膜構造物
PVC-PET（フッ素フィルム貼り合わせ）	防汚性

(1) 基 布^{2), 3), 4), 5)}

膜材の機械特性を担う基布は、遮蔽性を付与するため被覆材との積層体として使われるため、直接海水中に暴露されないが、シートの端面、縫製部あるいは被覆材の損傷部などから海水がシート内部へ侵入する恐れがあるので、海水中での物性変化の少ない材料が望ましい。

ナイロン、ポリエステル、ビニロンなどの汎用繊維について、長期にわたる海中浸漬試験が実施されている。国内各地で2年間浸漬した結果は、ビニロンの強度（引張および引裂）低下が大きく、耐久性の点で問題がある。その次に低下があるのがポリエステルで、ナイロンは相対的に強度低下が少ない。また、海中備蓄用の柔構造材としての検討もなされており、この場合もナイロン、ポリエステルが有力な候補とされている。

アラミドは、軽量高強力の基布が得られるという点で魅力ある素材であるが、耐水性に問題がある恐れがある。テフロンをコーティングした場合でも、海水浸漬1年で強力が低下し、特に水面付近（スプラッシュゾーン）では半分以下になるとの報告もある。

その他の素材として、耐久性のデータが不足しているが、高分子ポリオレフィン系、超延伸ポリアセタールなども高強度材料として対象になるものと思われる。

(2) 被覆材

膜材の表面特性は、被覆材の性質に左右される。海洋構造物の被覆材としては、金属へのライニングも含めて多種類の材料が使われている。たとえば、鋼管のライニング材としてのクロロプレンゴムの耐久性は、12年間良好であった例もある。

膜材は被覆材によって、波浪による揉み作用、付着生物や浮遊物による損傷などから保護されており、基布単独の場合より海中浸漬による物性低下は少ない。

被覆材としては、これまでに実績のあるクロロpreneゴム、ハイパロンゴム（クロルスルホン化ポリエチレン）、ウレタンゴム、フッ素系ゴムなどのゴム類、およびポリ塩化ビニル（PVC）、塩素化ポリオレフィン、エチレン／酢酸ビニル共重合体（EVA）、ポリウレタンなどの樹脂類が候補となろう。しかし、浮魚礁に使用したPVCコーティングのポリエステル膜材は、5年間で引裂強度が半分以下に低下した例もあり、可塑剤などの添加剤を多く配合する場合は、材料物性の経時変化に注意する必要がある。

表-2.4.3 代表的な膜材の素材

繊維素材	コーティング材
綿 ポリエステル合成繊維（PET） ポリアミド合成繊維（PA） ポリビニルアルコール合成繊維（PVA） ガラス繊維 ポリアラミド合成繊維（PAr）	塩化ビニル樹脂（PVC） クロロpreneゴム クロルスルホン化ポリエチレンゴム（CSM） シリコンゴム（Si） 四フッ化エチレン樹脂（PTFE）*1 フッ化エチレン・プロピレン樹脂（FEP）*1 フッ化ビニリデン樹脂（PVDF）*2 フッ化ビニル樹脂（PVF）*2

*1) コーティングを高温で行うため、ガラス繊維あるいはポリアラミド合成繊維のみに適用される
*2) 防汚・耐候性を向上させるため、被覆材の表面にフィルムラミネートして用いる

表-2.4.4 各素材の特長

	品名	長所	短所
被覆材	CR	接着加工ができる	耐候性良くない
	CSM	耐候性が良い、比較的防汚性良い 着色性良い	膜材接合加工に難点がある、一般に ミシン縫製が多く用いられる
	PVC	最も汎用性に富む、安価、着色性良い 膜材接合加工性良い	防汚性悪い 防火性に難点あり
	PTFE	耐候性、防火性、防汚性に優れている	被膜が固いため、膜材接合加工時、 建設時のハンドリングに注意を要する。
	Si	耐候性良い、ガラス繊維とのなじみが 良い、透明性良い	防火性に難点あり 膜材接合に難点あり
	ふっ素樹脂 フィルム	耐候性、防汚性良い	フィルムが硬いため膜材接合時のシ ワが残る、単純形状のみ使用される
繊維素材	綿	通気性が良いため、居住性が良い	耐候性悪い、吸水による重量増あり
	PA	モジュラス小さく融通性あり、染色性良い	耐候性良くない
	PVA	耐候性良い	吸湿時収縮により膜材に過度の応力
	PET	耐候性良い、バランスとれた性質を有する	ガラス繊維と比べると防火性に劣る
	PAr	高強度、耐熱性に優れている	耐候性など膜材としての適性に不明 の点がある
	ガラス繊維	防火性、耐候性、透明性に優れている	耐折曲げ性、耐引張性に問題がある

2.4.3 係留ロープ^{7)~18)}

(1) 合成繊維の適性

従来より、海洋の自然挙動すなわち巨大な海洋エネルギーの制御に関連する諸材料としては、金属材料、コンクリートおよび近年に至って一部FRP等の強靱な硬い材料が主に使用されていた。これらの硬い諸材料は、波浪、潮流、水圧等の海洋エネルギーを正面から受けとめ、反射させることを目的とする。

一方繊維、特に合成繊維は、従来の漁網、ロープ等の漁業用資材の範囲から大きく用途が拡大され、水産を始めとする海洋開発のほとんどの分野に幅広く利用されようとしている。これは海洋開発の多様性、規模の巨大化の必然性から当然のことと言えよう。

合成繊維を海洋工学用材料として見た場合、以下の特徴が上げられる。

- ①比重換算強度が、金属材料に十分匹敵できるものである。
- ②エントロピー弾性を有する。
- ③比重が海水に近似していて、金属材料、無機材料より極めて小さい。
- ④腐食しにくい。

これらの特徴を持つ合成繊維と硬い材料とを組み合わせ構造体とした場合、構造体が海洋エネルギーの緩衝効果を具備しうることとなる。

構成分子の動き難さと結晶性との関係（繊維材料の資質）を、図-2.4.3に示す。繊維材料、特にナイロン、ポリエステル等の汎用高強度合成繊維が、物性面、加工性面および価格面で、最もバランスのとれた海洋開発用繊維素材と言えよう。

繊維ロープは、用途に応じた原料繊維の使い分けと、ロープとしての構成、構造の違いを合わせると、非常に数多くの種類になる。すなわち三つ打ちや四つ打ちのロープ、編索等があり、さらに用途上必要な重量を加えるためのワイヤロープ、ワイヤストランドあるいは鉛類を撚り込んだロープもある。繊維ロープとして具備すべき目標（条件）として、次のような項目が上げられる。

- ①全長にわたり直径むら、撚りむら、強度むらのないこと。
- ②使用目的に適する伸度、柔軟性を有すること。
- ③性能が一定期間、持続すること。
- ④耐摩耗性があり、経時変化がなく、形崩れ、キンクを起こさないこと。
- ⑤加工や取り扱いが容易であること。
- ⑥経済的であること。

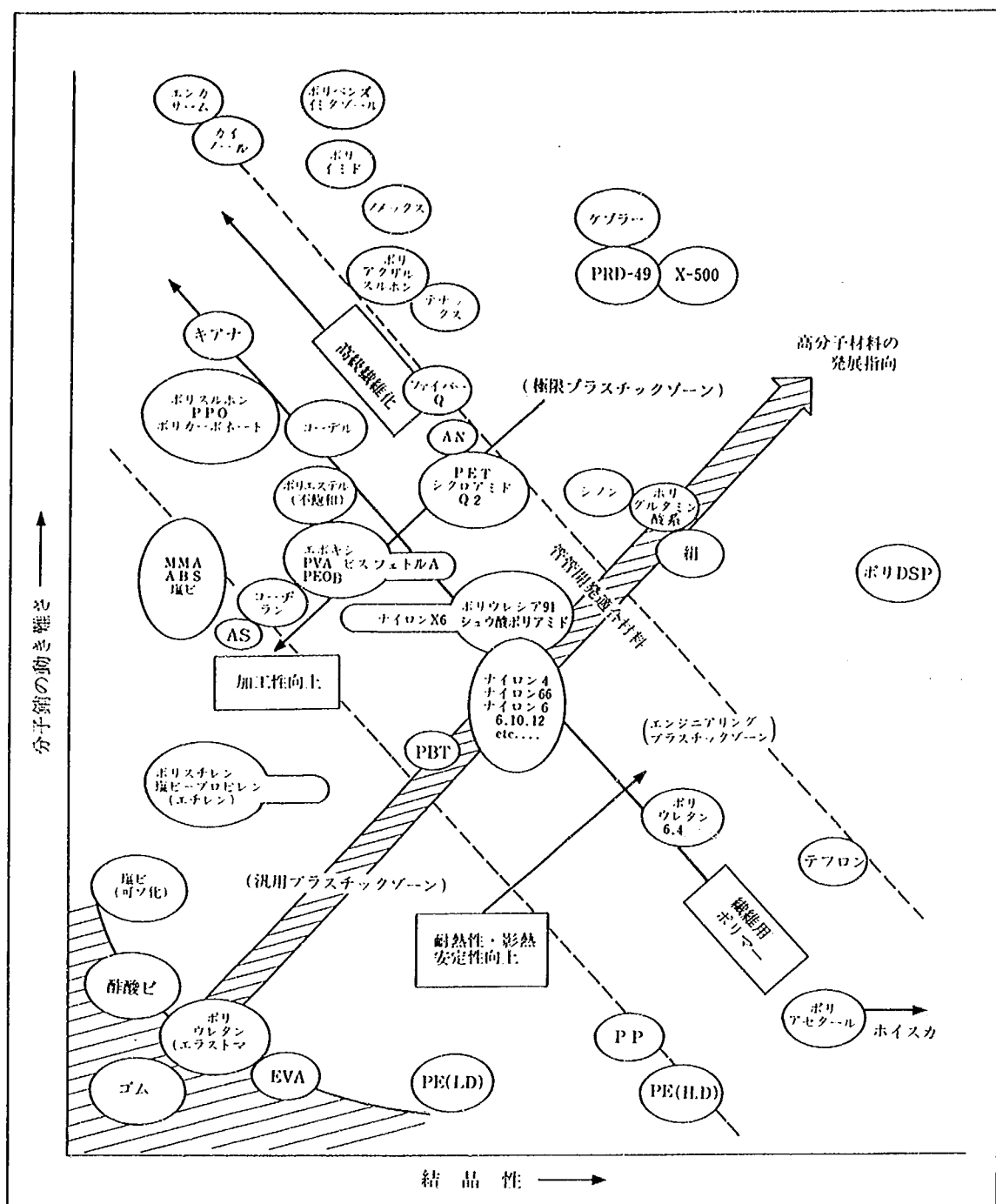


図-2.4.3 繊維材料の資質

(2) ロープに使用される繊維

一般に使用されている繊維類は品種だけでも10種を超え、それらが色別、繊維度別に使い分けられているので、非常に多く分類、仕分けされる。Du Pont 社のケブラー、帝人のテクノーラおよび Enka Glanzstoff社のアレンカは、わが国では試用の段階であるが十分注目すべき繊維である。

海洋水産に使用される合成繊維の一般特性を表-2.4.5に、高性能繊維特性を表-2.4.6に示す。各種繊維の引張応力と歪との関係を、図-2.4.4に示す。

表-2.4.8 合成繊維の特性

性 質	繊維名	ポリアミド		P.V.A 繊維		ビニリデン	塩化ビニル	ポリエステル		アクリル		ポリエチレン	ポリプロピレン	
		ナイロン 6		ビニロン		サラソ		テトロン		スフ		(低圧)		
		スフ	普通 フィラメント	普通 スフ	普通 フィラメント	フィラ メント	フィラ メント	スフ	普通 フィラ メント	I	II	フィラ メント	スフ	フィラ メント
引張強さ g/D	乾	4.7~6.7	5.0~6.4	3.8~6.2	3.5~4.5	1.5~2.6	2.7~3.7	4.4~5.5	4.3~5.5	2.5~4.6		5.0~9.0	4.5~7.5	4.5~7.5
	湿	3.9~5.7	4.2~5.9	3.2~5.0	2.6~3.7	1.5~2.6	2.7~3.7	4.4~5.5	4.3~5.5	2.0~4.5		5.0~9.0	4.5~7.5	4.5~7.5
伸び %	乾	38~50	28~42	15~26	14~19	18~33	20~25	40~50	16~32	27~48		8~35	30~60	15~35
	湿	40~53	36~52	16~27	14~22	18~33	20~25	40~50	16~32	27~58		8~35	30~60	15~35
結節強さ g/D		3.7~5.5	4.5~5.4	2.5~4.0	2.8~3.4	1.0~2.0	1.8~2.7	3.7~5.0	3.4~4.4	2.0~3.5		3.5~5.7	4.0~6.0	4.0~6.0
比重		1.14		1.26~1.30		1.70	1.39	1.38		1.14 ~1.17	1.28	0.94 ~0.95	0.91	
3%伸び の回復率		95~100	98~100	75~85	70~90	93~100	80~90	85~95	95~100	90~95		85~97	90~100	
水分率 %	公定	4.5		5.0		0	0	0.4		2.0		0	0	
	標準	3.5~5.0		4.5~5.0 3.5~4.5		0	0	0.4~0.5		1.2~2.0 0.5~0.8		0	0	
熱の影響		軟化点 180℃ 融点 215~220℃		軟化点 220~230℃ 融点不明		軟化点 150 ~180℃ 融点 180 ~200℃	融点 200 ~210℃ 軟化点 60~70℃	軟化点 238~240℃ 融点 255~260℃		軟化点 190 ~240℃	軟化点 150℃ 融点 210 ~230℃	軟化点 100 ~115℃ 融点 125 ~135℃	軟化点 140~160℃ 融点 165~173℃	
耐酸性		強さ少し低下 やや変質		強さほとんど低下し ない		強さ低下 しない	強さほと んど低下 しない	強さほとんど低下し ない		強さほとんど低下し ない		強さほと んど低下 しない	強さやや低下 しない	
酸の影響		濃塩酸、硫酸、硝酸 で一部分解してとけ る		濃塩酸、硫酸、硝酸 で膨潤あるいは分解 する		濃塩酸、 硫酸で強 さ低下し ない	濃塩酸、 硫酸で強 さ低下し ない	濃塩酸や硫酸で強さ 低下しない		濃塩酸や硫酸で強さ 低下しない		濃塩酸や 硫酸で強 さ低下し ない	濃塩酸、硫酸で強さ 低下しない	
アルカリ の影響		濃かせいソーダ液で 強さ低下しない		濃かせいソーダ液で強 さ低下しない		濃かせい ソーダ液 で強さ低 下しない	濃かせい ソーダ液 で強さ低 下しない	強アルカリ中長時間 放置で強さ低下		濃かせいソーダ液で 強さはほとんど低下 しない		濃かせい ソーダ液 で強さは ほとんど 低下し ない	濃かせいソーダ液で 強さはほとんど低下 しない	
他薬品の 影響		一般に良好な抵抗性		一般に良好な抵抗性		ほとんど 変化し ない	ほとんど 変化し ない	一般に良好な抵抗性		一般に良好な抵抗性		ほとんど 変化し ない	ほとんど変化しない	
溶剤の 影響		フェノール類、濃 酸に溶解、水酸に膨 潤、一般に不溶		熱ビリジン、フェノ ール、クレゾール、濃 酸に膨潤あるいは分 解		テトラヒ ドロフラン 、ジメ チルホル ムアミド 、シクロ ヘキサノ ンに溶解	テトラヒ ドロフラン 、ジメ チルホル ムアミド 、シクロ ヘキサノ ンに溶解	m-クレゾール、o- クロロフェノール、熱 ニトロベンゼン、熱 ジメチルホルムアミド に溶解 一般に不溶		ジメチル ホルムア ミド、ス ルホキサ イドに溶 解	アセトン 、ジメチ ルホルム アミド、 スルホキ サイドに 溶解	ベンゼン、 ガソリン 、四塩化 エタンに 熱膨潤	ベンゼン、ガソリン に熱膨潤 四塩化エタンに高温 で徐々に溶解	
染色		一般に用いられる染料 ：分散および酸性 染料		一般に用いられる染料 ：直接酸化還元染料 ：フタール、分散、染料、顔料		顔料	用いられ る染料 ：分散ナ フトル キヤン ヤ染色	分散、ナフトール還元 染料、可溶性バット染料、 キヤンヤ染色		分散、カチオン、塩 基性、酸性クロム、 還元、酸化ナフトール		顔料	顔料で原液染め	

表-2.4.6 高性能繊維の特性

	強度 (g/d)	伸び (%)	ヤング率 (g/d)	融点 (℃)
スズ	10~22	0.3~1.1	1,500~3,000	
アラミド	22~30	2.3~3.6	525~1,250	400
アリレート	17~30	2~5	400~1,050	300
超高分子量ポリエチレン	26~40	2~5	800~1,400	140
高重合度PVA	20~	3~4	450~	250

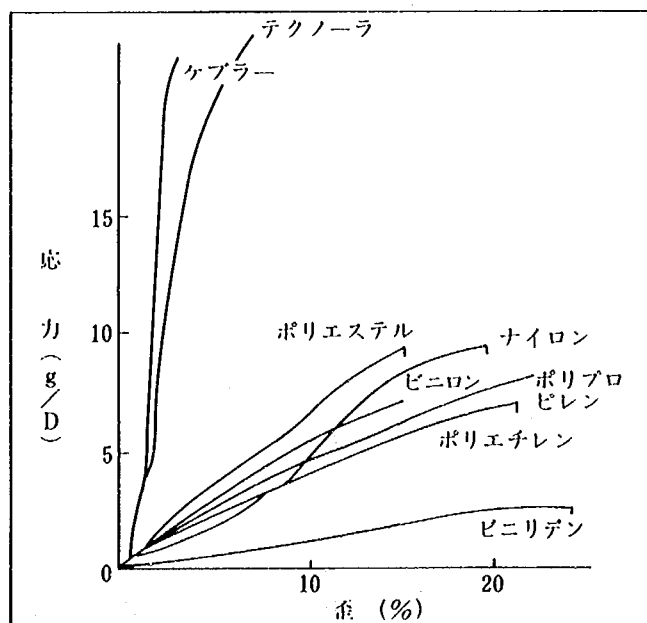


図-2.4.4 繊維の応力-歪み曲線

(3) ロープの構造

主な繊維ロープの切断面、撚り方向を図-2.4.5に示す。C. P. R は Compound Rope, C. B. R は Combination Rope の略、また 2×4 はストランド2本を引揃えたものを4つ組にしたことを意味する。

図-2.4.6に各種構造のロープ強度比較を示す。三つ打構造に比較し、パラフィル構造タイプは約2倍の強度が得られる。このように、構造によってロープの特性は大きく変化する。

① 撚り合わせたロープ

a) 三つ打ちロープ (Hawser Laid Rope)

ロープの撚り方向と反対の撚りを有するストランド3本からなり、その撚りが変わらないような方法で撚り合わされたロープである。

b) 四つ打ちロープ (Shroud Laid Rope)

4本のストランドからなり、それらの中心に芯ロープを入れ形崩れしないよう撚り合わされたロープで、外周が三つ打ちより円に近いので、表面摩擦を利用する動力伝導用に使われる。細いロープには芯を入れない。

c) バラ打ちロープ (Cable Laid Rope)

三つ打ちロープをストランドとして、さらに撚り合わせたロープで、現在はほとんど使用されない。

d) 六つ打ちロープ

6本のストランドと、それと同径の芯を入れ撚り合わせた、ワイヤーロープと同様な構造をしている。しかし全部を繊維のみで製造すると、使用にあたり形崩れするので、このままでは使用されていない。

② 編組されたロープ

編索 (Plaited or Braided Rope) は、SとZの撚りのストランドがそれぞれ同数で、ロープの長さ方向に対し斜めに交叉して組成されたロープである。この種の構造で細いものは組紐と呼ばれる。係船用として主に利用されている。編組されたロープは撚り合わせたロープに比し、キンクがなく、ロープの端末がばらけにくい特徴を有している。

③ 特殊構造ロープ

特殊構造ロープに、岩索や延縄がある。岩索は一般のロープのストランドに相当する部分が、製品の太さに関係なく二子または三子と定まっており、それを3本あるいは4本撚り合わせた構造である。特に柔軟性を要求される流し網等の上端側や下端側に使用される。延縄は岩索と同様に、ストランドは三子で構成されバラ打ちとよく似た構造である。耐摩耗性があり、形崩れを防止し、荷重時にロープが回転するのを少なくするように考えられた細物ロープであり、まぐろ漁業に多く使用される。

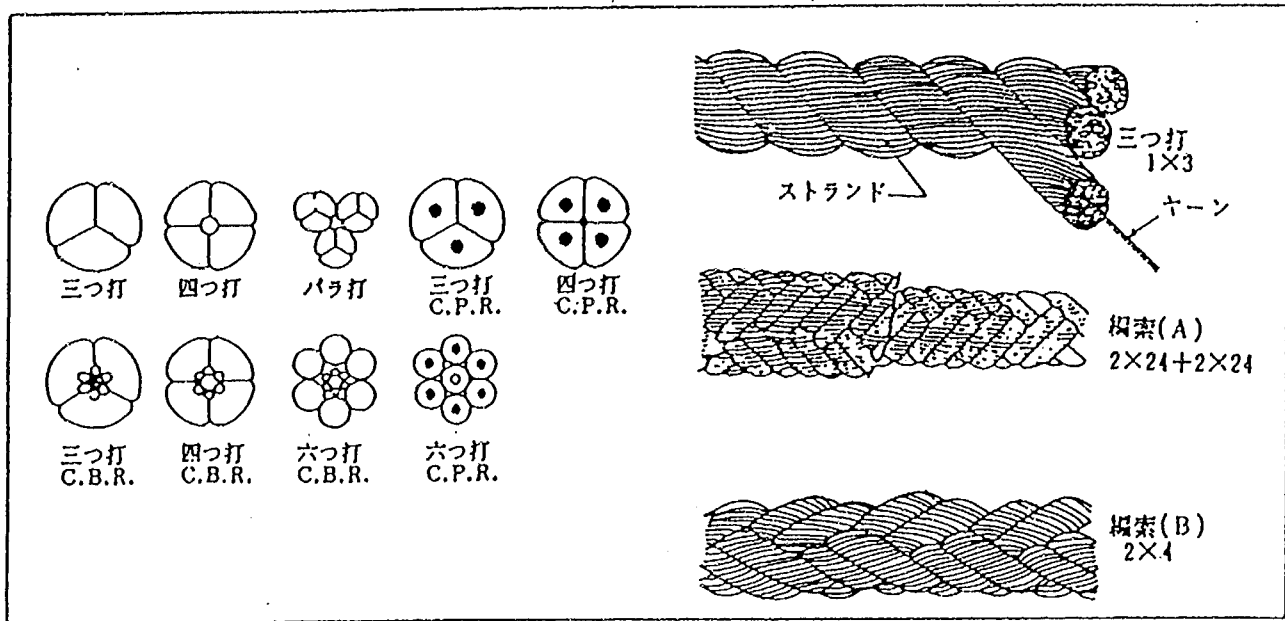


図-2.4.5 代表的なロープの構造

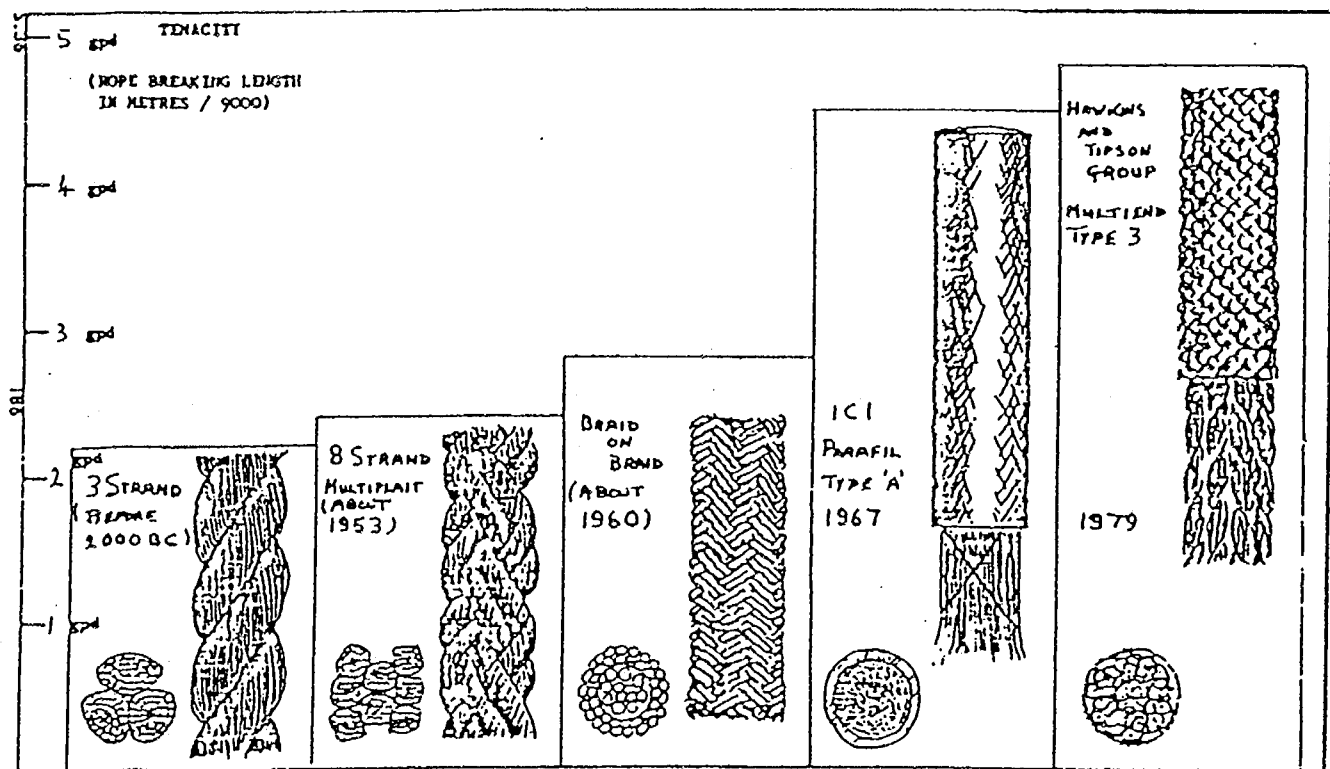


図-2.4.6 各種構造のロープの強度比較
(すべてのロープの原料はI.C.I.製, P.E.T. Type 125 である。)

(4) ロープの用途

① 船舶用

a) 係船索

大型船舶を岸壁、ブイなどに係留するロープで、だいたい50mmφ以上のものを言う。三つ打ちと編索があり、現在では形崩れし難いという点で編索が用いられている。繊維は、ナイロン、ポリエステル、ポリプロピレン等が主に用いられている。使用に当たって法定船舶備品としての認定が必要であり、N. K. (日本海事協会)、L. R. (Lloyd Register of Shipping)、A. B. I. N. V., 等の公的検査機関により、品種別に規格が制定されている。従来の基準に適したマニラ索に比べて、合成繊維ロープは強度が大きいため、ロープ直径の削減が認められている。(表-2.4.7) たとえば、マニラ索50mmφを用いる用途には、ナイロンロープであれば35mmφを用いても良いことを、N. K. で認定している。最近、タンカーの係留法に一点ブイ係留(S. B. M.)が行われている。船首から2本のロープで大型ブイに係留され、このブイの底面から陸上にパイプが設置されており、タンカーとブイとの間に海面上に浮かべた送油管を接続するもので、その破損を防ぐ意味からもロープの強度が重視される。またロープに浮力をつけるため、ドーナツ型の浮き子に通す。ロープ直径は100mm以上で、180ton以上の強度が要求される。

b) タグライン

船舶の出入港時、およびその他の曳航用のロープであり、係船索と同程度の性能のものが使用される。

表-2.4.7 合成繊維ロープの直径削減率 (N. K. 抜粋)

マニラ ロープ 径	ポリアミ ド系	ポリエス テル系	ビニロン 系	ポリエチ レン系	ポリプロピレン系			
	ナイロン	テトロン	クレモナ (1号)	ハイゼッ クス	パイレン (マルチ)	P. P (スパン) P. P (モノ)	ダンライ ン	リーレン
45	32	32	38	38	34	36	34	34
50	35	35	42	42	38	40	38	38
55	40	39	45	46	41	44	41	41
60	42	42	50	50	45	48	45	45
65	45	46	55	55	49	52	49	49
70	50	49	60	60	53	56	53	53
75	55	53	65	65	56	60	56	56
80			70		60	64		
85			75		64	68		
90					68	72		
95					71	76		
100					75	80		

(5) ロープの規格と特性

合成繊維ロープはJ I S規格に破断力、重量)が規定されている。

(6) 合成繊維ロープの耐久性

① 合成繊維の劣化

海洋開発用材料として、合成繊維の唯一の欠点としては劣化が上げられる。

海洋では、日光、特に紫外線の照射量およびオゾン濃度は陸上よりも多く、さらに、合成繊維は常時湿潤状態、あるいは湿・乾の繰り返し状態下での使用となる。

合成繊維の劣化は、物理的劣化、化学的劣化に分類される。

物理的劣化の原因には、湿潤時での摩耗、繰り返し屈曲疲労、高緊張下の疲労、あるいは高水圧下の疲労が上げられる。

化学的劣化は、酸素、熱、紫外線、大気中湿度および他の雰囲気、によって進行する。その程度は合成繊維の種類、特に化学構造、組成に基く紫外線透過吸収性や結晶性、および含有されている他物質（酸化チタンおよび可塑効果を有する物質等）の種類および含有量等によって大きく異なる。これらのうち、海洋雰囲気中では紫外線の影響が最も重要視されている。図-2.4.7、図-2.4.8に、合成繊維の日光による強度低下率を示す。

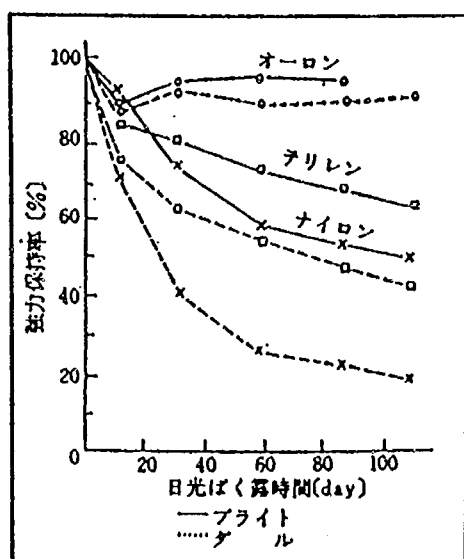


図-2.4.7 合成繊維の日光による強度低下

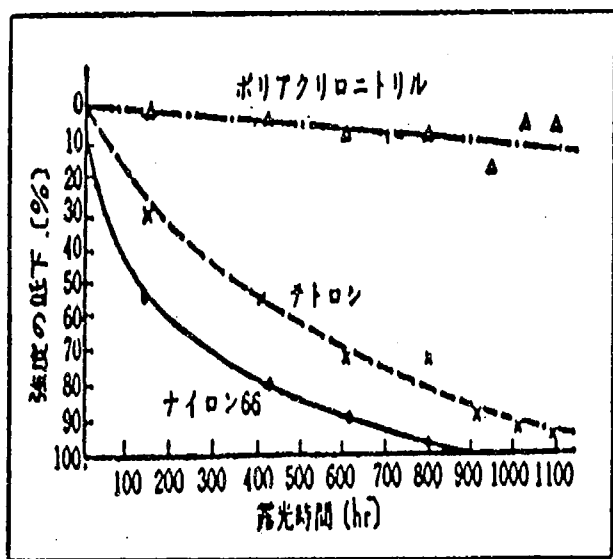


図-2.4.8 合成繊維の耐候性

② 合成繊維の劣化防止

紫外線老化防止剤等による原糸改質については割愛する。

a) カーボンブラック原着糸

カーボンブラックを 0.5~2.0 %混入した原着糸の耐候性は、カーボンブラックを混入しない一般の原糸の耐候性に比較して大巾に向上される。

カーボンブラックの光遮蔽効果は、粒子径の大きいものほど大きい。しかし、カーボンブラック混入による原糸の強度低下も、粒子径の大きいものほど多い。したがって、使用するカーボンブラックの銘柄選定には、原着糸の使用目的を十分考慮すべである。ただし、粒子径が小さい場合には分散性が劣るので、十分なノウハウの確立が必要である。

h) エラストマーによる被覆

合成繊維織布類を耐候性エラストマーで被覆した場合、織布の耐久性は大巾に向上することが、実用テストの結果証明されている。今後の海洋開発には、この種の複合素材が重要な地位を占めるものと思われる。

織布とエラストマーとの複合素材（ターポン、ゴム引き布等）はすでに陸上では、フレキシブルコンテナ、空気膜建築構造体等に広く利用されている。しかし、海洋開発用として利用する場合には、陸上用とは異なる物性が要求される。すなわち、乾・湿の繰り返し下、常時水中下あるいは相当な水圧下での使用などに耐えること。さらに、簡単には補修、交換が出来ない。海藻、貝等の付着が伴う。などの条件が加わる。

したがって、陸上用の場合とは異なる観点から繊維素材、エラストマーの選定、および複合体の製造方法（繊維とエラストマーの接合剤、接合方法等）の選定を行わなければならない。一般には、湿潤強度、耐候性（特に紫外線に対して）を重点的に考慮して選択を行う。高水圧下ではエラストマーの水透過性を考慮し、低温水域ではエラストマーの低温特性を考慮に入れるべきであろう。

③ 海藻、貝類の付着性

合成繊維が海洋開発に利用される上での重要な特性として、重量が軽く、取り扱いが容易であることが上げられる。しかし、長期間、海水中に浸漬した状態で使用される場合、海藻、貝類の付着は、使用目的によっては重大な欠点となる場合もあるであろう。一方、のり網、人工造林における海藻種網等では、海藻類の付着量の多いことがその目的とされる。

海藻、貝類の付着のしやすさは、表面の凹凸の大小、構成分子の末端基の極性によって支配される。これは、合成繊維とエラストマーとの複合体の場合の、表面構造体としてのエラストマーについても同様である。しかし、先に述べたように、エラストマーに付着防止剤を混入することや、表面を平滑にすることが可能であるので、複合体の場合の対応は容易であろう。

④ 繰返し疲労特性

各種合成繊維ロープおよびロープ用合成繊維の繰返し疲労特性は、ナイロン（NYLON）よりポリエステル（POLY-ESTER）のほうが繰返しによる耐疲労性が優れている、という結果が得られている。

⑤ 耐摩耗性

各種合成繊維ロープの表面ヤスリ状丸棒による耐摩耗特性は、テトロンロープ、ナイロンロープの耐摩耗は優れているという結果が得られている。

⑥ 各種ロープの実証実験による強度変化

北海道沖設置の浮魚礁に使用した係留索の強度変化は（設置場所—北海道茅部郡南茅部町沖、経過期間3年8ヶ月）3年8ヶ月経過後で、テトロンテープの強度保持率は70～80%であった。（水産庁「浮魚礁設置技術開発試験調査報告書」昭和57年度）

2.4.4 FRC用強化繊維

(1) FRCとは

FRCとは、Fiber Reinforced Cements と Fiber Reinforced Concretes の頭文字をとったもので、繊維補強セメントと繊維補強コンクリートを表す。現実にはセメントとコンクリートを区別して使用している文献は無く、元々の定義がどちらを指していたのか不明であるが、Cがセメントおよびコンクリート両者を示す定義の意と解釈しておく。

セメント、コンクリート補強用に使用されている繊維は無機質繊維と有機質繊維があり、無機質繊維としては天然繊維ではアスベスト（石綿）があり、人造繊維ではガラス繊維、金属繊維、炭素繊維等がある。有機質繊維としては天然繊維ではパルプが上げられ、人造繊維ではポリプロピレン、ビニロン、アラミド等がある。

ここでは、人造繊維を主体に述べる。

繊維を利用形態別に分類すると、下記の3つの方法がある。

- ① 短繊維を、セメントコンクリートマトリクスに分散させ、練り込むことによって補強する方法。
- ② 連続長繊維系（フィラメント系、紡績系等）を編織物として、補強する方法
- ③ ①と②を組み合わせた方法。

ここでは繊維形態にとらわれなくて出来るだけ広範囲に解釈し、セメント、コンクリートの補強に使われている限り、すべての人造繊維について述べる。

(2) FRC用繊維

脆いものの中に繊維状の強化材を混入することは、土壁に「すき」を入れてひび割れを防いだり、日干しレンガに藁を入れて作ったことから分かるように、古くからの技術である。

用いられる繊維の材料、利用の形式も多種多様であるが、有機質と無機質の繊維に大別し、さらにその生成過程により天然繊維、人造繊維に分けたのが図-2.4.9である。繊維材料はマトリクスと共に、種々の形態で複合体として使用される。

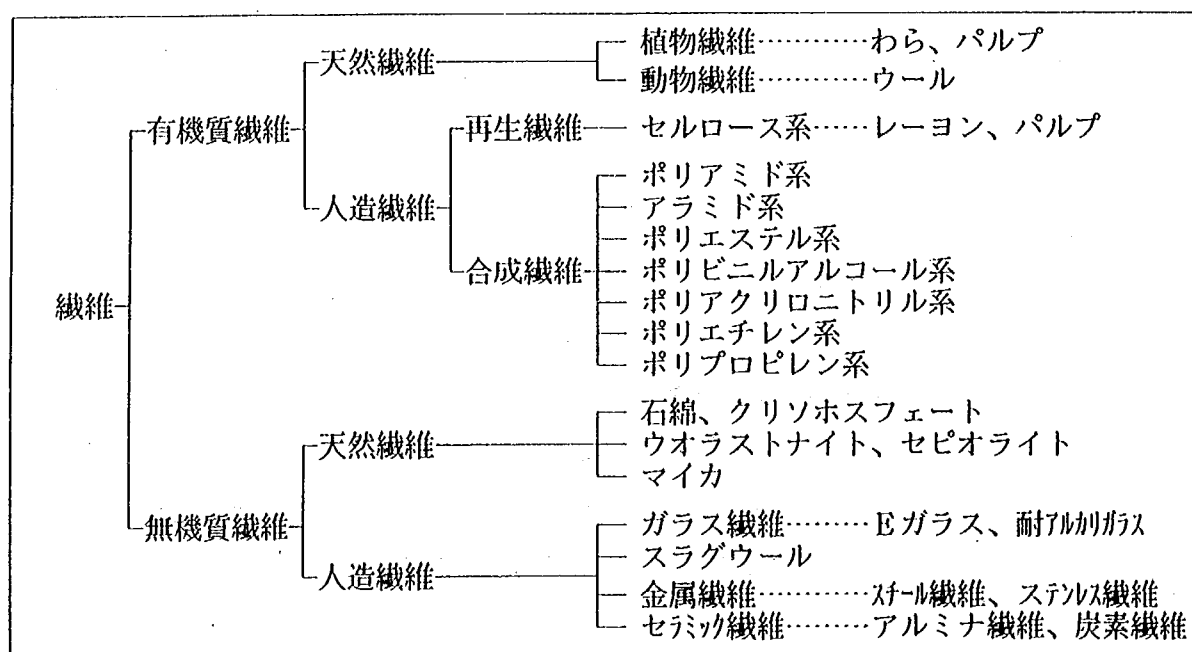


図-2.4.9 FRC用繊維一覧

セメント系マトリックスを初めとする無機水硬性材料の補強として使われる繊維は図-2.4.9、表-2.4.8のように多くの種類形態のものが上げられる。繊維固有の性質を始め、マトリックスとの適合性を考慮した使われ方がされている。

表-2.4.8 繊維のFRCに於ける利用形態

長 繊 維	ストランド、ロービング、糸、網
短 繊 維	パルプ、ステープル、チョップドファイバー、チョップドストランド
集 合 体	フェルト、マット、紡績糸、紙、不織布、編織物

表-2.4.9に、現在主に使われるFRC用繊維の、次の性質をまとめている。

① 直径、長さ

マトリックスの補強には繊維の直径、長さ、その比率（アスペクト比＝長さ／直径）、補強効率、混練性、作業性の面で重要となる。

② 比 重

繊維の種類によっては比重は極めてまちまちであり、混入量が重量で示された場合には、混入割合を容積で示すのが普通であるので、特に比重を考慮しなければならない。また、軽量化に対する一つの指標でもある。

③ 引張強度

強度の大きいものを使用するほど、原則的にマトリックスの中のひび割れの拡大を抑制すると考えられる。

④ ヤング率

複合体の引張りまたは曲げ荷重に対する挙動に、マトリックスのヤング率と繊維のヤング率の大小関係が影響する、また靱性や耐衝撃特性にも寄与すると言われている。

⑤ 破断時の伸び

繊維の破壊時の伸びは、全てマトリックス破壊時の伸びより2乗ないし3乗の次数で大きい。したがって、繊維の引張強度の中ばに達する前にマトリックスがひび割れし、繊維強度に近づくまでマトリックスのひび割れが長く進展する。

⑥ 耐アルカリ性

セメントの中に繊維を混入することは、pH13程度の強アルカリ中に継続的に暴露されることになる。

⑦ セメントの接着性

人造繊維では一般に十分な接着性がほとんど期待できないのが現状である。

⑧ 耐火性

有機繊維ではまず問題になるであろうが、法規制に左右される。

⑨ 単 価

経済性は、単に素材単価だけでなく、調合物、型枠材料、混練りの経費、人件費等を考えなければならない。ここでは、各種繊維が1㎡のセメントマトリックス中に容積率で1%含まれる場合の価格を示している。

表-2.4.9 FRCに用いられている各種繊維の主な性質

繊維素材名	直径X長さ $\mu\text{m} \times \text{mm}$	比重	強度 10^4kg/cm^2	伸度 %	弾性率 10^4KG/cm^2	耐アルカリ性	セメント付着性	耐火性	単価 Y/KG	コスト Y/㎡ $\times$ 厚=1cm
アスベスト (白)	0.02 X 30 ¹⁾	2.6 ¹⁾	0.3 ¹⁾	2 - 3 ¹⁾	~170 ¹⁾					
(青)	0.1 X 1-10 ¹⁾	3.4 ¹⁾	3.6 ¹⁾	2 - 3 ¹⁾	200 ¹⁾	○	○	○	100-500	2560 -12750
スチール	100-600 X 10-60 ¹⁾	7.85 ¹⁾	0.7 - 2.0 ¹⁾	3.5 ¹⁾	200 ¹⁾	○ (35)	×	○	260	20280
ガラス (A.R)	12.5 X 10-50 ¹⁾	2.75 ¹⁾	2.5 ¹⁾	3.6 ¹⁾	80 ¹⁾	×	△	○	800	21600
レーヨン		1.50 ¹⁾	0.40-0.65 ¹⁾	10 - 25 ¹⁾	7.0 ¹⁾	○	△	×		
ポリアミド	>4 X 任意 ²⁾	1.14 ²⁾	0.77-0.92 ²⁾	0.1 - 6 ²⁾	4.1 ²⁾	○	×	×		
アラミド	12 X 任意 ²⁾	1.45 ²⁾	2.9 ²⁾	2.1 ²⁾	130 ²⁾	△	×	×	6000-30000	90000-450000
ポリエステル		1.40 ¹⁾	0.7-0.9 ¹⁾	11 - 13 ¹⁾	8.4 ¹⁾	×	×	×		
ビニロン	14-16 X 任意 ²⁾	1.30 ²⁾	0.70-1.5 ²⁾	3 - 13 ²⁾	2 - 37 ²⁾	○	△	×	700-1200	9100-15600
アクリル	18 X 6	1.18	0.85-0.95	9 - 11	17 -19	○	△	×	1300	15600
ポリエチレン	900 X 30-40	0.95	0.26-0.71	10 - 15	0.14 - 2.2	○	×	×	1800	17100
ポリプロピレン	15-250 X 任意 ²⁾	0.91 ²⁾	0.4 - 0.65 ²⁾	8 - 10 ²⁾	5 - 8 ²⁾	○	×	×	900-1800	8100-16200
炭素繊維 (PAN系)	7-8 X 任意 ²⁾	1.8-1.9 ²⁾	1.5 -2.0 ²⁾	0.5-1.0 ²⁾	220 ²⁾	○	×	○	12000	228000
(ビッチ系)	15 X 3-10 ²⁾	1.63 ²⁾	0.8 ²⁾	2.2 ²⁾	38 ²⁾	○	×	○	3000	48000
普通*ハナント*セメント-モルタル ³⁾		2.2-2.3	0.002-0.004	0.5-1.5	25.5-35.7					
普通*ハナント*セメント-コンクリート ³⁾		2.3-2.4	0.001-0.004	0.5-1.5	30.6-40.8					

- 出所: 1) セメント協会: 「繊維補強コンクリート研究専門委員会報告 V-4」 (58.10)
 2) 青山他: 建築技術 (1986.5) NO. 417
 3) ハナント: 「繊維コンクリート」 (1980.9) 森北出版
 無数字のデ-9: 「合成繊維および合成繊維補強セメント/コンクリート技術資料」 (60.3)

繊維の種類、形態とFRCの生産技術との関係をまとめたものを、表-2.4.10 に示す。

表-2.4.10 FRCの成形法

利 用 形 態					複合材料の生産技術と製品例				
短 繊 維		長繊維	織 布 (ネット状)	不織布 フェルト	プレミッ クス法	吹付法	抄 造 法	含浸法	ファイメントワイ ンディング 法
モノフィ ラメント	ストランド								
○	—	—	—	—	—	—	◎ 石綿セメント板 硫酸カルシウム 板	—	—
○	—	—	—	—	◎ SFRC	◎ ショットク リート法 ガイト法	—	◎ SIFCON	—
○	○	○	○	—	◎ GFRC	○	○	○	○
○	○	○	○	—	◎ GFRC	◎ GFRC	○	◎ 左官用外の UV割防止材	◎ パイプ他
○	—	○	○	—	—	—	○	○	○
○	—	—	—	—	◎ CFRC	◎ 吹付 用外	○	○	—
○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
○	○	○	○	○	○	○	○	◎ 左官用外の UV割防止材	○
○	○	○	○	○	○	○	○	◎ NETCEM	○

(3) FRCの性能

FRC（繊維補強コンクリート）は、コンクリート中に短い繊維を均一に分散させることにより、コンクリートの脆性材料としての弱点を改善したものである。合成繊維補強の場合は、スチール繊維の場合などとは異なり、使用する繊維の弾性係数がコンクリートの弾性係数より小さく、FRCが引張または荷重を受けた場合の挙動は、例えば図-2.4.10 に示したようになる²¹⁾。

同図はFRCの引張荷重-変形の関係を示すものである。領域Ⅰでは、繊維が引張り力をほとんど負担しないので、ひび割れの発生する荷重(P_{cr})は繊維のないコンクリートの場合(P_0)と大差はない。しかし、ひび割れ後、コンクリートから繊維に引張り力が移行する領域(A)から、最大耐力にいたる領域(B)を経て、繊維が破断または引き抜けして大きな変形を生じながら耐力が減少してゆく領域(C)に至り、破壊する。

