

2.3 土木材料

赤塚雄三*
善一章**

1. 海洋開発における土木材料の役割

海洋開発において、土木材料の果たす役割と問題点は開発の対象となる資源ないし、開発手段としての構造物の機能や施工方法によっても、かなり相違するものと思われる。

なんらかの形で土木構造物の築造を必要とする開発対象としては、つぎのような各種の資源が考えられる。すなわち

- ① 水産資源：海草類や定着性魚貝類の養殖
 - ② 鉱物資源：海底の油田や鉱山の開発
 - ③ 土地資源：石油等の危険物の大量貯蔵場所、および海上都市とか洋上空港としての海底面や海面の平面的な利用、また生産性の乏しい海面を埋立てて生産性の高い陸地への変換をはかるといような土地利用
 - ④ 観光資源：保養や娯楽の対象としての海底景観の利用
 - ⑤ エネルギー資源：潮流や波浪のエネルギーの利用
- このような資源の開発には、自然環境や開発手段の実用性などの点から多くの制約が加わり、開発対象もみずから限定されてくる。

たとえば、養殖漁業では従来は水深 10 m 程度以下の浅海を対象として、海草や貝類の養殖が行われてきたが、将来は 30~50 m 程度の水深も対象となるものと思われ、すでに試験的なコンクリートブロックによる築礁も行なわれている。しかし、50 m 以上の水深では、これらの棲息の環境条件や採取技術上の難点が多くなるものようである。いずれにしても、この種の水産資源の開発に必要な土木構造物としては、築礁を対象とするコンクリートブロックや粗石の捨石堤等が主であって、現時点では土木材料としての問題点は少ないと考えてよ

* 正会員 工博 運輸省第二港湾建設局小名浜港工事事務所長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所主任研究官

いであろう。

一方、土地資源や観光資源を対象とする場合には、必要な構造物の形状や機能が多様であって即断しがたいが、たとえば水深 20 m 程度が構造物設置の経済的な限界水深の目安と考えられる。これは、この種の構造物の施工には潜水夫による水中作業が必須であり、その能率的な作業を期待しえる限界が表-1のように、水深 20 m 程度であること、水中貯油槽や護岸あるいは水中ホテル等の構造物を想定する場合、その構造上の所要強度は水深に応じて急激に増大し、大水深の下では経済性を計りたいこと等の点から推定したものである。そこで、このような限界水深を念頭において、想定される構造物施工上の難易を検討するといずれにも在来の港湾構造物の施工技術を適用可能であり、施工上の困難は少なく、構造材料の海水の作用に対する耐久性が問題となる程度である。

表-1 許容潜水作業時間*

潜水深度 (m)	潜水許容時間 (min)	浮上所要時間 (min)	1日あたり潜水許容時間 (min)
~20	~165	~52	~270
20~30	210~105	64~94	240~170
30~40	120~80	103~156	158~116
40~50	95~60	154~180	110~86
50~60	75~50	282~299	75~70
60~70	65~40	302~340	65~60
70~80	50~35	~341	~50
80~90	40~30	~334	~40

注：* 高気圧障害防止規則(昭 36.3.22)より抜す。いずれの場合にも潜水業務開始および潜水業務終了後にそれぞれ 150 min および 60 min の圧力減少時間を設けることが義務づけられている。

また、潮流や、波浪のエネルギー資源を対象とする場合、電力への転換がもっとも可能性が大きいと考えられるが、経済的な発電単位が巨大となり、原子力発電が実用化し、さらに、湾内や内海の汚染が公害の焦点となっているわが国では、たとえば潮流発電のようなエネルギー転換の実用性はかなり疑わしい。仮にその実用化を計る場合に必要土木構造物としては、水深数十mの巨大な海中ダム等が考えられ、施工技術の開発に新しい分野を提供するものと思われる。

現在の時点で海洋開発の最大の焦点は鉱物資源にあると思われる、たとえば、海底油田の開発計画等は実施の段階にまで進んでいると考えてよい。この種の資源を対象とする場合には、水産、土地、観光等の資源の場合と異なり、実用的な限界水深も明瞭でなく、100~200 m の水深も十分な可能性をもち、また、開発手段としても、洋上ボーリング、人工島築造、海底坑道、潜水作業船などが提案されている。

