

[6] 環境塩害と鉄筋コンクリートの耐久性

正会員 川 上 英 男 (福 井 大 学)

1. まえがき

鉄筋コンクリートの塩害が近年特に注目を集めるようになったのは、海洋構造物への応用、海砂使用によるコンクリートの先在塩分の増大が一因と思われる。一方環境塩害を受けやすい海岸地域に鉄筋コンクリートが普及してきており、塩害の発生が懸念される。塩害例を現在の問題にフィードバックするには施工技術レベルやコンクリートの品質が現在のものと大差ない例が望ましい。たまたま福井県越前海岸で材令7年の鉄筋コンクリート造建物が塩害を受け、海側壁面の鉄筋が全面的に腐蝕した例を調査したのでここに報告する。また環境塩害問題に重要なコンクリートの塩分分布線について觸れる。

2. 調査建物概要と経過

建物の所在地は図1に示すように西は日本海に面し、東と南は山である。西方14～18mにある防波堤からすぐ海になり、特に冬期は北西の季節風に荒れる海から恒常的に波しぶきを受ける位置となっている。建物は鉄筋コンクリート造平家建で、平面を図2に示す。

施工期間は昭和47年4月～11月、コンクリートの設計基準強度は 180 kg/cm^2 、施工級別A、JIS工場よりのレデーミクストコンクリートをポンプ打ちしている。外装は、屋根は高分子シート防水の上に保護防水モルタル塗、屋根梁と基礎梁はコンクリート打放し、柱及び壁はベニヤ合板型枠コンクリート打放しの上、合成樹脂エマルジョン吹付けリシン仕上げである。

建物は普段は無人の機械室であるので、昭和54年3月の困障改修工事の際に、西面と北面に著るしい損傷を発見した。その後7月にかけて所有者及び筆者らが実態を調査した。東面と南面の外壁はすでに新しく吹付けタイル施工が完了していた。

またこの機械室は継続使用中のため、調査は建物使用に支障を及ぼさない範囲に限定した。

3. ひびわれと鉄筋の腐蝕

庇下面と外壁に鉄筋に沿ったひびわれが生じており、特に海に面する西側で著るしい。これらは鉄筋の発錆膨張によるもので、コンクリートの浮上り、肌離れを伴っている。屋根梁と基礎梁のひびわれは微細である。西側中央部西方に突出した屋根梁には巾2～3mmに及ぶひびわれがある。この部分のコンクリートは後述のように凍害を受けた疑いがある。

