

参 考 資 料

土木學會誌 第十四卷第五號 昭和三年十月

海中工事に於ける混凝土の腐蝕と其の防止法

本文は Los Angeles 港線の技術者 G.F. Nicholson の論文を 1926 年 11 月の World Ports 所載の原文に據り抄譯せるものなり。混凝土に對する海水の影響は我邦に於ても屢問題となりたる所にして本文は其の好資料たるべし。

港の修築に當つて埠頭及其の上部構造物を支持する所の基礎工事の可否は水陸連絡設備に於ける最も重要なる要素となるものである。故に如何なる様式の基礎工を選ぶかに就ては充分の注意と研究とを要するものである。

第一章 混凝土造繫船埠頭の構造様式

世界の各港を通じ混凝土構造の埠頭に於て最も多く用ひられて居る様式は次の四つである。

(1) 擁壁工法

この様式はマス混凝土或は鐵筋混凝土の擁壁から成り時にはケーソン構造のものもある。歐洲の港によく用ひられ亞米利加の港に於ては餘り用ひられないものである。

(2) 混凝土圓壩工法

この様式は直徑の大なる混凝土圓壩を岩盤或は杭打基礎の上におき埠頭の床版を支へるものである。其の圓壩の内部は混凝土を以て填充する。通常次の鑄造混凝土杭を用ふる場合よりも土留擁壁を幾分か埠頭面に接近して置くのである。

(3) 混凝土杭工法

之は普通の混凝土杭即ち中空ならざる杭に依つて埠頭床版を支持するものである。

(4) 埠頭上屋の下の部分には混凝土杭を用ひ上屋前の埠頭床版の下にはクレオソート注入木材杭を使用する工法

この様式の(3)と異なる點は只クレオソート注入木材杭を上屋前の床下に用ふることである。Los Angeles 港の委員會では混凝土床版や上屋の下では永久的基礎工にするといふ方針の下にて此の(4)の工法を採用した。何故混凝土構造を前方迄用ひないかと云ふに埠頭に出来るだけ弾性力を與へて船の衝撃に備へると共に工費の節減を計らむが爲である。又上屋前の床下の木材構造は修繕及取換が比較的容易であつて混凝土床版や上屋構造物に何ら障害を與へることなく噴射水杭打法を以てすれば容易にこの作業を行ふことが出来るものである。Los Angeles 港では油類、木材等を取扱ふ特種埠頭の外築港當初より此の工法を用ひて居る。此れは繫船岸の計畫に當つて誠に當を得たものであると思ふ。

第二章 海水中に於ける混凝土腐蝕の原因

一般に海中工事に餘り關係の無い技術家の多くは立派に施工せられた混凝土は海水中に於ても事實上永久的であると考へて居る様である。然し之は大きな誤であつて如何に立派に科學的に作られた混凝土でも海水に晒しておけば遠からず大なる腐蝕を起すものである。海水中に於ける混凝土の腐蝕は或る程度まで物理的作用即ち波の作用とか崩壊物、氷塊等に依る磨滅とか、冬期水結から起る種々の作用などの結果に依るものであるが此の問題の研究者の多くは大體次の二大原因にその意見の一致を見出す様である。

(1) 海水の混凝土に及ぼす化學的作用

海水中に含む破壊力の最も強い要素は Magnesium Sulphate であつてそれがポルトランド・セメント中に約 15~30% 含まれて居る遊離石灰と化合する。此の化學作用に依り石灰の約 1.4 倍の容積を持つ Calcium Sulphate の結晶の沈澱物を生ずる其の爲混凝土は膨脹し分解されるのである。加ふるに free lime が取除かれた後には一寸水が作用しても混凝土中の Dry Calcium Silicate を溶解してしまふ、此の Calcium Silicate は混凝土硬化の當初に生成したものである。以上の分解作用が一旦開始されると何處までも繼續され終に混凝土は砂、砂利等の混合材の分離せるぼろぼろの塊と化してしまふのである。