スチール繊維のような、高弾性ではあるが伸びの小さな繊維を使用した場合の引張荷重-変形の関係を、図-2.4.11 に示す²¹⁾

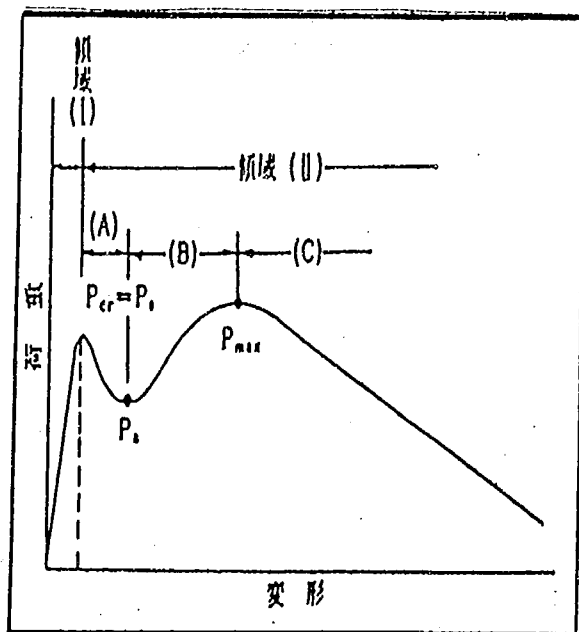


図-2.4.10
合成繊維補強コンクリートの
荷重と変形の関係

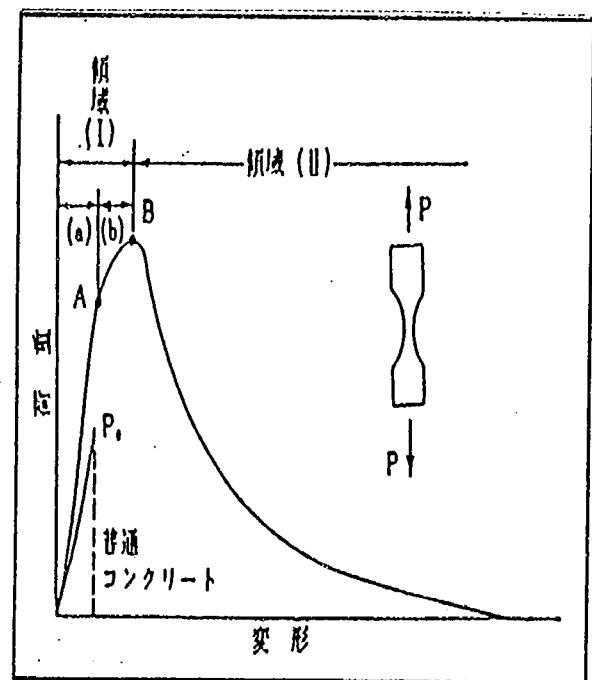


図-2.4.11
鋼繊維補強コンクリートの
荷重と変形の関係

この場合は、繊維とコンクリートが一体となって引張力を負担する領域(Ⅰ)と、ひび割れの発生後、繊維のみで引張り力に抵抗する領域(Ⅱ)とになる。図-2.4.10 および図-2.4.11 の比較から、FRCの最大の特徴は、ひび割れ後の材料のねばりにあると言う事が出来る。特に合成繊維FRCの場合は、伸びの能力が大きいためエネルギー吸収力(タフネス)が大きく、耐衝撃性に優れている。

この様な複合材料としての力学的性質や、合成繊維の持つ特性に起因する合成繊維FRCの利点を上げれば、次のようになる^{19) 21)}。

- ① ひび割れに対する抵抗が大きく、また微細なひび割れが発生しても急激に破壊することがない。ただし、靱性の増加に比べ強度の増加は期待できない。
- ② 伸び能力によりエネルギー吸収能力が大きく、衝撃に対する抵抗性に優れる。③ 繊維が断面内の応力を分散させ、乾燥収縮や凍結融解などによるひび割れの成長を抑制し、劣化を遅らせる効果がある。また、すりへりに対する耐摩耗性を改善する効果がある。
- ④ 合成繊維は化学的に不活性なものが多く、セメント水和物の高アルカリ性の環境下でも、安定している。
- ⑤ 合成繊維は比重が小さいため取り扱いが容易である上に、軽いコンクリートを作ることができる。
- ⑥ 合成繊維は大量生産し易く、品質も安定しており、価格も比較的安い。

一方、次の様な問題点も指摘されており、現状を考慮した使用方法を工夫する必要がある。また、この欠点を改良することがコンクリート補強用合成繊維の開発や使用方法の改善の指針を与えることとなる。

- ① 合成繊維の弾性係数が小さいため、強度増加につながらず、逆に強度を損なうことがある。ただし、無機質繊維は弾性率が高いので強度向上が可能である。
- ② 繊維のクリープが大きいので、連続荷重下でひび割れした場合、さらにひび割れが拡大しやすい。
- ③ 耐熱性が低く、耐火性に欠ける。紫外線によって劣化する場合もあり、長期間の耐久性が懸念される。またオートクレーブ養成に耐えない(150~180℃)。
- ④ 繊維を、均一にコンクリート中に分散することが難しい。特に合成繊維では、混入量が多くなると、現実的な良い方法が少ない。

(4) FRCの現状と問題点

FRCの利点や欠点については、前項に述べられた性能上の点ばかりでなく、使用方法やコストなど実用的な面も含めて考えなくてはならない。また、FRCを使用するユーザーすなわち建設業界、土木業界、およびFRCを製造する建材業界の実状や動向を熟知することも必要である。ここでは、充分ではないが、FRCとその使用繊維が置かれている実態と問題についてまとめた。

- ① FRCは、まだ汎用的な技術や材料として認知されていない。土木用、建築用、それぞれ使用される目的(メリット)や使用方法(施工法)、使用される部材などが異なり、一般的に取り扱う事が難しい。しかし、FRCの評価試験法などは官庁、業界、学界の協力で標準化する作業が進められている。

- ② GFRC、SFRCに比べ、合成繊維FRCについては実際の施工例は非常に少ない。建築用にカーボンファイバー（CF）が使われ始めた段階ではあるが、合成繊維FRCはまだこれからの状態である。
- ③ FRCは普通コンクリートに比べ、どうしても原料コスト高になる。これをクリアする決定的な特徴が出にくい。さらに施工時にも、混合するための設備、人員が必要でありコストアップの要因となる。
- ④ 建築用のアプリケーションではカーテンウォールが一番進んでいるが、合成繊維FRCでは実用化されていない。建設会社は、FRCについてはほとんど研究開発を行っていないので、施工法やアプリケーションの開発をどこかで真剣にやらなければ進まない。
- ⑤ 建築用材料として、ビル用途、一般住宅用途の汎用材料として認知されれば、FRCの特徴を活かした、曲面や複雑な形のものも増え、量の拡大が期待できる。以上のように、FRCは性能、コスト、実績の面でまだかなりの問題をかかえているのが現状である。従って、合成繊維の性能改善、合理的な施工方法や装置の開発、性能に見合うコストバランス等が、FRCが建設土木業界で認められるための重要な課題である。

(5) FRCの実績

前項でも述べた様に、合成繊維補強FRCはGFRC（ガラス繊維補強FRC）、SFRC（スチール繊維補強FRC）に比べ使用実績としてまとまった量には至っていない。GFRC用としてガラスファイバーが2～3千t/年¹⁰⁾（1982年）、SFRC用としてスチールファイバーが5千t/年¹⁰⁾製造されている。しかし、合成繊維補強FRCでは、ストレート板などに使用されているアスベストの代替品として、アスベスト規制の厳しいヨーロッパを中心にビニロンが年間数千t輸出²⁰⁾されている程度である。

その他の繊維のFRCはいまだ開発段階であり、カーボンファイバーのように実用化に向けての取り組みがなされているものもあるが、量的な拡大は前述した諸課題を解決することによって可能になってくるであろう。またアスベストの使用規制など法規制面での動向によっても、一部の用途については開発、実用化が促進されることが予想される。

2.4.5 ジオテキスタイル²²⁾

(1) ジオテキスタイルの成分

ジオテキスタイルは合成ポリマーで作られる。典型的なポリマーとしてはポリプロピレン、ポリエステル、ポリエチレン、ポリアミドなどがある。ガラス繊維が使われることもあり、スチールワイヤーやケーブルなどもジオテキスタイルと組み合わせて一つの製品に仕上げられることもある。天然繊維は人工繊維よりも寿命が短いため、特に短期間だけ必要というような仮設的なものにのみ用いられている。

(2) ジオテキスタイルの製造方法

ジオテキスタイルの製造は、まずファイバーや糸を作り、これらを様々な方法で組み合わせる。

- ① フィラメントとは、溶融したポリマーを微小な孔を通して吹き出し、ついで、この細い糸状物を引き伸ばした繊維のことを言う。引き伸ばすと分子が一定の方向に並び、引張強度が高くなる。
- ② ステープル・ファイバーとは、フィラメントを2～10cmの長さに切ったものである。
- ③ スリット・ファイルとは、細長い孔からポリマーを吹き出した後、引き伸ばして強度を高めたものである。その幅は1～3mmである。

不織布 (Nonwoven geotextiles) は、フィラメントまたはステープル・ファイバーで作る、織布 (Woven or knitted geotextile) は、糸で作る。この糸は数本のファイバーからなる。

- ① モノフィラメントは、単一のフィラメントである。
- ② マルチフィラメントは、数本のフィラメントからなる。
- ③ スパンヤーンは、ステープルファイバーをからませたものである。
- ④ スリット・フィルム・ヤーンは、単一のスリット・フィルム・ファイバーからなる。

また、繊維状糸 (Fibrillated yarn) は、編んでファイバー状の束 (Fibrous strand) にしたものである。。

- ① プラスチックストリップ (Plastic strip) は幅2～10cmであり、ウェブとかウェビング (Webbing) というような粗い織布 (Woven fabric) を作るのに用いる。
- ② 粗い、または剛いフィラメントは、マットと呼ばれる粗い不織布 (Nonwoven fabric) を作るために用いる。
- ③ 太さ1～5mmの粗いストランドは、ポリマーを太目の孔から押し出して作り、ネットに使う。

グリッドと成型プラスチックシートは、単一の工程で製造される。

(3) ジオテキスタイルの種類

ジオテキスタイル (狭義) は4種類、類似品が6種類、合計10種類に分けられる。

① 編んだジオテキスタイル (Knitted geotextile)

モノフィラメント、マルチフィラメント、スパン (紡織)、短繊維 (Fibrillated yarn) で編んだジオテキスタイルで、今はあまり使用されない。

② 織布

平行ヤーン (yarn) を直角に組み合わせたものが一般的に使用されているが、斜めに組み合わせたものもある。モノフィラメントのものは 0.5mm と薄い。マルチフィラメント、スパン、Fibrillated woven geotextile は厚く、通常は 3～5 mm、ときには 10mm になる。用途は広く使われている。

③ 不織布

ファイバーが様々な方向に配列されて乱雑になっているが、全体としては薄い板状になっている。ファイバーを互いにかからませる方法としては以下のようなものがある。

- a) 接着剤結合 (Chemical bonding) : 糊、ゴム、ラテックス、セルローズ類、合成樹脂で接合する。
- b) 熱結合 (Thermal bonding) : 熱でファイバーの一部を溶かしてファイバーを点接合するもの。厚さは 0.5～1 mm 程度である。
- c) 機械結合 (Mechanical bonding) : ニードルパンチ結合ともいう。数千個の小さな突起のある針 (Barbed needle) を板に植えつけ、この針を板状にした繊維に何度もつき刺し、ファイバーを互いにかからませる。出来上がった布の厚さは熱結合したものよりも厚く 1～5 mm である。

④ ジオテキスタイル製品 (Composite geotextile)

上記②③を重ね合わせて作ったもので、目の粗い布はスクリム (Scrim) という。

⑤ ウェブまたはウェビング (Webs, Webbing)

粗く織ったファブリックで、数 cm の幅をもった帯状の布である。ウェブ (Webbs) は粗い Ship film woven fabric であり、侵食防止、盛土の表面保護、補強土用に用いる。

⑥ マット (Mats)

粗い、むしろ剛性のあるフィラメントで、交点で結合されている。

⑦ ネット (Nets)

フィラメントよりも太い線をストランド (Strand) という。平行なストランドを 60～90° の角度で交差させ、交点を溶着させたものをネットと言う。ストランドの径は 1～5 mm、孔の大きさは 5～50 mm、ネットは補強材として、あるいはじゃかごに使う。また織布、不織布と組み合わせて排水用材として使う。

⑧ グリッド (Grid or Geogrid)

ポリエチレンまたはポリプロピレン製の孔あき板を、一方向または二方向に引張って作る。引張ると孔は 1～10 cm に拡大し、ストランドは引っ張られた方向に分子が並び、強度が増加する。用途は、土の補強に使われる。

⑨ 成型プラスチックシート

コルゲートしたもの、ワッフル状 (深い筋の入ったもの)、蜂の巣状のものなどがある。織布や不織布と組み合わせて作る。

⑩ 複合材 (Prefabricated composite structures)

前記の狭義材料①～④と、広義材料⑤～⑨を工場で組合わせて作った製品。

(4) ジオテキスタイル類の耐久性

ジオテキスタイル類の耐久性については種々の研究がなされているが、全ての製品について耐用年数が明らかになっているとは言えない。日本では、寿命についてあまり大きな問題にしていけないが、英国などでは土木構造物の寿命を 120年という長い期間をとっているので、ジオテキスタイル類についても十分な保証がない限り採用しないということである。イタリアのセンベネリーは、遮水用のPVCメンブレンの耐用年数について以下のように発表している。

「PVCメンブレンに柔軟性を与えるためにプラスティサイザーを入れる。このプラスティサイザーは風化によって年とともに減少する。プラスティサイザーの喪失限度は30%であり、薄いものほど減少の速度が大である。したがって、もし風化によって機能の減少を防ぐ必要がある場合には、鋼に錆び代を見込むと同様に、ある程度の厚みを持たせる必要がある。1.2mm以上の厚みをもっていれば安心出来るであろう。」

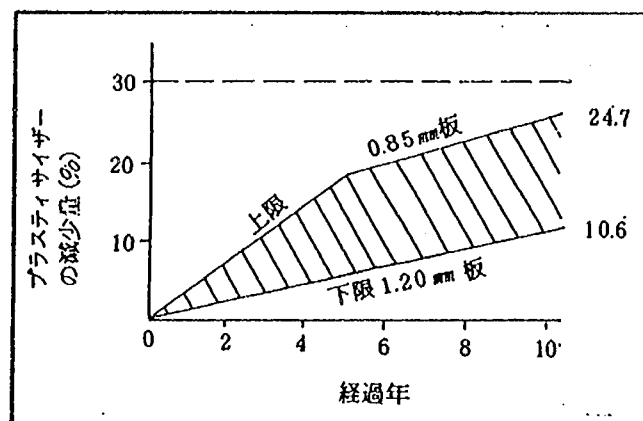


図-2.4.12 PVCジオメンブレンのプラスティサイザーの減少量
(センベネリーによる)

ジオテキスタイル類の耐久性には、次のような事項が関係する。

- ① ポリマー
- ② ポリマーに添加される物質の性質と量
- ③ ポリマーの処理方法、製造法（分子の配列の仕方）
- ④ ジオテキスタイル類の型と構造
- ⑤ 貯蔵、運搬、敷設作業

ポリマーには次のようなものがある。

- a) ポリオレフィン類（ポリエチレン，ポリプロピレン）
- b) ポリエステル（ポリエチレンテレフタレート）
- c) ポリアミド（ナイロン6）
- d) ポリアラミド（ケブラー，テクノーラ等）

型としては、ジオテキスタイル（織布と不織布），マット，ネット，グリッド，合成製品等がある。添加剤としては、アンチオキシダント，プラスティサイザー，フィラー，バイオサイド，スタビライザーがある。

織布か不織布か、マットかグリッドか、厚手のものか薄手のものかによって、原材料は同じものでも劣化の速度は違ってくる。

環境によって劣化の進行状態は異なる。環境条件としては温度、水（速度、酸素含有量、塩分濃度）、酸またはアルカリ度、凍結融解、紫外線、微生物等がある。

耐久性試験としては、短期加速試験と長期にわたる実際試験がある。短期試験には紫外線に暴露する、高温乾燥、高温（60℃）に浸す、酸素で飽和した水に浸す、酸性もしくはアルカリ性の塩分の溶液に浸す、引張応力を加えておく等の方法がある。長期試験には、クリープ（自然のまま、または高温）、高い湿度と酸素の供給、酸性もしくはアルカリ性、引張応力を加える、敷設前に紫外線にさらす等の方法がある。

(5) 今後の展望

ジオテキスタイル類の将来について考えるとき、わが国と先進諸国との間では多少様子が違うことに気付く。そこでまず国際的な観点から考察を加える。ジオテキスタイル類が土木建築関係の工事に広く使用されるようになってからまだ日が浅いので、材料、施工法、性質、設計法等多方面にわたる研究が必要であり、また研究成果の普及も忘れてはならない。

① 材料について

土や岩石というような天然の材料は、その性質が限られている。これに対して、ジオテキスタイル類は人工的材料であるから、目的に応じていろいろな性質を持ったものを作ることができる。ジオテキスタイル類にはジオテキスタイルの他にグリッド、マット、ネット、メッシュ等いろいろな製品があるが、将来さらに多くの製品が作られるであろう。この方面の市場が大きくなれば、もっと多くの製造会社が製造に加わるようになるであろう。特に、今までのような織布のメーカーだけでなく、プラスチック関係のメーカーが参入するようになり新しい製品が生まれて来るであろう。設計技術者の方からは、特殊な目的に使用するためのものを製造して欲しいという要求が出されるであろう。ジオテキスタイル類の排水機能を増大するためには空隙を大きくしなければならない。そうすると材料の容積が大きくなって運搬費が高くなる。そこで運搬時には容積が小さく、現場で簡単に膨張させることができるような材料が要求される。廃棄物、例えば、古タイヤのようなものからジオテキスタイル類が製造できるようにならないだろうか。そうなればそれに伴って設計法、試験法が開発されるであろう。

フランスでは素材のファブリック、糸、細かいグリッドを、直接土に混ぜて補強するという新しい工法が発案され、研究が進められている。今のところ、この工法は土の補強という目的にだけ使われているが、将来はフィルター材として使用できるようになるかもしれない。フィルターとしてジオテキスタイル類が用いられているが、これらは何れも極めて薄いものに限られている。将来、厚いフィルター材が要求されるようになる可能性があるが、その際、現場で素材と土とを混合するという手法をとるのが有利ではなかろうか。この場合、繊維素材が一個所にかたまらないようにしなければならない。粘着性があって、しかも透水性の良い材料は、地震のある地域でのダム構築に有効に利用できるであろう。このような材料は多孔性の小粒子と土とを混合することにより作られるであろう。

② 材料の使用と評価

材料の適正な選択が速やかに出来るようにするため、ジオテキスタイル類の性質をコンピュータのデータバンクに貯蔵し、これに検索するシステムをつくる必要がある。そうすれば設計者が希望する性質を持った材料を、直ちに、かつ、自動的に選び出せるようになる。この目的のためには、まず国際的な基準が必要となる。しかし、各国毎の基準を作るのさえ難しい現状から見ると、国際基準はもっと難しいであろう。ジオテキスタイル類のように、急成長をする分野ではなおさらのことである。仮の基準が作られる以前に新しい製品が開発され、それが誤用されることもある。国際基準ではSI単位を使用しなければならない。SIの記号と単位は、知識の円滑な成長と情報の交換のために大変重要である。1986年のウィーンにおける国際ジオテキスタイル会議では記号について取り決めたが、これは、国際土質基礎工学会とある程度の調整を行なったものである。この方面では今後、土質工学関係者と繊維の専門家の緊密な提携が是非必要である。

2.4.6 人工海草

海岸、砂浜の浸食防止法として、また砂浜の造成法として、最近人工海草の研究開発が進められている。たとえば、次のような機関での実験例が報告されている。

① 海岸土学国際会議

(W. A. Price ら、"The Effect of Artificial Seaweed in Promoting the Build up of Beaches" -cf. みるとの防災, No.92, P.75 (1986))

② 東海大学 (大草重康、第18回土質工学研究発表会, 1983.6)

③ 東京工業大学 (日野幹雄ら、土木学会論文報告集, No.266, 1977.10)

④ IMRA-ECS社パンフレット

(IMRA, Erosion Control System, (1987))

いずれも、十分技術開発が確立されたとは言いがたく、素材についてもいまだ特定化されていない。

今後、これらの人工海草の素材として繊維素材が応用されるものと期待される。

(追記)

日本化学繊維協会の合成繊維研究開発懇話会、MF P分科会では、海洋開発の一貫として図-2.4.13 に示すような合成高分子材料による人工島の開発を進めるべく、調査研究を行なっている。

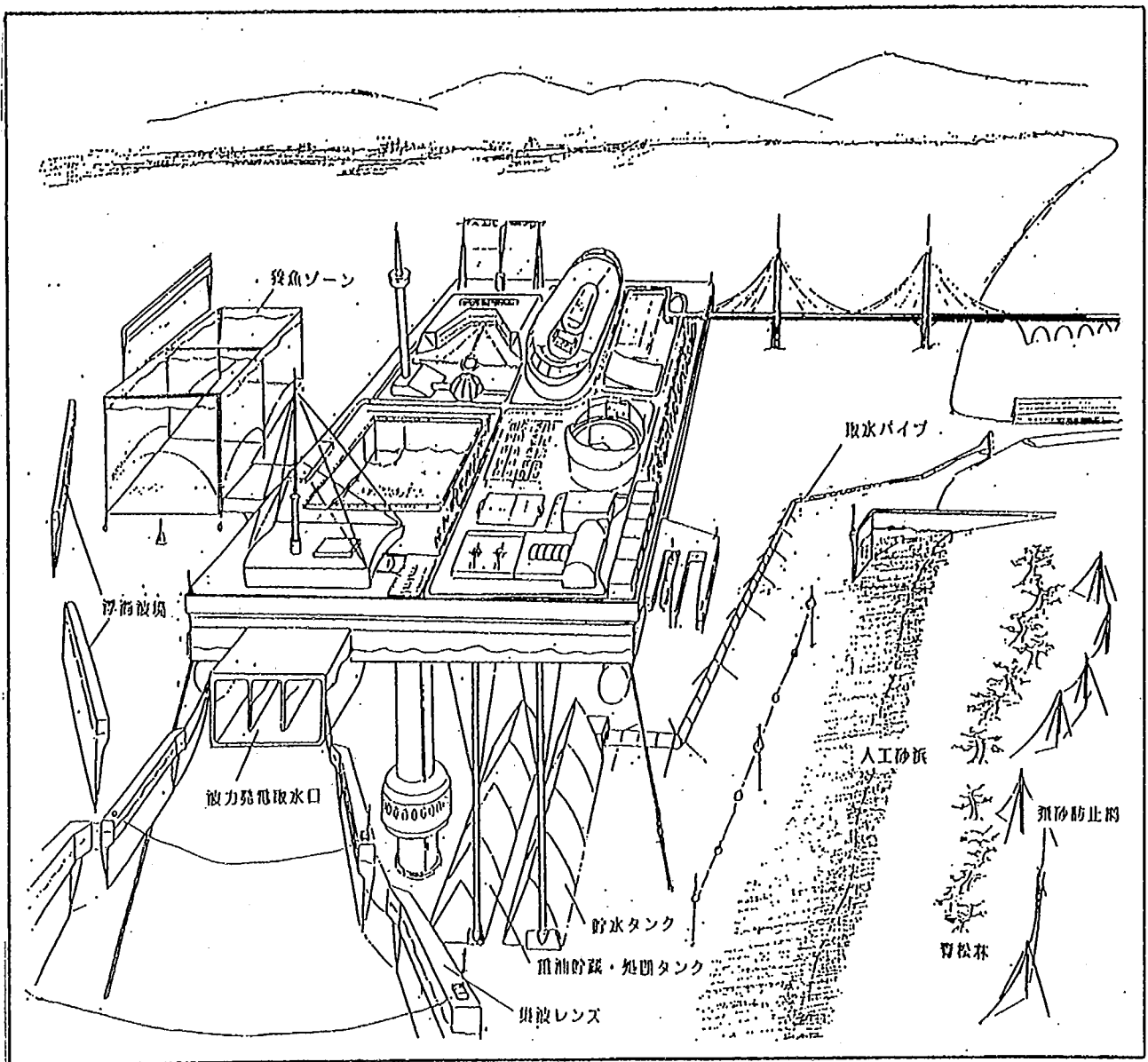


図-2.4.13 合成高分子材料による人工島
(合成繊維研究開発懇話会、MF P分科会案)

2.4.7 まとめ

海洋構造物用に適用される繊維系材料として、次の6種を取り上げ概説した。

- (1) 複合材料用強化繊維
- (2) FRC用強化繊維
- (3) 膜材料用強化繊維（および基布）
- (4) 係留ロープ
- (5) ジオテキスタイル
- (6) 人工海草繊維

しかし、ほとんどの繊維材料がこれまでに使用実績が少なく、実用化までには多くの研究課題を残している。それだけに、将来に大きな期待がかけられる新しい材料と言うことが出来る。

2.4.8 今後の課題と提案

(1) 複合材料用強化繊維

- ① 比強度、比弾性率の増強
- ② 耐侯性の向上
- ③ 化学的不活性化（耐久性の向上）
- ④ 電気絶縁性の付与
- ⑤ 生物付着防止技術の開発
- ⑥ コスト低減（材料及び成形）
- ⑦ 耐熱性（耐火性）の向上

(2) 膜材料用強化繊維および基布

- ① 耐熱性（耐火性）の向上
- ② 機械的特性の向上
- ③ 耐久性の向上
- ④ 耐海水性の向上

(3) 係留ロープ

- ① 耐侯性の向上
- ② 生物付着防止技術の開発
- ③ 耐久性（耐疲労性、耐摩耗性）の向上

(4) F R C用強化繊維

- ① 高弾性率合成繊維の開発
- ② クリープ性の改良
- ③ 耐熱性（耐火性）の向上
- ④ コンクリート分散性の向上
- ⑤ F R Cの評価試験法の確立
- ⑥ F R C施工実績の蓄積
- ⑦ コストの低減

(5) ジオテキスタイル

- ① 評価試験法の確立
- ② ジオテキスタイルの普及（当該官庁等の標準仕様書，設計指針，通達等への記載。）
- ③ 耐久性のデータ蓄積と改良

(6) 人工海草

- ① 基礎研究の継続による基本データの蓄積

2.4.9 参考文献

- 1) 大阪ケミカルマーケティングセンター；土木、海洋、建築構造物と繊維資材の新動向, 3, No10, P.178 (1980)
- 2) 磯野義人；化繊月報, 11月号, P.28 (1979)
- 3) 同上；ibid, 6月号, P.23 (1977)
- 4) 南 宏和；繊維学会誌, 42(7), P.254 (1986)
- 5) 高橋敬司, 他；製品科学研究所研究報告, No91, P.35 (1980)
- 6) 増田一広, 他；鉄と鋼, 72(12), P.1273 (1986)
- 7) 日本繊維機械学会；産業用繊維資材ハンドブック (S54.6)
- 8) 日本機械学会；機械工学便覧, 改訂第6版
- 9) 全国沿岸漁業振興開発協会；沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針 (S53年度版), (S59年度版)
- 10) 水産庁；浮魚礁設置技術開発試験調査報告書 (S57年度)
- 11) 日本繊維機械学会海外資料研究部会；講演会資料 (S57.11.11)
- 12) 水産土木学会；水産土木学会誌, No.1, P.10 (1973)
- 13) 宮本秀明；漁具漁法学 (S37.6.5)
- 14) 西山作蔵；定置網の手びき (S53.3)
- 15) 繊維学会；繊維学会誌, No.3, P.38 (1982)
- 16) 繊維学会；繊維学会誌, No.9, P.36 (1982)
- 17) 西山作蔵；定置網資材の基礎知識
- 18) 合成繊維ロープ J I S 規格
- 19) セメント協会；繊維補強コンクリート研究専門委員会報告 (S58年)
- 20) 情報開発；合成繊維及び合成繊維補強セメント／コンクリート技術資料 (S58年)
- 21) 青柳征夫；繊維補強コンクリート, 電気評論, 72, 922 (1987)
- 22) 大阪ケミカルマーケティングセンター；土木、海洋、建築構造物と繊維資材の新動向, 3, No10, P.2 (1986)
- 23) 大阪ケミカルマーケティングセンター；高性能複合材料の最新技術 (1981)

3. 被覆・防食材料の動向

3.1 有機系被覆

3.1.1 塗装材料

塗装材料は適当な流動性を有していて、施工に特別な設備を必要としないことから鋼材の防錆に広く使用されている。塗装の特徴を次に列記する。

- ① 対象構造物の大きさや、形状にかかわらず容易に施工できる。
- ② 防錆性だけでなく、美観も付与できる。
- ③ 各種の機能性も付与できる。
- ④ 現場で補修が可能である。
- ⑤ 比較的安価である。
- ⑥ 所定の性能を得るためには、各種の塗料を組合せ塗り重ねる。
- ⑦ 1回塗の膜厚は薄い。

(1) ジンクリッチペイント

ジンクリッチペイントは、塗膜中に金属亜鉛末（ジンクダスト）を高濃度（70～90%，重量比）に配合した塗料で、塗膜は導電性を持ち、おもに亜鉛の犠牲陽極作用で鋼材面を防錆する。このため、ジンクリッチペイントは防錆のために鋼面に直接塗装される。

ジンクリッチペイントは、鋼材の一時防錆のために15～20 μm の薄膜に塗装するものと（一般にジンクリッチプライマーと呼ばれている）、鋼材の防錆下地のために75 μm 程度の厚膜に塗装するもの（一般に厚膜型ジンクリッチペイントと呼ばれている）とがある。また、ビヒクルの種類によって、エポキシ樹脂を使用する有機ジンクリッチペイントと、エチルシリケートを使用する無機ジンクリッチペイントとに分類される。したがって、ジンクリッチペイントは表-3.1.1に示すように、4種類に分類することができる。

表-3.1.1 ジンクリッチペイントの分類

塗 料 の 種 類	膜 厚	ビヒクルの種類
① 有機ジンクリッチプライマー	15 ～ 20 μm	エポキシ樹脂
② 無機ジンクリッチプライマー	15 ～ 20 μm	エチルシリケート
③ 厚膜型有機ジンクリッチペイント	75 μm	エポキシ樹脂
④ 厚膜型無機ジンクリッチペイント	75 μm	エチルシリケート

なお、有機ジンクリッチペイントにはポリスチレン等エポキシ樹脂以外のビヒクルを使用したものや、無機ジンクリッチペイントにはアルカリシリケートをビヒクルとするものもあるが、現在、わが国ではほとんど使用されていない。

ジンクリッチペイントはスプレーで鋼面に塗装され、防錆性と密着性とを保持するために、鋼面はブラスト処理で十分に除錆されなければならない。ジンクリッチペイントは規定の膜厚を大幅に越えると塗膜にワレを生ずるので、塗装時の膜厚管理に注意が必要である。厚膜型ジ

ンクリッチペイントの塗膜は気候が多く塗重ねた時に発泡するので、ミストコートと呼ばれる低粘度塗料による封孔処理を行う必要がある。

海上大気部の防錆塗装では、厚膜型無機ジンクリッチペイントの上に $200\mu\text{m}$ 程度の塗装を行うのが標準になっている。飛沫部や干満部でも厚膜型無機ジンクリッチペイントが第1層に塗装されることが多い。

(2) エポキシ樹脂塗料

エポキシ樹脂塗料は、エポキシ樹脂とポリアミンとからなる2液硬化型の塗料で、密着性、防錆性、耐水性などに優れているので、海洋構造物の防錆塗装に多く使用されている。しかし、耐候性が悪く変退色しやすいので、海中部や干満部や内面以外では、耐候性の良いポリウレタン樹脂塗料が上塗されることが多い。飛沫部や大気部ではジンクリッチペイントの上に、下塗として $60\mu\text{m} \times 2$ 回程度塗装されるが、干満部では1回塗で $100 \sim 1000\mu\text{m}$ 程度塗装されることもある。

エポキシ樹脂塗料は、気温が 10°C 以下になると乾燥が遅くなるので、低温用の塗料を使用しなければならない。

(3) タール系塗料

タールは安価で耐水性がよいので、水中や地下埋設物の防錆に利用されてきた。タール系塗料には、つぎのような種類がある。

- ① タールを溶剤に溶解したもの：タールソリューション
- ② タールを熱溶融して塗布するもの：タールエナメル
- ③ タールを樹脂で変性したもの：タールエポキシ樹脂塗料など

海洋構造物には、タールエポキシ樹脂塗料が使用されている。タールエポキシ樹脂塗料は、コールタールや膨潤炭と、エポキシ樹脂、ポリアミンを主成分とする2液硬化型の塗料で、エポキシ樹脂塗料にくらべて厚膜に塗装できる、耐水性がよい、安価である等の特徴があり、浸漬部や内面の防錆に多く使用されている。

タールエポキシ樹脂塗料の品質は J I S に規定されており、次の3種類がある。

タールエポキシ樹脂塗料 J I S K-5664

- 1種：特に耐油性、耐薬品性が優れるもの。
- 2種：耐油性、耐薬品性を持っているもの。
- 3種：耐油性、耐薬品性を必要としない箇所に用いるもの。

海洋構造物の塗装には耐薬品性は必要ないが、性能の良い1種が使用されている。

タールエポキシ樹脂塗料は1回で $100 \sim 300\mu\text{m}$ の塗装が可能で、浸漬条件では $200 \sim 500\mu\text{m}$ の膜厚に塗装されることが多い。また、気温が 10°C 以下になると乾燥が著しく遅くなるので、低温用やタールウレタン樹脂塗料に代えなければならない。

(4) ポリウレタン樹脂塗料

ポリウレタン樹脂塗料は、ポリオール樹脂とイソシアネートを主成分とする2液硬化型の塗料で、耐候性が良いので暴露部の上塗塗料として使用される。1回塗の膜厚は30 μ mで、通常、中塗と上塗の2層塗りとされている。

(5) ガラスフレーク塗料

ガラスフレーク塗料は、りん片状のガラスフレークを塗料中に配合したもので、ガラスフレークが塗膜中で層状に配列して水や塩類の侵入を防ぎ、耐水性や防錆性が良い。1回塗で300～500 μ mと厚膜塗装も可能で、従来の塗装とライニングの中間の性能を示す。

ビヒクルの種類としてはエポキシ樹脂、ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂が使用されている。エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料は、密着性が良くジンクリッチペイントの上に塗装したりポリウレタン樹脂塗料を塗り重ねることも可能で、適用範囲が広い。ポリエステル樹脂ガラスフレーク塗料とビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料は、不飽和結合を持つ樹脂を触媒で硬化させるもので、低温でも乾燥し、耐水性にも優れているが、塗膜が硬いので衝撃を受ける箇所の塗装には適さず、他の塗料との塗り重ねにも制限がある。ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料は、ポリエステル樹脂ガラスフレーク塗料よりも耐水性、防錆性、耐薬品性に優れている。

(6) 機能性塗料

防錆と美観のほかに、各種の性能を持つ機能性塗料がある。機能性塗料にはつぎのような種類がある。

- ① 表面状態を調整するもの：潤滑、すべり止め、着氷防止など
- ② 電氣的性質：絶縁、導電、電波吸収など
- ③ 熱的性質：示温、断熱、防火、熱反射など
- ④ 音、振動：防音、防振など
- ⑤ 生物付着制御：生物が付き難い、生物が付き易いなど
- ⑥ 物性：耐衝撃など

塗膜中に珪砂などを配合したノンスリップ塗料が、階段やデッキ等のすべり止めに塗装されている。塗膜表面の極性や水侵入度の調整で、着氷し難い塗料が開発されている。フェライトを配合し厚膜に塗装した電波吸収塗料はレーダー波を吸収し、レーダー障害を防止できる。

防汚塗料を塗装すると、海藻や貝類などの生物の付着を防止することができる。防汚塗料の寿命は2年間程度で、その後は再塗装が必要になる。ある程度の水流があればセルフポリッシング型塗料を適用して寿命を延長することができる。最近では、シリコン樹脂等による溶解成分のない防汚塗料も開発されている。塗膜中に適当な富養成分を配合し必要な生物を付着させて、海中を自然な状態に保つ塗料も開発されている。水線部に柔軟な耐衝撃性塗料を塗装して、船舶や流木等の衝撃による損傷を防止することもできる。

代表的な塗装例を、表-3.1.2に示す。

表-3.1.2 代表的な塗装例

適用箇所	塗料の種類	膜厚 μm	備考
海上大気部	無機ジンクリッチプライマー	15	
	厚膜型無機ジンクリッチペイント	75	
	エポキシ樹脂塗料下塗	60	
	エポキシ樹脂塗料下塗	60	
	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	30	
	ポリウレタン樹脂塗料上塗 (合計膜厚)	25 (265)	
飛沫部	無機ジンクリッチプライマー	15	
	厚膜型無機ジンクリッチペイント	75	
	エポキシ樹脂塗料下塗	100	
	エポキシ樹脂塗料下塗	100	
	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	30	
	ポリウレタン樹脂塗料上塗 (合計膜厚)	25 (345)	
	無機ジンクリッチプライマー	15	
	厚膜型無機ジンクリッチペイント	75	
	エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料	250	
	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	30	
	ポリウレタン樹脂塗料上塗 (合計膜厚)	25 (395)	
干満部	有機ジンクリッチペイント	75	
	エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料	500	
	エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料 (合計膜厚)	500 (1075)	
	有機ジンクリッチプライマー	15	
	超厚膜型エポキシ樹脂塗料	1000	
	厚膜型エポキシ樹脂塗料 (合計膜厚)	1000 (2015)	
	無機ジンクリッチプライマー	15	
	タールエポキシ樹脂塗料	200	
	タールエポキシ樹脂塗料 タールエポキシ樹脂塗料 (合計膜厚)	200 200 (615)	
海中部	無機ジンクリッチプライマー	15	電気防食と併用する
	タールエポキシ樹脂塗料	200	
	タールエポキシ樹脂塗料	200	
	(合計膜厚)	(415)	

3.1.2 有機ライニング材料

有機ライニングは一般的に2～5mmと塗装に比べて厚膜に施工でき、防錆性や耐衝撃性に優れているが、施工性と経済性では塗装に劣る。

(1) ポリエチレンライニング

ポリエチレンライニングは専用のプライマーを塗布した面を、ポリエチレンシートを熱収縮等の方法で被覆するもので、工場のラインで施工される。被塗物の形状に制限があるが、耐水性、耐薬品性、防錆性に優れ、長期の耐久性が期待できる。

(2) レジンモルタルライニング

各種の合成樹脂に多量のフィラーを配合してモルタル状にした物で、樹脂の種類としてはエポキシ樹脂とポリエステル樹脂が使用されることが多い。へらやコテで施工され、1回で3～10mm程度の厚づけが可能で、すき間部の充填にも適している。

(3) ポリウレタンライニング

無溶剤のポリオール樹脂とイソシアネートとから成る2液硬化型の塗料で、先端で混合する特殊塗装機を用いる。このため、2液混合後のポットライフを考慮する必要がなく、速乾性で厚膜の塗装が可能である。1回塗の膜厚は0.5～5mm程度で、被塗物の形状にかかわらず施工でき、小面積であれば現場補修も可能である。

(4) 水中硬化型ライニング

水中にある構造物を被覆するためのもので、パテ状で手やへらで厚膜に被覆するものとはけ等で薄膜に被覆するものがある。被覆されたライニング材は、素地の水分と置換し密着するとともに、水分を外部に放出し硬化する。エポキシ樹脂系とポリエステル系のものがある。施工の際は、硬化までの間のウェーブダメージを防ぐためにフィルムで押さえたり、金網で補強したりする場合もある。

(5) FRPライニング

FRPライニングは、樹脂にガラス繊維を混合し補強するもので、ガラス繊維には繊維チップやガラス繊維クロスが使用され、樹脂にはエポキシ樹脂やポリエステル樹脂が使用される。ガラス繊維の補強効果で物理的性能に優れている。

(6) ゴムライニング

ゴムライニングは加硫剤や硬化剤を加えて、シート張りで施工される。物性面は優れているが、施工性や経済性の点から、使用例は少ない。

(7) ペトロラタムライニング

ペトロラタムは原油から蒸留した石油ワックスで、これに防錆剤等を配合してペトロラタムライニング材とする。ペトロラタムライニング材には、不織布に含浸させたシート状のものと、パテ状のものがある。パテ状のものは充填のために使用されるが、一般にはシートを巻き付けて使用する。干満帯の防食では、ペトロラタムシートを巻き付けた後、保護カバーを装着する工法が適用されている。保護カバーの種類には、ガラス繊維で補強したポリエステル樹脂、塩化ビニル樹脂、エポキシ樹脂、ポリプロピレン樹脂などが使用される。

代表的な有機ライニング例を、表-3.1.3に示す。

表-3.1.3 代表的な有機ライニング例

工 法	厚 さ	施 工 方 法	備 考
ポリエチレンライニング	5～3 mm	押出し被覆	工場施工
レジンモルタルライニング	5～10 mm	へら付け	工場および現場施工
ポリウレタンライニング	0.5～5 mm	専用塗装機による スプレー塗装	おもに工場施工
水中硬化型ライニング	0.2～5 mm	刷毛塗、へら付け	現場施工
FRPライニング	2～5 mm	へら付け	工場および現場施工
ゴムライニング	5～15 mm	シート張り	工場施工
ペトロラタムライニング	2～3 mm	塗布後シート巻、 シート張り	工場および現場施工

3.1.3 まとめ

- (1) 有機系被覆の方法は、塗布型のものとシート貼型のものがある。
- (2) 海中部と干満部と大気部とでは要求性能がことなり、別個の被覆材が用いられる。
- (3) 海洋構造物の有機被覆材の塗替までの寿命は、10～15年程度である。

3.1.4 今後の課題と提案

(1) 現行の問題点

- ① 寿命が明確でない。
- ② 材料間の性能比較が明確でない。

(2) 研究課題

- ① 寿命予測方法の確立のための研究
- ② 材料の比較検討試験
- ③ ①、②等により基準を作る。

(3) 提案

- ① 材料間の長短所を明確にする。
- ② 使用条件を明らかにして、評価判定基準を確立する。
- ③ 材料品質と施工方法の基準を設けて品質を安定させる。
- ④ 次のようなメリットがある。
 - a) 施工が容易で工場－現場を問わず施工できる。
 - b) 構造物の形状や大きさにかかわらず施工できる。
 - c) 供用しながらのメンテナンスが可能である。
 - d) 美観やその他の機能も付与できる。

3.2 金属，無機系被覆

3.2.1 耐食性金属ライニング（ステンレス，モネル，チタン等）

耐海水性鋼などの低合金系耐食性鋼よりさらに優れた耐食性を有する材料として、耐海水性ステンレス鋼，モネル，チタンなどが知られており、高価ではあるがメンテナンスフリーで利用できる可能性がある。そのため、イニシャルコストではなく、その長期耐久性を考慮に入れてコスト評価すれば、十分経済性を有するものと考えられる。

キュプロニッケル（10～30%Ni-Cu合金）は、停滞海水中よりむしろ流速の速い海水中で良好な耐食性を示し、耐孔食性も優れていると報告されている¹⁾。

（表-3.2.1）。また、耐生物付着性にも優れており、建設省土木研究所等による大井川沖での海洋暴露試験でも、最も良好な成績を収めている²⁾（表-3.2.2）。

モネルメタル（70%Ni-Cu合金）は、停滞海水中では孔食を発生するが、流速の速い海水中では耐孔食性に優れており、NACEの飛沫帯用の防食仕様に採用されている。海洋環境におけるモネルメタルの腐食機構は、最初極く小さな孔食（6年で25 μ ）が発生し、それが横に拡がり全面腐食のような平滑な面を形成した後、再び孔食を発生し、それを繰り返すものと推定される³⁾。

ステンレス鋼は、海洋では一般にSUS316Lが使用されており、土木研究所と鋼管杭協会の長期海洋暴露試験等で極めて良好な結果が得られている^{3)～6)}。

（表-3.2.3）。海洋環境におけるステンレス鋼では、孔食の発生が心配であるが、上記大井川沖での実験により、飛沫帯では隙間腐食などの局部腐食は発生しないことを確認している²⁾。干満帯や没水部では隙間腐食の発生が見られたが、電気防食を併用すればその防止が可能であり、実際に海洋暴露試験により電気防食併用のステンレス巻きが良好な結果を得たことが報告されている⁶⁾。上記の結果をふまえ、SUS316Lで被覆する防食法は、建設省土木研究所の飛沫帯・干満帯における防食指針に採用され、また、近く着工される東京湾横断道路の下部工の防食仕様にもリストアップされている。SUS316Lの他、他の元素を添加した孔食に強いオーステナイト系ステンレス鋼，二相系ステンレス鋼，高純度フェライト系ステンレス鋼なども開発されている。

チタンは、孔食，隙間腐食，応力腐食割れに優れた海洋環境における理想的な耐食金属だと言われており¹⁾、海水冷却用の熱交換器などに用いられてきた。最近では、石油掘削用プラットフォーム部材，マリンライザーなどにも採用されている⁷⁾。これら耐食性金属の施工法としては、母材にシートを溶接する方法とクラッド法がある。シート溶接の板厚は、モネル1～2mm，ステンレス2～4mm，チタン1～3mm程度である。クラッド法は、熱間圧延法や爆発圧着法等により鋼材に耐食性金属を圧着接合させる方法であり、密着性に優れそのまま構造用材料として使用できる。ただし、クラッド鋼の溶接は母材側の溶接とクラッド側の溶接とを分けてする必要がある。クラッド材の厚みは、モネル，ステンレスは2～4mmであるが、チタンでは耐食性の観点からは0.5mm程度で十分であるが、クラッド比の関係から、通常1～3mmの厚みが採用される。

これら耐食性金属を被覆した鋼材では、シート溶接法でもクラッド法の場合でも、鋼構造本体との接合部は異種金属溶接腐食を防止するため、電気防食や防食塗装を併用する必要がある。

表-3.2.1 各種金属材料の海水中の耐久性

金属 評価項目	チタン	ステンレス ²⁾	ニッケル	ニッケル 合金	銅	黄銅	青銅	銅ニッケル 合金	アルミ 合金	鉄	鋼
静止海水浸漬	A	A	A	B	B	B	B	B	合金の種類 による	C	C
耐孔食性	A	C	C	B	B	A	A	B	B	B	B
耐隙間腐食性	A	B/C	B/C	B	A	A	A	A/B	B	B	B
デアロイング De-alloying	A	A	A	鋭敏な ものあり	A	鋭敏な ものあり	A	鋭敏な ものあり	鋭敏な ものあり	鋭敏な ものあり	A
耐生物付着性	C	C	B	B/C	A	B	B/C	A:90/10 B:70/30	C	C	C
耐キャビテー ション損傷	A	A	B	B	C	C	C	C	C	C	C
流動海水浸漬 流速2m/s以下	A	C (孔食)	—	C (孔食)	A/B	A/B	A/B	A	—	C	C
流速 2~15m/s	A	A	A	A	A	B	B	B	—	C	C
応力腐食われ	A	鋭敏	多分鋭 敏である	多分鋭 敏である	A	A	A	A	鋭敏なも のもあり	A	A
電 位 列 ¹⁾	1	3	3	1~5 ³⁾	6	7	5	4	9	8	8

評価…… A : 良好 B : 平均的 C : 劣る

注) 1) 海水中での電位列であり、2つの金属が接触すれば数の多いものが溶解する。

2) オーステナイト系ステンレス

3) 合金の種類による。

表-3.2.2 試験材に対する生物付着

(単位: kg/m²)

防 食 系	防 食 仕 様	昭和59年度 4ヶ月		昭和60年度 1年4ヶ月		昭和61年度 2年5ヶ月			昭和62年度 3年5ヶ月		
		No.	採取 直後	No.	採取 直後	No.	採取 直後	乾燥後	No.	採取 直後	乾燥後
A-1	SUS316L 17Cr-12Ni-2Mo-L.C.	A-1-1 (西)	7.5	A-1-2 (西)	44	A-1-3 (西)	10	2.5	A-1-4 (西)	4.9	2.7
A-3	25Cr-50Ni-6Mo-Cu-Ti-L.C.	A-3-2 (西)	5.0	A-3-1 (西)	33	A-3-3 (北)	58	28.8	A-3-2 (東)	11.9	6.7
A-7	25Cr-7Ni-3Mo-Cu-N-L.C.	A-7-1 (北)	2.5	A-7-2 (北)	5	A-7-1 (南)	65	28.9	A-7-2 (南)	3.4	1.2
A-10	9-1 キュプロニッケル	A-10-2 (北)	0.5	A-10-1 (北)	0	A-10-2 (南)	1	0.5	A-10-1 (南)	1.9	0.1
A-11	モネル	A-11-2 (北)	6.0	A-11-1 (北)	10	A-11-2 (南)	25	7.7	A-11-1 (南)	12.9	6.8

年 度	採 取 直 後	乾 燥 後
昭和59年度	昭和59年 8月 8日	—
昭和60年度	昭和60年 8月11日	—
昭和61年度	昭和61年 7月25日	昭和61年12月 2日
昭和62年度	昭和62年 8月 5日	昭和62年11月20日

注) (1) 100×100(mm) の面積を採取, kg/m²に換算

(2) ()内採取位置

(3) 採取直後と乾燥後の測定日

表-3.2.3 Results of Visual Inspection after 11.5 Years Exposure Off Chiba

Type of coating	Direction	Atmos	Splash	Upper tidal	Lower tidal	Submerged
1. Stainless steel (25Cr-13Ni sheet, 3mm)	L	9 A	9 A	9 A	9 A	9 A
	M	9	9	9	9	9
2. Flame sprayed aluminum (200 μ m)	L	9 C	9 C	0 E	0 E	0 E
	M	9	9	0	0	0
3. Flame sprayed aluminum (100 μ m) + coal-tar epoxy (100 m x 2)	L	5 D	1 D	0 D	0 E	0 E
	M	0	0	0	0	0
4. Flame-sprayed aluminum (100 μ m) + coal-tar epoxy with vinylon cloth (300 μ m x 2)	L	6 C	5 C	0 D	1 D	5 C
	M	6	5	0	5	4
5. Flame-sprayed zinc (100 μ m) + coal-tar epoxy (300 μ m x 2)	L	9 B	7 B	0 E	2 E	9 C
	M	9	7	0	7	8
6. Inorganic Zinc-rich paint (75 μ m) + coal-tar epoxy (300 μ m x 3)	L	9 B	9 B	3 B	9 B	9 B
	M	9	9	9	9	9
7. Inorganic Zinc-rich paint (75 μ m) + epoxy (300 μ m x 3)	L	9 B	5 B	7 B	8 B	9 A
	M	5	6	9	9	9
8. Polyethylene (cohesion-type, extrusion process, 4mm)	L	9 A	9 AB	9 A	9 A	9 A
	M	9	9	9	9	9
9. Epoxy resin mortar (4 mm)	L	0 CD	0 CD	0 C	0 C	0 C
	M	0	0	0	0	0
10. Steel fiber reinforced concrete (100 mm by casing, 50 mm by spraying)	L	6 B	5 B	9 B	9 B	9 B
	M	1	6	9	9	9

- (1) Direction L : Face to land (land side)
 (2) Atmos : Atmospheric zone
 (4) Upper tidal : Upper part of tidal zone
 (6) Submerged : Submerged zone
 (8) 0 - 9 : Rating number of rust of base steel after removal of coating (ASTM D610-68)

- M: Face to off-shore (off-shore side)
 (3) Splash : Splash zone
 (5) Lower tidal : Lower part of tidal zone
 (7) A - E: Evaluation of surface appearance after removal of marine life
 A : Excellent
 B : Better
 C : Good
 D : Worse
 E : Worst

3.2.2 アルミ溶射

金属溶射は熔融状態の金属をガスあるいは空気で鋼材表面に吹き付け、凝固させて被覆する方法である。溶射金属として亜鉛、アルミニウムがあるが、海洋環境ではアルミニウム溶射被膜の方が耐食性に優れている。

溶射被膜は一般に多孔質であるから、封孔処理が行われるのが普通であり、通常エポキシ樹脂塗料や塩化ビニル塗料などが塗装される。溶射施工は下地処理（通常ニアホワイト以上）と溶射条件の十分な管理が必要で、次の規格が定められている。

- ① J I S H 8 3 0 1 アルミニウム溶射
- ② J I S H 8 6 6 3 アルミニウム溶射製品試験法
- ③ J I S H 9 3 0 1 アルミニウム溶射作業標準

アルミニウム溶射被覆は鋼素材に対して犠牲陽極として働くので、局部的に鋼素地が露出しても防食される利点がある。しかし、犠牲となる溶射膜は消耗するので注意を要する。飛沫帯、干満帯をアルミニウム溶射で防食する場合、海中部に鋼材の露出部が存在すると干満帯のアルミニウム溶射被膜の消耗を促進させるので、電気防食を併用するなど海中部に対して適当な対策が必要である。ただし、電気防食を併用する場合の防食電位は、アルミニウム被膜の電位より卑にする必要がある。また、美観が要求される場合は、アルミニウム溶射被膜に塗装を行うことがある。

3.2.3 重防食鉄板巻

表-3.2.4に示す重防食鉄板巻の仕様は、固定式石油掘削用プラットフォームの飛沫帯に関するNACEの標準防食仕様である。プラットフォームの寿命中に予測する腐食や摩耗を考慮して、十分な厚みの鋼板を鋼管などに巻き付ける方法であり、その上にさらに重防食塗装を施すものである。メキシコ湾にある石油掘削用プラットフォームなどに、この防食法が採用されている。

表-3.2.4 NACEの飛沫帯防食仕様⁸⁾

Section 10: Splash Zone Corrosion Control Measures

10.1 Introduction

10.1.1 This section recommends corrosion control measures that will minimize the deterioration of steel members in the splash zone.