従来の洋上ボーリングは比較的水深の浅い海底を対象としたもので、海中にやぐらを建てて足場を設けるか、一種のプラットフォーム船を回航して支柱を下ろしてプラットフォーム部分を海面上に押し上げて足場とする方法

等である。このような方法の基本的な考え方はあまり変化はないにしても、水深の大きい外洋を対象とする場合には大幅な構造的な改善が必要であり、鋼材が主たる構造材料となろう。

人工島築造による立坑掘削も、水深の比較的浅い海底炭田の開発には従来より行なわれており、立坑の深さも数百mに達した例もあり、最も実際の利用価値の大きい施工技術の一つと考えられる。もちろん、波浪が激しく水深の大きい外洋では土砂の巻出しによる人工島築造はほとんど不可能であって、たとえば、本四連絡橋計画で考えられているような巨大なドーム式ケーソンの沈設というような、かなり思い切った改善が必要なことは論をまたず、構造材料としては鋼材とコンクリートが主役を果たすことになる。この場合、部分的にはコンクリートの水中施工は避けたいものと見られ、潜水夫の水中作業を必要としないで、確実な品質のコンクリートを施工する方法の開発も問題の一つといえよう。

海底坑道の掘削には、青函連絡海底トンネルのために開発されている施工技術が、そのまま応用されることに疑問の余地がなく、大きな水頭をもつ湧水の防止とその先行探知が最も重要である。掘削後の坑道の巻立てにコンクリートが使用されることに異論はないが、経済的であり有効な止水注入材料や、防水材料の果たす役割はきわめて大きい。これは海底坑道の場合だけでなく、先に述べた各種の構造物の場合にもほぼ共通した問題である。

以上で概観したように、海洋開発の対象とする資源や開発手段としての土木構造物は現時点で想定するだけでも、かなり多様であり、今後の技術の発展に応じて、さらに新しい構造様式も加わるものと思われる。構造材料としては、主要材料としてのコンクリートや、鋼材のほか、止水注入材料や防水材料等の役割も無視しがたい。これらの材料の問題点は、構造物の機能や施工方法によっても異なるが、鋼材についてはその海水による腐食と防食法、コンクリートについては大水深下における施工方法と、海水の作用に対する耐久性が、最も重要と思われる。そこで、以下にこれらの諸点に関する技術水準の現状と今後の課題を紹介する。

2. 海洋における鋼材の腐食機構

従来、港湾鋼構造物にとって腐食の激しいところは潮位間(H.W.L.~L.W.L.)とされてきたが、入念な現地調査の結果、港湾鋼構造物の潮位間における腐食量は非常に小さいことが確かめられた。このような違いは何によるのかといえ、これまでは潮位間に暴露した鋼材片の腐食量が鋼構造物の潮位間の腐食量に等しいと考えてきたためである。しかしながら鋼構造物としての鋼材は

長尺物であるから、鋼材片と異なって接する環境が潮位間などの一つに限定されるのではなく、海水、海底泥層または不飽和砂層、飽和泥層などの異種環境を貫通した状態におかれる。ただし、ここでいう異種環境とは、鋼材表面への酸素供給速度が異なる環境の意味である。このとき、鋼材の電位は鋼材面への酸素の供給速度が低下するにつれて卑となるため、長尺鋼材が異種環境を貫通することはちょうど電位の異なる鋼材片を電気的に接続したことに相当する。したがって、相対的に酸素の供給速度が速い環境に接する鋼材部分はカソード(陰極)^{a)}、酸素の供給速度の遅い環境に接する鋼材部分はアノード(陽極)^{a)}となる腐食電池が発生する。このような腐食電池をマクロ・セルといい、マクロ・セルによる腐食をマクロ腐食という。これに対して、単一環境中鋼材の腐食をマイクロ腐食という。先に述べた潮位間の鋼材は常にカソードとなるために(海底泥層中鋼材電位より100mV位貴となる)、アノードとなる鋼材からマクロ腐食電流が流入してちょうど電気防食された恰好となる。このとき、通常カソード表面積(A_c)はアノード表面積(A_a)にくらべてかなり小さいので、流入電流密度が大きくなり十分防食されるため腐食量は小さくなる。