ひびわれ部のコンクリートを斫り落してみると鉄筋は錆びていて、甚だしいものはボロボロに腐蝕している。概してコンクリートのかぶり

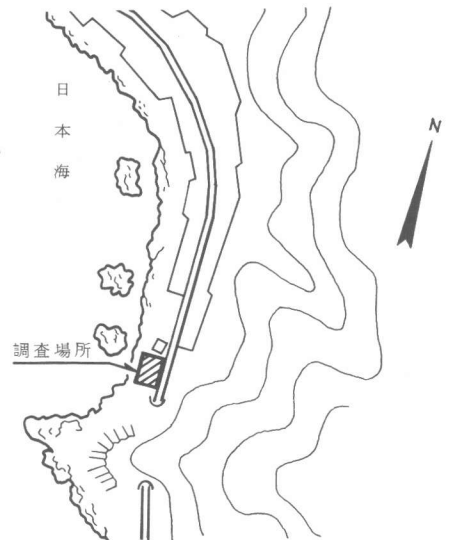


図1 敷地環境

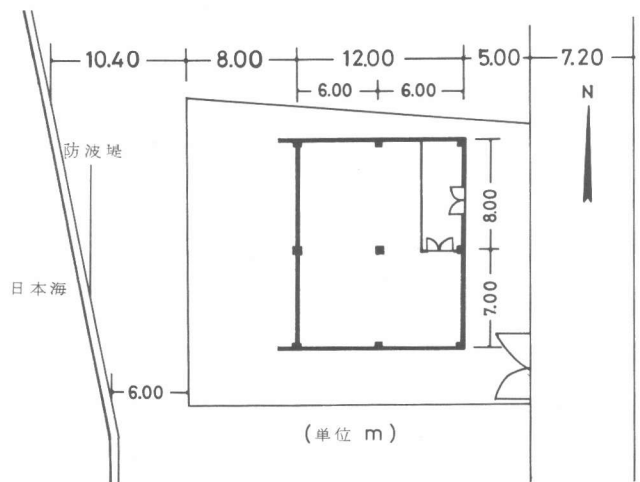


図2 建物平面および配置図

厚の小さい部分に被害が多い。西面の壁（かぶり厚約2.5cm）では9mm壁筋は一部の縦筋を除いて全面にわたって発錆し、多くは有効直径が5.8～7.8mmに細っていた。また柱でも腐蝕のために19mm主筋の有効径は17.4～18.8mmに、9mm帯筋では5.7～7.9mmに減少していた。これと同様の損傷は北面にも見られるが程度は西側よりも軽微である。後述のコア抜取りや中性化試験の際に調べた限りではかぶり厚が5cmを越える部分では鉄筋は健全であった。これらの損傷の程度をまとめるとおおよそ表1のようである。すなわち海からの波しぶきや風当たりを受けやすい部分に損傷が著しいという特徴が見られ、環境塩害とみられる。

4. コンクリートの中性化深さ

コンクリートを部分的に所りとり、フェノールフタレンアルコール溶液によるアルカリ反応を調べた。西側袖壁端部では60mm、西側軒裏での26mmという値は他に比べて極端に大きく、凍害によるコンクリートの劣化が関係しているものと思われる。その他の壁面、柱、基礎梁における15ヶ所の中性化深さは0～16mmの範囲にあり、平均値は7mmである。これはJASS 5.10.2の解説に示される中性化速度に関する一般式から求めた値にほぼ一致し、後述のコンクリートの諸試験結果と併せて、コンクリートには特に材質上の欠陥はなかったものとみなされる。

なお中性化深さの値には、特に建物のどの面が大きいといった明確な特徴は見当らなかった。

一般に中性化のために防錆効果がなくなると鉄筋が錆びはじめるとされている。本調査例でも西側突出梁など、これを裏づける場合も見られたが、多くはコンクリートが明瞭な赤変アルカリ反応を示すにかかわらず鉄筋が腐蝕しており、塩害の場合にはフェノールフタレンで示されるpH値が必ずしも発錆限界と一致しないことを示している。

5. コンクリートの圧縮試験・比重・吸水率・調合・付着強度

圧縮試験：西面壁2ヶ所、北面壁1ヶ所、西袖壁2ヶ所より採取したコア（直径10cm）の圧縮試験結果を表2に示す。圧縮強度の平均値は272 kg/cm²で、標準偏差は38 kg/cm²である。

表2 コンクリートコアの圧縮試験結果

供試体	圧縮強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²) [*]
W 1	283	1.97×10^5
W 2	311	2.10×10^5
W 3	219	1.88×10^5
W 5	300	1.89×10^5
北袖壁 ^{**}	249	1.95×10^5

（* 圧縮強度の1/3の応力度の割線係数）
（** 7.5 × 10 × 15 cmの角柱）

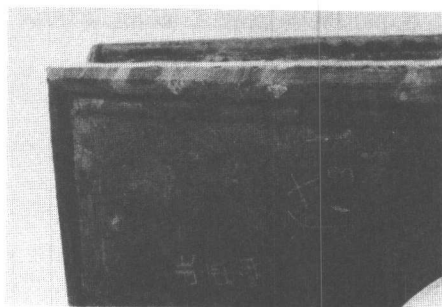


写真1 庇下側のひびわれ

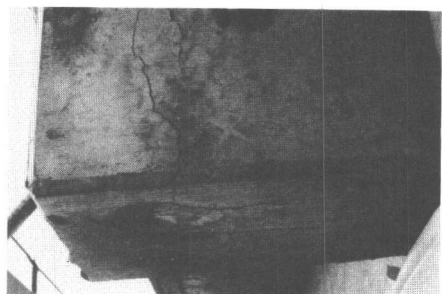


写真2 西側突出梁のひびわれ



写真3 西北袖壁上部梁定着筋の腐蝕

表1 損傷の範囲と程度

部 位	西 面	北 面	東 面	南 面
軒・庇	上端筋 ○	○	○	○
	下端筋 ×	×	/	×
	鼻部分 ×	×	/	/
壁	外側筋 ×	×	D	D
	内側筋 ○	○	○	○
梁	外側筋 ×	/	○	○
柱	外側筋 ×	×	×	○
基礎梁	外筋 ×	×	×	○

（○ 錆なし、D 錆の可能性）
（× 錆あり、/ 部分的に発錆）

表乾比重は平均2.29である（表3参照）。ただし西側突出梁先端のコンクリートは表乾比重が2.16と小さく、吸水率も12%と大きく、凍害による材質劣化の疑いがある。