10.1.2 Corrosion of attached pipelines or risers in the splash or submerged zone is outside the scope of this document.

10.1.3 Additional thickness of steel (wear plates) is usually provided in the splash zone.

10.2 Placement

10.2.1 Unless the setting depth of the platform can be ensured, consideration should be given to additional protection beyond the normal splash zone interval to provide a margin of safety.

10.3 Steel Wear Plates

10.3.1 Wear plates should compensate for the anticipated corrosion and wear during the life of the platform.

10.4.1.1 This sheathing, (UNS N04400, typically 1 to 5 mm (18 to 4 AWG gauge) thick; UNS C70600, typically 4 to 5 mm thick) is attached to tubular members in the splash zone either by banding or welding. Welding is preferred because the annulus between the steel member and the sheathing is sealed.

10.4.1.2 The metal sheathing should be protected from impact damage. Alloy clad steel plate may aid in preventing damage.

10.4.2 Vulcanized chloroprene

10.4.2.1 Vulcanized chloroprene is typically applied in thickness of 0.25 to 0.5 inch (6 to 13 mm).

10.4.2.2 Since this coating cannot be applied in the fabrication yard, it is normally restricted to straight runs of tubular members.

10.4.2.3 A minimum of 2 inches (51 mm) should be left uncoated at each end of a tubular member to

form. Wear plates are usually 0.5 to 0.75 inch (13 to 19 mm) thick.

10.3.2 Wear plates are needed because damage can occur to coatings or sheathings used in the splash zone. Repair of coatings at or near the water line is extremely difficult and costly.

10.3.3 In addition to providing a corrosion allowance, wear plates add stiffness and strength, thereby providing greater impact resistance.

10.3.4 Wear plates are usually coated or sheathed for additional corrosion protection.

10.4 Alternative Corrosion Control Measures for Steel in the Splash Zone

10.4.1 70/30 nickel-copper alloy (UNS N04400⁽⁴⁾) or 90/10 copper-nickel alloy (UNS C70600) sheathing.

⁽⁴⁾Unified Numbering System (UNS) for Metals and Alloys, Society of Automotive Engineers, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096.

prevent damage to the chloroprene during the welding operations.

10.4.3 High-build organic coatings

10.4.3.1 These coatings are usually filled with silica glass-flake, or fiberglass.

10.4.3.2 These coatings are typically applied to thickness of 40 to 200 mils (1 to 5 mm) over an abrasive blast cleaned surface.

10.4.3.3 Since this coating may be applied in the fabrication yard after assembly, joints may be protected as well as straight tubular runs.

10.4.4 Conventional heavy-duty platform coating systems 10 to 20 mils (250 to 500 μ m).

10.4.4.1 Although most of the conventional coating systems currently used to protect the atmospheric zone have performed well in the splash zone, they are not suited as a primary control measure for long-life platforms.

3.2.4 モルタルライニング

ここでいうモルタルライニングとは、セメントモルタルやコンクリートによる被覆を総称したものである。

型枠を取り外す方法は、土木建築における一般のコンクリート工事のように、木製または鋼製の型枠を用い、打設、硬化後型枠を取り外すものである（図-3.2.1）。また、型枠を用いないで吹き付けによる方法もある。

型枠を保護カバーとしてそのまま残す方法（図-3.2.2）は、気密性水密性の高い、耐食性の優れた材料で作った型枠を使用し、モルタルの打設後もそのまま残し、衝撃によるひびわれや中性化からモルタルを保護する方法で、この型枠に使う材料には、FRP、FRVなどの強化プラスチックやGFRC（強化セメント）が使用されている。

モルタルライニングの防食機構は、モルタル中の水酸化カルシウム Ca(OH)_2 によって鋼材をアルカリ雰囲気中に保持し防食するものである。よく知られているように、アルカリ雰囲気での鋼材は図-3.2.3に示す如く、その腐食速度が低くなるからである。このモルタルライニングは歴史が古く、実績が多いので、港湾構造物を始め種々の分野に多用されている。

モルタルライニングの耐用年数はその中性化速度に依存するが、ある調査によれば中性化速度は最大値で $1.3\text{mm}/\text{年}$ と言われ、たとえば 65mm の厚みがあれば、50年の寿命が期待できることになる。実際のライニングでは、厚みに余裕をみて、50年の寿命であれば、 100mm 位の厚みにするのが普通である。

モルタルは、打設直後では $\text{pH}12$ 以上の極めて高いアルカリ性を示すが、空気中の炭酸ガスと反応して、表層部やひびわれ部より徐々に中性化している傾向がある。

また、海水中の硫酸塩がセメントの水和生成物 C_3A と反応してエトリンガイトを生成し、モルタルの劣化の一因ともなっている。

以上の長期的要因の他、短期的には流木等の衝撃により、ひびわれ、欠損、脱落を生じるケースもある。

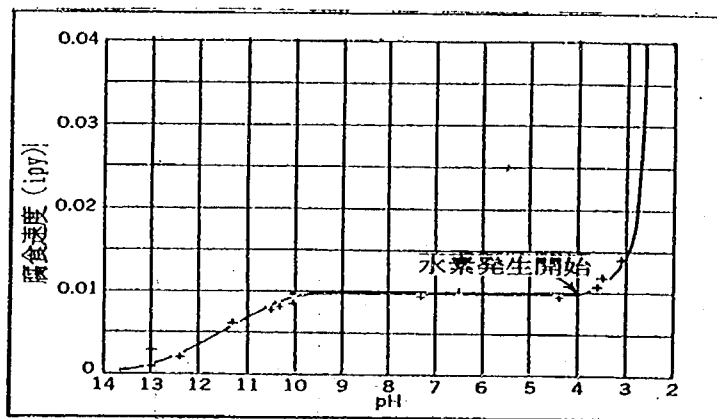


図-3.2.3 暴気した室温の水中での、鉄の腐食に対するpHの影響¹⁰⁾

モルタルライニング法には、前述のように2種類の工法があり、一つは素地調整後、FRP（強化プラスチック）やGFRC（強化セメント）等の型枠を取り付け、モルタルを注入し、型枠をそのまま残し、モルタルと型枠による中性化速度の減少と防食体の強化を狙う方法である。他の一つは、メタルフォームなどの型枠を施工後取り外す工法である。

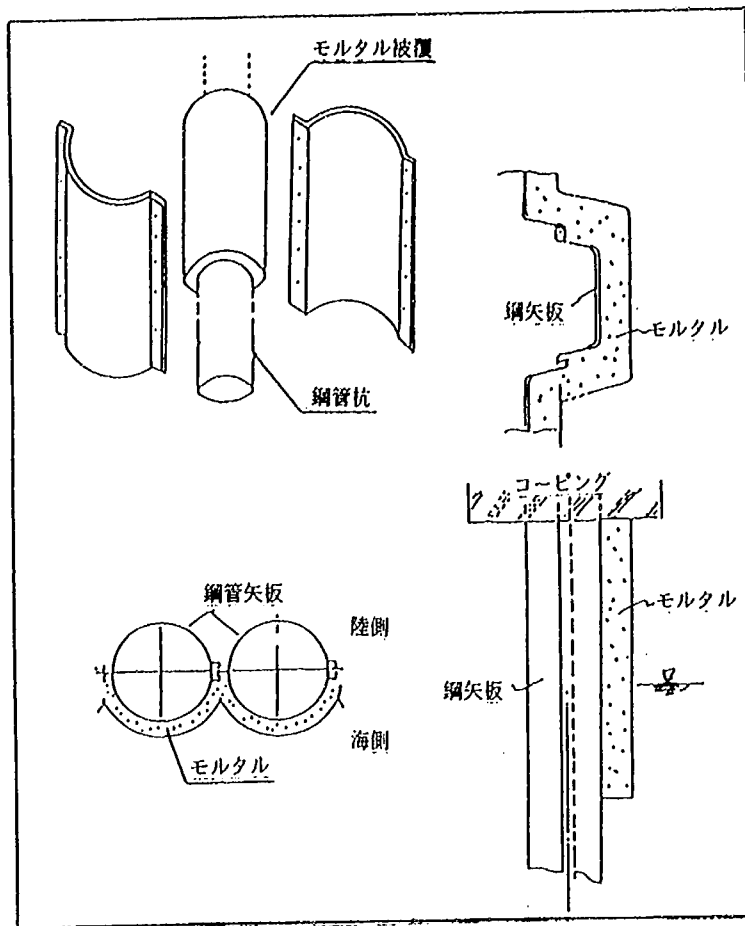


図-3.2.1 モルタルライニング例（型枠を取り外す方法）⁹⁾

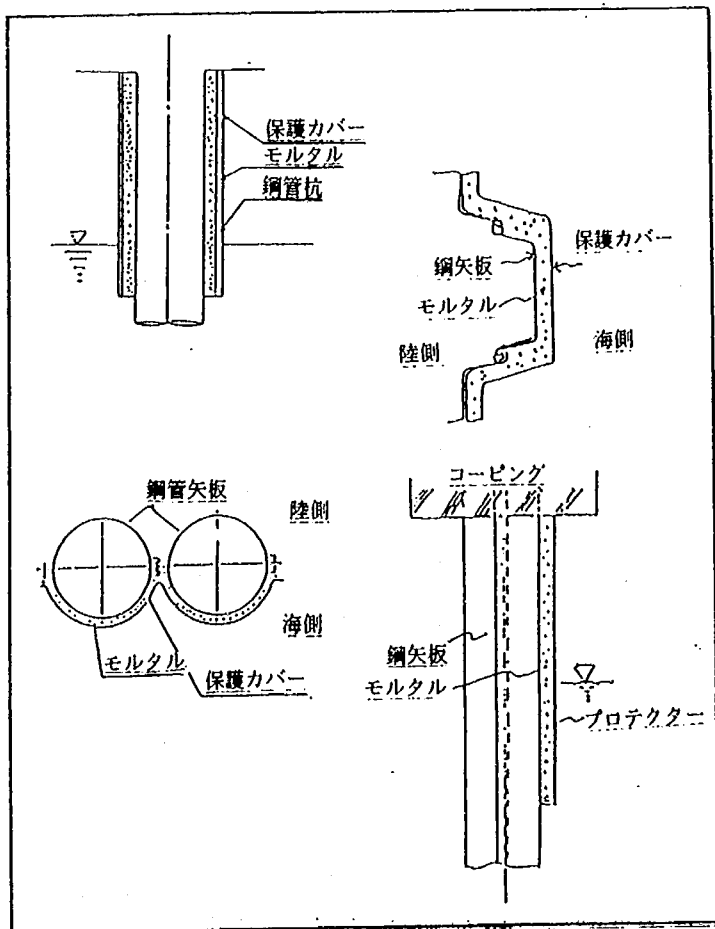


図-3.2.2 モルタルライニング例（保護カバー付き）⁹⁾

3.2.5 電着工法（海中で電気分解することによって無機被膜を形成する）⁹⁾

この工法は、アメリカで考案された「海水中鉱物の電着効果を利用して構造物を製作する方法」を、鋼構造物の防食に応用したものである。電着工法の原理は、概略次の通りである。電着工法は海水中のCaイオンとMgイオンを、電解により鋼材面に CaCO_3 、 Mg(OH)_2 を主体とする無機系物質として析出させるものである。

CaイオンやMgイオンが電気防食時に陰極面に石灰質被膜として析出する現象は、エレクトロコーティングといわれ古くから知られている。エレクトロコーティングは被膜が薄く(100~150 μ)、陰極防食を補完する手段と考えられる。これに対して

電着工法では、電流密度が2~7 A/ m^2 とエレクトロコーティングに比べて高く、析出する無機系物質層の厚みも通常10mm~20mm程度を目安にする。なお、コーティングされる無機系物質の量は、電流の大きさと通電時間にほぼ比例する。目標の厚さに達したあとは電流を切り、被防食体をコーティングした無機系物質で防食する。防食対象範囲は主として海中部である。また、この工法は既設の構造物にも適用でき、被覆層が破損した場合に再通電によって修復できる。10mm被覆厚を得るのにたとえば電圧3~8 V、電流密度2~7 A/ m^2 で約4~6ヵ月を要する。最近開発されたので、実績はまだ少ない。

3.2.6 耐海水性鋼巻（高性能被膜との組み合わせ）⁹⁾

犠牲鋼板の代わりに耐食性の大きい鋼板を使用して耐用年数を増すことを考えたのがこの方法で、耐食性の大きい鋼として、飛沫帯から海中部に強い耐海水性鋼と大気中に強い耐候性鋼とがある。

これらの耐食性鋼を巻き付けて溶接する場合は、合金系の専用溶接棒を使用する必要がある。また、異種金属接触腐食を防止するため、構造物本体との継手部分に十分な防食塗装などを施すか、または電気防食を施す必要がある。耐食性鋼は、そのまま構造物素材として使用することもできる。美観を必要とする場合にはさらに塗装を施すことができ、そうすることによって耐用年数も延長できる。

耐海水性鋼は、使用目的に応じて、飛沫帯用、海中部用および両用の3種類があり、それぞれのゾーンにおいて普通鋼の2倍程度の耐食性を有している。鋼の耐海水性に対する添加元素の効果の程度は、その組み合わせ方、添加量や暴露環境によ

ってかなり変動するが、総合的な評価としては飛沫帯でP、Cu、Ni、海中部でSi、Cr、Alなどが有効であり、また海中での孔食を小さくするのにNi、Moが有効である。耐海水性鋼はこれらの知見に基づいて開発された低合金鋼で、成分系として溶接構造用のCu-Cr-Mo系、Cu-Cr-Mo-Si系、Cu-Cr-Al系、Cr-Al

系などと、溶接性を重視しない用途には、P-Cu-Ni系、P-Cu-Cr系、P-Cu-Cr-Al系などがある。耐海水鋼と塗装の組み合わせによる海洋暴露テスト（千葉沖、飛沫帯、15年）の結果では、ジンクリッチプライマーを下塗りとし、タールエポキシ、ピュアエポキシ、塩化ゴムおよび塩化ビニルなどを上塗りした試料は、普通鋼（SS41）に塗装したものに比べて

全体にかなり良い結果が得られており、耐海水性鋼に塗装を組み合わせた防食システムが、より長期防食の可能性のあることを示唆している。この耐海水性鋼に重防食塗装を施した防食仕様については、現在、建設省土木研究所が中心となって、静岡県大井川沖の海洋技術総合試験施設を用いて確性実験中であり、約4年暴露では良好な状態であると報告されている。²⁾

3.2.7 参考文献

- 1) K. A. Chandler : Marine Offshore Corrosion, P. 182, 1985
- 2) 建設省土木研究所他 : 海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書
(昭和62年度報告書), 昭和63年3月
- 3) 増田, 他 : 鉄と鋼, Vol. 72, No. 5, P. 24~25, 昭和61年
- 4) 片脇, 田中, 土居 : 第34回腐食防食討論会 (A-307), 1987. 10 大阪
- 5) K. Katawaki, T. Asama & K. Doi : 7th International Congress on Marine Corrosion & Fouling, Valencia (Spain), 7-11, 1988. 11
- 6) 藤田, 他 : 鉄と鋼 Vol. 73, No. 13, P. 242, 昭和62年
- 7) C. F. Hanson : Int. Conf. Adv. Corros. Resist. Steels Met. Alloys Offshore, P. 150~158, 1987
- 8) NACE : Recommended practice—Control of Corrosion on Steel, Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production, 1983
- 9) 沿岸開発技術研究センター : 港湾鋼構造物防食マニュアル, 昭和61年3月
- 10) W. Whitman, R. Russel, V. Altieri : Ind. Eng. Chem, 16, P. 665, 1924

3.3 電気化学的防食

3.3.1 総論

電気防食の起源は古く、1824年英国のD a v y 卿が木造船の船底板を亜鉛で防食したことに始まる。その後、本法は適用技術が未熟なためと防食に対する認識が不足していたことから、長い間実用的な防食法として活用されることは少なかった。1930年代に入り、米国でパイプラインの進展に伴いその防食法として本法の防食効果が認められて以来本法が見直され、第二次大戦後、わが国でも基礎研究とともに実際面の適用が進められた。

わが国での土木鋼構造物への適用は、港湾構造物が最初で、昭和28年に尼崎港、ついで横浜港の山下埠頭に適用されたのが初めてである。

土木鋼構造物の電気防食は、当初は流電陽極材に優れたものがなく、ほとんどが外部電源方式で行われた。しかし、外部電源方式は保守管理に専門的知識をもった技術者が必要なことや、運転維持をしていくために電力費を要することなどの欠点があった。昭和40年頃から高性能のアルミニウム合金陽極の開発に伴って、保守管理の容易な流電陽極方式に変化してきた。現在では特別な場合を除き、アルミニウム合金陽極を用いた流電陽極方式が用いられている。

土木鋼構造物の海中部及び海底土中部の防食には現在、そのほとんどが電気防食を採用している。それは、原理的に防食効果が確実な方法であるだけでなく、施工性、耐久性、経済性の面で他の防食法に比べ優れており、更にメンテナンスも容易であるなどの理由によるものである。

3.3.2 「海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説」の概要

建設省土木研究所では昭和58年11月に「電気防食設計指針（案）・同解説」を発行したが、実験室試験結果を中心として作成されたものであった。その後、実海域での検証実験を重ね、この程「海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説」を作成した。

本指針（案）は、海域に建設される土木鋼構造物の電気防食を行う場合の設計、施工、維持管理に関する基本的な事項がとりまとめている。従来の指針（案）の改正または加筆された主な事項について概要を示す。

(1) 電気防食の適用部位

電気防食の適用部位は、従来と同様平均干潮面以下の海中部および海底土中部としているが、土木鋼構造物の場合、干満部および平均干潮面以下1～2 m程度まで塗覆装による防食を行っている場合が多い。この場合、海中部に電気防食を適用すると電気防食の効果は、没水率に比例して干満部までおよぶため、干満部の塗覆装の欠陥を補強し、塗覆装の寿命を延長する複合効果がある。

(2) 防食電流密度

実験室試験結果と実海域試験結果から、海域毎の防食電流密度の値を表-3.3.1のように定めている。

表-3.3.1 防食電流密度 (単位: mA/m²)

環 境			電 気 防 食		複合電気防食
			初期防食 電流密度	定常防食 電流密度	定常防食 電流密度
一 般 海 域	内湾性	海水中	100	50	左の値にPを 乗じた値
		土 中	20	10	
	外洋性	海水中	100 × K	50 × K	
		土 中	20 × K	50 × K	
特 殊 海 域	汚 染	海水中	100 × K	50 × K	
		へドロ 土 中	150	100	
	高潮流	土 中	20 × K	10 × K	
		1m/sec	160	80	
		2m/sec	230	115	
		5m/sec	270	135	

備考: F は、海域の波浪、潮流の程度に応じて 1.0~1.5 までの範囲とする。
 K は、汚染の程度に応じて 1.2~1.5 までの範囲とする。
 P は、塗膜の劣化、損傷等によって生じる鋼の露出率で、塗装系により
 0.1~0.25 までの範囲とする。

(3) 施工

施工に関しては、アルミニウム合金陽極による施工を中心に新たに定めた。施工計画、陽極性能確認、現場作業者、作業準備、施工方法の選定、施工方法、施工管理について記載されている。

(4) 点検および維持管理

点検を、定期点検と、定期点検で異常が認められたときの詳細点検に分け、点検項目を定めている。特に電気防食の防食状態を把握する上で重要な陰極電位については、管理電位を表-3.3.2のように定めている。

表-3.3.2 管理電位 (単位: mV対SCB)

電気防食の 種類 環 境	電気防食法	複合電気防食法 (塗装併用)
一 般 海 域	-800より卑	-800 から -1050 までの間
汚 染 海 域	-900より卑	
高 潮 流 海 域	-800より卑	

一般の海域の防食電位は-770mV(SCB)である。しかし、実海域においては、何らかの環境変化があり得るし、不測の事態も発生するので、これらに対して弾力的に対応できるよう防食電位より若干卑な電位を管理電位として設定し、測定した電位をそれより卑に保つことによって、完全な防食状態を維持することとしている。

3.3.3 最近の電気防食の施工例

土木鋼構造物では、建設省土木研究所の「海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説」に準拠した電気防食の施工例として、関西国際空港の連絡橋がある。以下、同連絡橋橋脚の電気防食の概要を示す。

(1) 防食方式

アルミニウム合金陽極による流電陽極方式（一部塗装併用による複合電気防食法）

(2) 塗覆装

① 犠牲鋼板部（TP、-2m以上）：

無機珪酸ライマー（20 μ ）＋有機珪酸ライマー（20 μ ）＋超厚膜型エポキシ樹脂塗料（2500 μ ）

② フーチング部（TP、-2m以下）：

厚膜型無機ジンクリッチ（75 μ ）＋タールエポキシ樹脂塗料（300 μ ）

(3) 防食電流密度

防食電流密度は、橋脚が建設される海域の載荷試験用鋼管杭に使用して、約1年間の仮通電試験を行い次の値を決定している。

- ① 海水中犠牲鋼板部 120mA/㎡×0.1（剝離率）
- ② 海水中フーチング部 100mA/㎡×0.25（剝離率）
- ③ コンクリート中（橋脚内面） 2.2mA/㎡ ※
- ④ コンクリート中（フーチング内面） 4.0mA/㎡ ※
- ⑤ 海底土中 表層部（G.L-5m以上）：30mA/㎡
下層部（G.L-5m以下）：20mA/㎡

※ 建設省土木研究所が実施した電気防食試験（土木研究所資料第1689号 1981年）の結果を参考にして決定した。

(4) 使用陽極

使用陽極および取り付けの概要を、表-3.3.3および図-3.3.1に示す。

表-3.3.3 アルミニウム合金陽極

型 式	30-Ⅲ型	30-1(M) 型
項 目		
形 状	(180+200)×190×1860 mm	(130+150)×140×1800 mm
標準発生電流	3.0 A($\rho=30 \Omega \cdot \text{cm}$)	1.0 A($\rho=70 \Omega \cdot \text{cm}$)
重 量 (NET)	181.6 kg±2%	95.0 kg±2%
電 気 容 量	53.90A-Yr (効率90%)	17.95A-Yr (効率90%)
有効発生電気量	2600 Ah/kg以上	2600 Ah/kg以上

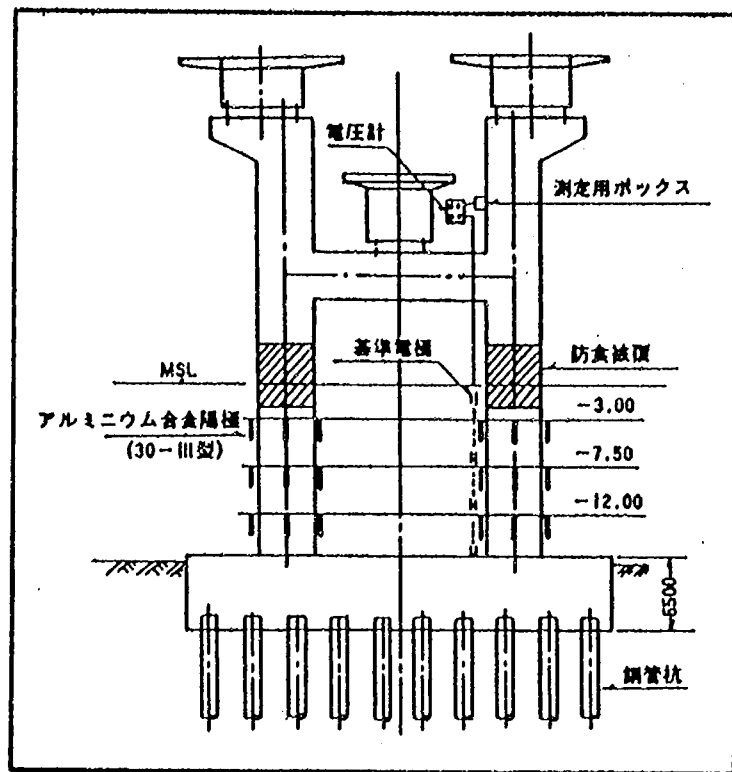


図-3.3.1 陽極取付概要

(5) 電位測定結果

現在、建設中であるが、すでに完成した橋脚の電位測定結果では、全て防食管理電位（-800 mV）より卑で、防食状態にある。

3.3.4 他機関の基準・規格

(1) 運輸省関係

①「港湾施設の技術上の基準・同解説」(社)日本港湾協会 昭和54年発行

運輸省の港湾法に基づいて定められた基準で、運輸省の監修で編纂されている。したがって、一般に運輸省の基準といわれている。本基準は、港湾構造物全体に対する基準で、この中に腐食、防食に関する基準もあるが、腐食、防食に関しては、その後の調査、研究が進み、必ずしも実情に合わない部分も出てきたため、現在改訂作業中である。現在、港湾構造物の腐食、防食に関しては、②に示す「港湾鋼構造物防食マニュアル」に準拠して行われている。

②「港湾鋼構造物防食マニュアル」(財)沿岸開発技術研究センター 昭和61年発行

「港湾鋼構造物補修マニュアル」と姉妹編で作成されたもので、運輸省と鉄鋼、建設、防食、塗料などの民間会社との共同で作成したものである。現在では、港湾施設の腐食、防食の指標となっている。第一編総論、第二編電気防食、第三編塗覆装からなっている。主な基本的事項を次に示す。

a) 港湾における鋼の腐食速度を、運輸省所管の約 500施設の調査結果を基にして定めてい

- a) 港湾における鋼の腐食速度を、運輸省所管の約 500施設の調査結果を基にして定めている。従来の基準とは、干満・海中部の腐食速度が大きく異なる。
- b) 港湾鋼構造物の防食工法及び防食適用範囲を、4工法を代表例として明示している。
- c) 電気防食の方法は、アルミニウム合金陽極を用いた流電陽極方式として、詳細な設計手順が示されている。また、海中部に電気防食を適用した場合は、平均干潮面以下での腐食速度は、無防食状態の場合に比較して、1/10以下と考えてよい。
- d) 港湾鋼構造物の塗覆装工法として、塗装，無機・有機ライニング，ペトロラタムライニングの4種類に大別し、各工法の詳細な説明がなされている。

③「港湾調査指針」(財)日本港湾協会 昭和62年

港湾構造物全般に関する調査指針で、第三章に「鋼材の腐食および防食」の項がある。

腐食調査の部分については、(財)沿岸開発技術研究センター発行の「港湾鋼構造物補修マニュアル」とほぼ同一の内容になっている。この他に、腐食因子に関する水質分析法が示されている。

(2) 海外基準

海外基準としては、腐食速度および腐食調査法に関する基準は見当たらない。防食法に関する基準は多く、その代表的なものを示す。

- ①「Code of Practice for Cathodic Protection」British Standards 1973年発行 本基準は電気防食の教科書的で、電気防食全般について記載されている。この中に海洋の部分もあるが、基準というよりは考え方あるいは解説的に書かれている。したがって、電気防食の参考書として使用するのがよい。

②「Fixed Offshore Instalation Technical Note」D n V 1981年発行

本基準は、北海を中心とした石油掘削リグの鋼材の電気防食についての基準である。したがって、世界の石油掘削を行っている主な海洋における防食電流密度，防食電位，アルミニウム合金陽極の設計法，電気防食の検査方法などについて規定されている。

しかし、海洋での石油掘削という特殊な環境での基準のため、基準値が全体的に安全サイドになっている。

③「Corrosion of Steel, Fixed Associated with Petoroileum Production」NACE1983年発行

本基準は、米国での石油掘削関係の防食に関する基準で、海中部の電気防食と、干満部及び飛沫部の塗装に関する基準である。電気防食については、何回かの改訂で現在ではD n Vの基準と大きな差はない。

3.3.5 コンクリート構造物の電気防食

鉄筋コンクリート構造物中の塩害による鉄筋の腐食に対して、電気防食が有効であることが認められている。

米国ではすでに、凍結防止剤を使用し塩害を受けている道路橋に、実用されている。アメリカ連邦道路局 (FHWA) では塩害の防止対策として、積極的に技術開発を進めている。電気防食は防食効果、装置の耐久性、経済性など検討する課題も多いが、コンクリート中に塩分が含まれている状態でも防食が可能であることから塩害防止対策として、今後有効なものになるものとして期待されている。

わが国での研究開発としては、主な研究として、建設省土木研究所と側土木研究センターの共同研究として昭和60～62年に行った「コンクリート構造物の電気防食に関する研究」がある。この研究成果から現状の技術について述べる。

(1) 管理電位

防食電流遮断後の電位の変化量を基準として、防食状態を管理する。電位変化量の基準は、100mVとする。コンクリート構造物の防食電位は環境などにより変化することがあるため 100mVの電位変化量を採用することが、最も实际的であり信頼性が高い。

(2) 防食電流密度

防食電流密度は 100mV以上の電位変化量を得る値であるが、環境、コンクリートの性状やかぶり厚さなどによって異なり、海中に浸漬している構造物は、2～5 mA/㎡程度、大気中に暴露されている構造物の場合は、10～30mA/㎡程度の防食電流密度を必要とする。

(3) 電気防食方法

電気防食の方法には外部電源方式と流電陽極方式の2種類ある。外部電源方式の電極材として、網状電極、線状電極や亜鉛溶射などがあり、電流分布をよくするためのオーバーレイの材料として、導電性モルタルや導電性塗料などが使用されている。流電陽極の陽極材料は亜鉛陽極で、防食電流を均一に供給するためにバックフィル剤を使用する必要がある。

上記の様に電気防食の方法にはいくつかのシステムが提案され、実用試験が行われている。各システムとも一長一短あり、現状では最良のシステムの模索段階にある。

3.3.6 まとめ

電気防食は、わが国において昭和30年代より土木鋼構造物に適用され、多大な成果を上げている。特に海洋鋼構造物は今後大型化され、長大橋、海上空港や人工島など恒久的な構造物が多くなるため、海中部以深の鋼材にはメンテナンスをほとんど必要としないアルミニウム合金陽極等を用いた電気防食の適用が不可欠になるであろう。コンクリート構造物の鉄筋の防食にも、電気防食が有効なことが認められているので、今後この分野での研究開発が進められ実用化されることが望まれる。

3.3.7 今後の課題

(1) 腐食疲労を受ける場合の電気防食条件

海水中の金属の腐食疲労について、電気防食が有効であるといわれているが、電気防食を適用する場合の電流密度などの電気防食条件が必ずしも明確になっていない。

(2) サンドエロージョンに対する電気防食の効果

実験室的には、流速6m/sec程度までに起こるサンドエロージョンに対しては、電気防食が有効な手段であることが認められているが、流速と砂の量との関係や防食電流密度などの電気防食条件が明確でない。

(3) 鉄筋コンクリート中の鉄筋の電気防食

近年研究が盛んになり、今後耐久性、経済性の優れた電気防食システムの開発が望まれる。

4. 維持管理技術に関する報告

4.1 維持管理に対する考え方

海洋構造物の維持管理技術はまだ確立されておらず、点検および補修技術の確立は今後の大きな課題であるが、今後における維持管理技術の研究の方向を探るためにも、その基本理念を明確にしておく必要があり、現在までに得られている知見を踏まえて、あえて、維持管理に対する基本的な考え方を述べる。

海洋構造物の維持管理に対する考え方は、対象となる構造物の設計寿命と主たる構造材料の種類により、やや異なっている。また、一口に海洋構造物といっても、その設置目的および設置環境条件により構造形式や規模は様々で、設計寿命も異なるため、一率に論じられない。

一つの考え方の例として、構造物の要求寿命によって、次のような3つのケースに分けて考えることもできるであろう。

- ①長期にわたり壊れては困る構造物（約50年以上）については、新設時に維持管理の対策を講じ、さらに定期的な維持管理を行い、必要により補修、補強を行う。
- ②中間的な寿命（約20～30年）が要求される場合は、新設時に維持管理のための対策を講じ、さらに維持管理を行う。
- ③短期間（10年以下）で壊れてもよい構造物の場合は、特にメンテナンスを行う必要はない。

また、将来の維持管理技術では、機能終了等により構造物を撤去するケースも出てくるであろう。そのための、構造物を解体・撤去する技術の確立も必要となってくるであろう。しかし、構造物の機能終了の判断は容易ではないであろう。

以下に、比較的長寿命の構造物を対象として、構造材料の種類別に考え方を述べたい。

4.1.1 鋼構造物の維持管理

鋼構造物に対する維持管理の考え方は、適用される防食方法により異なる。しかし現状では、設計寿命に近い耐久性を有し、かつ、経済的であり実用上問題の無い防食方法は開発されていないので、実際上は、構造物の設計寿命と防食寿命を勘案した適切な点検、補修による維持管理が適当と考えられる。

今後採用が予想される防食方法として、飛沫部を含む海上大気部に対しては、防食性や耐久性が著しく強化された厚膜塗装が上げられる。干満部に対しては、さらに防食性能を高めた超厚膜塗装や有機ライニング等が利用されるであろう。海中部や海底土中部に対しては、電気防食とりわけ流電陽極方式による電気防食が広く利用されるであろう。これらの方法は、いずれも維持管理が容易であるという特長を有するため、点検および補修の周期の長期化と、維持管理経費の軽減が可能になり、その効果が期待されている。厚膜塗装、超厚膜塗装および有機ライニング等は、点検結果に基づいて実施される適切な部分補修により維持管理を行う。電気防食は、管理電位との照合結果に基づく陽極の点検および補充等により維持管理を行うことが、それぞれ合理的かつ経済的な方法であると考えられる。

なお、点検等の詳細については、各論を参考にされたい。

4.1.2 コンクリート構造物の維持管理

コンクリート構造物の場合には、コンクリート自体が防食性の優れたライニングであり、コンクリートが蜜実で十分なかぶり厚さを有し、しかも大きなひび割れなどの欠陥が無い場合は、高いpHを保持することにより、鋼の表面は不動態化されている。したがって、たとえ海洋のような厳しい環境に置かれても、鉄筋の腐食を実用上問題のない程度に抑制することが知られている。コンクリートがこのような効果を発揮するためには、セメントや骨材の品質、コンクリートの配合やかぶり厚さおよび配筋等の設計が適切であり、かつ、設計どおりの入念な施工が行われることが不可欠の条件である。このようにして建設されたコンクリート構造物の耐久性については、疑問を抱く人はまずいないと思われる。しかし、設計、施工あるいは材料が適切でないことに起因するコンクリートの早期劣化や、鉄筋の腐食によるコンクリート構造物の劣化や損傷が生じているのが現実である。

また、設置環境によって、砂礫を伴う波浪による予測以上の摩耗と洗掘、地震による損傷などが生じる場合も予想され、適切な点検と、点検結果に基づく補修を考慮しなければならない。

一方、鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化損傷の傾向と、点検および補修のし易さは、以下に述べるように、構造物の部材が接する環境条件により著しく異なるため、維持管理に際してはその環境を十分に考慮する必要がある。

(1) 大気部（飛沫部を含む）

飛沫部を含む大気部は、コンクリート中の鉄筋が腐食し易い部位であるが、点検や補修は比較的行きやすい部位なので、気象条件や海象条件が穏やかな時期を選んで行えば、適切な点検、補修が可能である。

したがって、この部位に対しては、陸上に設置されるコンクリート構造物に準じて、目視によるひび割れ、錆び汁、コンクリートの浮きやはくり等を調査し、必要に応じコンクリート中の塩分量、かぶり厚さ、鉄筋の腐食状況等を調べ、損傷の程度を判定し、補修の必要性を判断するという方法で維持管理を行うことが適当と考えられる。

(2) 海中部

海水中にあるコンクリート部材の鉄筋は、海水の浸透により塩素イオンの影響を受けやすいが、中性化の影響を受けず、酸素の拡散速度も極めて小さいため腐食速度は著しく小さい。したがって、鉄筋の腐食に起因するコンクリートの劣化損傷の傾向も小さい。

しかし、構造物が設置される環境条件によっては、波浪と砂レキによる摩耗や洗掘の影響等を考慮する必要がある。

以上のように、コンクリート構造物の海中部は、鉄筋の腐食傾向は小さいものの、付着生物の影響、水中作業の困難さ等のため、大気部におけるような詳細な点検は不可能であり、補修も極めて困難または不可能な場合が多い。このため、ダイバーの目視によるおおまかな観察程度しか期待できない現状にある。

したがって、海中部については、ほとんど補修を考えない余裕のある設計とすることが望ましく、水中部の点検および補修技術の確立は今後の課題である。

4.1.3 ゴム、高分子構造物の維持管理

ゴム、高分子構造物の維持管理は構造物の設計寿命により異なるが、長寿命の構造物を想定した場合には、材料の耐久性向上のための添加材の配合や、保護被膜の併用、肉厚や断面積の増加、高強度繊維材料との複合化等の種々の努力を行ったとしても、構造物の寿命のますますの長期化を考えれば、材料の耐久性には限界がある。そこで、まず始めに劣化、損傷を生じやすい構造部位について点検を行い、劣化程度を診断して、その対策（補修、補強、交換等）を決定し、その決定に基づいて適切な措置を取るという方法で、維持管理を行うことになると考えられる。

そのためには、点検方法にしても、目視観察や打診テスト等の官能的検査方法だけでなく、大気中でも水中でもより迅速、的確に劣化程度が診断できる非破壊的な診断方法や寿命予測方法の開発が必要であり、補修、補強、交換技術の開発と併せて、今後の課題である。

なお、ゴム、高分子系構造部材の補修、補強および交換が著しく困難な場合や、たとえ技術的に可能でも経済性の面で問題となることも考えられる。しかし、ゴム、高分子系材料は、鋼材や鉄筋コンクリートには無い種々の特性を有することから、欠点を克服して、広く利用されるようになると期待される。

4.2 鋼構造物の診断技術

4.2.1 調査診断

(1) 腐食調査

① 肉厚測定

海洋鋼構造物の腐食調査の目的は、構造物を構成する鋼材の現時点での肉厚（厚み）を知ることと言ってよい。その意味で肉厚測定は重要なものであり、非破壊調査では、主として超音波厚み計が使用されている。

超音波厚み計には、共振式とパルス反射式があるが、共振式は板の表面と裏面が平行であるときの板厚による超音波の共振を利用したものであるため、腐食による凹凸のひどい鋼材の肉厚測定では誤差が大きく実用的でない。したがって現在では、もっぱらパルス反射式の超音波厚み計が使用されている。

現実に鋼構造物の厚さを測定する場合の問題点の一つは、その鋼材の元厚が不明の場合が多いことである。元厚不明の場合は、いわゆるカタログ値（設計値）を元厚として使用すが、鋼材の板厚変動はかなり大きいので注意を要する。例えば、JIS G 3193の規定によれば、厚さ10mmの鋼板で $\pm 0.6 \sim 1.05\text{mm}$ の変動が許容されているが、よく知られているように、海中部の腐食速度は $0.1\text{mm}/\text{年}$ 以下の場合もあり、大きな誤差となる。したがって、鋼構造物の建設時には必ず初期肉厚を測定しておくことが重要である。鋼矢板の元厚不明の場合など、止むを得ず上部コンクリート被覆部のコンクリートをはつり、その部分の鋼材肉厚を元厚とすることもある。

鋼構造物が機能を十分果たしているかどうかを知るためには、なるべく多くの正確な肉厚を測定する必要があるが、そのためには膨大な数の測定が必要である。そこで、肉厚測定の能率を向上させるため種々の工夫がこらされ、自動測定器が検討されているが^{1)~3)}、海洋環境に適用された例は無いようである。

また、海洋環境での肉厚測定の問題の一つは、腐食した鋼材表面に付着しているフジツボなどの生物や固着さびの除去に時間と人手を要することである。現在の超音波厚み計による肉厚測定では、探触子を鋼材に密着して測定しなければならないので、表面の生物や錆の除去および研磨は不可欠の条件である。したがって、非接触で肉厚測定が可能であれば大きいメリットとなる。最近、非接触で肉厚測定可能な方法が提案され一部実用されている。この方法は電磁超音波厚み計と呼ばれ、生物除去程度の素地調整で厚み測定が可能であり、通常の超音波厚み計と比較し、探触子の傾きの影響を受けにくい、鋼材の曲率の影響を受けにくい、鋼材の表面粗さの影響を受けにくいなどの特徴がある。（図-4.2.1~4.2.3参照）