(2) 鐵筋の酸化作用

鐵筋混凝土は只に上述の如き化學的又は物理的作用に依り破壊されるのみならず鐵筋の腐蝕に依つて破壊されるのである。即ち毛細管現象に依り杭の空氣中に現れて居る部分へ水が吸上げられ絶えず其處で蒸發して居る。この水の循環に依り鐵筋は徐々に酸素を供給されることになる。爲に鐵筋は酸化腐蝕され膨脹して混凝土の破碎を來し之が又腐蝕作用を促進して行くものである。

又埠頭の床版や桁の下側等も比較的些少ではあるが海水の飛沫や濃霧の爲上記のものと全く同様の作用を受ける。尙以上の外に種々附隨的原因があるが其の主なるは電氣分解等である。

第三章 海中工事に於ける混凝土腐蝕の實例

亞米利加に於ては太平洋及メキシコ灣沿岸並びに大湖地方の主要港は殆ど清水又は半鹹水の河川、湖、灣等に面し繫船岸には主として木杭を使用して居るから海水中に於ける混凝土の腐蝕の程度に就ては餘り知られて居ない。然し太平洋沿岸の諸港では古くから混凝土を海中工事に使用して居る所もあり従つて非常な影響を蒙つて居る例も澤山ある。混凝土の腐蝕は施工後間もなく開始されるもので最初數箇年はその進行も徐々であるが 7、8 年後に於て分解作用は急激に進行する様である。最も被害の甚だしいのは低水面から杭の頂部までの間

である。腐蝕を受けた實例を次に挙げて見れば：—

Seattle では埠頭繫船岸及 Lake Washington 運河の閘門等に混凝土構造を施したのであつたが鐵筋混凝土の壽命は約 17 年，マス混凝土は 30 年位であつた。

San Francisco では混凝土杭及混凝土圓壩を繫船岸に使用してから 20 年近くになるが近來非常な腐蝕をなし修繕中との事である。

South California では鐵筋混凝土杭が施工後間もなく非常に腐蝕したのであるがこれは材料や施工技術に缺點があつた事が解つた。

Los Angeles では普通の混凝土杭，塗料を施した混凝土杭又は質を緻密にするため種々の混和物，化合物を混じた混凝土杭など色々使用して見たのであるが何れも同じ様な腐蝕をなしたのである。即ち施工後 8 年目位に急に腐蝕は顯著になり其の後 3~5 年位の間に急激なる進行を見，結局混凝土杭は 11~14 年位の使用にしか堪へなかつた。又 1915 年に市有突堤第一號 55 番より 60 番バースに使用した混凝土杭は製作，施工共に非常なる注意と科學的方法とを以てした。即ち混凝土の配合は 1:1:3 とし或ものには表面に防水用塗料を施し又或ものには防水作用ある化合物を混和し又杭の打込に當つては一々潜水夫に検査させ，汚損，破壊せるものは全部取替へさせたのである。斯くしてさへ其の腐蝕する程度に於ては普通の混凝土杭と何ら選ぶ所がなかつた。即ち寫眞に示す如く混凝土は處々破壊して鐵筋露出し腐蝕されて居る。被害の甚しきものに到つては，斷面積 8 平方尺位もある杭さへ其の分解作用が鐵筋挿入線の内部へ深く侵入したのでを認めた。又 Watchorn 船渠及 Outer Harbor Dock & Warehouse Co. 等の繫船岸に使用した混凝土杭は 14 年間で全々腐蝕されてしまつた。又僅か 5 年前に打つた射着膠泥杭は既に腐蝕の徴候を現して居る。

以上は亞米利加太平洋沿岸諸港に於ける實例であるが永年マニラ港務局の主任技師であつた E. C. Earle 氏はフィリッピン，ハワイ及東洋の諸港に於ても矢張同じ様な腐蝕を見出すことが出来ると云つて居る。