これに対して、 A_c/A_a が小さくなるほどアノードの腐食量は小さくなり、 $A_c/A_a \ll 1$ ではマクロ腐食は無視できるようになる。したがって、現地で長尺鋼材を使用する際には、まず使用条件下におけるマクロ腐食とマイクロ腐食との関係を明確にし、腐食に対して最も効果的な鋼材の使用条件を知ることが大初である。

ただし、海水面上(H.W.L.)または地面上では、マクロ腐食電流の到達がむずかしくなるので、鋼構造物のH.W.L.上または地面上の腐食量はマイクロ腐食量に等しい。

3. 鋼材の腐食調査の必要性

鋼構造物についての腐食調査は、構造物自体の腐食量が把握できるため重要である。特に使用前の鋼材の肉厚を測定しておけば、構造物を試験材とした腐食調査が実施できる。しかしこの場合、精度よく現有肉厚を測定する方法が問題である。港湾では鋼矢板(平端面)のみに適用できる厚み計(水中用)で、矢板式けい船施設の肉厚測定が行なわれてきたが、この厚み計による肉厚は実際の値よりかなり薄いことが最近確かめられた。たとえ

a) 電気化学反応を説明する符号はまぎらわしいので、整理すると下表のようになる。

区分	① 電池(放電)		② 電池(充電) 電解		③ 腐食, 防食	
	陽極	カソード	陽極	アノード	陰極	カソード
正極	陽極	カソード	陽極	アノード	陰極	カソード
負極	陰極	アノード	陰極	カソード	陽極	アノード

ば 30 年以上経過した無防食の鋼矢板岸壁の海水中の現有肉厚を磁気不飽和型厚み計で測定したところ 10 mm 程度であったが、同一箇所から切取った鋼矢板片の現有肉厚をマイクロメーター（両球型）または重量から求めてみると約 20 mm あった。この場合の鋼矢板のタイプはラルゼン V 型だから、初期肉厚は 20.5 mm である。したがって、腐食量は前者では 0.3 mm/yr を越えるが後者では 0.02 mm/yr 以下で、両者間には 1 けたの開きがある。これまでは切取りによる破壊調査がほとんど行われなかったために厚み計による非破壊調査結果が、一般に港湾鋼構造物の腐食量と考えられている。このため、港湾鋼構造物の腐食調査法を検討した。

この結果、厚み計としては超音波式厚み計（水中用）が調査に適することがわかった。これは、従来の厚み計にくらべて精度のよいことのほか、探触子（被測定鋼材面にあてる部分）が小さい（外径 50 mm）ため、鋼矢板に限らず、H 杭や鋼管杭などにも適用できる。しかしながら、これは港湾用として開発されたものであるから、厚み計の本体と、探触子を結ぶ高周波ケーブルの長さは 20 m であり、また測定に要する水中作業はすべて潜水夫が行なう。

しかし、海洋開発のような大水深下では潜水夫による水中作業は困難となるので、さらに大水深下における調査法を検討する必要がある。このとき、肉厚測定法とあわせて水中観察法および腐食環境調査法の検討も望まれる。参考として大水深下の環境調査例を図一に示す。

厚み計による肉厚測定は、いわば事後診断であるが、構造物建設前に腐食量を推定するものに腐食計がある。これは厚み計と全く異なって設計の段階で腐食量を推定して腐食対策の選定に貢献するものである。野外用腐食計としては、モスコフ近辺の埋設ガス管用として開発さ

れたものと、粘土中鋼材について検討された NGI コロージョン・サウンドがある。前者は適用深度が -2 m までであり、後者は打込みができないタイプである。さらに両者の最大の欠陥はマイクロ腐食量のみを推定することである。これに対して、マイクロ腐食量とマクロ腐食量を推定する港湾用腐食計の実用性が目下検討されているが、これまでの適用深度は -20 m までである。海洋開発ではさらに大水深下で適用できる推定法の検討が望ましい。

4. 鋼材の腐食対策

腐食対策を選定するには、使用条件下における鋼材の腐食量をできるだけ正確に知ることがまず重要である。このためには、先述の 1.、2. の検討が必要となる。腐食量がわかれば、設計寿命、経済性などからそれぞれの鋼構造物に適した腐食対策がとりうる。