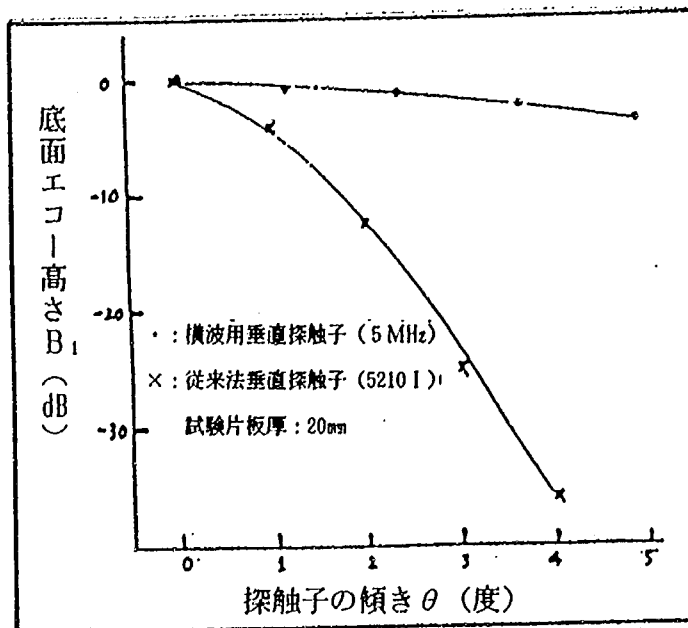


図-4.2.1 感度に及ぼす探触子傾きの影響

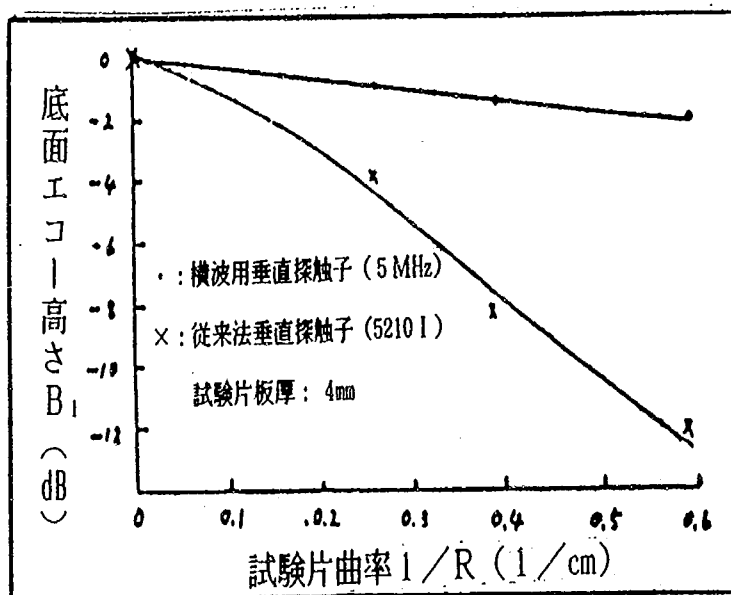


図-4.2.2 感度に及ぼす試験片曲率の影響

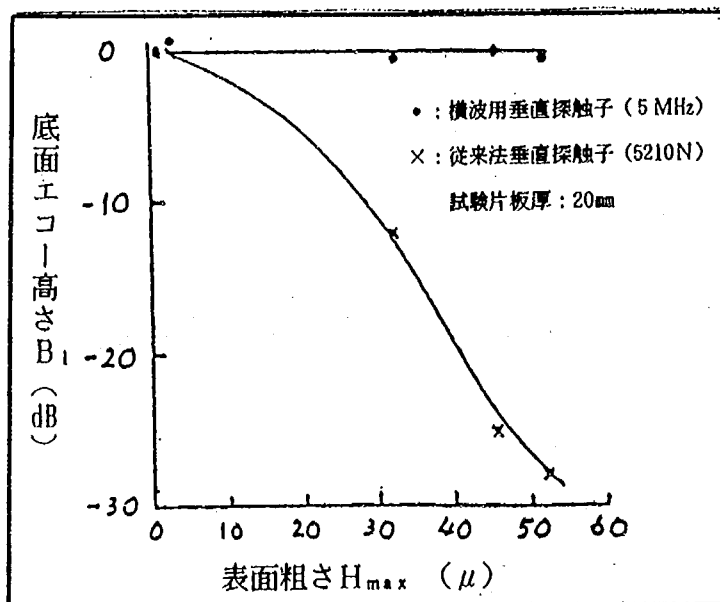


図-4.2.3 感度に及ぼす試験片表面粗さの影響

(2) 局部腐食測定

局部腐食の測定法として実際に行われている方法は、デプスゲージで局部腐食深さを測定し、超音波厚み計から得られた肉厚減少値をそれにプラスして、鋼材の局部腐食深さとするものである。その評価法としては、水中カメラやビデオで撮影して観察する方法や、水中硬化型樹脂や石膏を用いて、型取りし表面形状を観察する方法などがある。

海洋構造物に局部腐食が発生すると、いわゆる孔明きが生ずることになる。一般には孔明きが発生しても断面係数に大きな影響を及ぼさないので問題はない。しかし、応力集中部などに孔明きが発生する場合やパイプラインのような石油などの物質を輸送する系においては一つの孔明きでも致命的問題となる。孔明きの評価法の一つとして、極値統計法による方法がある。佐藤ら⁵⁾は7ヶ所の港湾施設の鋼管杭、鋼矢板計56本について、超音波厚み計で残存肉厚を測定した（建設後8.8年から37年経過したもの）。そして、最大腐食減肉厚を極値として選び極値解析を行ない、鋼材に貫通孔があるかどうかを推定し、良い対応があることを示した。その結果を表-4.2.1及び表-4.2.2に示す。

表-4.2.1 最大腐食厚の推定結果⁵⁾

箇所	元の厚さ (mm)	水深*1 (m)	推定最大 腐食厚 (mm)	貫通孔*2 推定	貫通孔*2 実測
A	15.5	-0.5	17.0	×	×
		-1.0	15.8	×	×
		-1.5	14.2	○	○
B	11.7	0	2.23	○	○
		-1.0	3.08	○	○
C	15.5	-1.0	10.3	○	○
		-1.5	15.0	○	○
D	12.5	-0.5	8.60	×	○
		-1.0	5.85	○	○
		-1.5	5.20	○	○

注) *1: 平均水位であらわしている。

*2: ×は貫通孔あり、○は貫通孔なし。また、実測の場合は“たまたま”発見されたものである。

表-4.2.2 最大腐食厚の推定結果及び貫通孔有無の推定結果⁵⁾

箇所	元の厚さ (mm)	水深*1 (m)	推定最大 腐食厚(mm)	貫通孔 推定*2	貫通孔 実測*2	箇所	元の厚さ (mm)	水深*1 (m)	推定最大 腐食厚(mm)	貫通孔 推定*2	貫通孔 実測*2
E	9.0	+0.75	9.6	×	○	F	9.0	+1.5	3.6	○	○
		+0.5	9.1	×	×			+1.25	4.0	○	○
		+0.4	7.9	○	○			+1.0	9.0	×	○
		+0.25	10.4	×	○			+0.75	9.3	×	○
		0	7.2	○	○			+0.5	9.8	×	×
		-0.25	7.4	○	○			+0.4	8.9	×	×
		-0.5	9.0	×	○			+0.25	9.5	×	○
		-0.75	4.5	○	○			0	10.0	×	×
		-1.0	3.1	○	○			-0.25	9.2	×	×
		-1.25	3.9	○	○			-0.5	8.7	×	×
		-1.5	6.9	○	○			-0.75	7.2	○	○
		-2.0	4.5	○	○			-1.0	4.9	○	○
		-3.0	6.5	○	○			-1.25	5.0	○	○
		-4.0	3.8	○	○			-1.5	7.2	○	○
		-5.0	4.3	○	○			-2.0	6.5	○	○
		-6.0	6.5	○	○			-3.0	7.4	○	○
								-4.0	4.9	○	○

*1 平均水位であらわしている

*2 ×は貫通孔あり、○は貫通孔なし、また実測の場合は“たまたま”発見されたものである

(3) 腐食速度測定

鋼材の腐食速度測定法で最も一般的に使用されているのは前述の超音波厚み計による肉厚測定結果から平均腐食速度を求める方法である。即ち、現在の肉厚と元の肉厚の差を求め、それを経過年数で割ることによって1年間の腐食速度とするものである。

$$\text{年間腐食量 (mm/yr)} = \frac{T_1 - T_2}{t}$$

ここに、 T_1 ; 初期肉厚 (mm) (測定していない場合はカタログ値)

T_2 ; 現在肉厚 (mm) (同一肉厚測定点における測定値の平均値)

t ; 腐食期間 (yr)

この方法の欠点は、何年かの平均腐食速度を求めるものであって、予寿命推定に必要な現時点の腐食速度が得られないことである。その他現実には、鋼材の肉厚が不明なこと（初期肉厚を測定していないのが殆どである）、或は前述のように、鋼材面の粗度、曲率などの影響をうけ易いことなどの欠点を有する。そのため多くの腐食速度測定法が提案されている。それらをまとめたのが表-4.2.3である。同表から明らかなように、それぞれに一長一短があるが現在海洋構造物に最も広く適用されているのは、交流インピーダンス法である。

伊藤らは交流インピーダンス測定法を用いて、建設後8年の鋼管杭の腐食速度を求め、同時に測定した超音波厚み計による腐食速度を比較し、良い対応を示したと報告している。図-4.2.4に測定方法、図-4.2.5にその結果を示す。

交流インピーダンス法による腐食速度測定は海中部に限られるため、超音波厚み計による測定と併用され商業的に港湾鋼構物の腐食調査に実用されている。

表-4. 2. 3 腐食速度測定法一覧表

方 法	測 定 原 理	長 所	短 所	適 用 例
1. 試験片による方法	試験片の試験前後の重量差から腐食速度を算出する。厚み測定でも可。	・ 操作简单、定量的	・ 局部腐食には不適用 ・ 多数の試料が必要 ・ 腐食速度の通算値のみ（平均値） ・ 酸素濃度電池作用の再現が困難（長尺試験片必要） ・ 誤差大きい	・ 化学工業等での環境の腐食性、適正材料の選定、材料開発を目的に実施されており、海洋鋼構造物の腐食モニタリングとしての適用例は殆ど無い。 ・ 海水中での鋼製パイルの陰極防食の研究（H. A. Ilumbe ⁶¹ ） ・ 耐海水性鋼材の海水暴露試験（小牧ら ⁶² ） ・ 溶接構造用耐海水性鋼（大場 ⁶³ ）
2. 電気抵抗法	試験片の電気抵抗の変化を測定し、次式から厚みに換算し、腐食速度を求める。 $R = \rho \frac{L}{S}$ ρ : 比抵抗 R : 抵抗 L : 試験片長さ S : 断面積	・ 全ての環境下での測定が可能 ・ 連続測定可能	・ 間接的で検定が必要 ・ 全面腐食にのみ適用 ・ 析出物付着面積効果による誤差大 ・ 平均腐食速度のみ	・ 広く工業プラントなどで実用化しており市販計器もあるが海洋構造物には不向き ・ 原油常圧蒸留装置への適用（E. Mohsen ¹²¹ ） ・ 天然ガスパイプラインへの適用化（佐藤ら ¹¹¹ ）
3. 分極抵抗法	外部電流を印加することによる分極曲線の傾き（分極抵抗）を測定し、 $R_c = K/I$ より腐食電流 I を求め腐食速度に換算する。	・ 瞬間腐食速度測定 ・ 連続測定可能 ・ 応答が早く短時間測定	・ 活性状態での電気化学的腐食（全面腐食）にのみ適用 ・ 腐食生成被膜、液抵抗による誤差が大	・ 化学工業などで実用化しており、市販計器もあるが、海洋構造物の腐食モニタリング例は無い ・ 排煙脱硫装置への適用例（P. A. Burda ¹²¹ ） ・ 重水プラントへの適用例（M. C. Hay et al. ¹⁴¹ ） ・ パイプライン腐食モニタリングへの適用（笠原 ¹⁵¹ ） ・ 石油タンク底板の腐食評価法としての適用性（朝倉ら ¹⁶¹ ） ・ 冷却水系における軟鋼の腐食モニター法としての適用（高崎ら ¹⁷¹ ） ・ 分極抵抗法の改良について「短時間分極抵抗法」（加藤ら ¹⁸¹ ）
4. クーロスタット法	予め既知量の電荷を有するコンデンサーを水中の試料極に瞬時に与え、電位を数mv変化させた後、分極の減衰曲線を記録し、マイコンで解析し、腐食電流 I_{corr} を求め、腐食速度に換算する。	・ 瞬間腐食速度測定 ・ 連続測定可能 ・ 高抵抗液中での測定が可能 ・ 短時間測定	・ 外部雑音、表面状態による誤動作 ・ 装置が複雑	・ 実用化の検討段階。化学プラント等への適用性はあるが、海洋鋼構造物への適用化は今後の研究を待つ必要がある ・ 高純度流水系における腐食速度の自動測定（長谷川部 ¹⁹¹ ） ・ 高流速水中の銅の腐食速度モニタリング（福井ら ²⁰¹ ）
5. 交流インピーダンス法	種々の周波数の微小電流を試料極に通電し、インピーダンスを求めそれを腐食抵抗と溶液抵抗など他の抵抗分に分離し、腐食抵抗 $R_c = K/I_{corr}$ より I_{corr} を求め腐食速度を得る。	・ 連続測定可能 ・ 高抵抗液中および腐食生成物の被膜があっても測定可 ・ 局部腐食（孔食）の測定も可 ・ 外部電源法による陰極防食の最適防食電位の決定が可能	・ 測定に時間がかかる（短時間化の可能） ・ 経時変化が大きい場合結果があいまい	・ 腐食モニタリングとしての適用化研究が進み技術としてはほぼ確立されている。海洋鋼構造物、鉄筋コンクリート構造物、陸上一般構造物へのモニタリングとしての適用化研究も進んでいる ・ 海洋鋼構造物への適用（伊藤 ²¹¹ ） ・ 鉄筋コンクリート構造物への適用（松岡ら ²²¹ ） ・ 陸上一般構造物への適用（伊藤 ²¹¹ ） ・ 腐食モニター制作と均一腐食への適用（水流ら ²³¹ ） ・ 陰極防食された金属の交流インピーダンス特性と防食電位（水流ら ²⁴¹ ） ・ 交流インピーダンス測定法の選択（水流ら ²⁵¹ ） ・ 交流インピーダンスの自動測定（紀平ら ²⁶¹ ） ・ 海洋構造物、鉄筋コンクリート、耐候性鋼への応用（伊藤ら ²⁷¹ ）

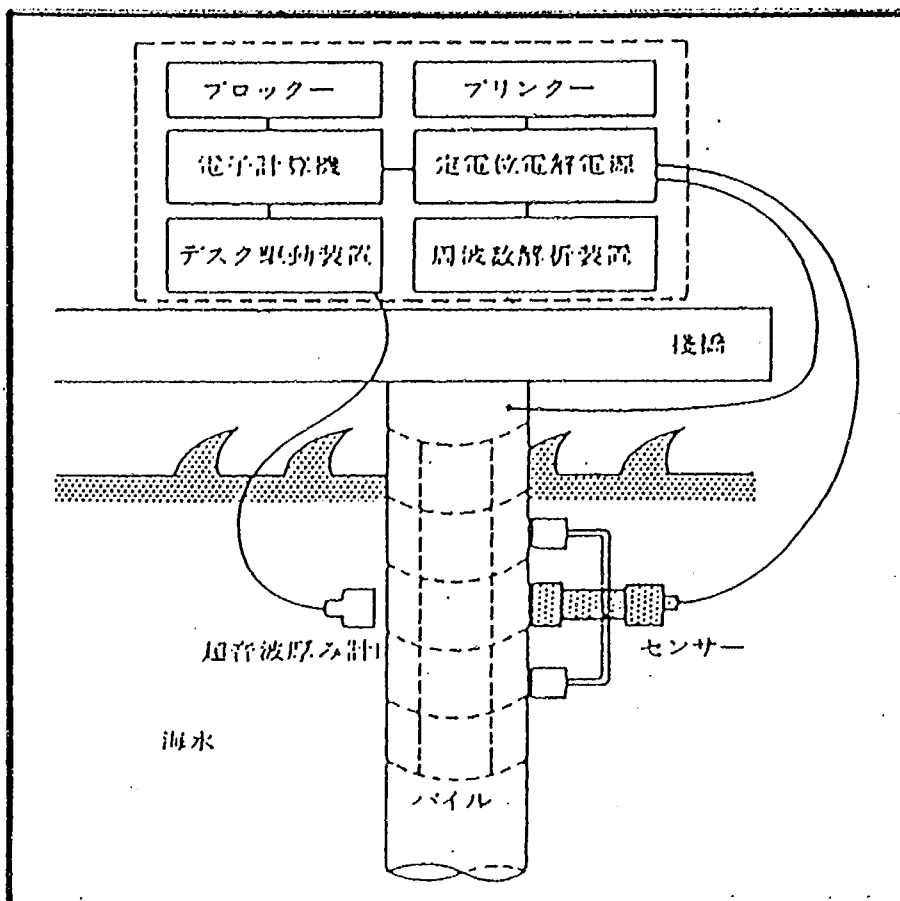


図-4.2.4 測定方法の概要

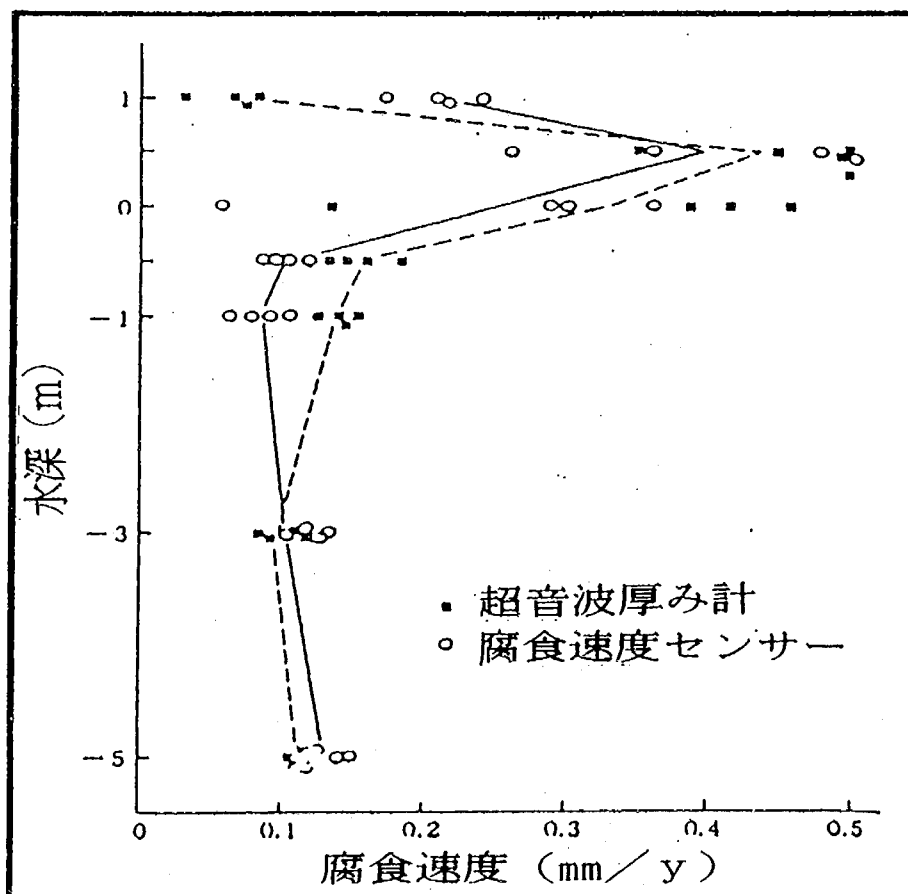


図-4.2.5 測定結果例

4.2.2 鋼材の健全度評価

鋼材の健全度評価には2つの考え方がある。一つは力学的健全度評価であり、他は鋼材の貫通孔の発生に見られるような孔明きからの健全度評価である。力学的健全度の場合鋼材の平均板厚が腐食などによって減少すると、強度的にその機能を果たことができなくなる。孔明きの場合は、通常、強度的には影響しないことが多いが、例えば鋼管では孔明きが発生すると、内面の腐食も進行するようになり、腐食速度が倍増することになる。またパイプラインなどは、内部の石油などの物質が飛散することになり大問題となる。

港湾の施設の技術上の基準（平成元年2月改訂、日本港湾協会）によれば、力学的健全度とは『各部材の発生応力度が許容応力度を満足している』状態を言う。一般に発生応力度の算出は鋼材の平均肉厚を用いて行われるが、それは鋼材に発生する孔明状の孔食については普通は、鋼材の断面係数に影響を及ぼさないからである。しかし、いわゆる孔食などの局部腐食が集中している場合には断面係数に影響をするはずであり、その際には平均肉厚から標準偏差を差引いた肉厚を用いるのが妥当であると考えられる。事実鋼管杭協会で行われた腐食した鋼管杭を用いた力学的特性試験結果によれば平均肉厚から標準偏差を差引いた肉厚を用いて応力度を計算することが腐食のための凹凸のある断面を考慮したことになると報告している。²⁸⁾ 図-4.2.6の P_{max}/P_c は本来肉厚に関係なく一定であるはずであるが、肉厚が減少するほど低下している。これは肉厚の腐食による減少量が影響していることを意味していると思われる。一方図-4.2.7のように平均肉厚から標準偏差を引いた値を肉厚にとれば P_{max}/P_c はほぼ一定となり、肉厚のパラツキは応力集中などに影響を与えるから標準偏差がある程度鋼材表面の凹凸を表していると考えられこの値は妥当な補正と思われる。

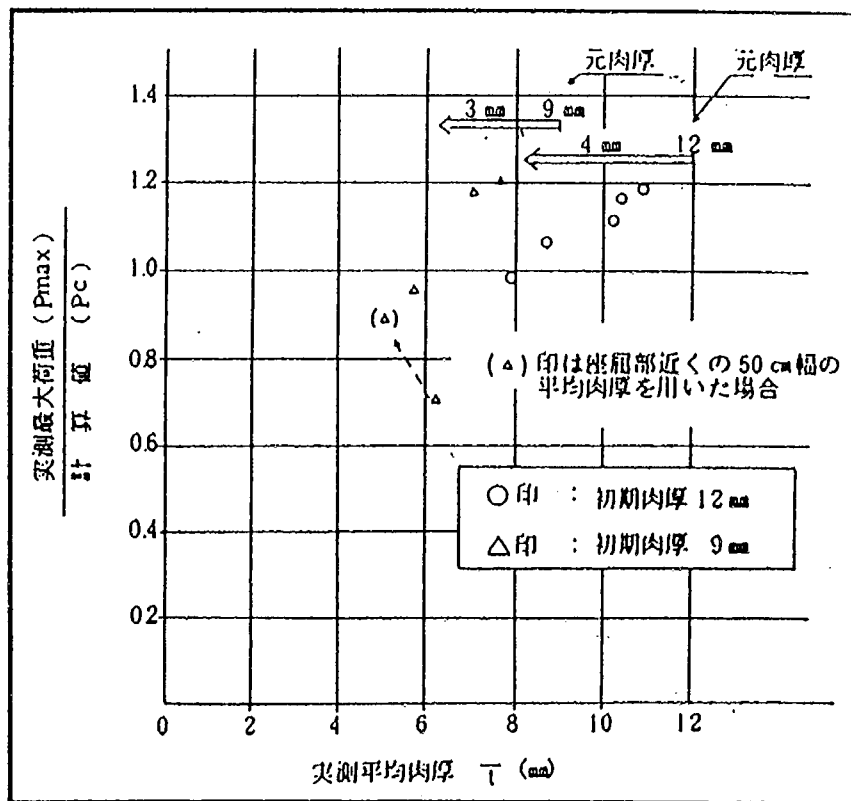


図-4.2.6 平均肉厚と耐荷力 ²⁸⁾

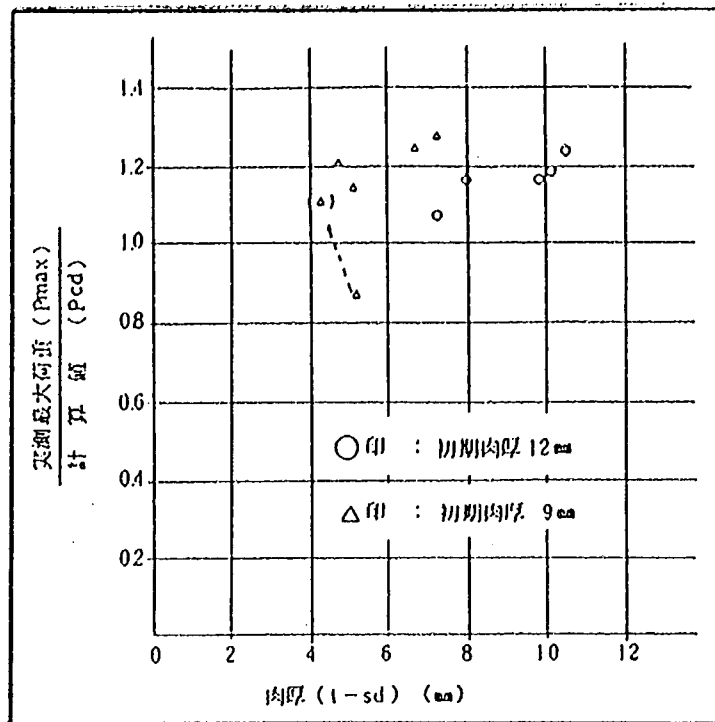


図-4.2.7 標準偏差を考慮した肉厚と耐荷力

4.2.3 参考文献

- 1) 新日鐵, 東京計器: タンク底板の厚さ測定例についての考察, 007-171, 昭54.8.30
- 2) クラウクレマー: 超音波によるタンク底板の肉厚分布カラー表示装置, 004-155, 昭和54.2.28
- 3) 理学電機: 石油タンクの腐食形態について, 004-190, 昭和55.5.27
- 4) 宮川, 河村他
- 5) 佐藤ら: 製鉄研究, 第322号, P.63~73, 1986
- 6) H. A. Humble: Corrosion, Vol.5, P.292~302, 1949
- 7) 善一章: 防食技術, No.22(10/11), P.428, 1973
- 8) 伊藤 叡: 日本材料学会, 腐食防食部門委員会資料, No.127, Vol.24, P.41, 1985
- 9) 小若 正倫ら: 住友金属, Vol.19, No.2, P.53, 1967
- 10) 大場 健二: 製鉄研究, 第284号, P.11413, 1975
- 11) 佐藤 健二ら: 腐食防食討論会予稿集, No.33, 1983
- 12) E. Mohsen: NACE Corrosion/78, paper No.132, 1978
- 13) P. A. Burda: Materials Performance, Vol.14, No.6, P.27, 1975
- 14) M. G. Hay et al: ibid, Vol.16, No.6, P.30, 1977
- 15) 笠原 晃明: 防食管理, No.11, P.7, 1983
- 16) 朝倉 祝治ら: 腐食防食, B-207, 1981
- 17) 高崎 新一ら: 防食技術, No.28, P.193, 1979
- 18) 加藤 正義ら: 防食技術, No.34, P.125, 1985
- 19) 長谷部裕之ら: 腐食防食, B-203, 1981
- 20) 福井 清ら: 腐食防食, B-204, 1981
- 21) 伊藤 叡: 防錆管理, No.7, P.91, 1987
- 22) 松岡 和巳ら: 腐食防食, C-102, 1986
- 23) 水流 徹ら: 防食技術, No.27, P.573, 1978
- 24) 水流 徹ら: 防食技術, No.34, P.36, 1985
- 25) 水流 徹ら: 防食技術, No.35, P.296, 1986
- 26) 紀平 寛ら: 防食技術, No.34, P.464, 1985
- 27) 伊藤 叡ら: 製鉄研究, 第322号, P.74~80, 1986
- 28) 沿岸開発技術研究センター: 港湾鋼構造物補修マニュアル, 付属資料2, 昭和61年3月

4.3 防食材（塗覆装）の劣化診断技術

4.3.1 有機被膜の劣化診断方法

有機被膜は有機高分子から成るものであるから、被膜の劣化は高分子の劣化と言い換えることが出来る。高分子の劣化原因は大きく分けて、2つに分類される。すなわち化学的劣化と、その他の劣化である。化学的劣化は、酸・アルカリなどの化学薬品、油脂類、水（海水）、有機溶剤などいわゆる化学的環境剤による劣化を言う。その他の劣化としては、光（紫外線）、酸素、熱、放射線、電気的要因、機械的要因、微生物による劣化などがある。高分子の劣化は、ある環境の中で時間とともに物質の化学的変化が進み、その性能や品質を低下させる現象と考えられる。しかし、その原因は単一でなく、多くの原因が複合的に作用するのが普通である¹⁾。海洋環境における有機被膜の化学的劣化の因子としては、海水とそれに含まれる酸素や溶存塩類などが上げられる。その他の劣化の因子としては、太陽光線（特に紫外線）、酸素、オゾン、大気中のイオウ化合物や窒素化合物、海洋生物、バクテリアなどがあり、波力などの外部応力や塗膜の内部応力も劣化に影響する。

有機被膜の劣化診断方法は、外観調査と機器調査に分けられる。外観調査としては、さび、ふくれ、われ、白亜化（チョーキング）などが目視観察される。その際、決められた評価基準値と比較して評価されるのが普通である。例えばさび発生面積なら、ASTM D610, SSPC-Vis2, JSSC, 日本塗料検査協会などの基準がある。表-4.3.1にさび発生面積の基準例を示す。

機器を用いる塗膜調査としては、付着力の測定、交流インピーダンス測定などが行われている。表-4.3.2に、主として鋼橋塗膜調査に採用されている調査項目の一覧表²⁾を示す。表から明らかなように、これらの調査法は現場で測定可能なものに限定されている。

表-4.3.1 さび発生面積基準一覧²⁾

さび発生面積 (%)	JSSC	目 録	ASTM / SSPC	E S R		ISO	DIN	BS	BISRA	FSPT (TYPE 1)
				RUSTING	PAINT PROTECTION					
0		10	10	R+0	10	RI 0	RI 0	RI 0		
0.03	3		9							
0.05				R+1	9	RI 1	RI 1	RI 1		
0.1	2		8						○(見本写真)	9
0.2		8							○(見本写真)	
0.3			7							8
0.5				R+2	8	RI 2	RI 2	RI 2	○(見本写真)	
1	1	6	6	R+3	7	RI 3	RI 3	RI 3	○(見本写真)	
2									○(見本写真)	
3			5	R+4	6					
5	0									
8		4		R+5	5	RI 4	RI 4	RI 4		
10			4							7
15		2								
16			3	R+6	4 (15/20)					6
20										
33		0	2							
40				R+7	3 (40/50)	RI 5	RI 5	RI 5 (40/50)		4
50			1							
75~85				R+8	2					
95				R+9	1					
100										

(注) RI=Rustgrad International

1) 日本鋼橋協会「協会の評定基準」(1970)

標準写真とさび発生面積との対応は日本鋼橋協会の鋼橋塗装研究班、さび防食研究班にて外観的に検討して用いている方法である。

3) ASTM-D610-68 (Reapproved 1974)

SSPC-Vis-2-68 (Steel Structures Painting Council)

4) ESR (European Scale of Degree of Rusting for Anticorrosive Paint: 1961)

① Rusting: Degree of Rusting Re 0-Re 9

② Paint Protection: Degree of Paint Protection Efficiency (①-④)

この版以降のESRにはさび発生面積の表示がないので注意すること。

5) ISO 4628/1-1978/DIN 53210 (1978) を参照規格として BS 3900 Part 1 (1980)

6) DIN 53210 Feb 1978

7) BS 3900: Part 1: 1980

8) BISRA (Rust Standards of British Iron and Steel Research Association)

9) FSPT (Federation of Societies for Paint Technology Type 1 (ふくれを伴わないさび))

表-4.3.2 塗膜調査項目一覧²⁾

調 査 機 関	調 査 の 目 的	目 視 調 査	計器による調査						付着汚染物の分析				備 考
		さふはわつ白変汚きそ くが 亜退 の びれれれや化色れず他	イ グ ン ビ ス	光沢測定		付着試験			pH Cl ⁻ SO ₄ NO ₃ 全懸濁 溶解物 固形分				
				水 洗		テープ付着	トルク付着						
				前	後			5 %		2 %			
日本鋼構造協会	研 究 開 発	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○	○	○	○		○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	塗膜劣化に関する基礎資料の収集			
日本国有鉄道 鉄道技術研究所		○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○	○	○	○			○	他にピンホールの試験があり、各種塗 装系の性能比較			
建設省土木研究所		○ ○ ○ ○ ○								各種防食材の性能比較 鋼橋塗装 Vol.8, No 4 (1980) pp.25			
日 本 鋼 管 ㈱ (新両国橋試験塗装)		○ ○ ○ ○ ○	○	○	○		○		○	各種塗装系の性能比較 鋼橋塗装 Vol.5, No 1 (1977) pp.16 Vol.9, No 3 (1981) pp.13			
首都高速道路公団	維 持 管 理	○ ○ ○ ○ ○								維持管理 鋼橋塗装 Vol.7, No 3 (1979) pp.41			
阪神高速道路公団		○ ○ ○ ○ ○				○				維持管理 鋼橋塗装 Vol.9, No 3 (1981) pp.23			
東 京 都		○ ○ ○ ○ ○ ○ ○								塗替え時の診断 〔(社)日本道路協会・ 鋼道路橋塗装便覧使用〕			
鋼道路橋塗装便覧 (建 設 省)	その他	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○		○						ほかに電気抵抗値あり、維持管理の為の 調査項目〔(社)日本道路協会〕			

次に、現場測定可能な機器による塗膜調査法を列挙する。

① 付着性

付着性をテストする方法としては、ゴバン目テープ剥離試験、アドヒージョンテストなどがあり、塗膜性能を示す重要な指標である。G. Menges³⁾によれば、下記のような関係があり、付着力は塗膜寿命に関連することが知られている。

$$L = \ell^2 / 6 D + \phi (P_B, \delta_n, \%)$$

L : 寿命

ℓ : 塗膜厚

D : 腐食性液体の塗膜中の拡散係数

P_B : 塗膜下の腐食によって発生したガスの圧力

$\delta_n, \%$: ふくれようとするガス圧に対し塗膜が耐え得る最高圧力
(付着力に関係する)

② インピーダンス測定²⁾

塗膜のインピーダンスを測定することによって、その劣化程度を推定できることが知られている。測定方法は以下の通りである。5×5 cmまたは10×10 cmのアルミ箔に 3%NaCl含有 CMC 液から成るペーストを塗布し測定部位に貼り付け、周波数別 (0.2, 0.5, 1.0 kHz) に交流抵抗と静電容量を測定する。それらの測定値から $\tan \delta$ を計算する。

$$\tan \delta = \frac{1}{2 \pi \cdot f C R} \quad , \quad f : \text{周波数(Hz)}, \quad C : \text{容量(F)}, \quad R : \text{抵抗}(\Omega)$$

一般に防食性の悪い塗膜は抵抗値が低く、耐水性の悪い塗膜は容量値が大きい。もちろん、膜厚や塗膜の種類によって異なるので注意を要する。また、健全な塗膜の抵抗値は測定周波数に反比例し、容量値は測定周波数を変えても変化しない。逆に、劣化した塗膜は、図-4.3.1の様に抵抗と周波数の関係は水平になり、容量と周波数の関係は水平から傾斜に変化する。実測例を、図-4.3.2に示す⁴⁾。

また、 $\tan \delta$ は塗膜のイオン透過性の目安を与えと言われ⁴⁾、岡本⁵⁾らは浸漬直後の塗膜では周波数1kHzの $\tan \delta$ が 0.2以下であれば耐塩水性が良好であると報告している。しかし、長期の海洋暴露試験後の重防食塗装系の塗膜 (たとえば厚膜型無機ジンクを下塗りとし上塗りをエポキシなど) については、 $\tan \delta$ の値が2以下では塗膜欠陥は認められず、5以上になると塗膜下腐食が認められ、その場合の体積抵抗値は、 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下になると報告されている⁶⁾。

また、交流抵抗値は両対数グラフ上で浸漬時間に対して膜厚に関係なく一定の勾配で低下していくことを用いて、一定の抵抗値までの寿命推定に利用されている。(図-4.3.3)

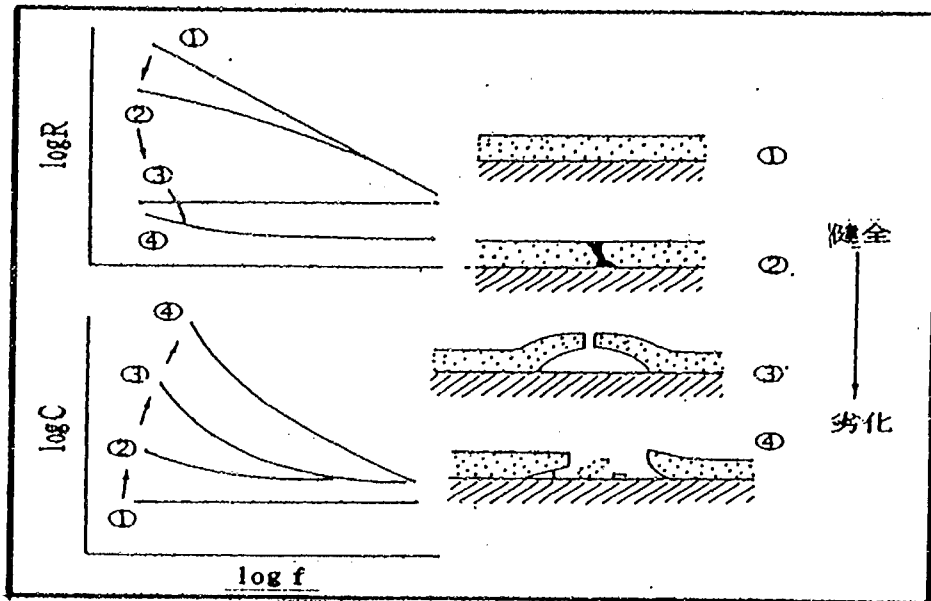


図-4.3.1 塗膜劣化状態とR, C成分の周波数特性²⁾

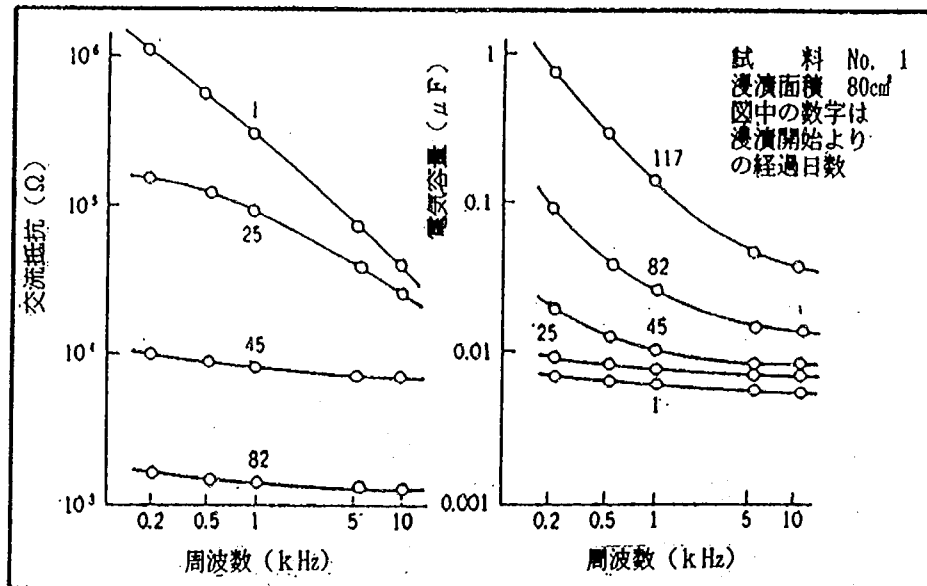


図-4.3.2 食塩水中の塗装鋼片のインピータンスの周波数特性測定結果の一例⁴⁾

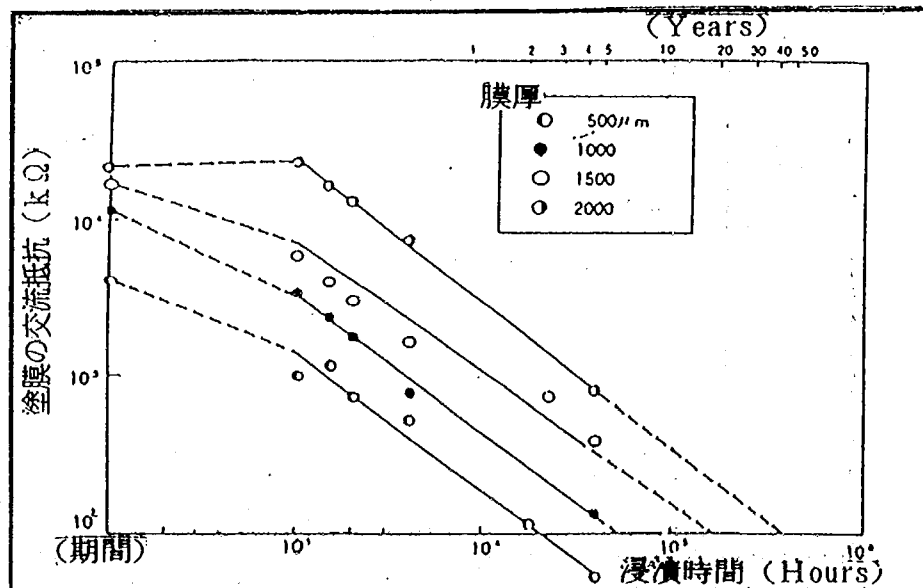


図-4.3.3 エポキシ系ライニング被膜の塩水浸漬による交流抵抗値の変化¹⁰⁾

③ 絶縁抵抗¹⁾

直流抵抗値は、交流抵抗値と同様に、塗膜の防食性能のインデックスになることが知られている¹⁾。300種類の有機系塗膜の浸漬試験（150回あるいはそれ以上）の結果、外観上良好な防食性を示したものの抵抗値は $10^8 \Omega/\text{cm}^2$ 以上であり、腐食の発生したものは $10^6 \Omega/\text{cm}^2$ 以下を示し、 $10^6 \sim 10^8 \Omega/\text{cm}^2$ の抵抗値のものは腐食する場合と腐食しない場合があったことが報告されている⁸⁾。この事実から塗膜抵抗値 $10^6 \Omega/\text{cm}^2$ が防食性能の基準値的な値として取り扱われてきた。また、

Mayne ら⁹⁾は抵抗値は塗膜の位置によって異なること、抵抗の増大する塗膜は腐食しないが、減少する塗膜は腐食すること、抵抗の増加は架橋密度の増加と関係していることを報告し、もし架橋密度を均一に増大できれば腐食性能を向上させうることを示唆している。図-4.3.4に食塩水浸漬試験における直流抵抗の経時変化測定例を示す。この図から明らかなように、防食性の優れたものは長時間高抵抗を維持し、防食性の劣るものは短時間に抵抗値が低下する。

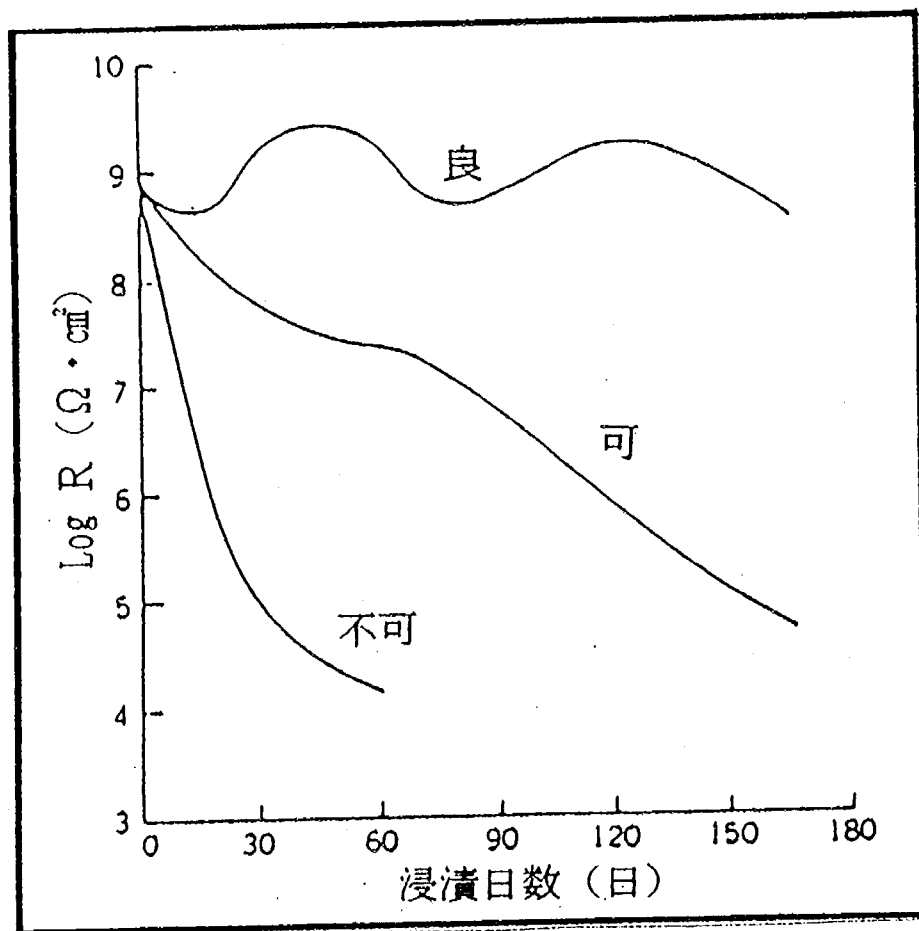


図-4.3.4 抵抗-時間曲線による防食性能の評価⁴⁾

建設省土木研究所と鋼管杭協会が 508φ の鋼管杭を用いて、千葉沖で実施した暴露試験の結果を、図-4.3.5に示す。この試験結果では、高抵抗値を10.5年にわたって維持していたポリエチレンライニングは、ポリエチレン被膜を剝離した鋼管杭表面にも錆の発生が見られなかった、ことが判明している¹¹⁾。