次に歐洲の諸港に於ては海中混凝土工事に非常な成功を収め少しも腐蝕を見出さないと云ふ様な報告書がよく發表されるのである。然し思ふに之は歐洲諸港に於ては殆ど大きな斷面のマス混凝土が使用せられて普通小さな斷面を有する鐵筋混凝土よりも比較的腐蝕が目立たない爲で決して腐蝕を受けない譯ではない。

第四章 腐蝕防止策の一として擁壁構造を使用する法

或る港灣技術家は維持費と破壊の程度の少いと云ふ理由を以て混凝土杭構造よりも擁壁式構造を遙かに勝れりと推奨する。然し此の工法は歐洲に於てよく使用せらるゝものであるが數多の缺點，不利益があるから岩盤とか其の外強固な地盤を有する様な特種の場合を除く外

何處でも此の工法を採用してよいかどうかは甚だ疑問である。其の缺點並に不利の點を指摘すれば次の如くである。

(1) 最初の工費大なること

最初の工費が非常に高いため現在の如き低廉な埠頭、船渠使用料では決して收支相償はざるは明らかである。歐洲諸港では岸壁の多くは數年前物價及勞働賃の安い時期に築造して非常に高い岸壁使用料を徴收し莫大の利益を得て充分の基金を蓄へて居るから今日新しい工費の大なる設備を施すに當つて投資が極めて自由である。これを見て今日の如き物價、勞働賃の高い時期に於て而かも資金の餘り豊でない多くの港に於て果して此の工費の大なる工法を採用してよいかどうかは大いに熟慮を要することであると思ふ。港の經營に於て收支相償はぬ過大の設備を施すことは却つて其の港の發展を阻止するものである。

(2) 繫船岸壁の水深を制限すること

歐洲諸港では繫船岸壁の水深は 25~30 年前には 25 尺に設計され當時はそれで充分であつたが今日では造船術の進歩と船舶經濟よりして競ふて大型汽船を使用する様になり船の吃水大となりたるため自然水深も 35~40 尺を必要とするに至つたのである。其の爲以前の水深 25 尺岸壁では全々役に立たず今日の狀勢に應ぜんためには之を倒壊して新しきものを再築しなければならなくなつた。是より見て今日の水深 35~40 尺岸壁は又 25~30 年後に於ては全々廢物となる日が来るかも知れぬ。

(3) 擁壁の腐蝕すること

鐵筋混凝土杭程にはないが矢張腐蝕を免かれることは出來ない。

以上の如き缺點不利を有するため歐洲に於ても近來新しい港に於ては順次擁壁構造を廢して混凝土杭構造を採用する様になつた傾向がある。

第五章 腐蝕防止策の一として混凝土圓壩構造を使用する法

此の工法の出發點は混凝土圓壩を使用すれば斷面積も大となり自然鐵筋を表面から餘程内部に挿入することを爲るため腐蝕を大いに減退させることが出來ると云ふに在る。

然し此の工法も矢張前章の擁壁構造の場合と同様な缺點を持つて居る。

即ち、(1) 最初の工費大なること

(2) 施工困難なること

(3) 混凝土圓壩の腐蝕すること

混凝土圓壩は豫め製造せるものを使用するか又は現場打にするかである。前者は混凝土の質を害することなく望ましいものであるが之を製造して使用する迄に多大の日數を要する缺點を有し後者は一般に施工困難を伴ふもので混凝土の素質を非常に低下するものである。

第六章 腐蝕救済法として高水面以下に塗料を塗布する法

普通の混凝土杭の腐蝕を防ぐには時々現場で塗料を施したらよからうと云ふことが度々提唱された。Los Angeles の港灣課の建設及維持係長である Coover 氏は特種のアスファルト塗料を Spray Gun で杭の高水面から下部に度々塗布することを企てた。然し濕氣や油類の汚點に出合ひなどして満足な結果を得ることは絶対に不可能であることを知り此の計畫は諦めたのである。若し塗料を多少満足に杭に塗布することが出来るとしても塗料と混凝土との間に完全なる接合を得ることは到底不可能である。此の缺點は塗料の膜の間に澤山含まれて居る空氣と共に杭に海水を滲潤さす助けをなすことである。第三章に於ても述べた様に Los Angeles 港で使用した塗料を施せる混凝土杭も普通の混凝土杭も殆ど同様な程度の腐蝕を見たこと云ふことは之を裏書せるものである。