腐食しるによる方法は、建設後何の手間もかからないから簡便であるが、腐食量を正確に把握することが特に必要である。また、大水深下では適当な長さの鋼材を現地で溶接して建込むことが考えられるので、鋼材の腐食に悪影響をおよぼさない溶接材料の使用が必要である。特に H.W.L. 付近（スプラッシュ・ゾーン）は腐食が激しいので耐食鋼の使用またはセメント硬化材による被覆などの他の対策を併用することも必要である。

耐食鋼を使用する方法も、普通鋼の腐食しるを利用する方法と同じく、構造物建設後の手間が不必要なので簡便である。特にスプラッシュ・ゾーンで腐食量が小さい耐食鋼がある。しかし耐食鋼を使用する場合も溶接が避けられないので耐食性のある溶接材料が必要である。

別の対策として電気防食法があるが、これの適用は、M.W.L. 以下に限られる。したがって M.W.L. 上に対しては、他の対策の併用が必要である。電気防食法を適用するとき最も大切なことは、施工後の管理を十分に行なうことである。このほか、大水深下での施工技术および防食効果に関する検討が望まれる。

もう一つの対策として、被覆材による方法がある。ターール・エナメルを含浸させて 2 回以上巻きつける塗覆装が海水浸漬試験では良好で、5 年経過してもフジツボが鋼材面に達しなかった例があるが、適用は鋼管に限られる。

一方、セメント硬化体が被覆材の場合セメント硬化体中、鋼材の電位は図二に示すように常に他の環境中鋼材の電位よりも貴となる。このため、セメント硬化体中鋼材はカソードとなり、流入するマクロ腐食電流によってアルカリの流出が抑制されるため、長く不動態域に保たれる利点がある。

図一 大水深下の環境調査例

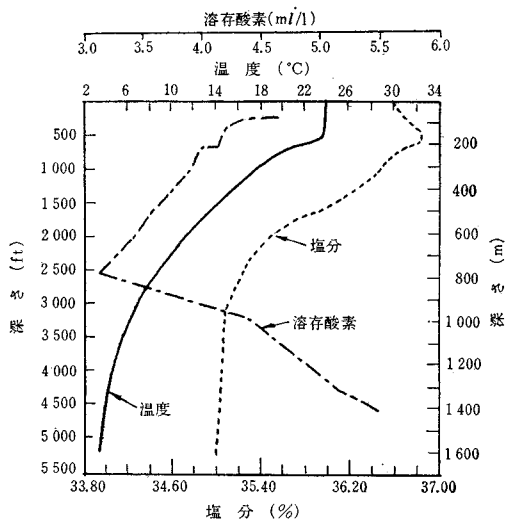
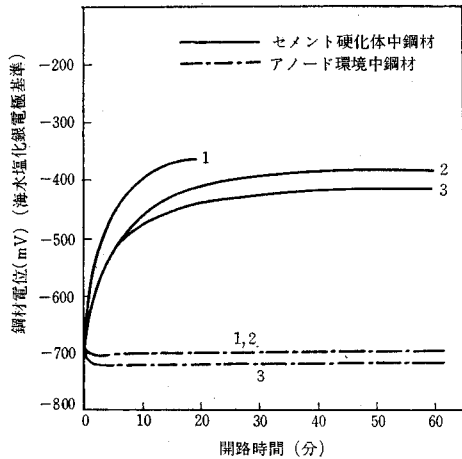


図-2 2層中鋼材の電位差



No.	カソード環境	アノード環境
1	セメント硬化体 (練り水：水道水)	海 水
2	セメント硬化体 (練り水：水道水)	砂層 (海水飽和)
3	セメント硬化体 (練り水：海水)	砂層 (海水飽和)

このときアノードとなる他の環境中、鋼材の腐食量は小さく、特に $A_c/A_a \leq 1$ では無視しうる。

5. コンクリートの施工方法に関する課題

コンクリートの水中施工はかなり以前から行なわれ、その施工方法としても、浅い水面に直接打込む方法、袋詰めコンクリート、底開きバケットなどを用いる方法、トレミーを用いる方法、コンクリートポンプを用いる方法、プレパックドコンクリート等があげられる。しかしこれらの方法による施工実績の大部分は水深20m以下を対象としたものであり、施工の確実さは潜水夫やボーリングによってある程度確認でき、さらに構造自体も、マッシュで大きな荷重を受けることのないものが多かった。