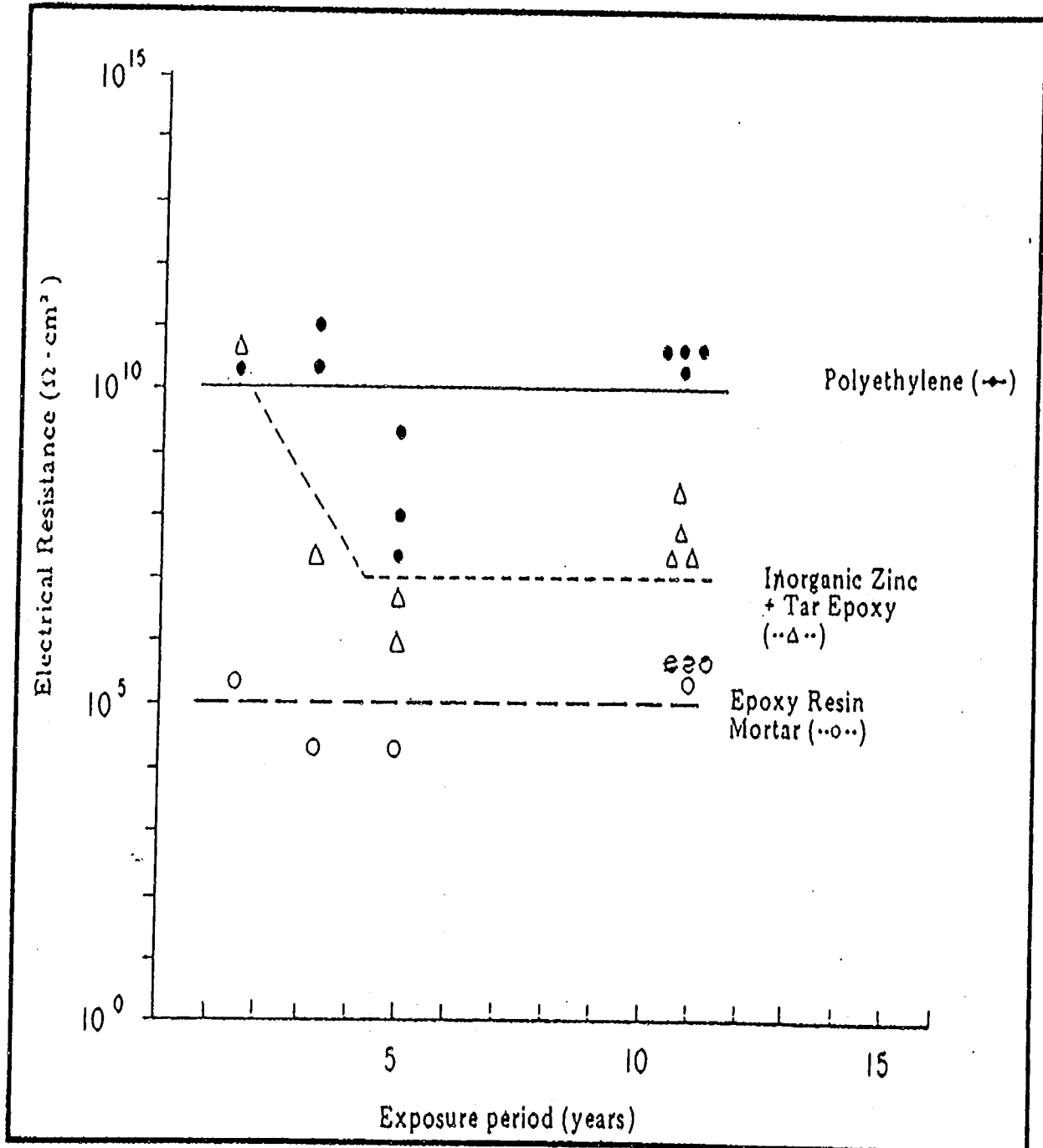


図-4.3.5 Secular changes of electrical resistance (off Chiba)

研究室で行われている塗膜の評価試験例としては、主として、環境剤の透過率測定（透湿度，ガス透過率），浸漬試験（海水浸漬など），耐候性試験，温度勾配試験，冷熱サイクル試験などが行われている。

④ 環境剤の透過率測定

海水浸漬によって塩分 (Cl^-) が塗膜中に浸透することが知られているが、その塩分の浸透深さを測定することによって塗膜の評価が行われている。この透過深さはX線マイクロアナライザーによって測定されており、その例を図-4.3.6に示す。塗料の種類によって塩分の浸透速度が異なることが分かる。

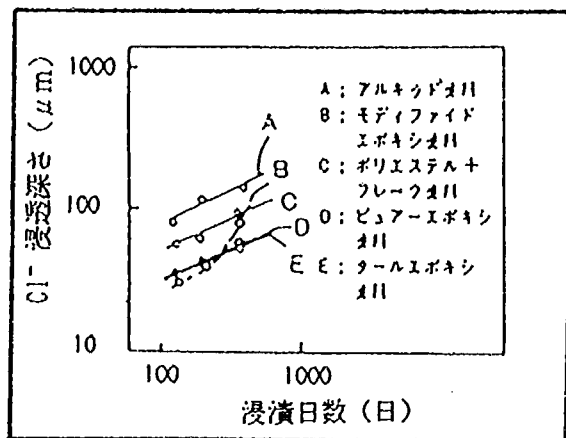


図-4.3.6 各種塗膜の自然海水浸漬での Cl^- 浸透状況¹²⁾

⑤ 耐候性試験

促進耐候性試験に用いられる各種光源の分光分布を図-4.3.8に示す。図から分かるように、塗膜に存在する有機化学結合の多くは紫外線領域で破壊される。それゆえに、耐候性試験は有機塗膜の有効な評価手段となっている。現在、プレ重防食鋼材として市販されているポリウレタンの、促進耐候性試験による塗膜の消失例を図-4.3.9に示す。

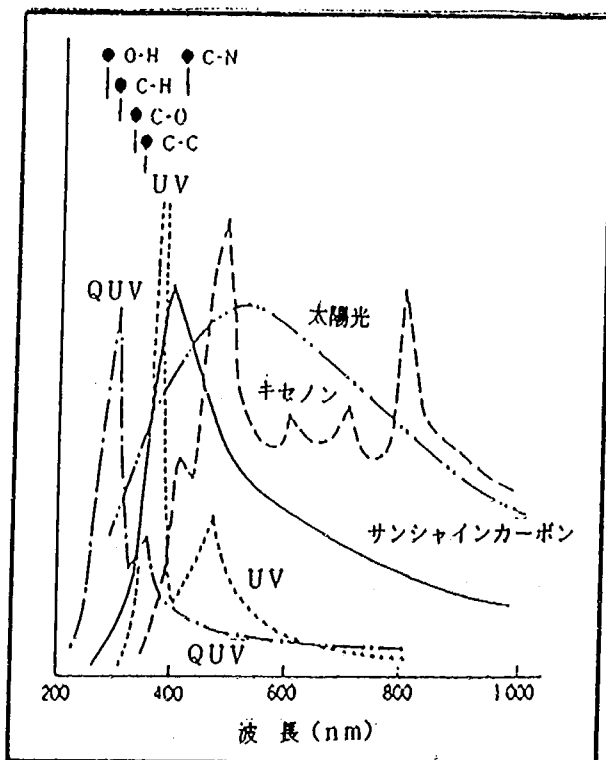


図-4.3.7 各種光源の分光分布¹³⁾

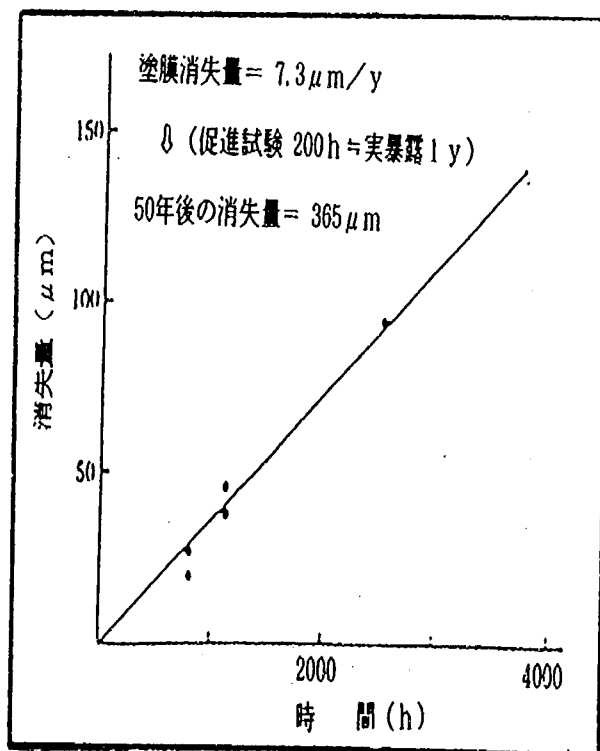


図-4.3.8 ウェザー・オ・メーター暴露による塗膜消失¹⁴⁾

⑥ 温度勾配試験

水溶液中の塗膜の接水側と母材側とに温度の勾配が存在すると、ブリストー（ふくれ）が発生することは古くから知られている。このブリストーの発生は外側の温度が低い時、すなわち船のバラストタンク中の液体の温度が外側の海水の温度より高いときや、内面塗装のパイプライン中の液体の温度が外側の温度より高い時などに発生する。要するに、熱拡散の方向と浸透拡散（物質の移動）の方向が一致する場合にブリストーが発生する。これは水の分子径は $2.7\text{\AA}$ であるが、樹脂類の平均分子間隔が数 $\text{\AA}$ 以上と大きいと、水あるいは水蒸気は容易に樹脂中に浸透するためと考えられる¹⁶⁾。浸透した水は、素地金属のところに集積し蓄積され、塗膜を押し上げて剥離させブリストーを発生させるのである。逆に、塗膜側の水溶液温度が低い場合は、塗膜にブリストーの発生は無く良好な状態に保たれる¹⁶⁾。一般に塗料のブリストー発生傾向は水抽出分の多いほど、また吸水性が大きいほど大きい¹⁷⁾。（表-4.3.3参照）しかし、上記のような温度勾配が存在すると著しく加速されることになる。また、塗膜やライニングに欠陥があれば、拡散浸透より早く水蒸気透過によってブリストーが発生すると報告されている。（図-4.3.9¹⁸⁾参照）

温度勾配試験で発生したふくれと、実海水暴露試験でのふくれ発生を対応させた実験例を、図-4.3.10 に示す¹⁰⁾。

表-4.3.3 各種塗料のブリストー発生傾向¹⁷⁾

塗 料	水抽出物 (mg/g)	浸 漬 時 間 (hr)					
		24	48	100	168	200	300
ア ル キ ド	14.6	△	△~▲	▲	×	×	×
エポキシエステル	1.8	◎	◎~○	△	▲	▲	×
エポキシアミン	0.4	×	×~××	×	×	×	×
エポキシポリアミド	0.3	◎	◎	◎	◎	◎	◎~○
ビ ニ ル	0.3	◎	◎	◎	◎~○	◎~○	○
フ ェ ノ ール	1.6	○	○~△	▲	▲	▲	×
ウ レ タ ン	0.5	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎ no blistering, ○ fine blistering, △ some fine blistering all over,
▲ many fine blistering, × fine to medium size blister all over,
×× large blisters

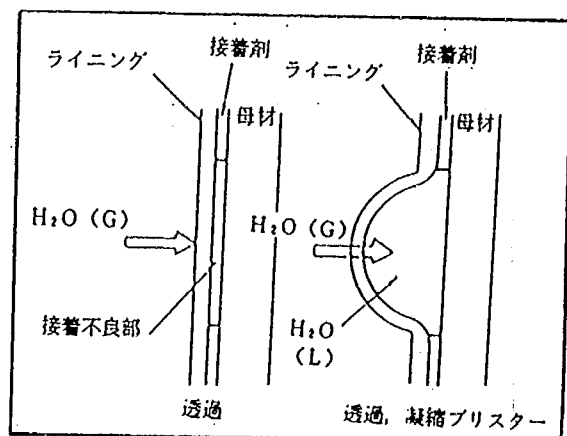


図-4.3.9 水蒸気透過におけるブリストー発生メカニズム¹⁸⁾

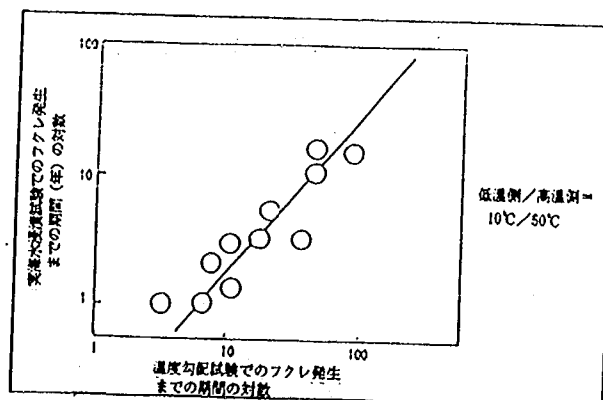


図-4.3.10 エポキシ系防食材料の実海水浸漬試験と温度勾配試験の関係

現在の塗膜評価試験の問題点は定量的評価が行われず、定性的、感能的評価が中心であることである。具体的には、McKnight¹⁰⁾らが指摘しているように、塗膜劣化機構に関する知識や塗膜劣化要因の相対的重要性やその組み合わせに関する知識が不足していることなどが、塗膜の定量的評価を困難にしていると考えられる。

最近、塗膜の劣化機構を解明し、それをもとに防食寿命を推定しようとする試みがなされており、その例を図-4.3.11に示す。ポリエチレン被膜の劣化は、紫外線による表面のチョーキングと熱酸化劣化である。酸化劣化を起こすと、分子中に酸素が侵入し、カルボニル基(=C=O)を生成し、分子の切断架橋反応が起こり、その物性が低下することになる。しかし、ポリエチレン中に添加された酸化防止剤が有効である間は、劣化は起こらない。これを酸素誘導期と呼ぶ。また、酸化反応は発熱反応であり、酸化防止剤が働いている間は、熱変化も生じない。熱分析を行うことによって、酸素誘導期を知ることができるので、高温時の酸素誘導期を測定すれば、それを外挿して、実際の使用環境温度での酸素誘導期(寿命)を推定することが出来る。

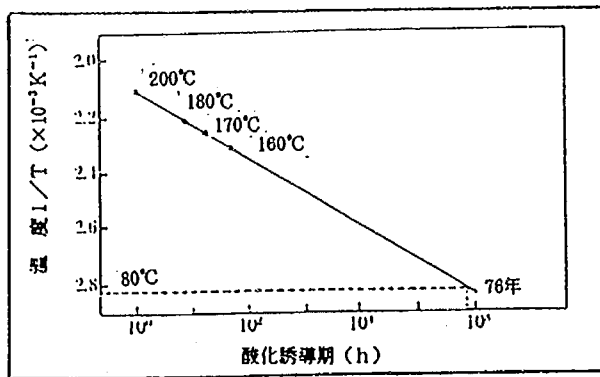


図-4.3.11 ポリエチレンの大気中における寿命推定
(アレニウスプロット法による)¹⁴⁾

(注)
誘導期と温度との間に、次に示すアレニウスの関係式が成立する。

$$\frac{1}{I} = A \exp \left(- \frac{E}{RT} \right)$$

ここで、

I : 酸化誘導期 (h)

T : 絶対温度

E : 活性化エネルギー

R : ガス定数

A : 定数

両辺の対数をとって変形すると、

$$\log I = \left(\frac{E}{R} \right) \frac{1}{T} + B$$

ここで、B : 定数 (B = -log A)

したがって、酸素誘導期と絶対温度の逆数は直線関係にあることから、アレニウスプロットをとって高温域から低温域への外挿により、実使用温度域での酸化誘導期を推定でき、耐久性(寿命)の推定が可能となる。

海水中での酸素誘導期を測定し、同様な手法で海水中の寿命を推定した例を、図-4.3.12に示す。同様に、ポリウレタン塗膜の寿命を推定した例を、図-4.3.13に示す。

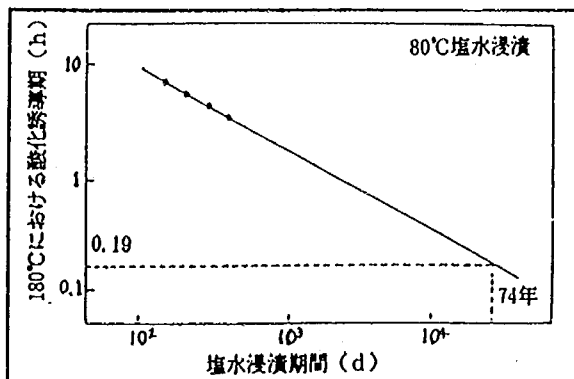


図-4.3.12 海水中のポリエチレンの寿命推定¹⁴⁾

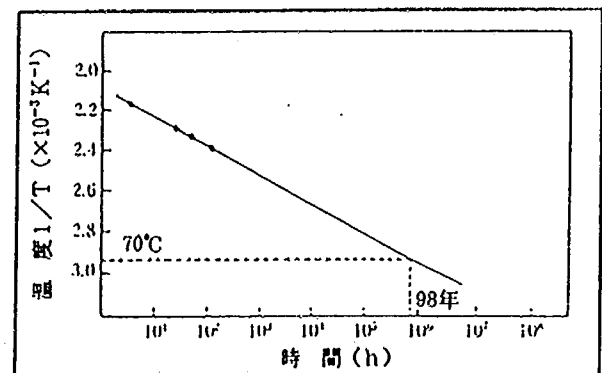


図-4.3.13 熱酸化劣化試験による寿命推定¹⁴⁾

最近の塗膜調査の傾向として、分子レベルで塗膜を研究し、劣化機構の解明や塗膜の寿命推定に役立てようとする動きが見られ、E P M A（電子プローブ微小分析法）^{20~22)}、S E M^{20~22)}、E S C A（X P S：X線電子分光法）^{23~24)}、F T - I R（フーリエ変換赤外分光分析法）²⁵⁾、E S R（電子スピン共鳴法）^{26~27)}などの表面分析研究機器が用いられている。それによって、樹脂そのものの劣化についてはかなり豊富な情報が得られるようになってきたが、塗膜としての劣化や寿命の推定については、今後の研究課題である。

4.3.2 無機被覆の劣化診断方法

① セメントコンクリートの劣化

コンクリートの劣化調査方法を、表-4.3.4に示す。

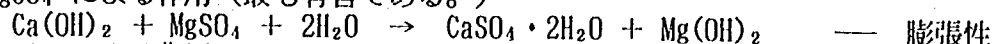
表-4.3.4 コンクリートの劣化調査方法

調査対象	測定項目	方 法 条 件	評 価 方 法
コン ク リ ー ト	0.5割れ	幅	目視, 外観観察
		長さ	器具による測定
		深さ	はつり測定, コアボーリング
			超音波(低周波)探傷器
	浮 き	ハンマーテスト	0.5割れの鋼材までの到達有無
		赤外線による温度分布測定	浮き面積を縦×横(mm)で測定
	剝 離	目視, ハンマーテスト	剝離部面積を縦×横(mm)で測定
	かぶり厚さ	コンベックス	海上大気部, 飛沫部, 海中, 各部でのかぶり厚さをmm単位まで測定
		電磁誘導式厚さ計(ローター)	
鋼 材	塩化物含有量	はつり測定	
	塩化物含有量	コンクリートコア打抜き(化学分析)	かぶり位置における平均塩分量を(Cl ⁻)kg/m ³ で表示
	中性化深さ	コア打抜き後はフェノールクレイン法	平均中性化深さをmm単位まで測定
	錆 汁	目視, 外観観察	鋼材の腐食劣化調査方法に準拠
	腐食面積 孔食, 肉厚	コンクリートコア打抜き後に浮き錆除去	鋼材の腐食劣化調査方法に準拠
鋼 材	自然電位分布	デジタル電位差計	Cu/CuSO ₄ 照合電極による電位測定
	鋼材腐食速度	分極抵抗によるインピーダンス測定	鋼材の腐食劣化調査方法に準拠

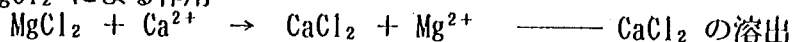
a) 海水の化学作用によるコンクリートの腐食劣化

セメントの水和生成物と海水中の成分との化学反応によるもの（わが国においてはこれによる被害はほとんどみられない）および Cl⁻イオンによる内部鋼材の腐食に分けられる。塩害における劣化機構を、図-4.3.14 に示す。

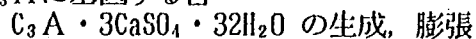
i. MgSO₄ による作用（最も有害である。）



ii. MgCl₂ による作用



iii. C₃A に基因する害



iv. Cl⁻ イオンの浸透

鉄筋の発錆, 膨張

b) 物理的作用による腐食劣化

i. 気象作用に起因するもの

乾湿繰り返し（温度、湿度の高低の繰り返し）

ii. 凍結融解作用

気温が著しく低いと海水の化学作用と凍結融解作用が重複し、海水中における凍結融解作用に対する抵抗性は、淡水中の 1/10 程度に低下する。

iii. 海水、浮遊土砂による摩耗（すりへり）

iv. 大きな波浪による繰り返し荷重、漂流固形物の衝突

c) 設計・施工不良による腐食劣化

i. コンクリート構造物の耐久性にとっては、コンクリート自体の劣化よりも、設計、施工面での不完全さによる害の方が大きい。あってはならないことであるが、鉄筋のかぶり厚さの不足あるいはジャンカ、不十分な打ち継ぎ目、温度制御不良による発熱ひびわれ等による欠陥が発生している。図-4.3.15 に、鉄筋のかぶりおよび塩分量と腐食の関係を示す。表-4.3.5には、電位と鉄筋の腐食発生との確率を示す。

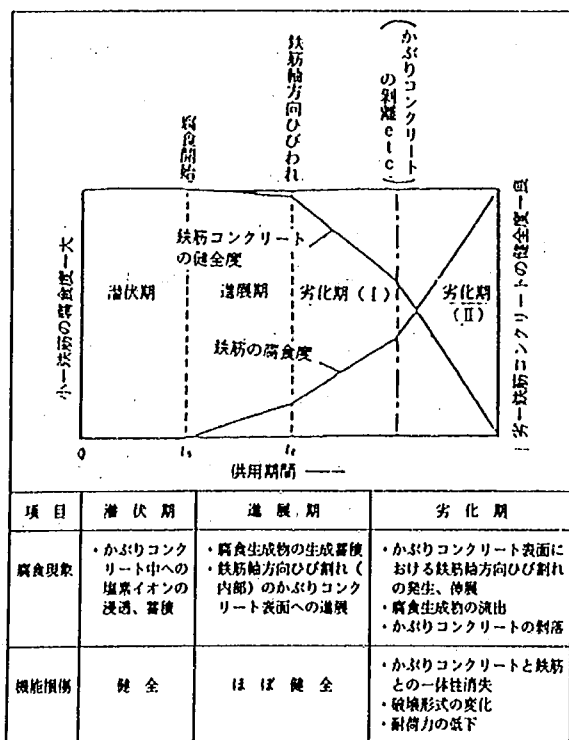


図-4.3.14 塩害における劣化機構⁸⁾

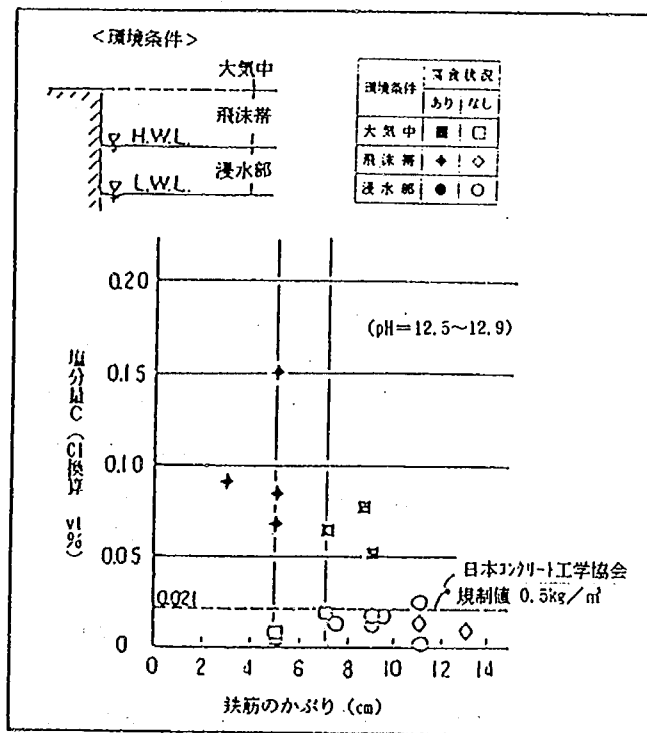


図-4.3.15 鉄筋のかぶりおよび塩分量と腐食の関係¹⁶⁾

表-4.3.5 電位と鉄筋の腐食発生との確率

$-200\text{ mV} < E$	90%以上の確率で腐食が生じていない。
$-350\text{ mV} \leq E \leq -200\text{ mV}$	不 確 定
$E < -350\text{ mV}$	90%以上の確率で腐食が生じている。

4.3.3 金属被覆の劣化診断方法

海水環境は複雑かつ過酷であり、種々の形態の腐食や局部腐食が想定される。海水環境における局部腐食としては、付着海洋生物下の孔食、すきま腐食、構造的要素に起因するすきま腐食、溶接部に発生する選択腐食、異種金属の接触が原因となる局部腐食、高張力鋼の応力腐食ワレ、腐食疲労、および錆層の破壊による局部腐食などがある。

なお、金属被覆材料の海水による劣化の形態は材料系によって異なり、犠牲鉄板、耐海水性鋼巻と、アルミニウム溶射系および、モネル、キュプロニッケル、ステンレス鋼、チタンなどの耐食金属被覆系の3種に区分される。

① 犠牲鉄板、耐海水性鋼巻系

基本的な腐食形態は、母材、溶接部ともに部位で異なるが、前章で述べた一般鋼材と同様である。ただし、飛沫帯や海水中にける耐海水性鋼の腐食速度は小さい。耐海水性鋼と接続される一般鋼材に異種金属接触腐食が生ずる、合金系の溶接棒を使用しない場合に溶接部の選択腐食が生ずる、という特徴がある。

② アルミ溶射

アルミ溶射は前節で述べた様に、大気部への適用が望ましいが、海中部では犠牲防食作用による損失が大きくなる。大気部、海中部ともに劣化形態としては白化、損失（膜厚減少）、ふくれ、浮き、はくり、発錆等であり形態としては、塗膜と同じである。

③ 耐食金属被覆

海洋環境におけるチタンやステンレス鋼などの高耐食性金属材料の耐食性は、海上部（海上大気部と飛沫帯）と海中部（干満帯、海水中部、海底土中部）では異なっている。高耐食性金属の腐食環境として見ると、海上部と海中部の差異は生物の付着と海水の存在である。すなわち、海上部に位置する構造物では海洋生物の付着がほとんど見られず、また海水に浸ることが少ない。他方、海中部に位置する構造物は海洋生物の付着が多く、常に海水に浸されている。このような海洋環境の特徴に照らすと、海上部で問題となる耐食性金属の腐食は応力腐食われと孔食を含む腐食であり、海中部で問題となるのは孔食と隙間腐食である。

a) ステンレス鋼

ステンレス鋼の海水環境における劣化は塩化物による孔食、隙間腐食、応力腐食われである。海水は Cl^- を多量に含み、海洋生物の付着繁殖、スライムの堆積、ゴミの付着など構造以外にも隙間を形成しやすい。このため孔食、隙間腐食を生成しやすい。生物付着の有無によるステンレス鋼の腐食速度を、表-4.3.6に示す。また、鋭敏化材の応力腐食われに関しては温度の影響が大きい、通常の海洋環境では生じ難いと考えられている。

b) ニッケル合金およびチタン

ニッケル合金は海水中では腐食し難く、流動水中で不動態化する。しかし、流速の穏やかな場所において、海洋生物などが付着すると孔食やすきま腐食を生ずることがある。これに比してチタンは、耐海水性が極めて優れ、通常の海水中では孔食やすきま腐食は生じない。

表-4.3.6 生物付着の有無によるステンレス鋼の海水腐食

種類	腐 食 速 度 * ¹ (m p y)	
	Kure Beach, N. C. (生物付着有り)	Duybury, Mass. (生物付着無し)
SUS302	1. 1 * ²	0. 2
SUS304	1. 5 * ²	< 0. 1
SUS309	0. 7	0. 3
SUS316	< 0. 1	< 0. 1
SUS317	< 0. 1	< 0. 1

注) *¹ : 5月から11月までの160日間の暴露

*² : 完全に貫通しているビット

4.3.4 参考文献

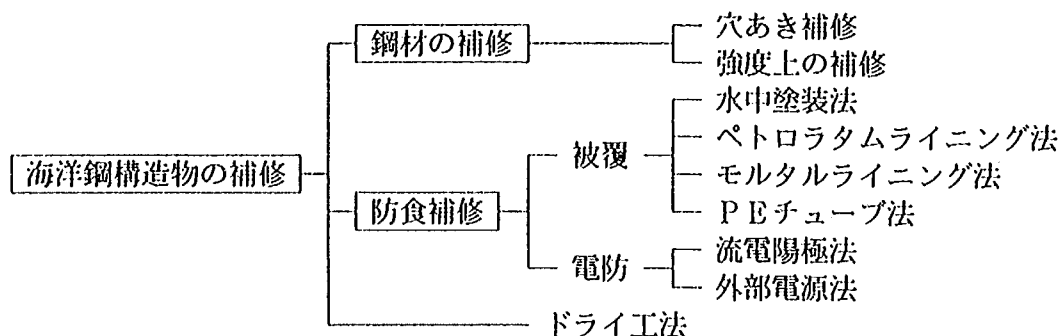
- 1) 日本鋼構造協会編：重防食塗装の実際，山海堂，P.53，1988.2
- 2) 日本鋼構造協会指針「鋼橋塗膜調査」：JSSC, Vol. IV, No. 3, 1982
- 3) G.Menges et al. : Kautshuk und Gumi-Kunststoffe , No. 25, P.213, 1972
- 4) 佐藤 靖：防錆管理, No. 8, P. 20, 1984
- 5) 岡本 剛他：電気化学協会誌, No. 23 , P. 15, 1955
- 6) 井沢, 加門, 吉田：第4回防錆防食技術発表会予稿集, 日本防錆技術協会, P. 79
昭和59年 7月
- 7) Cambell, P. G. et al : Short-Term Evaluation Procedures for Coatings on Structural Steel, N. B. S., September, 1981
- 8) Bacon, R. C. et al : Ind Eng. Chem., No. 40., P. 161 , 1948
- 9) Mayne, J. E. O et al : J. Oil Col. Chem. , No. 40, P. 155, 1975
- 10) 川田, 石原：樹脂ライニング研究会昭和62年年末研究会講演要旨, P. 9 ~14,
昭和62年12月
- 11) K. Katawaki, T. Asama , & K. Doi : The 7th International Congress on Marine Corrosion and Fouling , Valencia, Spain, 1988. 11
- 12) 柴田昭男他：金属表面技術協会「第68回学術講演大会要旨集」, P. 32, 1983
- 13) 田中文夫：塗装技術, No. 9, P. 153 , 1983
- 14) 中村他：製鉄研究, Vol. 321 , P. 19, 1986
- 15) 奥田 聡：プラスチックによる防食技術, 日刊工業新聞社, P. 49, 昭和57年
- 16) 鈴木 一, 高島憲一：金属表面技術, Vol. 32, No. 9, P. 30, 1981
- 17) 田中文夫：塗装と塗料, No. 409, P. 42, 1986. 6
- 18) 長谷川繁夫：配管技術, No. 3, P. 96, 1985
- 19) Mcknight, M. E et al : Jounal of Protective Coatings & Linings, Vol. 2 , No. 7, P. 18, 1985

4.4 鋼構造物の補修技術

海洋鋼構造物の補修は大きく分けて鋼材の補修と防食上の補修に分けられる。鋼材の補修は、局部的に発生した孔あきの補修と構造物全体の補修に分けられ、防食補修は、塗装やライニングなど被覆による補修と電気防食による補修に分けられる。

ドライ工法と呼ばれる補修法は、海水中にドライ空間を形成させ、その中で塗装や溶接などの施工を行う方法である。ここでは電防による補修法は記述を省略する。

表-4.4.1 海洋鋼構造物の補修



4.4.1 鋼材の補修

(1) 孔あきの補修

いわゆる集中腐食などにより、鋼管杭などに部分的に貫通孔が発生した場合に、水中溶接により鋼板などでパッチ当てを行うものである。その後に、何らかの防食対策が施される。

(2) 強度上の補修

鋼構造物を構成する鋼管杭などが腐食により減肉し強度的に機能を果たすのが困難になった場合などに補修が必要となる。通常、水中溶接によって板厚を付与し、強度の回復を図る方法が採用されている。鋼管杭協会の実験によれば、水中溶接法は気中溶接法の80%の強度が期待出来ると報告されている。

もう一つの強度上の補修法は、水中スタットボルトを打ち、モルタルライニングする方法である。これは、杭の軸力を伝達させるために多数のスタットボルトが必要となる。

4.4.2 防食補修

(1) 水中塗装法

水中塗装法の防食原理は、塗膜による環境遮断である。すなわち、塗膜によって水分・塩分等の有害物の浸透を防止するものである。防錆効果を増すために、フレーク状のガラスを添加し、有害成分の浸透速度を遅くするように工夫した塗料も開発されている。

一般に塗料の付着は分子間力（ファン・デル・ワールス力）によるのが主体であるが、その付着力は物質間距離の6乗分の1に比例する。水中硬化型塗料は文字通り水中で塗装するものであるから、被塗物である鋼材表面と塗料の間に水分が含まれるのを避けることは困難である。したがって、その付着力は陸上の塗料に比べて弱いのが普通である。

この付着力の弱さを補うため水中硬化型塗料では、親水性の樹脂を添加し、鋼材表面の水分を取り込んで付着するなどの工夫をこらしている。確かに水中で硬化するが、水中施工ができない塗料が多いのが現状である。

水中硬化型塗料には3～10mmの厚みに手塗りするパテ状のものと、はけ塗り可能な液状のものがあり、3種類の工法が実用化されている。いずれの方法でも素地調整（通常ニア・ホワイトSSPC-SP10）を行った後に、最初の方法は塗料のみを塗布する方法であり、次は塗料の補強剤として金網などを使う方法であり、3番目は型枠を用いて樹脂を注入し、硬化後取り外す工法である。

型枠法の変形の一つであるカバー材を併用する方法は、あらかじめ防食材をカバー材に塗布して、これを鋼材面に圧着被覆するもので、カバー材は腐食性物質の透過を防ぐ機能も有する。また防食材は硬化するまでカバー材によって保護される。カバー材には次のようなものがあるが、可撓性があり構造物の変位に追従できる。

- ① ゴム変成補強させたポリプロピレン、ポリエチレン系の熱可塑性エラストマーを使用したパネル材で鋼材の形状に合わせて工場で成型する。
- ② 磁性粉と特殊合成樹脂からあるシート材で、被覆面の形状と作業性からシートの寸法を定める。

最近、下塗用として亜鉛末やガラスフレークを添加したはけ塗りタイプの塗料が開発され、上塗りとの組合せで使用されている。この塗料が水中塗装された場合の防食性能は、たとえば、塩水噴霧試験後の体積抵抗率は500時間後で飽和しており、 $10^{12} \Omega \text{cm}$ を維持している。

型枠法を別にしてこの工法の特徴は、比較的手軽に施工可能であるため、メキシコ湾や東南アジア（ブルネイなど）の海洋鋼構造物の補修に多用されている。

(2) ペトロラタムライニング

ペトロラタムの防食原理は、その撥水性と添加されているインヒビター（防錆剤）による。ペトロラタムは石油系のワックスであり、水に溶解しない。したがって、ペトロラタムを塗布された鋼材は水を撥き、腐食することはない。しかしながら、ペトロラタムを水中で塗布したり、テープ状のペトロラタムを巻き付ける場合は、水中硬化型塗料の場合と同様に水分が含まれることを避けることは困難である。これらの水分は、腐食を促進することになる。そのため、ペトロラタムの中には、タンニンなどの防錆材を添加し、水分と錆と反応し、一種の防錆塗膜を形成させるような手段を講じている。

ペトロラタム系防食材料は、ペトロラタムを主成分として腐食抑制剤などを添加して不織布に含浸させたテープ状のものやシート状のもの、粘土状に固形化して充填剤として使用するマスティック、および下塗用のペーストなどがある。

ペトロラタムの欠点は、粘着性の物質であるが故に海洋環境では、その波力や木材などの浮遊物により機械的に除去される可能性を有している。そのため通常はペトロラタムを保持するための保護材として、強化プラスチック（FRP）が使用される。プラスチックライニング例を図-4.4.1に示す。

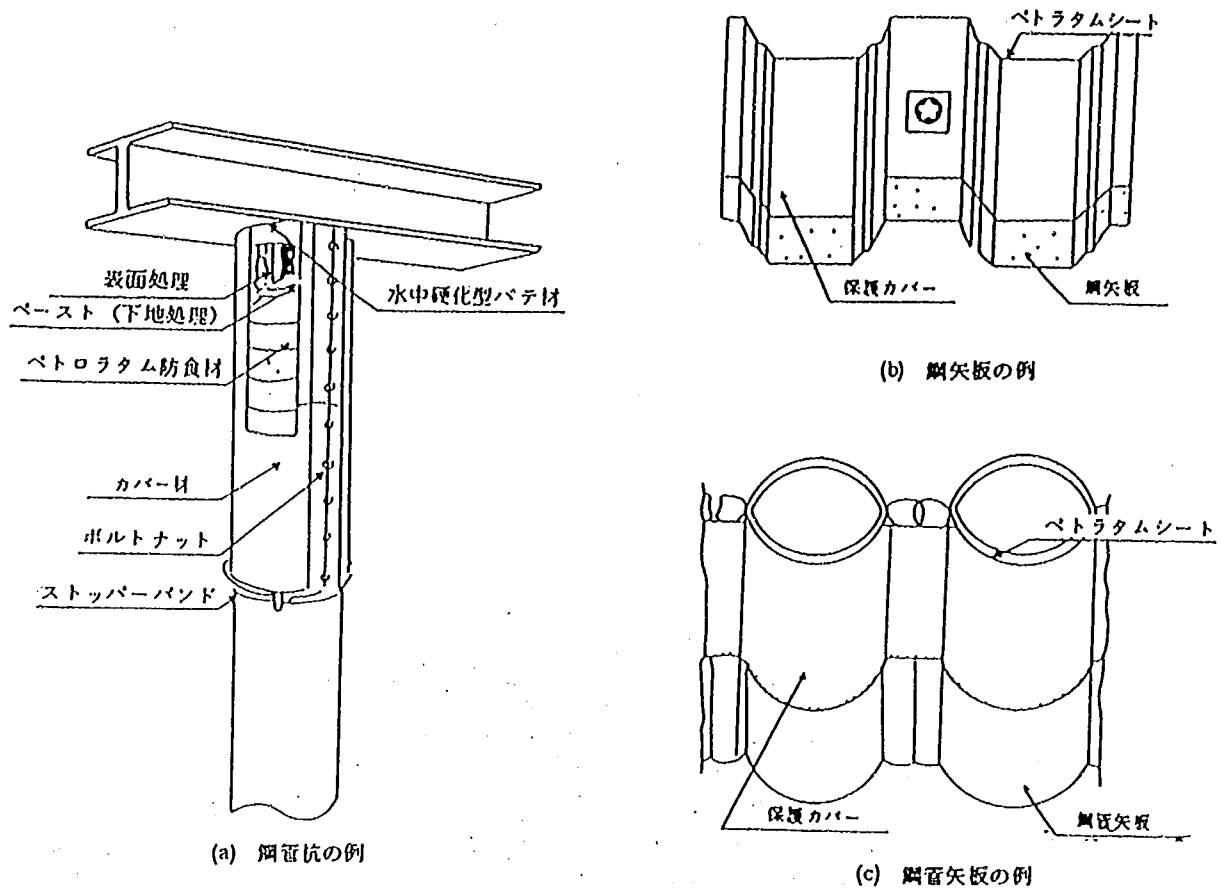


図-4.4.1 ペトロラタムライニング

ペトロラタムライニングには2種類の工法がある。

一つは、マルチステップライニングとも言えるもので、素地調整後、ペーストを塗布し、ペトロラタムテープを巻き、ついで保護材あるいは緩衝層を取り付ける方法である。

もう一つは、素地調整後、防食層、緩衝層（外力のクッションと、防食層を鋼材に密着させることを目的とする）および保護層をあらかじめ工場で一体化した防食体を取付けるいわゆる一体成型法である。この一体成型法（ワンステップライニングといえる）は工程省略によるコストダウンを狙ったものである。

(3) モルタルライニング

3.2.4 項で記述したモルタルライニング法は、基本的に水中施工が可能であるから、既設鋼構造物の補修に適用出来るので、3.2.4 項を参照のこと。

(4) PEチューブ法

PEチューブ法は、シュリンカブルチューブと呼ばれるポリエチレン製のチューブで被覆する方法で、ポリエチレン（PE）被覆されたパイプラインの継手部の防食に利用されているものである。鋼管を溶接接合する前に、いわゆる形状記憶樹脂であるPEチューブを片方の鋼管に通し、溶接の熱影響外にセットし、鋼管を溶接接着後PEチューブを溶接部に移し、加熱処理（通常 150℃以上）することによって、チューブを収縮させ鋼管に密着被覆する方法である。

その防食性能はあらかじめP Eチューブ内面に塗布されている粘着剤とP Eの相乗効果にあり、粘着剤は加熱溶解してP Eとパイプの隙間を埋める機能を有する。

一般の既設構造物にこのP Eシュリンカブルチューブを適用するのは、鋼管にP Eチューブを通すことができないので不可能である。そこで、既設構造物のP Eシュリンカブルチューブは、P Eシートの両側にファスナーをつけてチューブ状にすることによって熱収縮させる方法、あるいはP Eシートを鋼管に巻き付け、シートの両端をホットメルト型接着剤で接合させてチューブ状にした後に熱収縮させる方法などが適用されている。

ファスナータイプ、接着タイプのポリエチレンシートを図-4.4.2に示す。

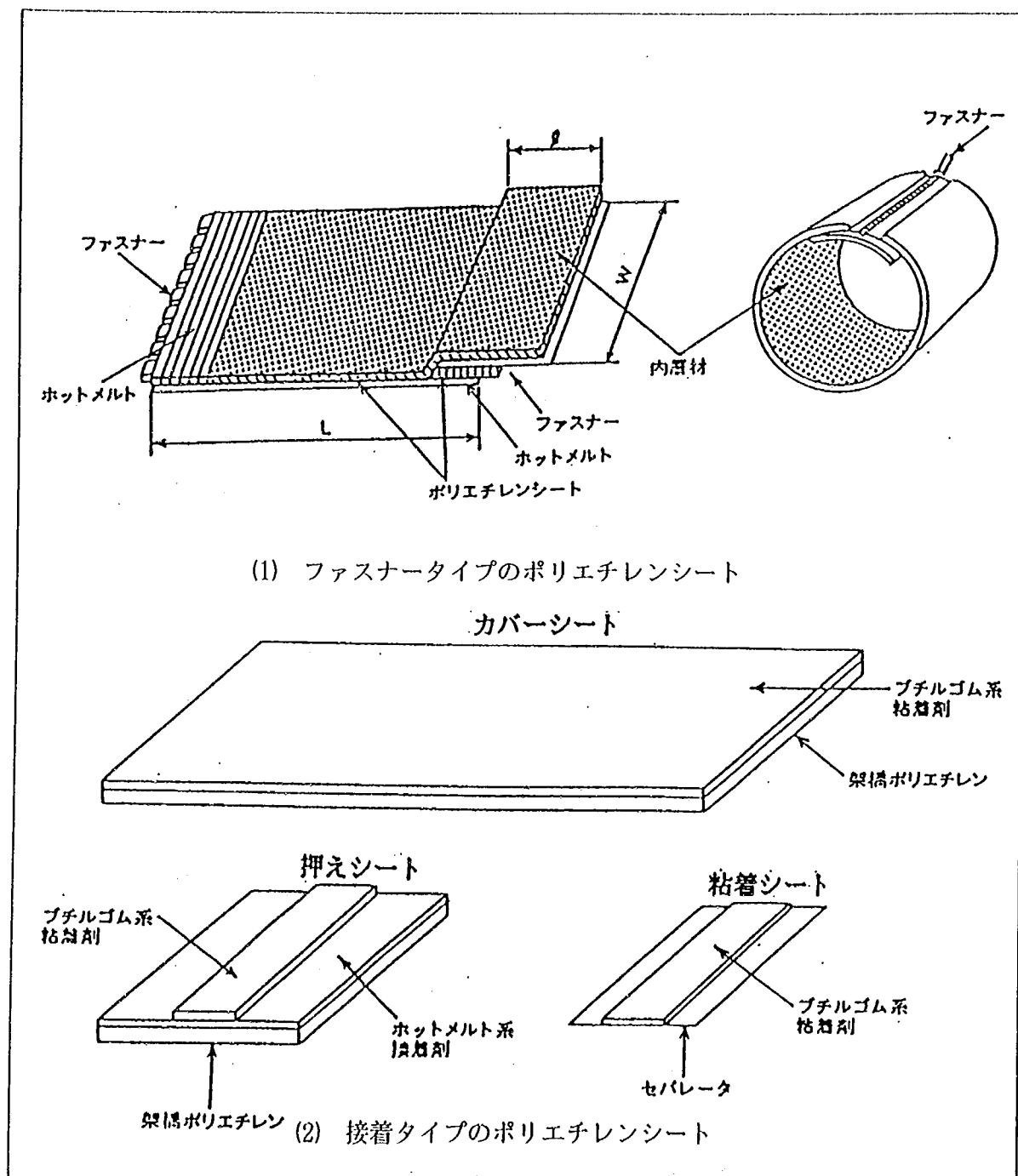


図-4.4.2 ポリエチレンシート

4.4.3 ドライ工法

ドライ工法は、水中部に作業函を設置してドライ空間を形成し、その中で塗覆装作業などを行う工法であり、図-4.4.3に示すように、鋼管杭などの柱状のものの周囲にドライ空間を形成させるもの、あるいは、鋼矢板などの壁面体にドライ空間を形成させるものがある。いずれもドライにしようとする空間を形成し、中の水をポンプなどで排出することによってドライ空間とするもので、取付金具と外からの水圧によって空間が保持される。もう一つの方法は、図-4.4.6の鋼管の場合と上下が逆の外壁を作り、上部から空気を送り込み、水面を下げてドライ空間のを形成するもので、ダイバーが下方からドライ空間に入り、溶接などの作業を行う。

ドライ空間内での塗覆装などの作業は、原則として大気中の作業と同様に実施される。ただ、空間は十分な広さとは言い難く、それなりの安全上の注意が必要である。

たとえば、プラスト作業をする場合は粉塵除去対策、塗装をする場合は有害な溶剤の除去対策を充分に行う必要がある。

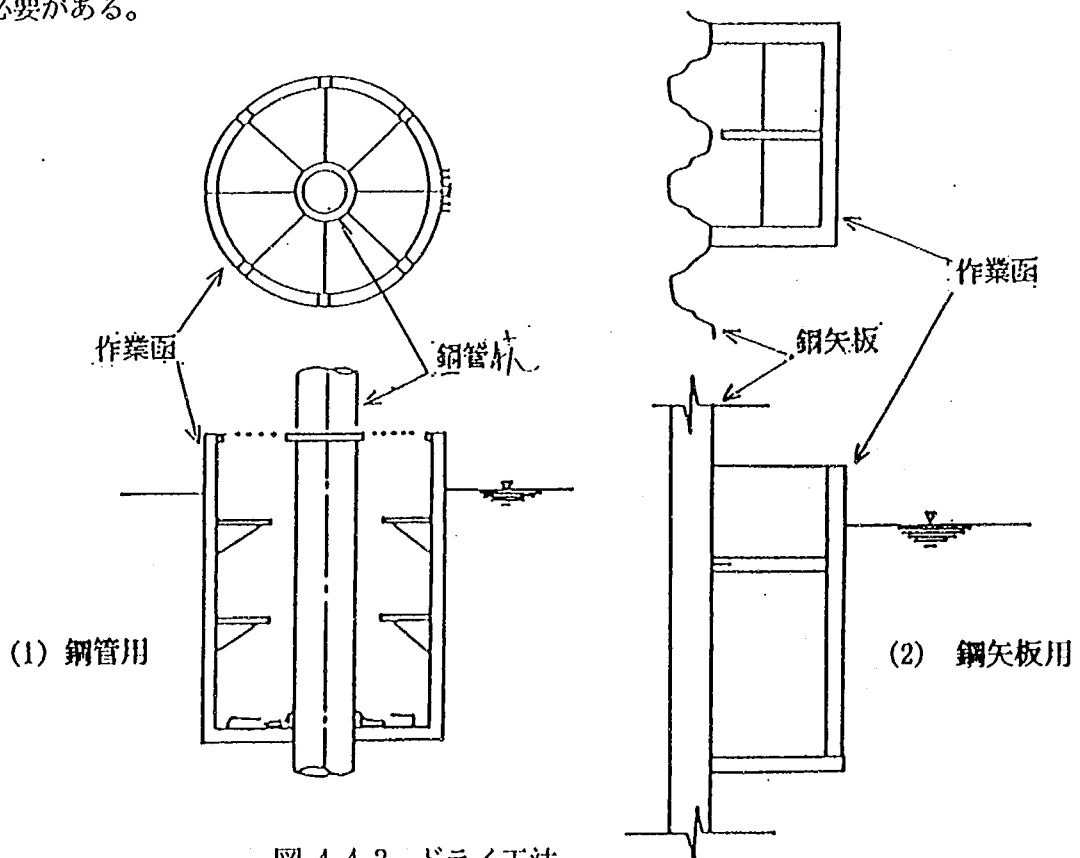


図-4.4.3 ドライ工法

4.4.4 参考文献

- 1) 港湾鋼構造物補修マニュアル：沿岸開発技術センター，昭和61年3月
- 2) 同上，付属資料3，「湿式水中溶接試験」：鋼管杭協会，昭和60年12月
- 3) 建設省土木研究所：海洋鋼構造物の防食指針・同解説（案）
（飛沫帯・干満帯編，昭和62年）
- 4) 清水義明ほか：日本鋼管技報，No.94(1982)83
- 5) 河本紀雄，村上陽，濱淵一文，清水雅人：日東技報，Vol.24，No.2(1986.10)42
- 6) 港湾鋼構造物防食マニュアル：沿岸開発技術センター，昭和61年3月