第七章 混凝土杭のアスファルト加壓注入に依る腐蝕防止法

Los Angeles 港港灣課では半永久的耐久力を有する混凝土杭を得んがために過去數年間に亘り幾多の試験と研究を重ねて來た。專賣特許の Duocrete pile として知られて居る所のアスファルト注入混凝土杭は此れ等研究の第一の産物であつた。此の Duocrete pile に對する一般の批判を聞くにアスファルトを充分に浸徹さすために混凝土の配合を悪くし多孔質とするため又高温を以て處理する時混凝土に脱水作用が起ることの爲に混凝土の素質を悪くし強度を非常に低下すると云ふことである。故に Los Angeles 港港灣課では永年この點に注意し調査研究の結果次の如き改良を加へた新しい様式の杭を目下工事中のバース 228 D & E に使用することに決定した。即ち強度を大にするため配合をよくして緻密となし而かも低温高壓の下に充分アスファルトを注入して表面の細孔を塞ぎ海水の浸入を防ぎ以て強度、耐久力共に完全に近き混凝土杭を得んとするものである。此の處理法は木材杭にクレオソートを注入する方法に非常によく似て居る。今同課の新しき仕様書に基き杭の製作並に處理法の順序を示せば次の如くである。

- (1) 1:1½:3 の配合の混凝土を水平の木型に入れる。
- (2) 低水面より下 3 尺の點から杭の頂部までの間は杭の外側 2 吋の深さだけ稍々固練りの混凝土を使用する。之をなすには鋼鐵釵を用ひ混凝土を入るゝに連れて順次持上げて行けばよい。
- (3) 混凝土に振動作用を與へて質を緻密にするために型の側面及頂部を Pneumatic Hammer で叩く。
- (4) 製作中の杭の列は 3 列までに制限す。

- (5) 出来上つた混凝土杭は最小限 60 日間養生さす。時には注入作業進行の具合に依つては 180 日間位も養生さすことがある。
- (6) 杭を $100^{\circ}F$ から最大限 $180^{\circ}F$ 迄の温度の空気の下で 12 時間豫熱す。此の間に杭の濕氣は取去られるのである。
- (7) 杭をアスファルト注入室に遷す。
- (8) 2 時間の間注入室を 23 吋の眞空に保つ。
- (9) アスファルトを $180^{\circ}F$ の温度で注入室に入れ最大限 $250^{\circ}F$ の温度に迄高む。
- (10) 8 時間の間平方吋につき 150 ポンドの壓力を加へる。
- (11) アスファルト及混凝土杭を注入室から取出し杭を自然の儘に冷却す。

又以前の Duocrete pile の仕様と異なる新しい點を擧げて見れば

- (イ) 混凝土の配合をよくし Pneumatic Hammer を使用すること。
- (ロ) 杭の列を制限すること。
- (ハ) 養生の期間を 30 日であつたのを最小限 60 日に増加せること。
- (ニ) 豫熱の温度を最大限 $180^{\circ}F$ に減じアスファルトの温度を以前 $500^{\circ}F$ であつたのを最大限 $250^{\circ}F$ に減少せること。
- (ホ) 最後に自然の儘徐々に冷却すること。

等である。最も注目に値するは混凝土の加熱試験の結果又は斯界の權威者の意見を見ても混凝土に結合せる水の脱水作用は $500^{\circ}F$ 頃から起るものであつて上述の $250^{\circ}F$ と云ふ温度は充分に安全圏内にあると云ふことである。