調査推定：8ヶ所のコンクリート塊をそれぞれハンマーで粗砕し、さらに粗骨材とモルタル部に分離する。このモルタル部分を微粉砕し、電気炉（700℃）で2時間加熱後、希塩酸で処理し、残分を細骨材、溶出分をセメントとみなす方法で、セメントと砂の重量比を求めると、

セメント：砂＝1：1.79～2.55（平均2.18）である。水セメント比65%，スランプ18cmでこのようなセメント・砂比に近い調査を標準調査表から見出すと表4のようである。

付着強度：西面袖壁より供試体を切り出し、引抜きによる付着試験を行なった。縦筋直径は9mmである。自由端のすべり量が1/1000 mmのときの荷重を埋込鉄筋表面積で除した値を付着強度として表5に示す。供試体によって鉄筋の埋込み長さに差があるので、比較のために埋込長さ15cmに対する値に換算して示してある。試験後、供試体を割り、鉄筋の腐蝕度合を調べた。腐蝕の著しい供試体Bではワイヤブラシで浮錆を除き残存健全部の重量から円形断面に換算した半径を求め、同様に求めたA供試体の健全鉄筋との差を腐蝕厚として示した。腐蝕厚0.67mmで付着強度は約半分に低下している。供試体数が少ないので一般的結論にはなり得ないが、この種の報告はみあたらないので一例として記した。

6. コンクリートの塩分含有量

11ヶ所の試料について塩分含有量を測定した。内2ヶ所はコアを輪切りにして内部コンクリートについても分析を行なった。粗骨材を除いたモルタル部を微粉砕し、JASS 5 T 202 普通細骨材中の塩分試験方法に準じた。結果を図3に示す。同図には表4の推定調査からコンクリートまたは砂に含まれる塩分に換算した値を（ ）内に示しておく。

モルタル中の塩分含有量の最も大きいのは西側軒先で0.39%である。海側の壁は表面近くで0.32%，鉄筋付近で0.11%を示している。壁厚中央では0.06～0.08%である。

これら塩分含有量の多少は、前述の建物の損傷の程度と傾向が一致しており、波しぶきを浴びる度合を示しているものとみなすことができよう。

施工当時、そのレデーミクストコンクリート工場では海砂を使用していなかったので、これらの塩分は竣工後に外部から滲透したものをみなされる。JASS 5の塩分許容値を大きく上廻るこれらの分析結果は、環境塩害を改めて見直す必要を示すと共に、この種の環境にある構造物に海砂を用いる場合には一段と慎重な配慮をうながすものといえよう。

表3 コンクリートの比重・吸水率

部 位	表乾比重	絶乾比重	吸水率 ^四
壁 W 6	2.29	2.06	9.4
壁 "	2.31	2.12	8.6
軒	2.28	2.13	7.1
突出梁	2.16	1.93	12.0

表4 推定調査（kg/m³）

水	セメント	砂	砂 利
192	295	673	1156
（ 1：2.3 ）			

表5 鉄筋の腐蝕度と付着強度

供 試 体	A	B
埋 込 長 (cm)	5.5	15
換 算 直 径 (cm)	8.2	6.9
腐 蝕 厚 (mm)	0	0.67
荷 重 / 表 面 積	29.0	30.1
長 さ 補 正 (× $\frac{1.5}{5.5}$)	79.1	—
強 度 補 正 係 数 *	0.71	1.0
付 着 強 度 (kg/cm ²)	56.2	30.1
率	1.0	0.54

（＊コンクリート工学ハンドブック）

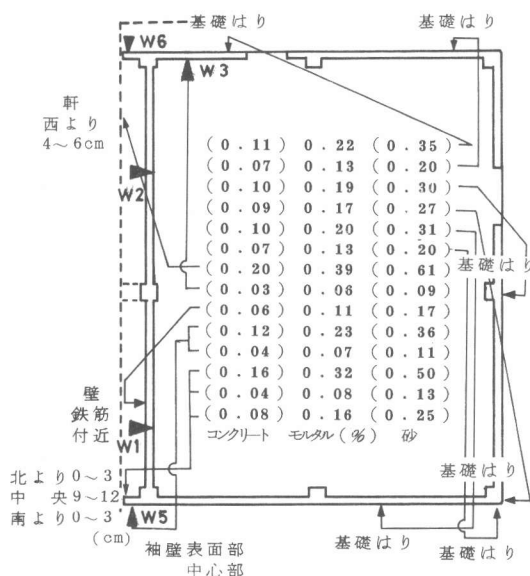


図3 塩分含有率（重量%）

7. 塩分透過量と鉄筋コンクリートの耐久性

コンクリート中の鉄の発錆過程や発錆限界塩分量については電気化学的な研究によって可成り明らかになってきた。しかしいろいろの環境条件のもとでの発錆過程や各種要因の関連性たとえば内部鉄筋周辺に対する塩分や酸素の供給実態などについてはなお不明な点が多い。