4.5 コンクリート構造物の維持管理

4.5.1 総論

良好な管理のもとに建設されたコンクリート構造物は、半永久的な耐用年数を持っており、構造物の所要の機能を維持してゆくための検査は原則的に必要としない。すなわち、コンクリート構造物は、メンテナンスフリーの立場から設計されている。ところが、使用材料や施工が悪いために鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートが剝離したり、断面欠損に落ち入り、補修を必要とする構造物が発生している。

維持管理技術には、損傷を生じないような耐久的なコンクリート構造物を作り込む技術と、万一損傷を生じた場合に、この損傷をできるだけ早期に発見し、補修の必要性の有無を判断し、補修を行う技術が含まれる。

海洋コンクリート構造物の維持管理技術を検討する場合、構造物の置かれる環境条件を「海上大気中」「飛沫・干満帯」「海中」に分けて考える必要がある。

海上大気中では、飛来塩分あるいは海水の飛沫を受けて、陸上部とは比較にならないくらい塩分による腐食性は厳しいが、実際には、防食塗装を塗り替えたり、コンクリートを打ち直したりすれば、なんらかの形で克服しやすい。

それに比べ、飛沫・干満帯になると、絶えず飛沫や波浪の影響を受け、藻貝類の付着も多く、大変腐食が進みやすい条件下にある上、波浪、反射波、渦流などにより作業船やダイバーの接近が妨げられ、点検、補修が難しい条件下にある。なおかつ、藻貝類の付着を除去した上でないと、損傷の点検も補修も不可能であり、現実にはほとんど実施されていない。メンテナンスの点からも、相当のコストアップにつながる。したがって、出来るだけメンテナンスに手のかからない半永久的な構造物として設計上対応しているのが現状である。

海中になると、海域にもよるが、やはり点検、補修が大変困難になるということから、同様にメンテナンスフリーの設計となっている。

海洋構造物の置かれる環境と維持管理の考え方は、一般に上記の通りであるが、海洋コンクリート構造物の耐久性および維持管理に関する設計基準を、4.4.2 章に記す。これらの基準は、構造物の供用期間中、補修が必要とならないように、耐久的なコンクリート構造物を作り込むことに重点を置いたものとなっている。

構造物建設後における点検、補修の流れは図-4.5.1に示される。海洋構造物では、点検のためのアクセスが制約され、広い範囲を短期間に点検する必要性から、原則として目視観測にたよっている。そして、点検により劣化が認められた場合にのみ、当該部分を簡単な測定器具を用いて劣化の程度を調査する方法が採用されている。

海洋コンクリート構造物の点検技術、補修技術は、気中用と海中用に大別される。気中における点検技術として、外観検査、非破壊検査があるが、以下、検査項目の一覧、劣化度の判定基準例について述べるとともに、今後、海洋構造物への応用が期待される非破壊検査法について、陸上構造物に適用されているものも含め概要を述べる。また、補修技術について、補修の考え方、代表的な補修方法の概要を述べる。

海中における点検、補修は、外観検査のみとなっているのが現状であるが、検査の方法（ダイバー、有人潜水船、ROV）、外観検査の限界、海中作業における問題点等について述べる。

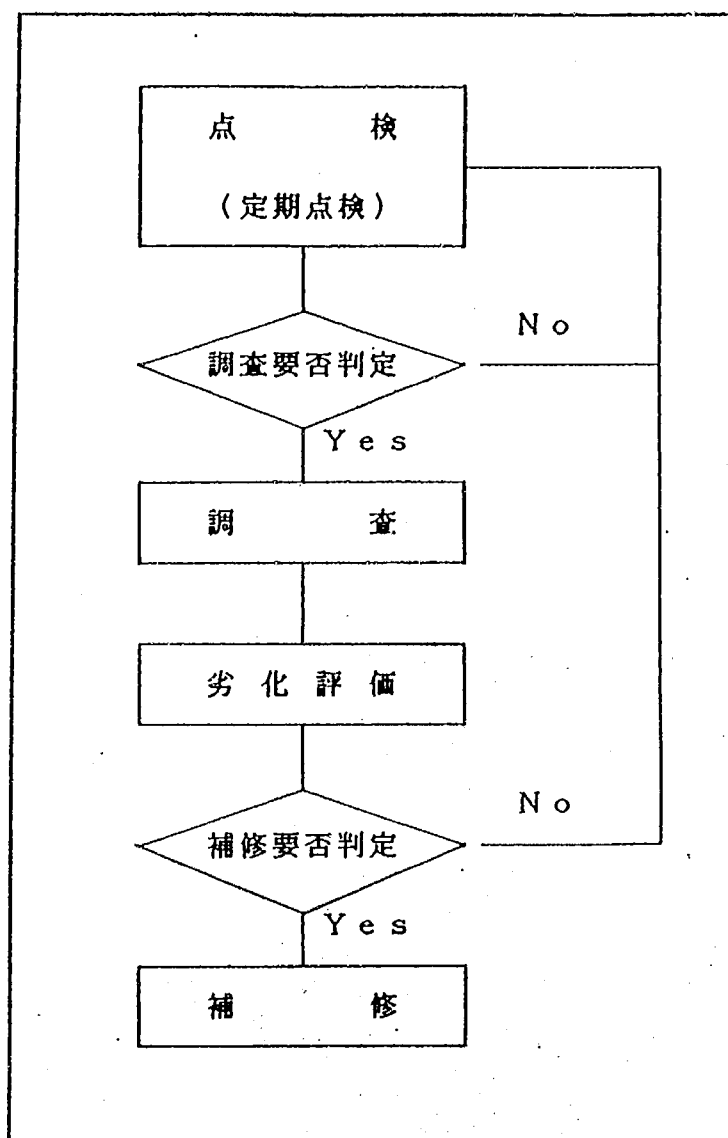


図-4.5.1 点検から補修までの流れ図

(出典：港湾コンクリート構造物の劣化防止、補修マニュアル(案)³⁾)

4.5.2 海洋コンクリート構造物の耐久性、維持管理に関する規格・基準

各国の海洋コンクリート構造物に関する設計基準を、表-4.5.1(その1)から表-4.5.1(その8)に示す。(出典：海洋構造物を取り巻く環境、防錆・防食並びに付着生物の除去技術、1984.9, ECOR日本委員会, P.101~108)

このほか、下記のもの等がある。

- ・海洋コンクリート構造物の防食指針(案), 1983,
日本コンクリート工学協会
- ・港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修マニュアル(案), 1987,
沿岸開発技術研究センター

表-4.5.1 (その1)

○: 該当する項目の記載がある
×: " がない

基 準 項 目		海洋コンクリート 構造物設計施工 指 針 (案)	プレストレスコン クリートバジ規準	プレストレスコン クリート標準示方書	F. I. P (1)	F. I. P (2)	A. C. I	D. N. V (1)	D. N. V (2)	B. V	U.S.S.R Register
作 成 者		財土木学会	財日本海事協会	財土木学会	国際プレストレスコンクリート協会	米コンクリート協会	ノルウェー海事協会	仏海事協会	ソ連船級登録局		
名 称		海洋コンクリート 構造物設計施工指 針 (案)	プレストレスコン クリートバジ規 準	プレストレスコン クリート標準示方 書	Recommendations for the Design & Construc- tion of Concrete Sea Structures	Prestressed Concrete Ships First Report—Considerations for De- sign	Guide for the Design & Construction of Fixed Offshore Concrete Structures	Rules for the Design, Construction & Inspection of Offshore Structures	draft Guidance for the Design, Construction & Classification of Floating Concrete Structures	Rules & Regulations for the Construction & Classification of Offshore Platforms	Rules for the Construction of Sea-Going Reinforced Concrete Ships & Floating Docks
発 行 年		1977	1975	1978	1977	1975	1978	1977	1978	1975	1968
対 象 構 造 物		コンクリート製海洋構造物	プレストレスコンクリートバジ	プレストレスコンクリート構造物	鉄筋及びプレストレスコンクリート製海洋構造物	プレストレスコンクリート船	鉄筋及びプレストレスコンクリート製海洋構造物	鋼製及びコンクリート製海洋構造物	浮遊式コンクリート製構造物	鋼製及びコンクリート製沖合プラットフォーム	鉄筋コンクリート製海洋コンクリート船及び浮ドック
目 的		コンクリート製海洋構造物の設計・施工に当って特に海洋環境の特殊性に重点を置いた指針	PCバジの船体材料, 設計, 施工に関する規準	プレストレスコンクリート構造物の設計および施工についての一般の標準を示す	海洋構造物の設計, 施工に関して実用技術に基づいた勧告集 (北海を対象) [R1.1]	プレストレスコンクリート船の設計に関する考慮事項	固定式海洋構造物の設計, 施工のための指針 [1.1] (北海を対象)	海洋構造物の設計, 施工, 検査に関して具備すべき最小限の規則 (北海を対象) [2.1.1]	浮遊式コンクリート製構造物の設計, 施工, 船級指定に関する指針 [2.1]	海洋構造物の施工, 船級指定に関する規則や規準 (北海を対象) [1.11.11]	船体における材料, 強度等の基本的な必要条件を示した規則 [1.1]
耐 久 性	総 則	耐久性に対する一般的な配慮の必要性	耐久性に対して詳細な配慮の必要性	耐久性に対する一般的な配慮の必要性	・耐久性に対して詳細な配慮の必要性 [R4.1] ・海洋構造物で考慮すべき苛酷な作用を受ける3領域と各々における劣化作用および耐久性を高めるための対策 [R4.3.1]	・コンクリートの水密性の必要性 [P.13] ・波浪作用に対する十分な設計 [P.13]	・耐久性に対して詳細な配慮の必要性 [2.4.1] ・海洋構造物で考慮すべき苛酷な作用を受ける3領域と, 各々における劣化作用 [2.4.2]	・水密性を高めるための対策 [7.2.3.1] ・透水係数 $K \leq 10^{-12}$ m/sec [7.2.3.1] ・凍結融解作用に対する対策 [7.2.3.5]	・耐久性に対してはDNV(1)に準拠 [8.1.1] ・構造物の水密性と安定性を重視 [2.1.3]	・耐久性に対する一般的な配慮 [4.11.11] ・打継目に対する注意 [4.11.22]	耐久性に対しては水密性, 構造強度を重視 [1.2.5]
	1. 自然外力	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○
	2. 品 質	○	○	○	○	×	○	×	×	×	○
	3. 材 料	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○
	4. 配 合	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○
	5. 鋼 材 材 質	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×
	6. 試験検査	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	7. 維持補修	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○

表-4.5.1 (その2)

基準 項目		海洋コンクリート 構造物設計施工 指針(案)	プレストレスコンク リートバジ標準	プレストレスコンク リート標準示方書	F. I. P (1)	F. I. P (2)	A. C. I	D. N. V (1)	D. N. V (2)	B. V	U.S.S.R Register
風 荷 重	設計 風速	$V=U_1 \cdot U_2 \cdot V_{10}$ V_{10} : 海上10mの 所の風速 U_1 : 高度による 補正 U_2 : 鉛直長によ る補正	-	-	構造物の海面上か ら10mの高さでの 風速 [R2.9.1]	-	-	$v=\alpha \cdot V \cdot (\frac{Z}{10})^{\beta}$ V_{10} : 平均水面上1 0mの風速 α, β : 係数 Z : 高さ [A1.1]	-	海上10mの所の風 速 [2.34.41]	-
	風 圧 力 の 算 定	$F=\frac{1}{1.6 \times 10} C_s \cdot V^2 \cdot A$ C_s : 抗力係数 V : 風速(m/s) A : 受圧面積 (m ²)	-	-	$F=0.0625 C_s \cdot V^2 \cdot A$ C_s : 形状係数 V : 風速(m/s) A : 投影面積 (m ²) [R2.9.2]	-	$F=0.0473 C_s \cdot V^2 \cdot A$ C_s : 形状係数 V : 風速 (km/h) A : 投影面積 (m ²) (API 1977年版参 照) [A 8]	$F=\frac{1}{2} \rho C V^2 \sin \alpha \cdot A$ C : 形状係数 α : 風向と部材の なす角 V : 風速(m/s) A : 投影面積 (m ²) ρ : 空気密度 [B1.2]	-	$F=\frac{1}{2} C_s \cdot \rho \cdot S \cdot V^2$ C_s : 抗力係数 ρ : 空気密度 S : 投影面積 (m ²) V : 風速(m/s) [2.34.41]	-
波 浪 荷 重	波 力 の 種 類	・抗力, 慣性力, 揚力 ・衝撃力 ・碎波圧 ・重複波圧	・波浪曲げモーメ ント及び波浪セ ン断力として表 示 $M=0.13 \cdot K_m \cdot L^2 \cdot$ $B \cdot C_b$ $(1+0.04 \frac{L}{B})$ $S=0.9 \cdot K_s \cdot C \cdot$ $L \cdot B$ $K_m, C_b,$ K_s, C : 係数 L : 船長 (m) B : 船幅 (m)	-	・抗力, 慣性力 ・回折波による力 ・衝撃力 [R2.8.3.2]	・波浪曲げモーメ ント及びねじり モーメントとし て表示 [P12]	・抗力, 慣性力 ・回折波による力 [A 2, A 3]	・抗力, 慣性力 ・衝撃力 ・渦による振動 [5.3.3]	・波浪曲げモーメ ント, 波浪ねじ りモーメント及 びセン断力とし て表示 (App. 1)	・抗力, 慣性力 [2.34.31]	・波浪曲げモーメ ント, 波浪セン 断力として表示 ・荷重は波高によ る水頭差として 作用させる [2.2]
	基 本 式	・Morison式 ・波圧は碎波圧, 重複波圧	(1+0.04 $\frac{L}{B}$) $S=0.9 \cdot K_s \cdot C \cdot$ $L \cdot B$ $K_m, C_b,$ K_s, C : 係数 L : 船長 (m) B : 船幅 (m)	-	・Morison式 ・回折波理論 [R2.8.3.2]	-	・Morison式 ・回折波理論 [A 2, A 3]	・Morison式 [5.3.3] ・衝撃力は提示の 式 [5.3.3]	-	・Morison式 [2.34.32]	-
	動 的 解 析	スペクトル法	-	-	波浪シミュレーシ ョンスペクトル法 [R2.8.3.3]	スペクトル法 [P 8]	スペクトル法 [A 6]	-	-	スペクトル法 (App-V)	-
潮 流 力	基 本 式	Morison式の抗力 項	-	-	適当な式 [R2.10.2]	-	・大きな部材から 成っているため 慣性力が支配的 である [A 4]	Morison式の抗力 項 [5.3.4]	-	Morison式 [2.34.31]	-
	カ ル マ 渦	考慮すべき	考慮すべき	-	考慮すべき [R2.10.4]	-	考慮すべき [A 4]	考慮すべき [B3.3]	-	考慮すべき [2.34.13]	-
氷 圧 力		-	-	-	・流水 ・浮氷群や氷原 ・結氷等を考慮 [R2.11]	-	関連文献参照 [A 9]	・流水は実験で求 める ・結氷力を考慮 [5.3.5]	-	流水による影響を 考える必要がある [2.34.51]	-

表-4.5.1 (その3)

(材令28日圧縮強度)

基 準 項 目		海洋コンクリート 構造物設計施工 指 針 (案)	プレストレスコンク リートバージ規準	プレストレスコンク リート標準示方書	F. I. P (1)	F. I. P (2)	A. C. I	D. N. V (1)	D. N. V (2)	B. V	U.S.S.R Register
設 計 基 準 強 度	気 中 領 域	・プレテンション 方式350kg/cm ² 以上 ・ポストテンショ ン方式300kg/cm ² 以上	・プレテンション 方式400kg/cm ² 以上 ・ポストテンショ ン方式350kg/cm ² 以上	・プレテンション 方式350kg/cm ² 以上 ・ポストテンショ ン方式300kg/cm ² 以上	30N*/mm ² 以上 (360kg/cm ²) [R4.3.5]	—	5,000psi以上 (35Mpa) (352kg/cm ²) [2.9.1]	—	—	30N*/mm ² 以上 (306kg/cm ²) [2.62.32]	・圧縮強度 重コンクリート 300kg/cm ² 以上 軽コンクリート 300kg/cm ² 以上 ・引張強度 重コンクリート 22kg/cm ² 以上 軽コンクリート 27kg/cm ² 以上 [1.2.1]
	飛 沫 領 域				40N*/mm ² 以上 (408kg/cm ²) [R4.3.5]						
	水 中 領 域				40N*/mm ² 以上 (408kg/cm ²) ただし洗掘が予想 される場合 45N*/mm ² 以上 (459kg/cm ²) [R4.3.5]						
供 試 体 寸 法		円柱供試体 (φ15cm, H30cm)	円柱供試体 (φ15cm, H30cm)	円柱供試体 (φ15cm, H30cm)	立方体供試体 (15cm角) [R3.3.2.1]		円柱供試体 [2.9.1]	円柱供試体 (φ15cm, H30cm) [7.3.1.1]	円柱供試体 (φ15cm, H30cm) [6.2.1.1]	直径と高さの比が 1:2の円柱供試 体 [2.62.31]	立方体供試体 [1.2.1]

注1) *は特性強度“Characteristic strength”で不良率5%の所の強度である。

注2) 立方体強度=1.25×円柱体強度 (F.I.P)

注3) 我が国の設計基準強度の定義は“一般に材令28日における圧縮強度”である。

(参 考)

各基準の作用領域の定義

基 準 作用領域	海洋コンクリート 構造物設計施工 指 針 (案)	F. I. P (1)	A. C. I	D. N. V (1)	B. V
気中領域 (Atmospheric zone)	潮風を受ける部分及び 波しぶきを受ける部分	飛沫領域より上の部分 [R4.3.1]	飛沫領域より上の部分 [2.4.3]	飛沫領域より上の範囲 [6.3.2]	—
飛沫領域 (Splash zone)	潮の干満作用で受ける 部分及び海水で洗われ る部分	海水によって湿潤と乾燥を繰返して受ける 部分 (大潮のH.W.LおよびL.W.Lにおいて、 再現期間6カ月の波が到達する最高水 位と最低水位の間と考えてよい) [R4.3.1]	常時、湿潤と乾燥を受 ける領域	天文潮位と100年確立で起こる波高との範 囲 (上限はH.A.T*より上に上記波高の65 %を考えた高さ 下限はL.A.T*より下に上記波高の35 %を考えた高さ [6.3.2])	潮の干満領域 (tidal zone) [2.26.21]
水中領域 (Submerged zone)	常時、海中にある部 分	飛沫領域より下の部分 [R4.3.1]	常時、海中にあると 見なされる部分 [2.4.3]	飛沫領域より下の範囲 [6.3.2]	—

注1) *印は
H.A.T (Highest astronomical
tide)=H.W.L
L.A.T (Lowest astronomical
tide)=L.W.L

表-4.5.1 (その4)

基 準 項 目	海洋コンクリート 構造物設計施工 指 針 (案)	プレストレスコン クリートバジ標準	プレストレスコン クリート標準示方書	F. I. P (1)	F. I. P (2)	A. C. I	D. N. V (1)	D. N. V (2)	B. V	U.S.S.R Register
総 則	—	—	品質の確かめられ たものの使用	—	—	証明書又は実施試 験データの添付 〔2.1〕	仕様書又は証明書 の提出 〔7.2.1.1〕	DNV(1)に準拠 〔8.1.1〕 仕様書又は証明書 の提出	定期及び品質チェッ クの義務	当規則集に準拠 〔1.2.5〕
セ メ ン ト	・ポルトランドセ メント(4種類)、 高炉セメント、 シリカセメント、 フライアッシュ セメントはJIS R-5201, R-5 211, R5212, R -5213に適合す るもの	・ポルトランドセ メント(3種類)、 高炉セメント、 フライアッシュ セメント、シリ カセメント	・セメントはJIS R 5210に適合 するもの	・ポルトランドセ メント(4種類) は各国標準に合 致したもの ・異種セメントの 混和禁止 ・C ₃ A含有量: 12 %以下 〔R4.2.1〕	—	・ポルトランドセ メント 〔2.5.1〕 (ASTMC 150, C595参照) ・C ₃ A含有量: 4 ~10%〔2.5.2〕 ・油密の際には、 C ₃ Aの減少を規 定 〔2.5.2〕	・ポルトランドセ メント (AST M-I, II, III, IV, IS, IP) ・異種セメント混 和の禁止	DNV(1)に準拠 〔8.1.1〕 ・ポルトランドセ メント (AST M参照) ・異種セメント混 和の禁止	・自国の基準に合 致するもの 〔4.21.31〕 ・C ₃ Aの含有量8 %以下 〔4.21.31〕	・普通ポルトラン ドセメント耐硫 酸塩ポルトラン ドセメント ・異種セメントの 混和禁止 ・製造工場の検査 証明書が必要 〔1.2.8〕
骨 材	・骨材の具備すべ き条件提示 ・不純物、有害物 を含むものは不 可 ・海砂中の塩化物 は絶対重量の0.1 %以下	・不純物を含むも のは不可	・有害物含有量の 限度を規定 ・海砂に含まれる 塩化物は砂の絶 対重量の0.03% 以下	・セメントと化学 反応を生じるも のは不可 ・海砂は塩分量や 貝類が許容量で あれば可 〔R4.2.2〕	—	・ASTMC33, A STM330に適合 するもの 〔2.7.1〕 ・海砂は淡水で洗 篩 〔2.7.2〕 ・clはセメント重 量の0.1%未満 (RC), 0.06% 未満(PC)	・化学反応を生じ るもの、有害物 を含むものは不 可 〔7.2.2.3〕	DNV(1)に準拠 〔8.1.1〕 ・化学反応を生じ るもの、有害物 を含むものは不 可	・有害物を含むも のは不可 〔4.21.12〕 ・SO ₃ 化合物は0.1 %以下 〔4.21.13〕 ・不純物(粘土) は2%以下 〔4.21.13〕	・不純物(粘土、 微粒分)は1% 以下 〔1.2.1.1〕
水	・有害物を含むも のは不可 ・海水の使用禁止	・有害物を含むも のは不可 ・海水の使用禁止	・有害物を含むも のは不可 ・海水の使用禁止	・海水の使用禁止 (構造物コンク リート) 〔R4.2.3〕	—	・RCの場合〔2.6. 1〕 cl-セメン ト重量の0.07 %未満 so ₁ -セメント 重量の0.09%未 満 ・PC又はグラウ トの場合〔2.6. 1〕 cl-セメン ト重量の0.04 %未満	・汚濁物の含有は 不可〔7.2.2.3〕	DNV(1)に準拠 〔8.1.1〕 ・汚濁物の含有は 不可	・塩分 2 g/ℓ 以 下 〔4.21.21〕 ・海水の使用禁止 〔4.12.12〕	・工業用水や汚水 の使用禁止 〔1.2.1.5〕
混 和 材 料	・良質の減水剤、 AE剤の使用 ・ボゾラン使用は、 責任技術者の判 断	・良質なもので本 協会の承認を受 けたもの	・減水剤、AE剤 は、本学会規格 に合致したもの ・フライアッシュ はJIS A 6201 に適合したもの	・0.1%以上のcl を含む原料や塩 化カルシウムの 使用禁止 〔R4.2.4〕	—	・ACI318-77に 適合するもの 〔2.9〕 ・cl-セメント重 量の0.1%未満 (RC), 0.06 %未満(PC) 〔2.8.6〕	・本協会の承認が 必要 ・塩化カルシウム の使用禁止 〔7.2.2.4〕	DNV(1)に準拠 〔8.1.1〕 ・本協会の承認が 必要 ・塩化カルシウム の使用禁止	—	・当局の承認が必 要 〔1.2.1.6〕
鉄 筋	・JIS G 3112, G 3117に適合する もの	・本協会の承認が 必要	・JIS G 3112, G 3117に適合する もの	・鋼材メーカーの 保証が必要 〔R4.2.5〕	—	・ACI318-77, 3 -5項に適合す るもの 〔2.10.1〕	・公認の各基準を 満足 ・本協会に保証書 提出 〔7.2.5.1〕	DNV(1)に準拠 〔8.1.1〕 ・公認の各基準を 満足 ・本協会に保証書 提出	・鋼材メーカーの 保証が必要 〔4.21.41〕	・当局の基準に合 致の事 〔1.2.1.8〕

表-4.5.1 (その5)

基準 項目	海洋コンクリート 構造物設計施工 指 針 (案)	プレストレスコンク リートバージ基準	プレストレスコンク リート標準示方書	F. I. P (1)	F. I. P (2)	A. C. I	D. N. V (1)	D. N. V (2)	B. V	U.S.S.R Register
P C 鋼 材	・試験による品質 確認 ・取扱い上の注意 事項	・本協会の承認が 必要	・試験による品質 の確認	・鋼材メーカーの 保証が必要 [R4.2.6]	—	・ACI318-77, 3 -5項に適合す るもの [2.10.1]	・品質と緊張方法 について試験結 果の証明書を本 協会に提出 [7.2.5.3]	DNV(1)に準拠 [8.1.1] ・品質と緊張方法 について試験結 果の証明書を本 協会に提出	・鋼材メーカーの 保証が必要 [4.21.41]	—
シ ー ス	・剛性、水密性の 必要性	・原則として鋼製	・剛で継目が水密 なもの ・一般に鋼製シー スを内面に 防錆したもの が良い	・剛で水密な鋼製 シースの使用 ・継手部は水密テ ープ使用 [R4.2.7]	—	・ACI318-77, 18-15項に適合 するもの [2.11.1] ・プラスチックシー ス好ましくない [2.12.2]	—	—	・原則として鋼製 ・剛性、水密性が 必要 [4.11.52]	—
P C グ ラ ウ ト	・プレストレスコ ンクリート標準 示方書参照	・グラウト材の具 備すべき条件 ・水セメント比35 ~45%	・膨脹率10%以下 ・圧縮強度200kg/ cm ² 以上 ・水セメント比45 %以下	・グラウト材の具 備すべき条件 ・全膨脹率10%以 下 ・海水使用禁止 [R4.2.8]	—	・ACI318-77, 18-16項に適合 するもの [2.12.2]	・圧縮強度300kg/ cm ² 以上 ・clはセメント重 量の0.05%以下 ・全膨脹率10%以 下 [7.2.4]	DNV(1)に準拠 [8.1.1] ・圧縮強度300kg/ cm ² 以上 ・clはセメント重 量の0.05%以下 ・全膨脹率10%以 下	・圧縮強度30N/ mm ² (306kg/cm ²) 以上 粘度2,800μ/m [4.11.53]	—

表-4.5.1 (その6)

基 準 項 目		海洋コンクリート 構造物設計施工 指 針 (案)	プレストレスコンク リートバジ基準	プレストレスコンク リート標準示方書	F. I. P (1)	F. I. P (2)	A. C. I	D. N. V (1)	D. N. V (2)	B. V	U.S.S.R Register
単 位 セ メ ン ト	飛 沫 領 域	330kg/m ³ 以上	400kg/m ³ 以上	・単位水量と水セ メント比から決 定 (コンクリート 標準示方書参 照)	400kg/m ³ 以上 〔R4.3.3〕	F.I.P(1)に準拠 400kg/m ³ 以上 〔P2〕	600pound/yard ³ 以上 (356kg/m ³) 〔2.8.2〕	400kg/m ³ 以上 〔7.2.3.2〕	D.N.V(1)に準拠 400kg/m ³ 以上 〔8.1.1〕	350kg/m ³ 以上 〔4.11.23〕	・重コンクリート 400~500kg/m ³ ・軽コンクリート 450~575kg/m ³ 〔1.2.2〕
	その他 領 域	—	400kg/m ³ 以上		—	—	600pound/yard 以上 (356kg/m ³) 〔2.8.2〕	300kg/m ³ 以上 〔7.2.3.1〕	D.N.V(1)に準拠 300kg/m ³ 以上 〔8.1.1〕		
	備 考	水中コンクリート の場合 370kg/m ³ 以上	—	$\sigma_{sk}=400\text{kg/m}^2$ の 時 370~430kg/m ³	・ $G_{max}=40\text{mm}$ の場 合 320kg/m ³ 以上 ・ $G_{max}=20\text{mm}$ の場 合 360kg/m ³ 以上 〔R4.3.3〕	F.I.P(1)に準拠 〔P2〕 ・ $G_{max}=40\text{mm}$ の場 合 320kg/m ³ 以上 ・ $G_{max}=20\text{mm}$ の場 合 360kg/m ³ 以上	—	—	—	—	—
最 大 水セメント比		・気中領域50~65 % ・飛沫領域45~55 % ・水中領域55~65 %	45%	・水で飽和部分 55~65% ・気中領域 60~70%	45% (十分なワーカ ビリティが得 られれば40% 以下が望まし い) 〔R4.3.4〕	F.I.P (1)に準拠 〔P2〕 45% (十分なワーカ ビリティが得 られれば40% 以下が望まし い)	・気中領域 40% ・飛沫領域 40% ・水中領域 45% 〔2.8.1〕	45% (40%以下が望 ましい) 〔7.2.3.1〕	D.N.V(1)に準拠 〔8.1.1〕 45% (40%以下が望 ましい)	45% 〔4.11.21〕	42% 〔1.2.2〕
凍 融 解 の 対 策		AE剤、減水剤の 使用が望ましい	AE剤、減水剤は 有効		・AE剤の使用義 務 ・空気量4~7% ($G_{max}=40\sim10$ mmの場合) 〔R4.3.7〕	F.I.P(1)に準拠 〔P2〕 ・AE剤の使用義 務 ・空気量4~7% ($G_{max}=40\sim10$ mmの場合)	・空気連行の義務 づけ ・空気量の規定は ACI201. 2R- 78参照 〔2.8.4〕	・空気量3~5% ($G_{max}=40\sim20$ mmの場合) ・気泡0.25mm以下 〔7.2.3.5〕	D.N.V(1)に準拠 〔8.1.1〕 ・空気量3~5% ($G_{max}=40\sim20$ mmの場合) ・気泡0.25mm以下	—	当局の承認を得て 対策すべきである 〔3.4〕

表-4.5.1 (その7)

基 準 項 目		海洋コンクリート 構造物設計施工 指 針 (案)	プレストレスコンク リートバージ基準	プレストレスコンク リート標準示方書	F. I. P (1)	F. I. P (2)	A. C. I	D. N. V (1)	D. N. V (2)	B. V	U.S.S.R Register
鉄 筋	気 中 領 域	50以上	船側及び船底外周 部 70以上 上記以外の部分 40以上	気中領域 スラブ はり 柱 以上 以上 以上 20 25 30	(50cm厚以上の部 材) 75以上 〔R4.3.9〕	—	(20in厚以上の部 材) 2in (50mm) 以上 〔2.13.1〕	40以上 〔7.10.3.1〕	・船底、船側およ び水密隔壁 (検査・修理の ためにドライ ドック可能な 船の場合 25以上 (上記個所でド ライドック不 可能な船の場 合) 40以上 ・デッキおよび非 水密性隔壁 25以上 〔7.1.1〕	50以上 〔4.11.31〕	船殻外表面 15以上 船殻内部 10以上 ドックの作業床 20以上 〔2.1.3〕
	飛 沫 領 域	70以上			75以上 〔R4.3.9〕	—	2.5in (65mm) 以上 〔2.13.1〕	50以上 〔7.10.3.1〕		65以上 〔4.11.31〕	
	水 中 領 域	70以上			60以上 〔R4.3.9〕	—	2in (50mm) 以上 〔2.13.1〕	50以上 〔7.10.3.1〕		65以上 〔4.11.31〕	
P C 鋼 材	気 中 領 域	—	船側及び船底外周 部 100以上 上記以外の部分 45以上	・プレテンション 方式 スラブ はり 柱 以上 以上 以上 20 25 30 ・ポストテンショ ン方式シースカ ぶり40以上	(50cm厚以上の部 材) 100以上 〔R4.3.9〕	—	(20in厚以上の部 材) シースかぶり 3in (75mm) 以上 〔2.13.1〕	シースカぶり80以 上 〔7.10.3.1〕	・船底、船側およ び水密隔壁 (検査・修理の ためにドライ ドック可能な 船の場合 シースカぶり50 以上 (上記個所でド ライドック不 可能な船の場 合) シースカぶり80 以上 ・デッキおよび非 水密性隔壁 シースカぶり50 以上 〔7.1.1〕	シースカぶり75以 上 〔4.11.31〕	—
	飛 沫 領 域	責任技術者の判断 による			100以上 〔R4.3.9〕	—	シースカぶり 3.5in (90mm) 以上 〔2.13.1〕	シースカぶり 100以上 〔7.10.3.1〕		シースカぶり75以 上 〔4.11.31〕	
	水 中 領 域	—			75以上 〔R4.3.9〕	—	シースカぶり 3in (75mm) 以上 〔2.13.1〕	シースカぶり 100以上 〔7.10.3.1〕		シースカぶり75以 上 〔4.11.31〕	
備 考		・水中で施工する コンクリート 100以上	—	・鉄筋の直径以上	薄肉断面部材 ・ G_{min} の1.5倍以 上 ・鉄筋最大径の1. 5倍以上 〔R4.3.9〕	—	(20in厚以下の部 材) ・ G_{min} の1.5倍以 上 ・鉄筋最大径の1.5 倍以上 ・スターラップ3/ 4in 以上 〔2.13.1〕	G_{min} の1.5倍以上 〔7.10.3.1〕	・鉄筋最大径以上 ・シー最大径以 上 ・ $G_{min} + 5mm$ 以上 〔7.1.2〕	—	—

表-4.5.1 (その8)

基準 項目		海洋コンクリート 構造物設計施工 指針(案)	プレストレスコン クリートバース基準	プレストレスコン クリート標準示方書	F. I. P (1)	F. I. P (2)	A. C. I	D. N. V (1)	D. N. V (2)	B. V	U.S.S.R Register
試 験		- 材料試験 (JSに基づく) - 圧縮強度試験 (JS A 1108, JS A 1132に準拠)	施工法承認試験 (工事前) - 材料試験 - 圧縮強度試験 施工確認試験 (工事中) - スランブ試験 - 圧縮強度試験 以上の試験方法は、本協会が認めた方法で行なうこと。	- 材料試験 1) 骨材の試験 2) スランブ試験 3) 鋼材の試験 4) PCグラウト試験 - 圧縮強度試験 - コンクリートの非破壊試験 (必要な場合)	- 材料試験 [R4.1] - 圧縮強度試験 [R4.3.5]	- プレストレス載荷中のひずみ測定 [P2] - コンクリートの非破壊試験 [P2]	- 材料試験 (ASTMに基づく) [2.2.1] - 圧縮強度試験 - 圧裂、曲げ引張試験 (追加試験) [2.2.2]	- 材料試験 [7.13] 1) 使用材料 2) コンクリートの性状 3) PCグラウトの品質 4) 補強鋼材、補修材料の品質	DNV(1)に準拠 - 材料試験 1) 使用材料 2) コンクリートの性状 3) PCグラウトの品質 4) 補強鋼材、補修材料の品質 [8.1.1]	- 材料試験 [4.2] - 圧縮強度試験 [2.62.3] - 引張強度試験 [2.62.4]	- 材料試験 - 圧縮強度試験 - 引張強度試験 - 水密性試験 - 水圧試験 [1.2.5]
	定期検査	—	製造中登録検査 1) 材料試験 2) 水圧・水密試験 3) 海上試運転 4) 搭載装置の有効試験	—	・定期的に実施 [R7.2] - 検査箇所 1) 飛沫部や以前の修理・改造箇所 - 検査範囲 [R7.2] 1) 一般的目視 2) 材料劣化、ひびわれ 3) 鉄筋電位測定 ・水中テレビ、ダイビングベル [R7.2]	・検査範囲 1) 一般的目視 [P7]	・5年毎に実施 [7.2] - 検査箇所 [7.2] 1) 感潮部や以前の修理した箇所 - 検査範囲 [7.2] 1) 一般的目視 2) 材料劣化 3) 初期ひびわれ 4) 防食システム 5) 付着生物 6) 漂石	・5年間のうちに実施 [11.2.3] - 検査範囲 [11.2.2] 1) 一般的目視 2) 材料劣化 3) 初期ひびわれ 4) 防食システム 5) 付着生物 6) 漂石 ・水中テレビ、水中カメラ [12.2.2]	・2年毎に実施 [9.2.2.1] - 検査範囲 [9.2.2.1] 1) 材料劣化 2) クラック 3) 鋼材腐食	・毎年実施 [1.43.11] - 検査箇所 [1.43.12] 1) 飛沫領域 2) 検査官が必要と認めた箇所 - 検査範囲 [1.43.12] 1) 一般的目視 ・水中カメラ、水中テレビ [1.43.12]	—
	特別検査	—	・登録継続のための検査	・載荷試験 コンクリートの非破壊試験 (必要と認められた時)	—	—	・事故や損傷劣化の発見時 [11.3.1] - 構造物の安定に影響する変更箇所がある場合 - その他諸条件の変更時 [7.1.2]	・事故や損傷劣化の発見時 [11.3.1] 本協会に検査箇所の通知 [11.3.2]	・4年毎に実施 [9.2.3.1] - 検査範囲 [9.2.3.3] 1) クラック、割れ 2) コンクリートの劣化 3) 鉄筋の腐食 4) 防食システム - 検査箇所 [9.2.3.4] 1) 飛沫領域 2) 施工経目 3) 補修箇所	・4年毎に実施 [1.42.11] - 船級継続時 [1.42.12] - 検査箇所 [1.42.14] 1) 飛沫領域 2) 装置、設備	—

4.5.3 点検技術の現状

適切に設計され、入念に施工されたコンクリート構造物は、海洋の厳しい環境に置かれても実用上問題となることとはない。ところが、最近、外部から侵入する塩分により、コンクリート内部の鋼材が腐食し、コンクリートのひびわれを引き起こすという塩害による劣化が栈橋式係留施設等にみられる。この実状に合わせ「港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修マニュアル（案）」が、1987年に財団法人沿岸開発技術研究センターから発刊されたところである。

コンクリート中の鋼材がいったん腐食し始めると、鉄筋コンクリート構造物の劣化は急速に進行するといわれており、塩害を受けた構造物が所定の機能と耐用年数を満足するためには、劣化の早期発見と、なるべく早く適切な対策を講じる必要がある。対策が遅れた場合、補修に要する費用や労力が大きくなるだけでなく、補修の効果が得られにくくなる。

また、海洋コンクリート構造物は海上に位置している。したがって、その点検、調査は海象条件等による次のような制約条件下で行われており、広い範囲を短期間に点検する必要性から、原則として目視観測にたよっている。点検によって劣化が認められた場合にのみ、当該部分を簡単な測定器具により劣化の程度を調査する方法がとられている。

- ・潮汐 : 地域や季節により潮汐は異なるため、調査時期、時間に制約を受け、調査が出来ない場合もありうる。
- ・波浪 : わずかの波浪によっても調査作業は困難を伴う場合が多い。
- ・構造形式 : 構造物と水面との間の調査空間は、狭く、暗く、かつ潮汐および形状などや波浪の影響下にあるため、足場、照明、安全性などを十分考慮する必要がある。
- ・その他 : 栈橋の場合、船舶接岸時には、ボートなどの栈橋下への出入りを含め、暗闇に近い状態での作業となり、調査は困難を伴うことが多い。

(1) 検査項目^{1), 3)}

コンクリート構造物の損傷劣化を早期に発見、評価するためには、以下に示す変状項目を調査する必要がある。

① コンクリートのひびわれ

ひびわれ数のほかに、代表的なひびわれについて幅と長さを測定する。

② 錆汁

滲出箇所数のほか著しい錆汁についての色調、おおよその面積についても調べ、内部の鉄筋腐食の推定資料とする。

③ コンクリートの剝離、剝落

箇所数やおおよその広さを調べるほかに、出来れば鉄筋のかぶり厚さも測定する。

④ コンクリートの浮き

コンクリートの浮きは目視では発見しにくいことが多い。濃い錆汁の滲出している箇所や、剝離、剝落のある箇所の周辺をテストハンマーで打診すると、発見できることが多い。コンクリートの浮きは、このような箇所に存在することが比較的多いからである。

⑤ 鉄筋の露出、腐食、破断

鉄筋がすでに露出していたり、さらには腐食したり、破断したりしている場合は、その箇所数や長さを調べるほかに、テストハンマーで鉄筋の錆を叩き落とし、腐食の進行程度も調べる必要がある。

なお、補修時期の決定や補修工法の選定を行う際に、上記の調査資料以外の資料が必要となることがある。通常、必要に応じて行われる調査項目には、下記のもの等があり、これらの項目を適宜組合せて調査するのが一般的である。

- ① コンクリート中の含有塩分量
- ② コンクリートの中性化深さ
- ③ コンクリートの物性
- ④ 鉄筋のかぶり厚さ
- ⑤ 鉄筋の腐食状況
- ⑥ コンクリートのひびわれ深さ

(2) 損傷度（劣化度）判定基準^{1), 3), 4)}

補修の要否の判定は、少しでも劣化が認められた時点で行うという考え（極端な場合には、塩化物がわずかでも侵入した時点）から明らかな断面耐力の減少の時点で行うという考え（かぶりコンクリートが剝落し、多少鉄筋断面が減少しても補修しない）まで在り、構造物の重要度の相違等により、ケースバイケースで判断が異なるのが実状である。たとえば、石油開発用コンクリートプラットフォームでは、構造物の破損が、重大な海洋汚染や人命の損失に直接つながってしまう。一方、沿岸に設置された海釣り施設や港湾構造等では、台風等暴風時には避難することが可能であり、直接人命の損失につながることを避けることができる。このように、同じ海洋構造物でも、損傷劣化に対する許容の程度は異なってくる。しかしながら、一般の既設構造物では、明らかに、鉄筋の腐食が認められる時点とかぶりコンクリートの剝落が認められる時点の間が、補修する・しないの分岐点となるようである。「塩害を受けた土木構造物の補修指針（案）¹⁾」および「港湾コンクリート構造物の補修マニュアル（案）」³⁾に示される損傷度（劣化度）判定基準を参考として、表-4.5.2、表-4.5.3に例示する。

表-4.5.2 塩害を受けた土木構造物の補修指針（案）における損傷度の判定

3 章 補修および劣化防止の必要性の判定

3.1 判定の基本

補修および劣化防止の必要性は、点検結果に基づき損傷度、環境条件、供用年数等を考慮して判定するものとする。

3.2 損傷度の判定

- (1) 構造物の損傷度は、点検により得られた結果に基づき判定するものとする。
- (2) 損傷度の区分は、表-3.2.1を標準とする。

表-3.2.1 損傷度の区分

損 傷 状 況	損 傷 度
鋼材の露出や破断、またはコンクリートの断面欠損が認められる場合	I
ひびわれ、錆汁、はくり、あるいははく落が連続的に認められる場合	II
ひびわれ、錆汁、あるいははくりが部分的に認められる場合	III
ごく軽微なひびわれや、錆汁が認められる場合	IV
損傷が認められない場合	無

- (1) 構造物の損傷度を的確に判断するためには、外観調査に加えて、はつり調査、塩分量調査、自然電位差分布調査、超音波伝播速度調査等を行うことが望ましい。しかし、これらの調査の実施にあたっては、特別な器具や装置を用いたり、あるいは足場等を設けなければならないことが多い。このため、ここでは目視による点検の結果に基づいて、構造物の損傷度を判定することとした。

- (2) 損傷度を損傷状況に応じてI、II、III、IV、無の5段階に区分した。

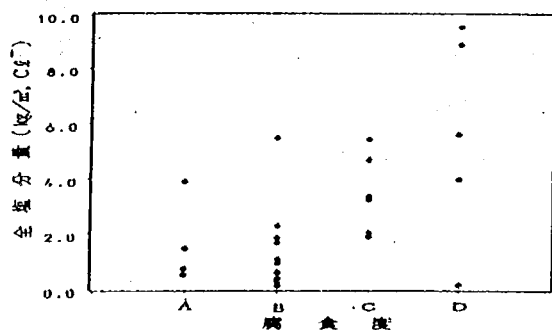
損傷度Iは損傷が著しく外面に現れているもので、交通の安全確保または第三者に対し支障となっているか、もしくはそのおそれのある場合で、緊急に補修が必要な損傷状況である。このような場合には、補修対策に加えて新たな鉄筋の追加やアウトケーブルの使用等による補強対策についての検討が一般に必要となる。

損傷度IIは損傷度Iほど損傷が著しくないが、錆汁やコンクリートのひびわれ、はくり、はく落がかなり認められる場合で、補修が必要な損傷状況である。

損傷度IIIは一般に補修の要否を判断しにくい場合であり、ひびわれ幅が小さく、錆汁およびコンクリートのはくりが部分的な場合である。

損傷度IVは、コンクリート表面にスケーサ等の点錆が部分的に認められ、引き続き調査が必要となるような損傷状況である。ただし、竣工後早期に点錆等が認められる場合は、補修の要否について検討する必要がある。

なお、損傷度IIIにおける補修の要否については、塩分量調査およびたたき調査を実施するとともに、構造物の経過年数およびコンクリートの施工状況等を考えあわせて検討するのがよい。その場合、鋼材位置での含有塩分量が 2.5 kg/m^3 (Cl^- 重量、全塩分量)程度以上であれば、補修を行うのが望ましい(図-解3.2.1参照)。また、可能な場合には自然電位差分布調査も行い、その要否の判定の精度を高めておくのがよい(「コンクリートの耐久性向上技術の開発」報告書、第1編、第2章、1.2.2「鉄筋腐食度の非破壊診断技術の開発・自然電位測定によるコンクリート中の鋼材の腐食診断方法(案)」参照)。



腐食度	判 定 基 準
A	腐食無し
B	ごく表層的な腐食
C	浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食
D	断面欠損が著しい腐食