現在 Los Angeles 港で使用せる數多の混凝土杭の試験の結果其の強度は次表に示す如くであるが注入せる混凝土の強度は無注入の普通混凝土に比し實に理想に近いものである。

普通混凝土		處理せる混凝土	
平均應壓強度	最大應壓強度	平均應壓強度	最大應壓強度
材齡 #/口"	材齡 #/口"	4865 #/口"	6070 #/口"
28日 4185	28日 5570	注意 處理せる混凝土の試験片の材齡は 60 ~100 日, 平均 80 日とす。	
60" 5025	60" 6240		
100" 5300	100" 7100		

第八章 海中工事に使用する混凝土杭の強度と耐久性

海中工事に使用する混凝土杭の製作に當つて吾々の理想とする所は永久的耐久力を有するものを作ると云ふことにある。今日迄一般に混凝土杭の強度と云ふことは耐久力と云ふことよりも餘りに偏重され過ぎて來た傾がある。腐蝕を防止するために杭を處理すれば應壓強度の低減を來すと云ふことは非常に重大視されて居る。然し前述の如く科學的に作られた立派

な混凝土杭ですら僅か 12 年位で全く腐蝕し時には全断面の $\frac{1}{2}$ 位まで侵されるといふ有様で而かも此の腐蝕が一旦始めれば之を防止することは到底不可能であると云ふならば混凝土杭の強度の低減と云ふ様なことは寧ろ第二段の問題ではあるまいか。

Los Angeles 港のバース 228 D & E に使用せる混凝土杭の設計荷重は 1 本の杭に對し 30 噸であつた。安全率を 4 とし最大荷重を 120 噸とした。事實破壊する迄には 150 噸位は充分に支へ得るのである。先頃荷重試験を行つたのであるが試験杭のプラットホームの上に 83 噸を乗せ得た。この試験に依り 30 噸の設計荷重では沈下は少しもなく 83 噸の荷重では破壊の痕跡は少しもないことが證明されたのである。勿論海中工事に使用する混凝土杭は強度と云ふことも大切ではあるが併しそれよりも混凝土の分解作用を防ぎ腐蝕を減退し耐久力を増加することは最も急を要することであると思ふ。此の見地よりして前述の Los Angeles 港に於て作られたアスファルト注入混凝土杭は強度並に耐久力を兼備せる點に於て實に理想的のものとならねばならぬ。

第九章 クレオソート注入木材杭とアスファルト注入混凝土杭との 工費比較

或る港湾技術家は普通の混凝土杭が海水中に於て數年ならずして非常な腐蝕を來すのを見て極力クレオソート注入木材杭の使用を主張する。然し混凝土床版及上屋の下等に於てはアスファルト注入混凝土杭を使用すれば工費並に耐久力の點から見て永年の間にはクレオソート注入木材杭より遙かに經濟的であることが解るであらう。一般にクレオソート注入木材杭の耐久力は處理法とか地方状況に依り 15 ~ 25 年、平均 20 年位である。そしてアスファルト注入混凝土杭の工費はクレオソート注入木材杭の工費の約 2.5 倍である。アスファルト注入混凝土杭の海水中に於ける耐久力に就ては實際上永久的であるが今假に前者の 2 倍即ち 40 年と見てもアスファルト注入混凝土杭を使用する方が遙かに經濟的になるのである。特にクレオソート注入木材杭に就て次の如き工費の増加と種々の不利益の點が一般に考へられる様になつた今日最早問題にならぬのである。即ち

- (1) クレオソート注入木材杭は凡そ 20 年後に於て元の杭を取除くに少なくとも最初の工費位を要し其れに床版の大部分を破壊し取替へる工費を加へなければならぬ。若し床版が鐵筋混凝土である場合には其の工費は餘程莫大なものになる。
- (2) 法面の上部に多量の碎石張をなし又之を維持したりするため上屋の下の杭に對する損傷が増加すること。
- (3) クレオソート注入木材杭は混凝土桁等との結合が不完全であつて設計として非常に拙劣なものであること。