環境塩害に対しては、コンクリートの表面から内部にゆく程塩分含有量が減少する一般的傾向は、鉄筋周辺部の塩分量を問題にするときの基本的事項である。この塩分分布を本調査例で見ると、図4のようである。塩分分布の報告は比較的少なく、今後の研究の蓄積が待たれるところである。

塩分含有量の分布を示すこの塩分分布線の特徴について今まで報ぜられているのは次のようである。

飯塚¹⁾は塩分分布線は、塩水噴霧試験では2次曲線的であるが海岸曝露では直線的となる実験結果を報告し、その理由は前者では毛細管現象、湿気等によって緩慢に表面から浅く塩分の侵入がくり返されるのに対し後者では波浪をかぶったり、侵入水の重力降下のためであるとしている。

Bazant²⁾は海水に接する場合に対し、塩分のコンクリート中への拡散現象に対するモデル解析結果を図5のように与えている。経年と共に直線に近づくことが示されている。

海岸にあるコンクリートの内部への塩分の蓄積はおおよそ図6のような塩分分布線の変化を辿るものと想定できよう。

ここで長年月の塩分分布線を大まかに直線と想定して、この視点から低水セメント比およびかぶり厚増加という一般的塩分対策を眺めると次のようである。すなわち、水セメント比の低下はコンクリート中の塩分拡散を低下せしめることによって塩分分布線の勾配を急にし、鉄筋周辺部の塩分量を低く押えることを意味し(図7参照)、かぶり厚の増加は図8に示すように塩分分布線を左に平行移動せしめるものである。

(一方この2対策は同時に酸素の供給を低下せしめる効果も伴う) 海砂使用等によるコンクリート中の先在塩分は塩分分布線を上に移動せしめる意味をもつのは勿論である。

このような基本概念をもとに対策の効果を定量的に把握することができれば、より明確な対策指針が得られることになる。

8. あとがき

比較的新しい建築物の環境塩害を報告すると共に、コンクリート内の塩分分布線の視点から塩害対策の意味を考察した。建築用コンクリートは水セメント比が比較的大きく、塩害に対して不利である。すでに海浜に建っている建物には経年と共に被害が発生してくるとも懸念される。防水仕上げの手入れが望ましい。

なお、本調査例は損傷部全面にわたってかぶりコンクリートを斫りおとし、増筋と溶接金網を施してからサンドブラストで旧鉄筋の錆を落してコンクリートを吹付け、その上に塗膜防水を施したことを付記しておく。

文献

- 1) 飯塚・真下 “海岸地に建つコンクリート建物の塩分防止効率、建築技術 No. 209, 1969年1月, pp. 89~99
- 2) Z.P. Bazant "Physical model for steel corrosion in concrete sea structures - Theory" Proceedings, ASCE, V. 105, ST6, June 1979, pp. 1137-1153

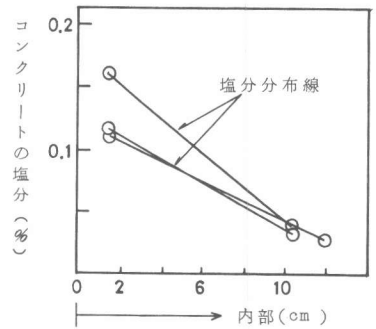


図4 塩分分布

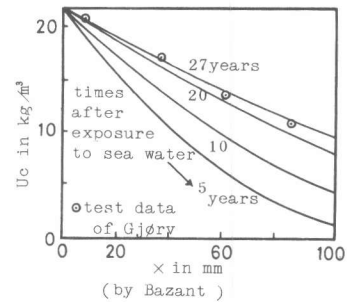


図5 海水に接する場合の塩分分布線

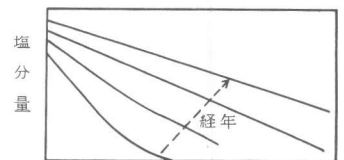


図6 海岸コンクリートの塩分分布線

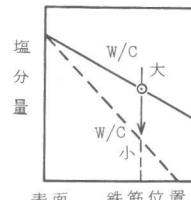


図7 W/Cと塩分分布線

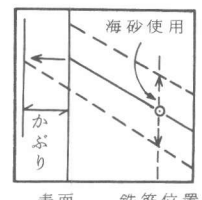


図8 かぶり増加と塩分分布線