対象構造物：2 構造物	
構造物A	……地域区分Bの地域において海岸線上に位置する昭和43年竣工のRC橋
構造物B	……地域区分Bの地域において海岸線から約40 mの地点に位置する昭和10年竣工のRC橋

注：地域区分B：「コンクリートの耐久性向上技術の開発」報告書、第1編、第4章、1.2.「沿岸土木構造物の設計・施工指針(案)」参照

図-解3.2.1 実構造物での塩分量と鋼材腐食度との関係

表-4.5.3(その1) 港湾コンクリート構造物の補修マニュアル(案)における劣化度判定

劣化度の判定は下記項目を基本とし、スラブ、はり、ハンチの1区画単位を標準として行う。
(1) 鉄筋の腐食度
(2) かぶりコンクリートの劣化
① ひびわれ
② 剥離・剥落

〔解説〕

劣化度の判定は、本来劣化に関連する種々の項目について行うことが望ましいが、本章では、劣化対象を塩害に限定していること、さん橋における調査の作業性などから、劣化形態として特徴づけられる表記項目を基本として設定する。

(1)

鉄筋の腐食は塩害による損傷の第一歩であり、その程度と広がりにはRC部材の耐力に直接的にかかわってくる事象である。腐食度の判定は、さん橋の場合浸潤条件下にあるのが一般的であるため錆汁の有無を基本とするが、かぶりコンクリートの剥落箇所では腐食状況も判定資料として加味する。

(2)

鉄筋腐食とひびわれの関係は、極論すれば、鉄筋腐食によってひびわれが発生する形態と、コンクリート自体あるいは構造・外力要因によるひびわれによって腐食因子(塩分、酸雨、水)の浸透を促進する形態の両者があり、いずれの場合においてもひびわれの存在は劣化度の判定において重要な項目である。当項目の判定は、ひびわれパターン・幅・長さなどについて行う。

また、かぶりコンクリートの変状として剥離現象はRC部材の機能性の基本にかかわる重大な事象と認識される。これの進行形態は「浮き→剥離→剥落」のパターンが想定されるため、たたき調査で判定する。

表2.1は、鉄筋の腐食、ひびわれ、かぶりコンクリートの剥離・剥落の3項目による劣化度判定の標準を示したものであり、判定は各項目における劣化状態の最も厳しい段階をもって行うものとする。ここで、劣化度Ⅴのひびわれに関する基準については、ひびわれが劣化度Ⅳ以上に進行すると実際には剥離・剥落の現象となることが予想されるため、あえて表現していない。

なお、さん橋の劣化度は、資料の実態調査結果に示されるようにスラブ、はり、ハンチの部材の種類によって劣化形態が微妙に異なり、かつ構造上の重要度も同一ではない。したがって、実用上はこれらの点を考慮した劣化度判定が必要であり、その基準の目安として表2.2を一例として示す。

表 2.1 劣化度判定の標準

劣化度 項 目	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆がみられる	一部に錆汁がみられる	錆汁多し	浮き錆多し	浮き錆著しい
ひびわれ	なし	一部にひびわれがみられる	ひびわれやや多し	ひびわれ多し ひびわれ幅数 mm以上のひびわれ含む	ひびわれ幅数 mm以上のひびわれ多数	——
かぶりコンクリートの剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きがみられる	一部に剥離・剥落がみられる	剥離・剥落多し	剥離・剥落が著しい
点検による調査の要否判定	調査の要なし (点検継続)		要 調 査			

表-4.5.3(その2) 港湾コンクリート構造物の補修マニュアル(案)における劣化度判定(つぎ)

劣化度 部材 項目		0	I	II	III	IV	V
ス ラ ブ	鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に 点錆がみられる。	一部に錆がみられる。	錆目多し。 鉄筋腐食が広範囲に認 められる。	錆目多し。 鉄筋周囲の大部分ある いは全周にわたる腐食 が広範囲に認められる。	錆目著しい。 鉄筋周囲の大部分ある いは全周にわたる腐食 が全周にわたっている。
	ひびわれ	なし	一部にひびわれ、ある いは浮状または陥伏の 亀裂状出物が2、3 箇所みられる。	ひびわれ、あるいは浮 状または陥伏の亀裂状 出物が箇所みられる。	ひびわれ多し。 陥伏状あるいは錆目と ともなうひびわれ含む。	陥伏状のひびわれ等が 全周にわたり多数みら れる。	——
	剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きがみられる。	一部に剥離がみられる。	浮き・剥離多し。 (1区画面積の4割程度 以下)	全周にわたる浮き・剥 離(1区画面積の4割 程度以上)
は り	鉄筋の腐食	なし	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ
	ひびわれ	なし	小さなひびわれ(ひび われ幅1mm以下程度) が2、3箇所みられる。	ひびわれやや多し。 柱方向に垂直なひびわ れのみ。	ひびわれ多し。 柱方向につながったひ びわれ(ひびわれ幅3 mm以上程度)を含む。	柱方向につながったひ びわれが全周にわたり 多数。	——
	剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きがみられる。	浮き多し。	浮き多し。 剥離・剥落が箇所みら れる。(1区画面積の 4割程度以下)	剥離・剥落多数。 (1区画面積の4割程度 以上)
ハ ン チ	鉄筋の腐食	なし	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ	スラブと同じ
	ひびわれ	なし	一部にひびわれがみら れる。	ひびわれ幅2mm程度以 下のひびわれが箇所み られる。	ひびわれ幅2mm程度以 下のひびわれが全体に 広がっている。	ひびわれ幅2mm程度以 上のくもの巣状あるい は鉛直方向のひびわれ がみられる。	——
	剥離・剥落	なし	なし	部分的に浮きがみられ る。	部分的に剥離がみられ る。	剥離・剥落多し。 (1区画面積の4割程度 以下)	全周にわたり多数剥離 (1区画面積の4割程度 以上)

- 1) 補修の要否の判定は劣化評価の結果に基づき行うものとする。また補修を行う範囲の判定は責任技術社の判断による。
- 2) 補修の程度、材料および方法の選定は劣化度に応じ、また構造物の置かれている環境条件および使用条件に応じて適切に行うものとする。

〔解説〕

- (1) 補修の要否の判定は、3. 2の劣化度判定の結果に従うものとする。原則として劣化度Ⅲ以上については補修を行うものとする。(表2. 3)
なお、劣化の程度が1ブロック内で全体に一樣でなく、局部的な場合には、必ずしも1ブロック全体の補修を行う必要はないが、ごく部分的な補修はあまり効果のない場合もあり、また部材の部位により重要度も異なるので、これらを考慮にいれた総合的な判断により、補修の範囲を決定する必要がある。
- (2) 補修の程度は上記の原則に従うが、補修に用いる材料および方法の選定は、構造物のおかれている環境条件のほか、荷重などの使用条件および劣化している部材のみならず、その周辺の部材との関係をも十分考慮にいれて行う必要がある。

表2. 3 補修の要否判定

劣化度 項 目	0	I	II	III	IV	V
補修の要否判定	補修の要なし		補修の要なし (場合により 補修)	要 補 修		要補修 (場合により 補強)

(3) 検査の方法

① 気中における検査³⁾

a) コンクリートのひびわれ

塩害によるコンクリートのひびわれは、

鉄筋の腐食→腐食物である錆量の増大→ひびわれ→剝離、剝落

といった劣化過程における現象であるが、一度ひびわれが発生すると、ひびわれ部より塩化物、酸素、水分が侵入し劣化が進行して行く。このように塩害のみならず何らかの原因でひびわれが発生すると、環境条件にもよるが、劣化は急速に進行するといわれているため、ひびわれ調査はその発生原因および進行状態(変動)を重視し、注意深く実施する必要がある。ひびわれの原因推定は容易ではないが、ひびわれのパターン、幅、長さ、発生部位などの調査により、ある程度の推定は可能である。塩害によるひびわれの一般的なパターンは、鉄筋に沿って発生するが、実態調査においても、はりの軸方向鉄筋に沿って発生したひびわれ事例が数多く観察されている。

以下にひびわれの調査方法を記す。

i. ひびわれ幅

メジャー(コバックス)、クラックスケール、ルーペなどを用いて測定する。また、幅の変動は、クリップゲージや電気式ダイヤルゲージ、ノギスなどを用いて測定する。

ii. ひびわれ長さ

メジャー(コンベックス)、物差し、巻尺、測量用ポールなどにより測定する。

iii. ひびわれ深さ

ひびわれの深さについては、ひびわれ部分をはつり測定する方法、コアボーリングによる方法、超音波の伝播速度により測定する方法などがある。

b) コンクリートの浮き、剝離、剝落およびかぶり厚さ

コンクリートの浮き、剝離、剝落の原因には、外力、施工、コンクリートの品質および塩害などがある。塩害の場合には、コンクリートの浮き、剝離、剝落は鉄筋の腐食により発生するが、この状態においては、鉄筋とコンクリートの付着力の減少、鉄筋の断面欠損などを生じていることが多い。また、浮き、および剝離、剝落の調査結果は、原因の推定、補修要否の判定、補修方法の選定などの参考になるため、調査は目的を考慮し慎重に行う必要がある。

i. 浮き

鉄筋に沿ったひびわれ及び錆汁の多い箇所や剝離、剝落がみられる周辺のコンクリート表面をテストハンマーで叩き、その音で浮きの有無および範囲を確認し、メジャー(コバックス)、巻尺、測量用ポールなどを用いてその面積を測定する。なお浮き部分の打音は、周辺の健全なコンクリート表面の打音と比較することによりその違いを確認できる。

ii. 剝離、剝落

剝離部はハンマーによりその範囲を確認し、メジャー(コバックス)、巻尺、測量用ポールなどを用いその面積を測定する。剝落部においては、面積および剝落深さの測定を行う。なお、時間などの制約により、剝落面積の測定が難しい場合には、写真などにて判定を行ってもよいが、剝落深さについては、最も深いと思われる代表的な点を実測するのが望ましい。

iii. かぶり厚さ

コンクリートの剝離、剝落などにより生じた露出鉄筋部のかぶり厚さはメジャー(コバックス)、測量用ポール、箱尺などを用いて測定する。内部鉄筋についてはコンクリートをはつり、露出鉄筋部と同じ要領で測定する方法や電磁誘導方式の非破壊タイプ計測器(商品名:パコメーター)などを使用し測定する方法がある。なお、非破壊タイプ計測器による測定は、熟練を要しかつ信頼性にかける面もあるため、補修を目的とする場合などには、はつり調査により確認するのがよい。

c) 鉄筋の腐食

鉄筋の腐食は、コンクリートと鉄筋の付着力や鉄筋断面の減少などを生じ、構造物の耐力や機能の低下をまねく結果となる。塩害による鉄筋の腐食は、飛来塩分、あるいは海水飛沫、海水の浸漬、および凍結融解、乾湿などの繰り返しによるコンクリート表面からの塩化物の進入によって生じる。これは、目に見えないコンクリートの内部で生じるため、劣化がある程度進行し、ひびわれの発生、錆汁の溶出などの損傷がコンクリート表面に現れるまで、目視および簡単な測定具を用いて行う調査では発見できないことがある。このため、内部鉄筋の腐食を目視によらず調査する場合には、コンクリートをはつり、コアーを採取する、鉄筋の電位分布を測定するなどの方法により鉄筋の腐食程度を測定する。

以下に鉄筋腐食の測定方法を示す。

i. 露出鉄筋

露出鉄筋の腐食は、その本数、長さ、位置、腐食程度を調査する。長さ、位置はメジャー(コバックス)、巻尺、測量用ポールなどを用い、腐食程度は、テストハンマーで錆を落とし目視により観察する。鉄筋の断面欠損の調査は、コンクリートをはつり、鉄筋を切断採取後、断面積または、重量の計測、引張試験などにより行う。

ii. 内部鉄筋

内部鉄筋の腐食調査にはコンクリートをはつり、鉄筋を露出または、切り取り、目視観察や断面積の計測などにより行う直接的な方法と、鉄筋の自然電位分布を計測し、腐食状態を推定する間接的な方法がある。自然電位は、コンクリート面の一部をはつり取り、鉄筋を露出させた後に、コンクリート面に参照電極(硫酸銅電極、飽和甘こう電極、

塩化銀電極などがある)を、鉄筋には銅線を接続しその間の電位差を測定する。測定は、パコメーター等で確認した鉄筋位置のコンクリート表面を湿潤な状態に保ち、順次参照電極を移動させ行うが、構造物のおかれている環境条件などにより誤差を生じる場合も多い。このため、自然電位測定方法による内部鉄筋腐食調査は、あらかじめ、その目的や構造物のおかれている環境などを充分考慮し、実施することが望ましい。

d) コンクリート中の塩化物含有量(塩分含有量)

鉄筋の不動態皮膜が塩素イオンにより破壊されるには、ある一定量の塩素イオンが必要である。コンクリート中の塩分量の測定は、劣化の進行度合いを把握し、今後の劣化の予測などに利用できる。塩分量調査は、通常コンクリート表面より鉄筋位置までのコアを採取粉碎後、化学分析による方法や簡易な塩分測定器などを用いて測定する方法がある。調査の目的、劣化状況などに応じて測定方法を選択し、塩分量調査を実施する。

以下に各種測定方法を示す。

i. 化学分析法

本方法は、コンクリートに含まれる塩分を抽出させて測定する方法であり、精度的には十分満足できるものの、試験の方法が煩雑でかつ種々の試薬が必要であるという難点がある。このため、本方法の採用にあたっては、調査の目的などを十分検討する必要がある。なお、本方法に関しては、吸光光度法などの種々の試験方法があるが、JCIにより「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(案)」¹⁰⁾ および「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法(案)」¹¹⁾ が提案されている。

ii. 簡易測定法

簡易測定法は、主にフレッシュコンクリートや骨材に含まれる塩分を測定する場合に用いられる。硬化コンクリートの場合には、コンクリートを粉碎後、硝酸にて溶解させ塩素イオン濃度を測定する。なお、フレッシュコンクリートの塩分量測定には、(財)国土開発技術研究センターの技術評価書が交付された測定器を用いるとよい。現在まで8種類の測定器に技術評価書が交付されているが、いずれも現場で簡単に塩分量の測定ができる携行型または使捨て型であり、測定時間も2~30分と短く取扱いも容易である。

e) コンクリートの中性化深さ

鉄筋コンクリート構造物において、炭酸ガスなどの影響により中性化すると内部の鋼材は腐食するが、既往文献等によると中性化深さは大きなものでなく、港湾構造物の様に十分なかぶり厚さで設計されている場合には、コンクリート中の鉄筋に悪影響を及ぼすことはないと考えられる。しかしながら、かぶりが薄い場合やコンクリートの打継目の位置、または施工が不適当である場合には、中性化の進行は著しく早期に鉄筋腐食が生じる。

i. 中性化深さの測定

中性化深さは、コンクリート表面の一部をはつり取り、破断面にフェノールフタレインエタノール溶液を噴霧し、コンクリート表面から赤着色部（中性化している部分）までの距離をノギス、スケールなどを用いて測定する。

中性化は環境条件、コンクリートの品質、施工の良否などにより異なり、測定結果には通常ばらつきがみられる。なお、中性化深さの調査の実施については、対象物のおかれている環境条件、劣化状況、調査目的等を考慮し決定する。

f) コンクリートの物性

本調査は、主として劣化原因の推定、補修設計等の目的のためになされることが多い。一般的に実施されるコンクリートの物性に関する調査項目及びその方法を以下に記す。

i. コンクリートの吸水量および単位体積重量

コアを採取し測定を行うが、試験も簡単であり、かつ本項目は、塩害因子である塩化物、水分、酸素のコンクリート中への浸透抵抗を表わす目安となりうるため測定されることが多い。なお、同時にコアの目視観測や骨材の品質および種類、粗大空隙などの観察も行い、他の測定結果と合わせて検討を行えば、コンクリートの耐久性の判定などに有効である。

ii. コンクリートの強度など

コアを採取しその圧縮強度、引張強度、曲げ強度、弾性係数などを測定する。目的によっては、スラブ、はりの一部を切り出し、載荷試験を行うこともある。なお、コア採取を行わず、直接コンクリートの圧縮強度を測定するには、シュミットハンマーなどを用いて行うが、打撃方向、乾湿、材令などによりその値は異なるので注意を要する。

iii. コンクリートの配合

硬化コンクリート中のセメント量、骨材量、結合水量を推定するもので、セメント協会「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」に示される方法などがあるが、骨材の種類、成分など種々の条件により、結果に誤差を生じるため、調査の目的を吟味し、試験を行う必要がある。

② 海中における検査⁵⁾

海洋コンクリート構造物の海中における検査は、現状では外観検査のみとなっている。

a) 外観検査

水中においてダイバーが肉眼でコンクリート表面を観察し、クラックやコンクリートの剝落などの損傷を発見する。構造物周辺の洗掘や盛り上がり、衝突の損傷および波浪による損害はすべて目視で判定できる。

外観検査の結果を船上に伝達し、分析するには、次の方法がある。

i. 手書きの方法

ダイバーによる直接観察のうえ、手書きさせる方法は、簡単なスケッチ板に水中でかけるペンでスケッチさせる方法である。海流、波、透明度の悪いところなど困難な環境下では、生理的、心理的作業上の制限がダイバーの判断力、筆記力に影響を及ぼすため、監理者は十分なチェックポイントを船上から適切な通話システムを用いて指示することが大切である。

ii. 水中写真と水中ビデオ

写真およびビデオによる記録は、今日では普通に行われている。特にビデオの映写は、記録すると同時に船上で監視できる。ビデオ映写の方法は、次の3ケースがある。

- ・ダイバーが操作するシステム
- ・有人潜水船が装備するシステム
- ・遠隔操作水中無人観測機に装備するシステム

b) 外観検査の限界

損傷を目で判定できるのは、毛スジ程度のいわゆるヘアクラックまでである。しかし、水中においては、事前にクラックがあるのを知っていれば発見できるが、通常海面下のコンクリートの表面は、藻貝類に覆われているため、一般に発見は困難である。コンクリート中の鉄筋またはプレストレスト鋼材の錆は、鋼材の腐食に伴う膨脹によりかぶりコンクリートの表面にひびわれを生じさせ、次いで表面を剝離させる。しかし、外観検査で発見したときには、鉄筋またはプレストレスト鋼材の錆はかなり部分的に進んでいるのが普通である。

外観検査に使用する機器には、大きさの制限があり、かつ海水の流れ、透明度などにより観測は制約される。そこで、一般外観検査は、遠隔操作水中無人観測機に装備したビデオで行い、特定箇所の詳細検査はダイバーで行う。この際、遠隔操縦機でダイバーの監視を行い、ダイバーは詳細検査の場所に接近し、写真およびスケッチなどにより記録をとるのが最近の傾向である。

c) 構造物のモニタリング

厳密には構造物の検査手段ではないが、構造物の保全に関する永続的な情報を提供するモニタリングが開発されていて、これが水中検査の一翼となっている。

以下に北海におけるコンクリートプラットフォームに適用されている構造物のモニタリングの例を述べる。

i. レベル測定機

プラットフォームのいろいろの地点での沈下の測定は、プラットフォームの傾斜の情報を提供し、構造物に生じている応力の情報を提供する。設計分析により沈下によって応力が上昇した箇所が分かり、これらの場所が検査計画に組み入れられる。現在の技術では、沈下の決定はそれほど信頼できるものではない。

ii. 横移動の測定

もし、横方向にプラットフォームが動くと、パイプラインとコンダクターに重大な損害を生じる恐れがある。海底面にパイルで固定された鋼製ジャケットが横方向に動くことはほとんどあり得ないが、それにもかかわらず横移動が起こることがある。このようなプラットフォームに関する経験は限定されるので、これには測定が必要であると指示されている。

iii. 応力測定

構造物内の応力のモニタリングにストレインゲージを用するのは既に確立された方法である。固定プラットフォームでは、基礎の移動による荷重の変化の測定に使用できる。これによって、検査員が必要な部位を知らせることができる。しかし、ゲージの数は経済上限定されるので、その装置位置の決定が重要である。

iv. 将来の開発

今日、利用できるシステムは単に欠陥発生後に、それを発見するにすぎないが、欠陥が発生するのを事前に警告を与えるシステムについての研究開発が必要である。もし、モニタリングが検査作業を減少するために使用されるなら、システム自身はできるだけメンテナンスフリーのものでなくてはならない。個々の計器、たとえばコンクリートに埋設される歪ゲージは、構造物の全稼働期間信頼できるものでなくてはならない。また、これらは建造工事中にも破損しない頑健さが必要で、建造直後に不作動が判明しても、修理や取替えはできないため無駄になる。しかし、モニタリングシステムは、プラットフォームの通常の作業の妨害となってはならない。

(4) 非破壊検査法の現状

陸上部のコンクリート構造物の耐力診断技術として、非破壊検査法の開発が各所で進められている。非破壊試験の主な対象は、物性値 (ρ , E , V_p , V_s , ν) , 剝離, ひびわれ, 幅, 間隔鉄筋, かぶり深さなどである。今後、海洋構造物点検技術への応用が期待されるこの検査法の現状について、概要を以下に記す。

① 非破壊検査法

RC構造物の非破壊試験においては、試験対象をコンクリートと鉄筋に大別し、さらに各々を表-4.5.4に示すような詳細な調査項目として表すことができる。

表-4.5.4は、調査したい項目とそれを得るための非破壊試験の関係を示したものである。各試験項目に対する試験方法の技術レベルの評価は、実用化されているもの (○), 研究段階のもの (△), 今後の発展が期待されるもの (☆) の3つにランクを分けて行った⁸⁾。ただし、既に実用化されている手法についても新たな測定, 解析処理技術の導入によって試験精度の向上が考えられるものについては重複した (○☆) の形式で評価を行った⁸⁾。

これらにより以下のようなことが考えられる。

- i. コンクリートに比べて鉄筋を対象とした実用的な調査法の種類が少ない (鉄筋の腐食状況など)
- ii. 実用化されている試験法としては、目視, 打撃, 電磁気, 音波を用いたものが主である。

表-4.5.5は、表-4.5.4中に示した各試験法の簡単な測定内容, 特徴などを説明したものである。

表-4.5.4 試験対象及び項目と試験方法

試験方法 試験対象及び項目			目視による方法		打撃を用いる方法		電磁気を用いる方法		音波を用いる方法			電磁波を用いる方法					その他の方法		
			ひびわれ観察	測量	反発硬度法	電気法	磁気法		共振法	音速法	A E 法	電波法	赤外線法	放射線法	中性子法	マイクロ波吸収法	中性化深さ測定	表面吸収法	空隙率法
コンクリート	物性値	圧縮強度			○				○	○									△
		弾性係数							○										
		弾性波速度								○									
		凍結融解低減性							○									○	
		中性化深さ															(○)		
		密度				○					△			△	△				
	コンクリート表面の不良	載荷履歴									△								
		ひびわれ幅	○☆																
		ひびわれ長さ								○									
		ひびわれ分布	○☆										○	△					
鉄筋	鉄筋の腐食	剥離 (うき)											○						
		ジャンカ			○					○		☆		△	△	△			
		厚さ								○		☆		△					
鉄筋	配筋・かぶり厚	養生面を剥離								○		○							
												☆		☆					

○: 実用化されているもの
△: 研究段階のもの

☆: 研究段階及び今後の発展が期待されるもの
(): 局部的にコンクリートをはつる試験

表-4.5.5 非破壊試験法の種類

試 験 方 法		測 定 内 容	特 徴	備 考
目視による方法	ひびわれ観察	コンタクトゲージ法 クラックスケール法 画像処理法	・ひびわれに直接スケール類をあてて測定する	・測定が簡便 ・画像処理を行う場合に解析用ソフトが必要である
	測定	レベル・トランシット法 ダイヤルゲージ法	・測定器で各点のたわみ量を測定する	・測定が簡便 ・結果を直接判断できる
打撃法を用いる方法	反跳硬度法	シュミットハンマー法	・コンクリート表面を打撃し、反跳硬度を測定する	・測定が簡便 ・被測定物の形状・寸法にかかわらず適用できる
電気を用いる方法	電気法	電気抵抗法 誘電率法 自然電極電位法	・電気抵抗の測定 ・誘電率の測定 ・自然電極電位の測定	・測定は比較的容易 ・同一箇所に繰り返し測定できる
	磁気法	パコメータ法 ガバメータ法	・鉄筋の存在に起因する磁界の変化を測定	・測定は比較的容易 ・同一箇所に繰り返し測定できる
音波を用いる方法	共振法	縦共振法 たわみ共振法 ねじり共振法	・特定形状・寸法のコンクリート供試体の共振振動数 対数減衰率等の測定	・測定は比較的簡易 ・同一供試体に繰り返し適用できる
	音速法	超音波法 衝撃波法 連続波法 反射法	・超音波パルスの伝播速度測定 ・衝撃波の伝播速度測定 ・表面波の伝播速度測定	・被測定物の形状・寸法にあまり制約がない ・同一箇所に繰り返し適用できる
	AE法		・載荷に伴うコンクリート内部のひびわれ発生音の計測	・カイザー効果を利用してそのコンクリートの過去の載荷履歴を推定できる
電磁波を用いる方法	電波法	パルスレーダー法 連続波レーダー法	・コンクリート表面から電波を送信し、コンクリート背面等からの反射波をとらえる	・測定は比較的容易 ・結果を直接判断できる
	赤外線法		・コンクリート表面のクラックや剥離により生ずる微小な温度差を赤外線センサーで受信し画像処理を行う	・測定は比較的容易 ・結果を直接判断できる
	放射線法	X線法 γ線ラジオグラフィ法 γ線ラジオメトリー法	・放射線(X線、γ線)がコンクリート中を通過する状況を測定、撮影する	・コンクリート内部の状況が直接観察できる
	中性子法	中性子含水量測定 中性子活性化分析法	・中性子の減衰状況の測定	・測定精度は比較的良い
	マイクロ波吸収法		・波長0.3～300mmのマイクロ波の水による減衰量を測定する	・測定は比較的容易
	中性化深さ測定	フェノールフタレン法 化学分析法	・コンクリート表面に指示薬を吹付けその反応により判断する	・測定が容易
その他の方法	表面吸収法		・コンクリート表面にはった水の吸水速度と吸水量の測定	・特別な機器を必要としない
	空隙率法		・水銀圧入法による空隙率と化学分析による水和度の測定	・コンクリート片があれば強度推定ができる

J I S : Japanese Industrial Standard (日本工業規格)
 B. S : British Standard (英国規格)
 ASTM : American Society for Testing & Materials (米国材料試験協会)
 D I N : Deutsche Industrie Norm (ドイツ工業規格)

② 非破壊検査法の今後の動向

表-4.5.6は、表-4.5.4、表-4.5.5で示した非破壊試験法の現状と今後の予想される動向について試験対象別に技術レベルを評価したものである。なお、今後の課題として将来有望と考えられる試験対象と試験方法の組合せについては、既に表-4.5.4中に星印（☆）で示してある。これらより非破壊試験の現状は以下の2項目に集約されるようである。

- i. 原理的に非破壊という手法を用いているために、コンクリート内部の詳細な状況が把握しにくい。
- ii. iと同様の理由で健全部と劣化部の測定値の比較を行うような定性的評価が主であり、定量的な評価の行える手法が少ない。

また、今後精度の良い試験法を検討するために必要な検討課題としては以下に示すようなものが考えられる。

- i. 現在用いられている方法によるデータの蓄積をはかり、定量的評価としての信頼性を向上させる。
- ii. 現在用いられている方法について、装置の改良、処理技術の向上などを行うことによって、測定精度を高める。
- iii. 新しい測定手法の開発および他分野で用いられているような測定、解析方法の適用について検討する。

表-4.5.6 非破壊試験法の現状と今後の動向

試験対象		現 状	今 後 の 動 向
コンクリート試験を対象とした	コンクリートの物性値	- 物性値の中で主となるものは圧縮強度であり、シュミットハンマー及び音速法等の非破壊試験法がある。 - これらの間には密接な関係があり、ある程度確立された技術と考えられる。	今後はさらに精度の高い推定法及び測定器の開発の検討が望まれる。
	コンクリート表面の不良	- ひびわれの分布及び幅については、現状では人々によりスケッチ及びクラックゲージ等で行っている。 - 剥離については赤外線法等が利用されている。 - ひびわれ深さについては超音波法が適用されているが測定誤差が大きい。	- ひびわれ分布及び幅等については、今後写真撮影等を利用した画像処理技術の検討が必要である。 - ひびわれ深さについては精度の良い新技術の開発が望まれる。
	コンクリート内部の不良	現状では確立されたものがなく、音速法によるCT法及び電波を用いた反射法（地下レーダー法）の研究が実施されている。	現状の研究で今後の発展が期待されるものは電波法（地下レーダー法）であるが装置の改良及びデータ処理技術の向上が必要である。
鉄筋を対象とした試験		- 配筋及びかぶり厚さについては磁気法（主としてパコメータ）が適用されているが、鉄筋以外の磁性体の影響により誤差がある。 - 腐食については電気法（自然電位法）が適用されているがコンクリート中の湿潤の程度や含有塩分の影響を受け易い点に問題がある。	- 配筋及びかぶり厚さ判定に用いている磁気法については他の磁性体の影響を受けないような装置の工夫が必要である。また、新技術としては電波法の適用も期待される。 - 鉄筋の腐食については電気法（自然電位法）の評価法の検討及び新技術としてX線の適用が考えられる。

4.5.4 補修技術の現状

(1) 補修の基本的考え方^{1)・3)}

コンクリート構造物の一般的な補修方法は、外観の損傷している箇所の簡単な防錆処理と断面修復が主体である。しかし、海洋環境下に立地して塩害により損傷している構造物においては、コンクリート中にすでにかかなりの塩分が浸透しているとともに、今後も塩分、酸素などの腐食因子の侵入が予想される。

したがって、塩害の補修方法は、これらの鉄筋の腐食因子の侵入を抑制または防止することである。

酸素、塩分などの腐食因子の新たな侵入を抑制または防止する方法として、長期的にその効果が確認されているものは今のところ無いが、実用性とこれまでの補修実績、研究報告などからコンクリート表面の被覆による遮断効果を期待した方法が取られている。

塩害の補修方法の目的と対策を表-4.5.7に示す。

表-4.5.7 補修方法

補 修 方 法	目 的	対 策
鉄筋の防錆処理	錆びた鉄筋の腐食進行を抑制する	鉄筋を露出させ、ブラストにより除錆した後、防錆材料を塗布する。
断 面 修 復	はつりなどにより欠損した部分のコンクリート断面形状を修復する	断面修復材料を用いて修復する。
コンクリート表面の被覆	塩分、酸素などの侵入を減少させて鉄筋の腐食進行を抑制する	コンクリート表面を被覆する
鉄筋のさしかえ、補充	錆びた鉄筋の断面減少を修復する	鉄筋をさしかえ、または補充する。

① 鉄筋の防錆処理

断面修復部の露出した鉄筋は、すべての箇所について鉄筋の防錆処理を行う。

② 鉄筋のさしかえ、補充

腐食により鉄筋の断面減少が著しい場合は、鉄筋の損傷部分の取り替えなどを考慮しなければならないこともある。

既設鉄筋と新規鉄筋との継手方法は、コンクリート標準示方書にある重ね継手が標準的であるが、土木学会「鉄筋継手指針」に準じた他の方法を用いてもよい。ただし、いずれの方法でも所定の施工ができないこともあるので、そのときの対策についても検討しておかなければならない。さしかえ、補充した鉄筋は露出鉄筋と同じように防錆処理を行う。

③ 断面修復

腐食した鉄筋を露出させるためにははつり取った箇所は、断面修復材で復元する。また、ジャンカなどのコンクリートの不良箇所は、鉄筋の腐食因子が侵入しやすい状態にあるため、

断面修復材などを充てんする。鉄筋のかぶり厚がほとんどない場合も、断面修復材でかぶりを確保することが望ましい。

④ ひびわれ注入

コンクリートの乾燥収縮によるひびわれなどの鉄筋の腐食に起因しないひびわれは、従来のひびわれ注入（エポキシ樹脂などの注入）により補修する。

⑤ コンクリート表面の被覆

外観損傷を生じている箇所とそのまわりの同一環境条件下にあるスラブ下面、ハンチおよび梁について、コンクリート表面に被覆を施す。

また、部分的な範囲での被覆は十分な補修効果を得られないため、まとまった範囲で被覆することを原則とする。

コンクリート表面の被覆材料は多種多様であるが、鉄筋の腐食を長期的かつ効果的に抑制するとともに経済的な補修を実施するため、損傷程度に応じて被覆材を使い分けることが望ましい。

なお、補修に用いる材料は、コンクリートの湿潤や施工後の海水の影響などを考慮に入れ、海洋環境下での補修に適した材料を用いることが大切である。

(2) 補修の方法¹⁾

① 断面修復の方法

コンクリートの欠損部に対する断面修復の工法は、一般に以下に示すような、プレパッキングコンクリート工法、打継コンクリート工法、モルタル工法に大きく分類される。断面修復は、これらの工法の特徴を十分理解したうえで、コンクリートの劣化損傷状況や劣化損傷部位に適した工法を選定する必要がある。

i. プレパッキングコンクリート工法

プレパッキングコンクリート工法は、一般に欠損断面が大きい場合に用いられる工法であり、その一例を図-4.5.2(a)に示す。この工法による施工は、型枠設置、修復部への粗骨材の充てん（注入材の種類によっては充てんされない場合がある）、注入材の注入の順序で通常行われる。

ii. 打継コンクリート（モルタル）工法

打継コンクリート（モルタル）工法は欠損断面が比較的大きく、下向きの作業が可能な場合に用いられる工法であり、その一例を図-4.5.2(b)に示す。この工法による施工は、型枠の設置、コンクリートなどの充てんの順序で通常行われる。

iii. モルタル工法

モルタル工法は、一般に欠損断面が比較的小さな場合や他の工法が困難な場合に用いられる。この工法を用いた場合には、コテ、ヘラあるいは指によってモルタルなどを塗り込む作業が中心となる。

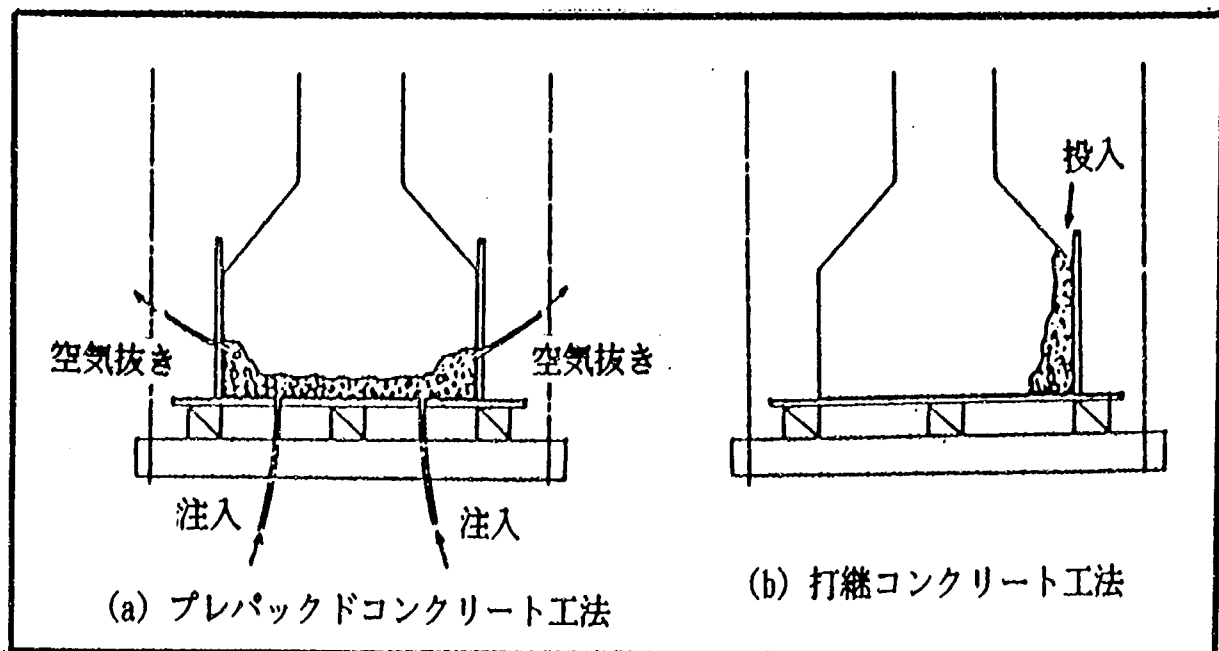


図-4.5.2 断面修復の概要

② コンクリート表面被覆の方法

コンクリート表面被覆工法は、一般に図-4.5.3に示すような塗膜コーティング工法とモルタルライニング工法に大きく分類される。前者の工法は、一般に有機系材料を薄く塗り重ねる（下塗り、中塗り、上塗りのすべてに有機系材料が用いられる）工法である。、後者は、一般に前者の下塗りとは中塗りにあたる部分のある程度の厚みを持った無機系材料の層で置き換えた工法である。このコンクリート表面被覆は、どちらの方法を用いる場合も直接外気に接する部分の全体を対象に行うのがよい。これは、被覆されていない部分があると、そこから塩分、水分、酸素などの浸入を招き、十分な補修効果が得られにくくなるためである。

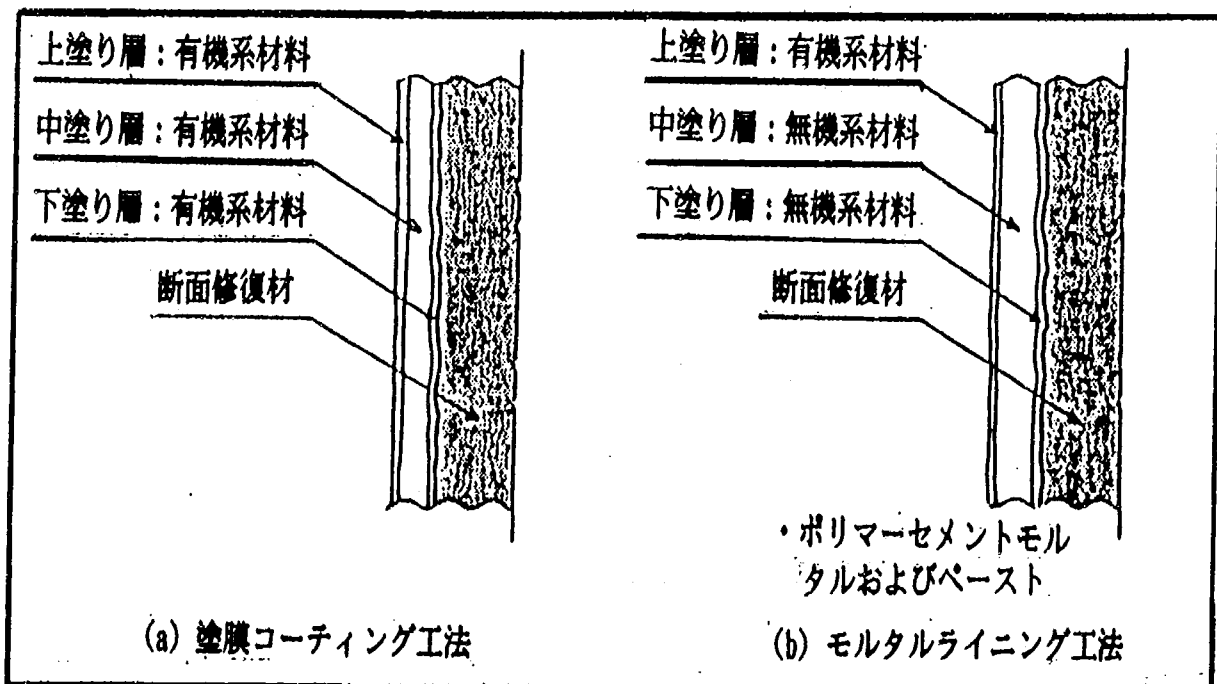


図-4.5.3 コンクリート表面被覆工法

4.5.5 まとめ

- (1) 良好な管理のもとに建設された海洋コンクリート構造物は、半永久的な耐用年数を持っており、構造物の所要の機能を維持していくための検査は原則的に必要とせず、海洋コンクリート構造物はメンテナンスフリーの立場で設計されている。
- (2) 維持管理技術の一面である、劣化、損傷を生じないような耐久的な海洋コンクリート構造物を作り込む技術については、従来から多大な努力が払われており、多くの規格、基準にその成果が示されてきた。
- (3) 劣化、損傷が生じた場合に、できるだけ早くこれを発見し、補修する技術（点検、補修技術）については、コンクリートが耐久的であることから、最近になって開発が開始されたのが現状である。
- (4) 海洋コンクリート構造物の維持管理技術は、建設省を始めとする各省庁、公共団体、大学、電力および企業の研究機関等において研究の緒についたところである。
- (5) 海洋コンクリート構造物の点検、調査では、海象条件等による制約が厳しく、原則として目視観察にたよっている。

陸上部のコンクリート構造物の耐力診断等で用いられている非破壊検査法を、今後、海洋構造物の点検技術として応用していく場合、この海象条件等の制約を十分考慮しなければならない。

- (6) 我が国では、沖合に展開する本格的な海洋コンクリート構造物は未だ建設されたことがなく、維持管理技術についても、北海の石油開発用コンクリートプラットフォームにおける経験を参考にしていく必要がある。

4.5.6 今後の課題と提案

(1) 維持管理の考え方の確立

海洋コンクリート構造物の維持管理技術は、建設省を始めとする各省庁、公共団体、大学、電力、企業の研究機関等において研究の緒についたところである。

わが国には、コンクリートプラットフォーム（ＣＰＦ）のような本格的海洋コンクリート構造物の実績は無く、この種の構造物に対する維持管理の考え方は確立されていない。構造物の重要度、点検、補修の難易度等により、耐久性に関する設計思想のあり方は異なるものであり、今後、欧米におけるコンクリートプラットフォームの実績等をもとに、構造物の実情に応じた維持管理の考え方を確立していくことが望まれる。

(2) 点検調査手法について

海洋コンクリート構造物の点検、調査では、海象条件等による制約が厳しく、原則として目視観察にたよっている。

陸上部のコンクリート構造物の耐力診断等で用いられている非破壊検査法を、今後、海洋構

造物の点検技術として応用していく場合、この海象条件等の制約を十分考慮し、より簡便に行えるロボット技術を利用した点検、調査手法等の開発が望まれる。

(3) 海中における点検、調査、補修作業について

大気中の検査においても、より簡便な検査方法の開発が求められているのが現状であるが、海中においては、さらに次のような厳しい条件、課題の解決を図って行かねばならない。

- ① 通常、海中における点検、調査、補修作業は、ダイバーが主体になって行っているが、ダイバーの潜水環境を考慮して極力作業を単純化している。高度な技術を要する作業を、ダイバーに行わせるのは非常に難しい。
- ② 海中作業を行うに当たってのダイバー自身の呼吸用エア、圧縮空気、電気等の動力源、通信等はほとんどの場合、海上からケーブル、ホース等を通じてなされる。このため、ケーブル、ホース類相互のからみや、構造物とのからみ等の問題が発生しやすく、施工手順、安全管理が重要となる。
- ③ ダイバーが海中作業を行う場合、海中での作業時間は人体への影響により陸上での作業時間と比較すれば極めて短時間である。さらに、水深が大きくなると潜水作業時間は急激に短くなる。長時間潜水が可能な、直接潜水方式による潜水技術の開発が望まれる。
- ④ 水中作業の困難性を十分考慮し、海中で容易にかつ確実に操作でき、作業能率および作業範囲等の向上を図った、機器および技術は十分なものとはなっていない。

透明度の悪い海域における海中作業には、水中照明が必要であるが、現在の技術、機器ではその照明範囲は極めて限られている。汚濁海水中では、照明透過度は約 1~2 mと言われている。低照度中および汚濁海中でも写る水中テレビカメラや、ダイバーが容易に取り扱えるスチール撮影用小型カメラは、まだ実用化されていない。また現状では、水中テレビカメラ用ケーブルは太く重いため、ケーブルを支えるケーブル操作専任のダイバーが必要となっている。

暗黒海水中での作業物体の形状、大きさ、その位置が容易に確認可能であり、かつダイバーの取り扱いが簡単な機器の技術が求められている。音響方式、レーザー光線等を使用する方式の基礎研究はなされているが、今後開発すべき大きな問題として残されている。

- ⑤ 現在の水中通信では、音声の歪みや、潜水器具による発声の障害があり、鮮明に通話することが出来ない。陸上なみに通話できる機器の開発が求められている。
- ⑥ 海中での適当な非破壊検査機器がないので、コンクリートの検査は主として外観観察に限られている。しかし、ダイバーが海中で容易に検査結果を記録できるハンディな機器はなく、現状では藻類貝類をかき落とし、コンクリート表面を清掃したうえで、手書きのスケッチにたよっている。

詳細な外観検査を行うためには、構造物の表面を綿密に清掃する必要がある、構造物が大きい場合、さらに多くのダイバーと時間を要する。

ダイバーが海中で容易に判断でき、取り扱いが容易なクラックを検出する機器や、鉄筋・PC鋼棒等の錆の状況を検査する機器の開発が必要である。

4.5.7 参考文献

- 1) 建設省：コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書<第二編> --- 塩害を受けた土木構造物の補修指針（案），1988.11
- 2) E C O R日本委員会：海洋構造物を取り巻く環境--防錆・防食並びに付着生物の除去技術，1984.9
- 3) 沿岸開発技術研究センター：港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書 --- 劣化防止・補修マニュアル（案），1987.9
- 4) 関 博，大即信明：コンクリート構造物の耐久性設計の考え方ー港湾・海洋構造物の場合，コンクリート工学，Vol.26，No.11，1988.11
- 5) 建設省土木研究所：海洋構造物の維持管理技術に関するフィージビリティスタディ報告書，1987.4
- 6) 建設省土木研究所：海洋構造物の保守管理技術に関する報告書，1982.3
- 7) 海洋科学技術センター：海中計測技術の動向調査報告書，1987.6
- 8) 日本技術検査協会：コンクリート構造物に対する非破壊検査技術の適用とその精度・講義と討論（第3回），1986
- 9) 長滝重義：コンクリート構造物の劣化現象とその対策，維持管理分野の現状と展望，土木学会 関東支部，1987
- 10) 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法（案），コンクリート工学，Vol.22，No.12，1984
- 11) 硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法（案），コンクリート工学，Vol.23，No.6，1985

4.6 ゴム，高分子材料の維持管理技術

ゴム，高分子構造用材料は、使用される環境条件が極めて厳しいので、維持管理は重要なことである。特に海洋構造物に構造用材料として使用されるゴム，高分子材料は、その寿命を長く保持するためには、維持管理は欠くことのできない重要な技術要素の一つである。しかし、環境が厳しいので、維持管理を常時行うことは困難な場合が多い。そのために、できるかぎり設計段階において、維持管理の軽減を計れる配慮をする必要がある。

海洋構造物に使用されるゴム，高分子構造用材料の維持管理は、使用される場所によって異なるが、基本的には年に一回以上の総点検と、台風，地震等の異常発生後の点検を定期点検とし、この点検では不可能であり必要を認めた時に実施する点検を臨時点検とする。