- (4) 修繕中は埠頭及上屋の使用不可能となり、それに依つて収入の減少を來すこと。
- (5) 火災に對する危険性多きこと。
- (6) 多額の保険料を要すること。

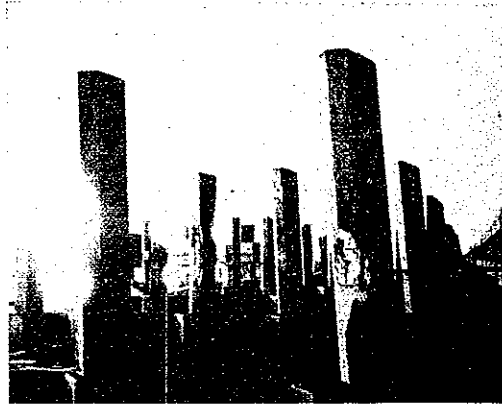
要するに結論として埠頭繫船岸の設計に當つて鐵筋混凝土杭構造を使用するは最も經濟的な方法であるが然し或種の保存作用をなす藥品例へばアスファルトの如きものを加壓注入して細孔を塞ぎ海水の浸入を止め混凝土の分解作用並に鐵筋の酸化を防止するに非ざれば必ずや非常な腐蝕を起し苦い經驗を嘗めなければならぬであらう。

寫眞第一



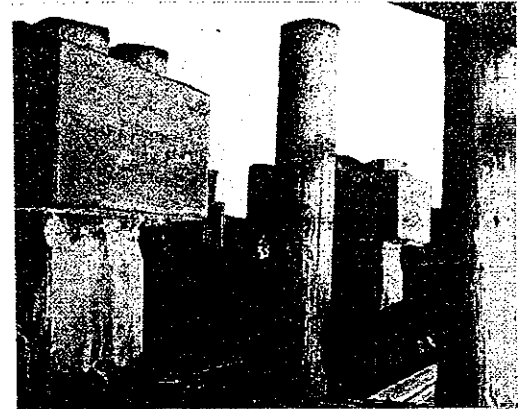
ロスアンセルス港第一埠頭に於ける
混凝土杭の腐蝕状態

寫眞第二



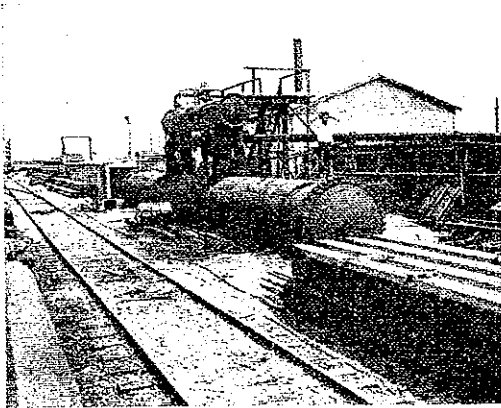
同 左

寫眞第三



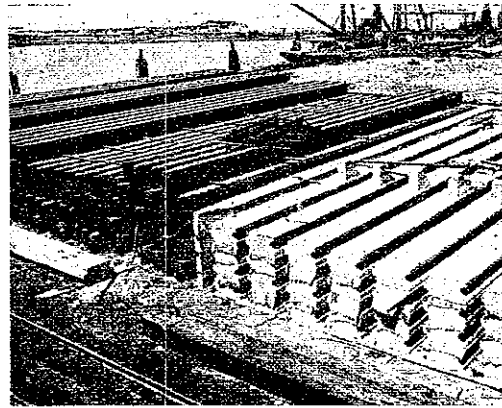
同フーチングの腐蝕

寫眞第四



同港に於ける混凝土杭のアスファルト
注入工場

寫眞第五



同港に於けるアスファルト注入混凝土杭と
普通混凝土矢板

寫眞第六



同港に於けるアスファルト注入混凝土杭の断面
(アスファルトの浸入状態を示す)