しかし、海洋開発を目的とする構造物に水中コンクリートの施工を必要とする場合には、水深に相応する水圧や巨大な上部工の重量が荷重として作用し、潜水夫やボーリングによる品質確認も困難であるというような厳しい条件が課せられることであろう。目的は異なるが本四連絡橋橋脚の下部構造に用いられるコンクリートは、ほぼこれに近い条件が課せられるものと予想されている。このようなコンクリートの水中施工には、プレパックドコンクリートが最も適していることは大方の認めるところであるが、従来の研究成果や施工実績だけでは処理していく点も数多く、たとえば、上記の例では鉄道建設公団や建設省による大規模な注入実験等によって問題点の

解明が進められているのが現状であり、今後の技術開発が必要と思われる(別項「本四架橋の問題」欄参照)。

以上では水中施工を前提とするコンクリートについて述べたが、水中施工はできるだけ避けるのが望ましいことには議論の余地がなく、水中施工を要しない構造様式と施工方法を開発するのも一つの方法である。たとえば港湾工事では1500トン級の大型鉄筋コンクリートケーソンは随所で用いられているが、ケーソンヤードの拡大によってさらに大型化を計ることができ、また、PC杭の溶接継手のような継手構造をケーソン全断面に応用することによって、中空橋脚状の構造物を大水深の現場で急速施工することも可能であり、この種の構造様式と施工技術の開発は研究に値する課題といえよう。

6. 海洋におけるコンクリートの劣化機構と問題点

海洋環境におかれたコンクリートは、気象作用、海水の化学作用、波浪等の機械的な作用等の影響を受けて次第に劣化し、その速度は陸上におかれたコンクリートに比べてはるかに著しい。しかし、劣化に関してより決定的な影響をおよぼす要因は、コンクリート材料の品質と設計および施工の良否であって、良質の材料を用い設計が適切で、かつ入念に施工されたコンクリートは同一環境下におかれた他の土木材料、たとえば、鋼材、木材、合成樹脂等と比較するとその耐久性は格段にすぐれ、半永久的な構造物とみなすこともできる。実際にはコンクリート構造物については、良質の材料を選び、適切に設計することは容易であっても、施工の完全さを期待することは概して困難であり、程度の差はあっても局部的な欠陥があるのが普通であって、このような欠陥が上記の諸作用の影響と結びついて劣化が予想以上に進行し、構造物が比較的短期間に使用不能におちいる例が少なくない。

コンクリート劣化の直接的な原因となる各種の作用は相互に有機的に関連して働くもので、これによる劣化も当初の侵食から部分的破損を経て部材の全面的破壊に至るまで幾つもの段階を経て進行する。このため、上述の気象作用、海水の化学作用および波浪等の機械的作用を含めて海水の作用と総称するのが普通であり、また、コンクリートの劣化に関して個々の要因の影響が定性的にはかなりの程度まで解明されてはいるが、定量的にはいまだに明らかにされていない点が多いのが実情である。

気象作用の影響は、陸上のコンクリートの場合とほぼ同様であるが、海中のコンクリートでは潮の干満差の影響や海水のしぶきないし激しい潮風を受ける部分では、乾湿の変化がより厳しく作用する。また、コンクリート