なお、これ以外に日常の巡回時等において下記の項目を点検し、異常が認められた場合、必要に応じて処置を講ずることが好ましい。

- ① ゴム，高分子構造用材料本体の損傷。
- ② 付帯部材の損傷，変形，破断，緩み。
- ③ 取り付け部の異常。（ボルトの緩み，接着の剝離，ずれ）

さらに、使用環境が異なるので、時期，周期，点検の方法等は必要に応じ見直しし、改定をする必要がある。

表-4.6.1に、ゴム，高分子材料の保守点検要領（案）を示す。

表-4.6.1 ゴム、高分子材料の保守点検要領（案）

点検箇所	時期 周期	観 測 監 視 保守点検要領（案）			
		内 容	方 法	判 定	処 置 及 び 対 策
本体外面	年1回以上 及び、台風 地震等の異 常発生後	ゴム、高分子表 面の損傷 亀裂、ひび割 れ、変形、摩 耗等	付着物を除き、 目視、スケール 等にて点検	小さな傷； 数mm程度で、 成長の可能性 のあるクラッ ク 大きな傷； 性能に影響す る程度、及び 将来機能を損 なう等の危険 のあるもの。	小さな傷の場合は、 補修し使用する。 異常発生後は、入念 に点検する。 大きな傷の場合は必 要に応じて、補修、 工場修理、取り替え 等を判断する。 必要に応じて、取り 外し圧縮試験をして 確認する。
本体金属 部分	同 上	塗膜の損傷、発 錆、変形等	付着物を除き、 目視、ハンマー 等にて点検	塗膜の損傷、発 錆がある場合； 同系の塗料に て、タッチア ップする。 変形の著しい 場合は、取り 替え等の対策 をする。	
変形量 測定	同 上 または 常 時	本体の、歪み測 定、監視、と記 録	変位計で測定し 自動記録	設計限界歪み内 に、変形量がお さまっているか	許容歪み以上に変形 をしたゴム、高分子 本体は、圧縮検査等 を実施し、異常の有 無を確認する。 特に、異常発生後 は、記録を入念に点 検する。
取付部	同 上	ボルト、ナット の緩み、脱落、 腐食等	目視、ハンマー 等にて点検	回り止め、点溶 接が破断してい るか、容易に回 転するか。	緩みのある場合は、 増し締め、点溶接を 行う。 脱落、腐食のある場 合は、新品と取り替 える。 特に、異常発生後 は入念に点検する。

5. 生物付着に関する報告

5.1 総論

わが国の沿岸海域では、大型の海洋構造物の建設が盛んになってきている。これらの構造物は海中にある限り、海中に生存している海洋生物の付着は避けられない。

海洋生物の付着は、被対象物によっては被害を及ぼす場合と、海洋生物の付着によって魚類の繁殖や浄化などの有効利用を図れる場合がある。

また海洋生物の付着は、海域、潮流、季節などによって、その種類や付着量が大きく異なる。しかし、生物付着の実態は各機関における調査結果があるが、必ずしも付着の実態が明らかになっているとはいえない。

本章では、最近の海洋生物の実態調査結果と、付着防止・除去技術および促進技術について述べる。

5.2 付着の実態と影響

5.2.1 付着の実態調査結果

付着の実態調査は各機関で調査した結果があるが、比較的最近に行った主な調査結果を以下に示す。

(1) 駿河湾海洋技術総合研究施設の調査¹⁾

生物付着厚さ調査結果を表-5.2.1に示す。

表-5.2.1 生物付着厚 (駿河湾)

(単位: mm)

レベル (T. P.)	第1回調査 (62. 8. 5)			第2回調査 (62. 12. 16)			
	A	B	C	A	B	C	D
± 0 m	10	30	20	7	10	5	3
- 1	5	45	30	10	10	10	2
- 2	20	20	20	10	10	10	3
- 3	15	15	30	15	10	7	3
- 4	20	20	30	20	7	10	2
- 5	20	20	30	10	7	10	2
- 6	20	20	30	20	7	10	3
- 7	5	10	10	10	5	5	2
- 8	2	1※	3	10	5	5	2

注: ※は海藻類が僅かに付着。

第1回調査の付着生物の種類および付着量の調査結果を表-5.2.2に示す。

表-5.2.2 付着生物種と付着量

(10×10cmの量, 単位: g)

レベル (T. P.)	A				B				C			
	総重量	フジツボ (大)	フジツボ (小)	巻貝	総重量	フジツボ (大)	フジツボ (小)	サン ゴ類	総重量	フジツボ (大)	フジツボ (小)	ホヤ
± 0 m	200	180	20		120	100	20		300	300		
- 1	50	20	30		230	170	60		230	125	105	
- 2	170	75	95		150	75	75		130	55	75	
- 3	140	90	50		50	15	35		475	210	105	106
- 4	340	200	140		300	35	100	165	300	120		180
- 5	325	165	150	10	175	10	150	ホ15	340		125	135
- 6	130	35	95		100		100		440	35	210	80
- 7	50	20	15	15	20		20		35		35	195
- 8	カ0			カ0					カ0			

注: カ; 海藻類 ホ; ホヤ類

この結果、駿河湾のように秋季から冬季にかけて波浪の大きい海域では、夏季と冬季では付着厚さが大きく異なることがわかる。また、付着量の最大は47.5kg/m²とかなり大きな量を示している(付着量の測定は採取後30分の重量)。深度方向では、約-6m以下はほとんど付着していない。この原因は、この海域は絶えず漂砂があるため砂によって構造物表面が洗われているためと考えられる。

(2) 千葉沖および阿字ヶ浦の調査²⁾

千葉沖および阿字ヶ浦の調査結果を、表-5.2.3および表-5.2.4に示す。千葉沖、阿字ヶ浦とも無処理の鋼管杭の他、各種の塗覆装が施されている鋼管杭を供試しているが、塗覆装による差は顕著ではなく、どの被覆にも海洋生物の付着は認められる。海域による差は、若干阿字ヶ浦の方の付着量が多い。ただし、千葉沖で赤潮が発生した昭和58年の同様な調査では、表-5.2.3の結果の1/3程度の付着量となっている。

表-5.2.3 生物付着量測定結果（千葉沖）

杭No.	被 覆 の 種 類	付着厚 (cm)		付 着 量 (kg/m ²)	
		海側	陸側	採取直後	乾燥後
1	無処理	15	10	66.05	43.07
2	ステンレス (25Cr-13Ni系) 巻 (3mm)	7	10	28.31	14.94
3	耐海水性鋼 (Cr-Al系) 巻 (6mm)	20	10	46.40	23.43
4	アルミ溶射 (100 μ) + ケーブル材料塗装 (300 μ × 2)	20	13	39.41	24.48
5	アルミ溶射 (100 μ) + ビニルクロス補強ケーブル材料塗装 (300 μ × 2)	17	20	38.63	19.26
6	アルミ溶射 (200 μ)	15	23	40.40	21.33
7	亜鉛溶射 (100 μ) + ケーブル材料塗装 (300 μ × 2)	10	15	36.63	19.82
8	無機シリケート塗装 (75 μ) + ケーブル材料塗装 (300 μ × 3)	20	15	44.96	24.75
9	無機シリケート塗装 (75 μ) + ガラスクロス補強材料塗装 (300 μ × 3)	15	15	46.62	25.69
10	ポリエチレン押出しライニング (4mm) (粘着剤使用)	12	15	47.73	23.45
11	エポキシ系レジンモルタルライニング (4mm)	10	10	47.29	23.54
12	ファイバーコンクリートライニング (型枠: 100mm)	15	10	38.85	20.05

注1: 付着量は、30×30cm (=900cm²) から採取し、m²に換算した。

2: 採取日 昭和61年 7月 9日、直後測定は 7月14日、5日後。

3: 乾燥後測定 昭和61年12月 2日、5.5ヶ月後。

表-5.2.4 生物付着量測定結果（阿字ヶ浦）

杭No.	被 覆 の 種 類	付着厚さ (cm)		付 着 量 (kg/m ²)	
		海側	陸側	採取直後	乾燥後
1	無処理	14	18	35.15	19.25
1	耐海水鋼（Cu-Cr-Al系）巻（6mm）	5	30	57.63	30.33
2	無機シリケート塗装（75 μ ）＋カーボン系塗装（300 μ ×3）	10	30	59.11	31.56
3	アルミ溶射（100 μ ）＋ガラス繊維補強カーボン系塗装（300 μ ×3）	3	25	50.68	28.00
4	無機シリケート塗装（75 μ ）＋ガラス繊維補強カーボン系塗装（300 μ ×3）	3	15	39.60	20.39
5	エポキシ系レジンモルタルライニング（4mm）	5	30～35	69.33	36.57
5	〃	3	35	40.10	21.85
6	ウレタンマスチックライニング（3mm）	5～6	40	64.95	34.42
7	セメントモルタルライニング（47mm）＋ポリエステルFRPカバー（3mm）	5	35	51.01	28.00
8	ポリウレタンゴムライニング（4mm）	5～6	37～40	25.10	13.12
9	ポリエチレン押出しライニング（4mm）	4～5	25～30	29.90	15.66

注1：付着量は、30×30cm（＝900cm²）から採取し、m²に換算した。

2：採取日、昭和57年 7月15日

3：採取位置は、陸側から海側に向かって杭を見て、左側より採取した。

(3) その他の調査結果

深度方向の調査結果を図-5.2.1に示す。この調査は、平塚沖約1km、水深21mの波浪観測塔で、建設後17年経過している。

この結果では、深度方向の最大付着部分は-5~10m付近で、最小付着部分の海底面直上では付着量が非常に少ない。深度方向の付着物の種類は、-13mより浅部ではフジツボが優占種で、-14mより深部ではマガキが優占種と深度により異なる。付着量、厚さについて1982年と1983年の2回調査を行っているが、傾向はほとんど変わらない。

しかし、鹿島港の建設後14年経過している水深-21mのシーバースでは同様な調査結果では、平均付着量が560g/100cm²で深度方向に徐々に付着量は低下するが、海底付近でも200~300g/100cm²の付着量がある。

付着量の調査は、この他にも多数あるが、調査が必ずしも同じ基準で行われていないため比較が難しい。例えば付着重量は、水中、採取直後、乾燥時などで大きく変化する。目的に応じた調査基準を決めた調査が必要である。

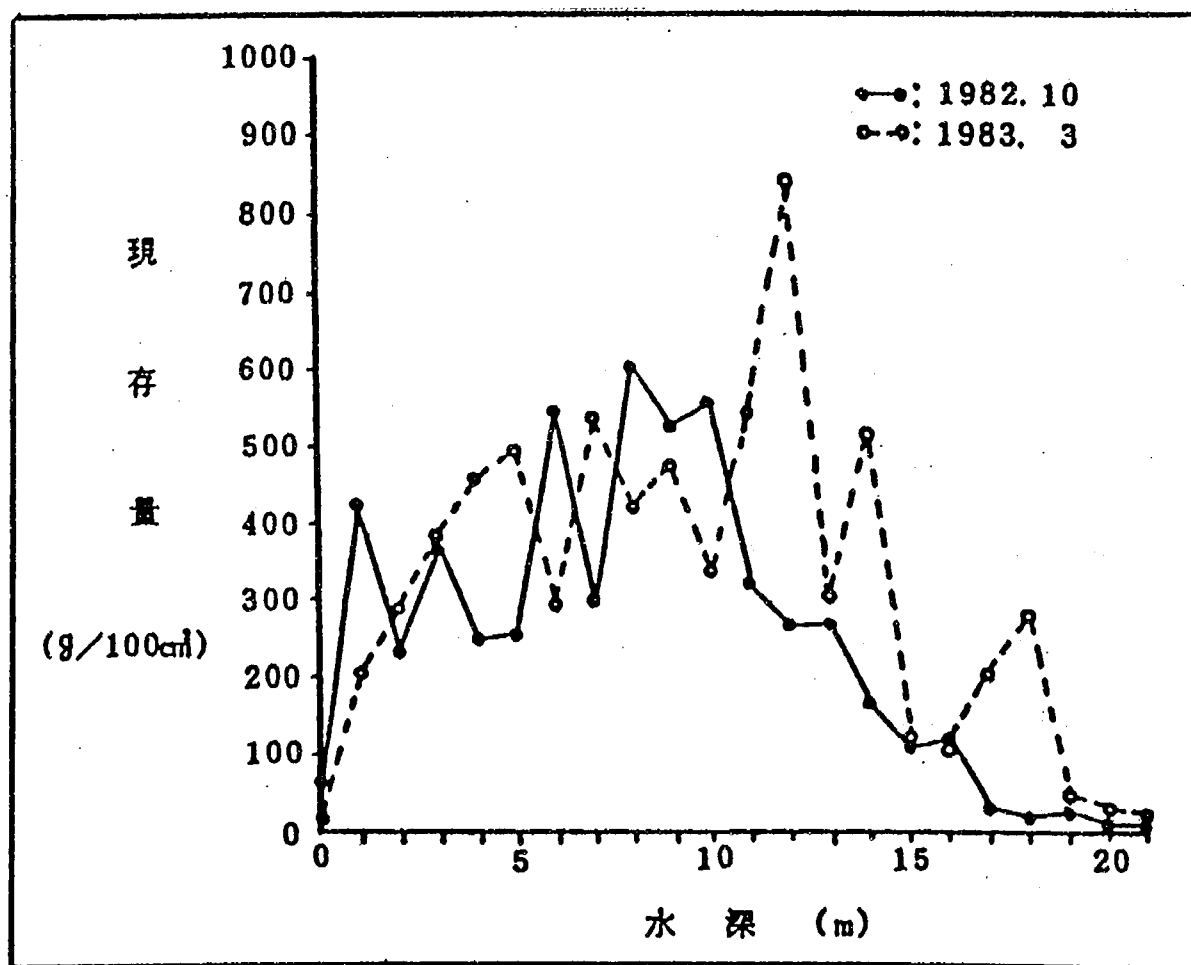


図-5.2.1 水深別付着量 (平塚沖観測塔)

5.2.2 生物付着の影響

(1) 重量、厚さなどの影響

海洋構造物に対する海洋生物の付着は、部材の断面積を大きくし、波浪や潮流に対する抵抗を増加することになる。表-5.2.4のデータでも判るように付着生物の厚さは、清浄な海域では20cm以上になることがある。これらの付着物は、それ以上厚くなると下層の生物が窒息して死滅し、脱落する。このサイクルを繰り返すためある程度以上の厚さにはならない。

また、付着生物による重量の増加は、水中では浮力により軽減するが、ブイなどの浮体式構造物では、付着生物の重量で構造物が沈下する場合がある。

(2) 鋼材の腐食への影響

海洋生物の鋼材に対する影響は、生物の付着により鋼材面への酸素の拡散を制御し、腐食を抑制する効果をもっている。反面、局部的には、酸素濃淡電池などを形成し易く局部腐食を増長する原因ともなる。特にステンレス鋼の場合は、フジツボ類などの生物が付着した場合、付着した部分でスキマ腐食が生じ易く局部的に大きな腐食速度を示すことがあるので注意が必要である。

また、付着生物が死滅堆積すると、嫌気性バクテリアである硫酸塩還元菌が繁殖し、硫化水素が発生して、腐食を増大させる場合がある。

(3) 塗覆装に対する影響

表-5.2.3、5.2.4の千葉沖、阿字ヶ浦の調査結果からも判るように、通常の塗覆装に対しては海洋生物の付着は避けられない。油性系塗料や塩化ゴム系塗料などでは、海洋生物が付着すると塗膜を浸食し、鋼材面まで達し鋼材を腐食させる場合がある。また、イガイやフジツボ類は塗覆装の種類によっては塗覆装面に食い込み、死滅脱落時に塗覆装まで一緒に脱落させる場合がある。

(4) その他の影響

生物付着による被害としては、船舶の航行速度低下による燃料消費量の増大や、発電所の冷却水路の水量低下による冷却効果の低下、復水器内に生物が吸い込まれ異常が生じる場合などがある。

また、水産関係では、養殖用の網に生物が異常に繁殖し、内部の魚類が酸欠状態となるような被害を及ぼす場合と、付着生物の増加により魚類を集める効果があり、付着性の良い魚礁の開発が行われている。

5.3 付着除去・防止および促進技術

5.3.1 付着除去技術

(1) ダイバーによる方法

一般に小規模の場合は、ダイバーが直接壁面の海洋生物を掻き取る方法がとられる。海洋構造物の水中塗装をする場合の下地処理などは、ほとんどダイバーによる直接除去が行われている。ダイバーによる除去は、被対象面が複雑な場合や小規模の場合は有効な方法である。

近年は、ダイバーによる除去により落下した海洋生物が堆積、腐敗したりして海洋汚染につながる場合などがあり、除去だけでなく回収についても機械化するシステムが考案され実用化されつつある。

(2) 機器による方法

機器による除去技術は、回収技術と合わせ電力関係で開発が盛んである。特に電力関係は、冷却水取水路の流速が速くダイバーによる除去作業は危険であることや、除去した生物が復水器や冷却管などに流れ込まないようにする必要があるため、活発に開発が行われている。

現在、機器による除去装置として開発されたものが数種あるが、いずれも水中ブラシを回転させ除去するものである。また、先端に水中テレビカメラを装備し、除去の状況が監視できるものもある。ただし、現在開発されているものは壁面タイプと配管内面用のもので、複雑な形状をした土木構造物などに適用できるものはない。

また、除去した海洋生物を流失し海洋を汚染させることなく、混気ジェットポンプなどを使用して、除去と同時に吸引し回収するようなシステムも開発され実用化されつつある。

5.3.2 付着防止技術

付着防止技術として、現在実用化されているものとしては、汚染塗料および塩素殺菌などがある。この他、超音波や電撃、振動、紫外線、天敵による捕食などの方法が提案または開発されているが、実用化には至っていない。

(1) 防汚塗料

防汚塗料として、現在使用されているものは、亜酸化銅や有機錫を主体とした、溶解マトリックス型および不溶解マトリックス型である。安全取扱基準上、現在使用可能な防汚剤の主なものを表-5.3.1に示す。

防汚塗料はいずれにしても、塗膜中の防汚剤がある速度以上で溶解し始めて効果があるものであり、防汚剤の溶出が終わると寿命となる。一般に寿命は、2～4年程度といわれている。千葉沖で各種の防汚塗料および防汚性のある金属について試験した結果を表-5.3.2に示す。

表-5.3.1 現在使用可能な防汚剤

名 称	構 造 式	系 統	性 状	経口投与 LD50(mg/kg)
亜 酸 化 銅	Cu_2O	無 機	赤色粉末	300
テトラメチル チラウム ジサルファイド	$\begin{array}{c} CH_3 \\ \diagup \\ N-C(=S)-S-S-C(=S)-N \\ \diagdown \\ CH_3 \end{array} \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagup \\ \\ \diagdown \\ CH_3 \end{array}$	有機窒素 硫黄系	白色粉末	(860)
ジンクジメチル ジチオ カーバメート	$\left\{ \begin{array}{c} CH_3 \\ \diagup \\ N-C(=S)-S \\ \diagdown \\ CH_3 \end{array} \right\}_2 Zn$	有機窒素 硫黄系	白色粉末	(1400)
トリブチル錫 フルオライド	$\begin{array}{c} C_4H_9 \\ C_4H_9 \\ C_4H_9 \end{array} \triangleright SnF$	有機錫系	白色粉末	320
トリフェニル錫 ハイドロ オキシaid	$\begin{array}{c} C_6H_5 \\ C_6H_5 \\ C_6H_5 \end{array} \triangleright SnOH$	有機錫系	白色粉末	927
トリフェニル錫 クロライド	$\begin{array}{c} C_6H_5 \\ C_6H_5 \\ C_6H_5 \end{array} \triangleright SnCl$	有機錫系	白色粉末	439
トリブチル錫 メタクリレート 共 重 合 体	$\left[\begin{array}{c} CH_3 \\ \\ C-CH_2- \\ \\ COO-Sn \end{array} \begin{array}{c} C_4H_9 \\ C_4H_9 \\ C_4H_9 \end{array} \right]_n$	有 機 錫 含有 アクリル樹脂	コポリマー 樹脂ワニス	>750

表-5.3.2 各種防汚塗料の試験結果

片 No.	被 覆 の 種 類	ばくろ 年/月	観 察 位 置					
			+1.5m	+0.9m	+0.5m	± 0m	-0.5m	-0.9m
55	[ORGANO-METALLIC COPOLYMER] 系 防汚塗料塗装(75 μ ×2)	55/ 8	70%	20%	30%	30%	30%	80%
56	[亜酸化銅+有機錫] 系 防汚塗料塗装(50 μ ×2)	55/ 8	20	100	40	40	80	80
66	[亜酸化銅+有機錫] 系 防汚塗料塗装(80 μ ×4)	56/11	6	6	0	0	0	0
67	[亜酸化銅+ORGANO-METALLIC COPOLYMER] 系 防汚塗料塗装 (100 μ ×2)	56/11	20	10	1~2	1~2	1~2	1~2
68	[亜酸化銅+トリフェニル錫] 系防汚塗料(高濃度型)塗装 (60 μ ×3)	56/11	90	30	2	2	0	0
69	[亜酸化銅+ORGANO-METALLIC COPOLYMER] 系防汚塗料塗装 (80 μ ×6)	56/11	100	100	80	30	0	0
70	[ORGANO-METALLIC COPOLYMER] 系 防汚塗料塗装(1mm×1)	56/11	100	70	70	0	0	0
71	銅 (99.9%以上)	56/11	—	0	0	0	0	0
65	キュプロニッケル巻き (クラッド、90Cu-10Ni)	55/ 8	15	15	15	15	5	5
72	キュプロニッケル (90Cu-10Ni)	56/11	—	2	60	60	70	70
73	キュプロニッケル (70Cu-30Ni)	56/11	—	50	30	30	70	70
74	亜鉛 (99.995%)	56/11	—	60	20	20	70	70
75	普通鋼板 (SM50) (比較用)	56/11	—	35~40	35~40	35~40	35~40	35~40

注：昭和58年 8月22日観察
海側から30cm幅で½周を観察。

この他に最近では、自己研磨型として、塗膜中の防汚剤が溶け出すとその後の残った基材まで同時に脱落し、消耗した塗膜面が常に新しい面を有し、最後の塗膜が消耗するまで防汚効果を示す塗料や、塗膜の表面調質剤として低表面張力の撥水性物質を配合して防汚効果を発揮する無公害型の防汚塗料⁶⁾などが開発されている。

しかし、いずれも寿命を有することや経済性の点から海洋構造物への適用例は少ない。

(2) 塩素殺菌

発電所の水路などで多く用いられている方法で、過去には塩素ガス注入法が多く用いられていた。残留塩素濃度として1.0ppm以下の塩素ガスを連続注入する。稚貝になる前に注入すると、非常に有効な方法である。しかし、海水の性状に変化をきたすため（プランクトンの死滅など）現在ではほとんど使用されていない。

また、海水を電解して次亜塩素酸を生成し、同じような効果を得る海水電解型塩素イオン供給装置がある。船舶の熱交換器や発電所の熱交換器などで、一部採用されている。

(3) その他の方法

その他の方法で実用化されているものは少ないが、超音波法は日本造船研究協会における試験⁷⁾では鉄板に対する付着生物は、超音波照射速度が100G付近で付着量が減少し、300G程度で防止できる。周波数が高いほどその効果が大きい。28kHzで300Gを加えた場合、20～160secの照射で60～90%の死亡率が得られ、音圧では、0.2bar付近から死亡率が大きくなる結果が得られている。鈴木らの実験⁸⁾では、付着生物が無くなるには0.3bar以上の音圧が必要であり、照射する角度が重要であるとしている。以上のような報告があるが、実用化には至っていない。

銅や銅合金を被覆することにより生物の付着を軽減できることは、古くから知られており、表-5.3.2の鋼管杭の試験をみても明らかである。

この他に植毛による方法、電撃処理法、高温処理法や爆薬利用法などの研究があるが、実用化には至っていない。

5.3.3 付着促進技術

付着生物の除去技術については、被害が多いことから多くの研究開発が行われているが、付着促進技術については、近年になって行われ始めたばかりである。

魚類の餌になるような有効な海洋生物の付着は、魚類を集めることになり、今後の漁業の発展や海洋レジャーおよび海域の清浄化に欠かせないものである。

(1) 電気化学的方法

電気化学的方法として電着工法が上げられる。この方法はアメリカで開発されたもので、鋼材を陰極として海水を電解することにより、海水中のCaイオンやMgイオンを鋼材面に、炭酸カルシウム、水酸化カルシウムとして析出させる方法である。この電解被膜が、特に藻類の繁殖に優れた効果を有するとされている。電解に用いる陰極電流密度は $2 \sim 7 \text{ A/m}^2$ 必要とされる。

また、鋼材面に電気防食を行った場合、無防食の場合に比較して付着生物が増加する。また、鋼材面の防食電流密度が $50 \sim 150 \text{ mA/m}^2$ で付着量が最大となり、防食電流密度がそれ以上になると減少するという報告がある。⁹⁾

(2) その他の技術

促進技術として、塗膜中に海藻類の育成促進材料を含有させた塗料が開発されつつある。また、光を適度に与えることにより増殖するとか、温度を適温にすることにより増殖するとか言われているが、特に進んだ研究は見当たらない。今後の研究課題といえる。

5.4 まとめ

海洋開発を進める上で、海洋生物の有効利用を計る一方、生物付着による被害も大きい。生物付着の実態調査は数多く行われているが、全貌を知るとは至難である。今後とも、付着防止、除去技術や付着促進技術の開発を続ける必要がある。

5.5 今後の課題

(1) 土木構造物への影響

土木構造物に対する影響は、構造物の構造形式や使用部材などによって異なるが、付着生物によって、波浪や潮風を受ける面積が増大し、設計波力よりも大きな波力を受けることがある。また、特殊なものとして、スリット型の消波堤のように生物の付着より、スリット間隔が変化し、本来の消波堤の機能に影響が生じるような構造物もある。

付着生物はその種類や付着状況によって付着厚さや付着強度が異なるが、設計許容範囲内の一定波浪以上になった場合に付着生物が脱落する場合には、構造物への影響は無い。

したがって、土木構造物に対する影響については、海域毎の付着生物の実態を調査する中で、力学的関係（波力と付着強度の関係）についても調査・研究する必要がある。

(2) 生物付着の防止技術

生物付着の防止技術としては、現在実用化されている技術として、防汚塗料があるが、防汚寿命が長いものでも数年程度のため、土木構造物のように長期間供用する構造物への適用は困難な現状にある。したがって、防汚寿命の長い塗料の開発または、水中で塗り替えが可能な防汚塗料の開発が望まれる。

(3) 付着除去技術

海洋構造物の生物付着の除去は、沿岸構造物で波浪が小さく、小規模の場合は人力（ダイバー）による除去が可能であるが、沖合構造物や大規模の除去が必要な場合は、機器による除去が必要となる。しかし、現状では、平坦な壁面あるいは管内面などを除去する機器は、電力関係で実用化されているが、土木構造物のように複雑な形状をした構造物の付着物の除去を行う機器は開発されていない。

今後、海洋構造物の付着生物の除去を大規模に行う必要がある場合は、複雑な形状でも除去できると同時に、除去時に海洋汚濁が生じないような回収装置を含めた除去・回収機器の開発が必要となる。

(4) 付着促進技術

海洋レジャー等を目的とした海洋構造物の場合は、目的に応じて有効な生物の付着促進が望まれる。

現在、付着促進技術として実用化されている方法は無い。海洋レジャー等が盛んになりつつあるため、付着を促進する塗料や電気化学的に鋼材表面を付着し易くする方法などが考えられ、一部で研究が行われはじめているが、今後より一層の実用化をめざした研究・開発が望まれる。

5.6 参考文献

- 1) 片脇, 西島: 消波構造物への生物の付着挙動に関する研究報告書 (第一報)
土木研究所資料第2867号 (1990)
- 2) 鋼管杭協会: 「防食鋼管杭の開発とその海洋暴露記録」 (その10, その11)
- 3) 伊藤, 梶原: 海洋科学技術センター報告 No.14 (1985)
- 4) 同上
- 5) E C O R 日本委員会: 「海洋構造物を取り巻く環境」 (1984)
- 6) 電気化学協会: 海洋生物汚損対策懇談会「無公害生物付着防止対策の最近の進歩」
予稿集 (1988.9)
- 7) 日本造船研究協会: 第97部会資料「超音波による船底防汚に関する研究」 (1968)
- 8) 鈴木, 三枝, 星野: 電気学会論文誌 C Vol.107, No.5 (1987)
- 9) 桑, 野村: 日本水産学会誌 Vol.54, No.3 (1988)

6. まとめ

(1) 開発目標

わが国の今後の海洋開発は、沿岸域から沖合へと展開していくものと考えられる。

しかし、ウォーターフロント、マリフロントといわれるように、海岸域の開発が土木技術にとって特に重要であると考えられる。

現在世界で沖合に建設されている本格的な海洋構造物は、鋼製の海底石油掘削生産用プラットフォームが主流であり、1970年代に入りコンクリート製重力式海底石油掘削生産貯蔵用プラットフォームが建造され始め、北海を中心に世界で約30基が実現している（日本では鋼製プラットフォームは3基あるが、コンクリート製は実績がない）。

日本では全く事情が異なり海洋構造物の大半は海岸域の構造物であり、消波構造物、人工島、横断道路、湾岸道路等、プラットフォームよりも大規模な多くのものがある。

このような公共性の高い構造物の場合100年間の防食を目標とする必要があろう。

(2) 鋼、金属系構造材料

鋼材においては、高度なライニング技術、金属系においてはステンレスおよびチタンを用いて完全なメンテナンスフリー化を可能とする耐食材料の開発が行われている。

(3) コンクリート系構造材料

コンクリート製海洋構造物は、外洋での厳しい環境下におかれ、維持管理も容易でないため、コンクリートの品質管理に厳しい基準を課し、設計、施工面において細心の配慮がなされる必要がある。

コンクリートは、安価で耐久性に優れた材料であるが、さらにコンクリートの耐久性を向上するための種々の開発が行われている。使用材料、設計施工方法の改良改善により海洋構造物の主要材料として今後ますますコンクリートが用いられていくものと予想される。

コンクリートは、本来メンテナンスフリーの材料であるため、定期的な点検、補修などのメンテナンスが必要な鋼材など他の材料と比べて、その耐久性の考え方はおのずから異なってくる。近年、港湾や海岸部でコンクリート構造物の早期劣化が発生し、点検、補修技術の開発が行われている。これらの早期劣化は、欠陥のある材料や良好でない施工法が用いられたためであり、現在ではコンクリート構造物はメンテナンスフリーで設計寿命が全うできるような配慮がされている。

海洋環境におけるコンクリートの劣化の最大の要因は、海水の侵入による内部鋼材（鉄筋、PC緊張材）の腐食であり、本文でも述べたような種々の対策が講じられている。さらに、鋼材に変わる新素材を用いたコンクリートの開発が実用化されれば、コンクリートの耐久性は飛躍的に向上するものと期待される。

将来、わが国では欧米のコンクリートプラットフォームに代表されるような海洋コンクリートの技術を、実際の施工を通じて修得していく必要がある。さらに、耐震設計技術を考慮した、わが国のわが国独自の海洋コンクリート技術が発展していくことを期待したい。

(4) ゴム、高分子系構造材料

ゴム、高分子材料（プラスチック、アセチル木材等）を海洋構造物に構造材として利用する場合、その固有特性を有効に利用することが必要である。例えば、ゴムの場合には、弾性を利用することによる構造物継ぎ目の止水や、また構造物に対する緩衝等に有効である。プラスチックは素材単体でも使用できるが、軽く、使用目的に対して幅広い対応ができるため、補強材と複合化して軽量の構造材を作るのに有効である。また、高分子アセチル木材は、その寸法安定性、耐腐食性、加工性が良好で、加えて軽量、肌合いのよさから、今後各種の強度構造材との複合新構造材を作るのに有効であろう。

従来の土木構造材としての鉄、セメントに無い特性を持つゴム、高分子材料を使用する場合、注意しなければならないことは次のことである。

- ① ゴム、高分子を海洋構造物に使用する場合、耐オゾン保護と分子間の連鎖を長く保てるため、設計上張力のかからない状態で使用できる様に配置する。
- ② 構造物に於ける要求特性を、出来る限り先行事例を調べて明らかにする。ゴム、高分子には配合剤、添加剤等が使用されていることが多い。そのため、物性に大きい幅がとれる場合もあるので、この性質を有効に使う必要がある。このため、要求特性に対応する材料設計を行う。
- ③ ゴム、高分子、高分子アセチル化木材等を、鉄、セメント等の構造物に単一材、または複合材として使用する場合、鉄、セメント等の構造物との接合設計に注意する。特に完全固定接合の場合は、構造物の温度に対する伸縮との相関性を加味した設計を行う必要がある。

ゴム、高分子系単一材、複合材を海洋構造物に使用する時、信頼性と安全率は大切な問題である。鉄筋コンクリートは1868年に開発され、すでに 120年の実績を持っている。しかるにゴム、高分子の単一材、複合材の実績は、ゴム支承が 1889年から使用され約 100年、その他はまだ約30年程度である。したがって多くの場合、促進試験による各種物性値の経年予測が行われている。これら促進試験の多くは、連鎖構造を持つゴム、高分子について起こる幾つかの化学反応の集積としてとらえ、反応速度の温度変化から計算される見掛けの活性化エネルギーを求め、寿命の推定が行われている。（Arrhenius のプロット）しかし、この予測方法では、インプットする値が幅をもつ平均値でありそれらを結ぶ曲線の外挿上の点も不確かさが残る。したがって、安全率は出来る限り促進試験の推定寿命より安全側にとるとよい。

(5) 繊維系構造材料

海洋構造物用に適用される繊維系材料として、次の 6 種を取り上げた。

複合材料用強化繊維、FRC用強化繊維、膜材料用強化繊維（および基布）、係留ロープ、ジオテキスタイル、人工海草繊維

ほとんどの繊維材料がこれまでに使用実績が少なく、実用化までには多くの研究課題を残している。それだけに、将来に大きな期待がかけられる新しい材料と言うことが出来る。

(6) 有機系被覆防食材料

有機系被覆の方法は、塗布型のものでシート貼型のものがある。海中部と干満部と大気部とでは要求性能が異なり、別個の被覆材が用いられる。海洋構造物の有機被覆材の塗替までの寿命は、10～15年程度である。

(7) 金属、無機系被覆防食材料

ステンレスクラッド、チタンクラッドの防食材料がある。

これらの寿命は、現在まで40年以上と見込まれている。

(8) 電気化学的防食

電気防食は、わが国において昭和30年代より土木鋼構造物に適用され、多大な成果を上げている。特に海洋鋼構造物は今後大型化され、長大橋、海上空港や人工島など恒久的な構造物が多くなるため、海中部以深の鋼材にはメンテナンスをほとんど必要としないアルミニウム合金陽極等を用いた電気防食の適用が不可欠になるであろう。コンクリート構造物の鉄筋の防食にも、電気防食が有効なことが認められているので、今後この分野での研究開発が進められ実用化されることが望まれる。

(9) 鋼構造物の維持管理

現在の防食材料を用いた場合、供用期間中に再防食の作業が必要である。

このための精密な診断・補修工法の開発が行われている。

(10) コンクリート構造物の維持管理

良好な管理のもとに建設されたコンクリート構造物は、半永久的な耐用年数を持っており、構造物の所要の機能を維持していくための検査は原則的に必要とせず、コンクリート構造物はメンテナンスフリーの立場で設計されている。

劣化、損傷が生じた場合に、できるだけ早くこれを発見し、補修する技術（点検、補修技術）については、最近になって開発が開始されたのが現状である。コンクリート構造物の維持管理技術は、研究の緒についたばかりである。

海洋コンクリート構造物の点検、調査では、海象条件等による制約が厳しく、原則として目視観察にたよっている。

陸上部のコンクリート構造物の耐力診断等で用いられている非破壊検査法を、今後、海洋構造物の点検技術として応用していく場合、この海象条件等の制約を十分考慮しなければならない。

(11) 生物付着

海洋開発を進める上で、海洋生物の有効利用を計る一方、生物付着による影響も大きい。生物付着の実態調査は数多く行われているが、全貌を知ることは至難であり、また土木構造物と直接関連する技術資料は未整備である。今後とも、付着防止、除去技術や付着促進技術の開発を続ける必要がある。

7. 今後の課題と提案

7.1 鋼，金属系材料に関する課題と提案

- ① 鋼材用に用いる高耐久性ライニング材料と適用技術の開発
- ② 高耐食性金属材料の開発と施工技術の改良
- ③ 耐久性に優れ，美観性を考慮した金属材料の開発

7.2 コンクリート系材料に関する課題と提案

- ① 自然界の中で不活性な硬化体の開発
- ② できるだけ収縮せず，ひびわれを生じない材料の開発
- ③ できるだけ密度が高く，ボイドの少ない材料の開発
- ④ 引張強度と圧縮強度の差が小さい材料の開発
- ⑤ 施工に左右されない材料の開発

7.3 ゴム，高分子材料に関する課題と提案

(1) 現行の問題点

- ① フィールドにおける，過去の使用材に対して相関出来る材料の評価システムが取れていなかったもので，安全率を高くとらねばならない。
- ② フィールドにおける，要求特性と材料特性のコーディネートがシステム化されていないので，現在の段階では信頼性に不安を残している。
- ③ 構造用ゴム，高分子が広く使い始められているので，先行事例の少ない新材料として寿命の推定に不安を持っている。
- ④ ゴム，高分子材料は，鉄，セメントに比べて価格が高いため，更に要求特性に合わせてコスト，性能の適性化を計る必要が有る。

(2) 研究課題

- ① 急を要するもの
 - a) 国内外の先行事例データ調査
 - b) 分析，欠落データの補充実験
 - c) 既存ゴム，高分子材料の利用指針案作り
- ② 中期的課題
 - a) 境界層の複合化技術（構造用強度締結，耐止水）
 - b) 寿命予測システム
 - c) 補修技術の認定

(3) 提案

- ① ゴム、高分子材料を構造材に使用する場合、ゴム、高分子の専門技術の分野と、土木構造物の技術分野は高度の技術を有しているが、この2つの異なる技術を結びつける境界層の技術分野が欠落している。構造材料として長所を伸ばし短所を少なくするためには、これら境界層の技術の向上を計る必要がある。

提案例：テクノロジーコーディネーター、システムによる研究会、委員会、等の活用

- ② 評価、設計技術については、提案例を活用し寿命予測データシステムを作る努力をする必要がある。
- ③ 耐久性については、境界層の技術による複合性能の向上、および寿命予測が可能となれば、適当な維持管理のもとではゴム支承 100年とまでは言わないが、60年以上は安心して使用できるようになるであろう。
- ④ 海洋構造物等の、以下のような部位には、ゴム、高分子（プラスチック）、高分子アセチル木材等が有効な効果を期待出来るものと思われる。

- | | |
|---------------------|---------------|
| a) ケーソン継ぎ目の止水、緩衝 | (外洋対応) |
| b) 大水深シールドトンネル止水、緩衝 | (高水圧、大伸縮) |
| c) 浮栈橋の本体、係留ワイヤー | (景観、防食) |
| d) プレハブ式軽量橋梁 | (軽量、防食、施工合理化) |
| e) 消波構造体 | (耐久性、加工性) |

材料の複合化による新複合材の開発が進めば、さらに厳しい要求にも対応が可能になる。

総合的には、ゴム、高分子材を利用する場合、2つのポイントが上げられる。

- a) 機能的に、他に代替えがない。
- b) 加工、施工、性能、維持管理等を含めて、トータルコストが安くなる。

このような時は、大きなメリットが期待できる。

- ⑤ 設計、品質の基準案を先行実績を基に作り、体系化する必要がある。この場合、異種技術接着の役目をはたす人材の活用も、ゴム、高分子については有効であろう。

7.4 繊維系材料に関する課題と提案

(1) 複合材料用強化繊維

- ① 比強度、比弾性率の増強
- ② 耐侯性の向上
- ③ 化学的不活性化（耐久性の向上）
- ④ 電気絶縁性の付与
- ⑤ 生物付着防止技術の開発
- ⑥ コスト低減（材料及び成形）
- ⑦ 耐熱性（耐火性）の向上

(2) 膜材料用強化繊維および基布

- ① 耐熱性（耐火性）の向上
- ② 機械的特性の向上
- ③ 耐久性の向上
- ④ 耐海水性の向上

(3) 係留ロープ

- ① 耐侯性の向上
- ② 生物付着防止技術の開発
- ③ 耐久性（耐疲労性、耐摩耗性）の向上

(4) F R C用強化繊維

- ① 高弾性率合成繊維の開発
- ② クリープ性の改良
- ③ 耐熱性（耐火性）の向上
- ④ コンクリート分散性の向上
- ⑤ F R Cの評価試験法の確立
- ⑥ F R C施工実績の蓄積
- ⑦ コストの低減

(5) ジオテキスタイル

- ① 評価試験法の確立
- ② ジオテキスタイルの普及（当該官庁等の標準仕様書，設計指針，通達等への記載。）
- ③ 耐久性のデータ蓄積と改良

(6) 人工海草

- ① 基礎研究の継続による基本データの蓄積

7.5 有機系被覆材料に関する課題と提案

(1) 現行の問題点

- ① 寿命が明確でない。
- ② 材料間の性能比較が明確でない。

(2) 研究課題

- ① 寿命予測方法の確立のための研究
- ② 材料の比較検討試験
- ③ ①、②等により基準を作る。

(3) 提案

- ① 材料間の長短所を明確にする。
- ② 使用条件を明らかにして，評価判定基準を確立する。
- ③ 材料品質と施工方法の基準を設けて品質を安定させる。
- ④ 次のようなメリットがある。
 - a) 施工が容易で工場－現場を問わず施工できる。
 - b) 構造物の形状や大きさにかかわらず施工できる。
 - c) 供用しながらのメンテナンスが可能である。
 - d) 美観やその他の機能も付与できる。

7.6 金属無機系被覆に関する課題と提案

- ① 薄くて加工性に優れた金属系クラッド材とクラッド施工技術の開発
- ② 無機パネル材料の開発

7.7 電気防食に関する課題と提案

- ① 腐食疲労を受ける場合の電気防食条件

海水中の金属の腐食疲労について、電気防食が有効であるといわれているが、電気防食を適用する場合の電流密度などの電気防食条件が必ずしも明確になっていない。

- ② サンドエロージョンに対する電気防食の効果

実験室的には、流速6m/sec程度までに起こるサンドエロージョンに対しては、電気防食が有効な手段であることが認められているが、流速と砂の量との関係や防食電流密度などの電気防食条件が明確でない。

- ③ 鉄筋コンクリート中の鉄筋の電気防食

近年研究が盛んになり、今後耐久性および経済性に優れた電気防食システムの開発が望まれる。

7.8 鋼構造物の維持管理技術に関する課題と提案

- ① ライフサイクルに関する基本的考え方の確立
- ② 非破壊検査技術の高精度化と省力技術
- ③ 水中補修材料と施工技術の確立

7.9 コンクリート構造物の維持管理に関する課題と提案

- ① 維持管理の基本的考え方の確立
- ② 補修の要否の判定手法の確立
- ③ 点検調査手法の開発
- ④ ダイバーによる海中検査、海中作業の省力化
- ⑤ 海中での観察、検査、修理作業の無人化
- ⑥ 水中検査技術の改良

7.10 生物付着に関する課題と提案

① 土木構造物への影響について

土木構造物に対する影響は、構造物の構造形式や使用部材などによって異なるが、付着生物によって、波浪や潮風を受ける面積が増大し、設計波力よりも大きな波力を受けることがある。また、特殊なものとして、スリット型の消波堤のように生物の付着より、スリット間隔が変化し、本来の消波堤の機能に影響が生じるような構造物もある。

付着生物はその種類や付着状況によって付着厚さや付着強度が異なるが、設計許容範囲内の一定波浪以上になった場合に付着生物が脱落する場合には、構造物への影響は無い。

したがって、土木構造物に対する影響については、海域毎の付着生物の実態を調査する中で、力学的関係（波力と付着強度の関係）についても調査・研究する必要がある。

② 生物付着の防止技術について

生物付着の防止技術としては、現在実用化されている技術として、防汚塗料があるが、防汚寿命が長いものでも数年程度のため、土木構造物のように長期間供用する構造物への適用は困難な現状にある。したがって、防汚寿命の長い塗料の開発または、水中で塗り替えが可能な防汚塗料の開発が望まれる。

③ 付着除去技術

海洋構造物の生物付着の除去は、沿岸構造物で波浪が小さく、小規模の場合は人力（ダイバー）による除去が可能であるが、沖合構造物や大規模の除去が必要な場合は、機器による除去が必要となる。しかし、現状では、平坦な壁面あるいは管内面などを除去する機器は、電力関係で実用化されているが、土木構造物のように複雑な形状をした構造物の付着物の除去を行う機器は開発されていない。

今後、海洋構造物の付着生物の除去を大規模に行う必要がある場合は、複雑な形状でも除去できると同時に、除去時に海洋汚濁が生じないような回収装置を含めた除去・回収機器の開発が必要となる。

④ 付着促進技術

海洋レジャー等を目的とした海洋構造物の場合は、目的に応じて有効な生物の付着促進が望まれる。

現在、付着促進技術として実用化されている方法は無い。海洋レジャー等が盛んになりつつあるため、付着を促進する塗料や電気化学的に鋼材表面を付着し易くする方法などが考えられ、一部で研究が行われはじめているが、今後より一層の実用化をめざした研究・開発が望まれる。

あとがき

総プロ「海洋利用空間の創成・保全技術の開発」においては、海洋構造物にふさわしい材料の開発、これまでに注目されることが少なかった付着生物に関する調査、維持管理技術の確立が重要な課題となっており、これらに関する研究を遂行している。

本報告書は、保全技術を確立するための要素技術の開発を行う上で極めて有益な資料となった。

本報告書の作成にあたっては(財)土木研究センター内に作業グループを設置し様々な御協力を頂いた。関係された方々の御氏名を下記に示し、厚く謝意を表する次第である。

氏 名	所 属 ・ 役 職 (当時)
鴻巣 信	日本化学繊維協会 (東レ(株) 研究開発企画部 主席部員)
小林 辰夫	横浜ゴム(株) 顧問
綱脇 清和	日本化学繊維協会 (帝人(株) 繊維技術企画統轄室 主席部員)
土居 一幸	日鉄防蝕(株) エンジニアリング事業部 技術開発部長
戸村 寿一	中川防蝕工業(株) 技術開発部長
原田 宏	鹿島建設(株) 海洋開発室長
福島 稔	日本ペイント(株)重防食塗料部 技術担当部長
片脇 清	建設省土木研究所 化学研究室 室長
村井 禎美	建設省土木研究所 海岸研究室 研究員
根本 正幸	建設省土木研究所 化学研究室 部外研究員
田中 柳之助	(財)土木研究センター 専務理事
森 芳徳	(財)土木研究センター 研究開発部長

海洋構造物材料・維持管理に
関するフィージビリティス
タディー報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 2929 号
1991 年 2 月
片脇 清，佐々木 徹
根本 正幸

キーワード：海洋構造物，材料，維持管理，フィージビリティスタディー

要 旨

海域制御構造物などの海洋構造物に用いられる構造材料およびその維持管理技術について，新材料や非破壊検査等を含めた現状の技術動向と研究課題を調査し，とりまとめたものである。



郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切
手をはって
下さい

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所
化学研究室
御中

No. 001

No. 001

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2929号

「海洋構造物材料・維持管理に関する
フィージビリティースタディー報告書」

部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印