中の水分の凍結融解作用のくり返しにしても、海水中の塩分の影響もあって、淡水の場合に比較してはるかに厳しく作用することが知られている。

海水の化学作用に関しては、海水中の硫酸塩の作用とセメントの水和によって生じた遊離石灰の溶出が主たるものとされている。前者に関しては、従来海水中の硫酸マグネシウムがセメント中の石灰とアルミナと化合して結晶水を有する複塩、カルシウム・サルホアルミネート ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; 通称セメントバチルス) を形成し、この結晶生成時の容積膨張がコンクリートの組織を破壊するという説が行なわれていた。しかし近年セメントペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の濃度によって生成したカルシウムサルホアルミネートにも容積膨張をとまう型とむしろ強度の増加をもたらす型のあることが明らかになり、上記の在来の説の矛盾を解く新しい仮説が提案されている段階にある。いずれにしても、海水中の硫酸塩が特に有害に作用するのはセメント中のアルミン酸三石灰 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) であって、この C_3A 成分の少ないセメントが海水の作用に対して、耐久的なコンクリートをつくるのに適していることは、実験的にも供用実績の点からも確かめられている。セメントの水和によって生ずる遊離石灰は、元来それ自体でも海水に対して可溶性であるが、海水中の塩化マグネシウムはこれと作用して水に溶け易い塩化カルシウムを生成して海水中への溶出を促進し、これによってコンクリートが次第に多孔質になることが知られている。この種の作用に対しては遊離石灰の少ないセメントを用いて水密的なコンクリートをつくるのがその抵抗性を増す要点であり、このような意味で、高炉セメントやフライアッシュセメントは、海水の作用を受けるコンクリートに適しているといわれる。

外洋に面した構造物は波のもつ巨大なエネルギーのほか、流木や流水による衝撃や磨耗、海底の砂礫の移動による磨耗等の作用を受け、なかでも荒天の際に砕波を生ずるときの波の圧力と衝撃はすさまじく、構造的な欠陥や上述のような気象作用や化学作用によって局部的に生じた欠陥も、この種の作用で拡大されて、構造物全体としての劣化が一段と進行するのが普通である。

表-2 鉄筋コンクリートのひびわれ幅と鉄筋の腐食の関係

ひびわれ幅 (mm)	ひびわれ 箇所数	腐食発生率 (%)		
		腐食なし	腐食の痕跡が 肉眼でようやく 認められる	腐食がかなり 進行している
0.01	12	83	0	17
0.02	48	69	2	29
0.03	60	68	19	13
0.04	63	63	16	21
0.05	62	64	13	23
0.06	25	56	4	40
0.07	23	43	17	40
0.08	7	86	0	14
0.09	6	83	17	0
0.10~0.14	44	36	23	41
0.15~0.24	24	42	29	29
0.25~0.35	21	42	29	29
0.35~0.45	16	19	25	56
0.45~0.55	18	6	44	50
0.55~0.65	21	14	19	67
0.65~0.75	7	0	0	100
0.75~0.85	0	—	—	—
0.85~0.95	0	—	—	—
0.95~	43	65	9	26

注：ひびわれを発生せしめた鉄筋コンクリートばり (15×30×180 cm) 多数を4年間激しい潮風に暴露し、ついで1年間干満潮位間の海水中に浸漬したのち、コンクリートをはつって内部の鉄筋の腐食状況を観察した。

以上に述べた海水の作用によるコンクリートの劣化のほか、コンクリート構造物の耐久性を支配する要因として鉄筋の腐食があげられる。コンクリートは元来アルカリ性のもので、それ自体で相当の防錆力を有しているが、海水の作用を受けた状態では、設計ないし施工上の欠陥や前述の劣化部分では防錆力を失ない鉄筋の腐食が始まる。このようなコンクリート中の鉄筋の腐食機構はかなり複雑で、従来の多くの腐食理論も関連した現象を完全に説明するには至っていないのが実情である。たとえば、曲げや引張りを受ける鉄筋コンクリート部材ではコンクリートのひびわれを避けられないのが普通であるが、このひびわれ幅が過大になると鉄筋は容易に腐食する。このひびわれ幅の許容限界については従来 0.2 mm とする説が多かったが、その根拠は必ずしも明らかでない。著者らの調査によると、表-2 のような結果がえられ、これによって判断する限りでは持続荷重によるひびわれ幅の許容限界は上記の値よりかなり小さく押える必要があろう。

コンクリート標準示方書

B 6 判 438 ページ 定価：1 000 円 会員特価：800 円

コンクリート標準示方書解説

A 5 判 356 ページ 定価：1 300 円 会員特価：1 000 円

人工軽量骨材コンクリート設計施工指針 (案)

B 6 判 53 ページ 定価：300 円 会員特価：250 円

プレバッドコンクリート施工指針 (案)

B 6 判 38 ページ 定価：220 円 会員特価：180 円

夏期講習会資料

B 5 判 128 ページ 定価：900 円 会員特価：700 円