

横須賀製鉄所 1 号ドライ Dock の石材侵食量と強度の関係

防衛大学校 正垣孝晴・宮川真国

深田地質研究所 藤井幸泰

横須賀市自然・人文博物館 菊地勝広

1. はじめに

我が国で最初に石造として建設された横須賀製鉄所 1 号 Dock (1871 年竣工) は, Verry が耐震性の検討のために, フランス海軍省に技術的検討を依頼して, 埋立案から丘を切り崩して土丹層に建設することに設計変更された¹⁾。土丹層は, 施工性・安定性・耐久性の地盤工学的観点から有利であり, 1923 年関東大震災でも記録に残る大きな損傷を受けず, 今日でもそのまま活用されている。この Dock は, 横浜の 1 号 Dock (国の重要文化財) の 25 年前に完成し, 我が国の第一級の重要な文化財であるが, 建設から今日までの間に, 石材の目地等の部分的な修復が行われている。文化財の修復においては, 信憑性 (authenticity) や初期の技術的な価値 (遺産価値) を損なわないことが重要である。従来の修復の履歴とその内容の検証を通して, 今後の修復・保全の指針を開発することが必要である。近々の発生が予想されている首都直下地震を前に, 横須賀製鉄所 1 号 Dock のダメージアセスメントと修復・保存方法のガイドラインの開発は, 文化財の管理・保存に加え, 国防や防災・減災等の国費の効率的運用の観点からも, 我が国の喫緊の課題である。

地盤工学会関東支部の「江戸期以降の土木史跡の地盤工学的分析・評価に関する研究委員会 (以後, 土木史跡委員会と表記)」は, 2011 年から継続してこの Dock の写真測量と渠口部の漏水調査²⁾等を行っており, その一環として, 1986 年調査の写真に対応する同じアングルの写真を撮影した³⁾。それによると, 石材の塩類風化等によるハニカム構造 (蜂の巣状構造) の侵食が進展して石材表面が平滑化していることに加え, 石材表面の数字や記号の刻印が侵食に起因して認識し難い状態であることが分かっている。また, この風化による侵食は Dock 開渠後 142 年間の中で, ここ数十年間の進展が著しいことも分かっている³⁾。

本稿は写真測量による風化石材の侵食量の測定とその岩石の強度との関係をシュミットハンマーによる反発値から推定する。写真測量による石材風化量の推定は, 著者の一人の藤井⁴⁾が多くの実績を有している。

2. 石材侵食量と強度の調査方法

2.1 写真測量の概念と侵食量の測定

写真測量は, 撮影した写真から対象物の距離を計測する技術である。一枚の写真は二次元情報しかないが, 対象物を異なる位置から撮影した二枚の写真からは三次元的な分析ができる。しかし, 写真測量はレーザ計測と異なり, 写真画像のみで座標を特定することはできない。対象物に標定点と呼ばれる目印を設置し, 標定点を写真に写し込むとともに, トータルステーションなどの測量機器で標定点の位置情報も必要となる。写真に写しこんだ標定点から, カメラ位置と撮影対象物の位置を計算すれば, 絶対標定が行える。しかし, 標定点の設置がなくても, 立体写真に寸法のわかるものを写し込んでおけば, 座標が特定できなくても対象物の形状が認識できる。本研究では Dock 壁面の石材の立体写真を撮影するために, スタッフを同時に写し込んだ。さらにハニカム構造等で侵食の大きい石材のみではなく, 侵食をほとんど受けていない石材も同時に撮影して, 侵食量の推定を試みる。侵食を受けていない石材表面の判断は, 石材を整形した際の鑿の跡が残っていることから行える。

立体写真の例を写真-1 に示す。撮影条件は, カメラから石材までの距離 H が約 2 m, カメラのレンズ焦点距離 f は 35 mm, カメラのセンサー解像度 (1 ピクセルのサイズ) δ_{CCD} は 0.0078 mm, 左右カメラの間隔 B は約 0.4 m である。これらの数値を用いて, 写真測量時の分解能は式 (1) と (2) から求めることができる。

$$\sigma_{XY} = H/c \times \delta_{\text{CCD}} \dots \dots (1), \quad \sigma_Z = B/H \times \sigma_{XY} \dots \dots (2)$$

写真-1 の場合は, 石材表面に平行な方向の分解能 $\sigma_{XY} \cong 0.5 \text{ mm}$, 垂直方向の分解能 $\sigma_Z \cong 2 \text{ mm}$ であった。また σ_{XY} は写真-1 のピクセルのサイズであり, σ_Z は写真-1 の左右写真の視差差が 1 ピクセル時の奥行サイズとなる。撮影した写真に対しては, 対象石材の上下左右に写し込んだ侵食の進んでいない石材表面を判読しながら, 侵食を受けた石材の

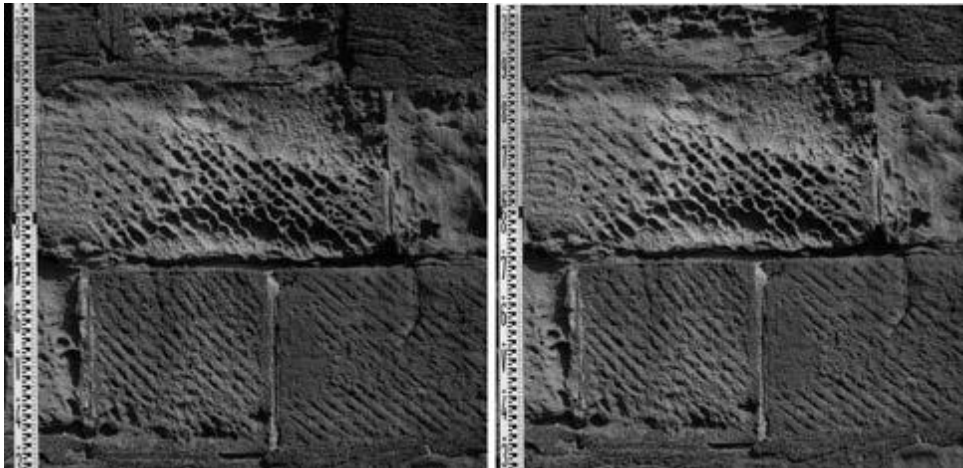


表-1 石面に刻印された数字と記号

No.	数字と記号
1	三
2	四
3	七
4	三
5	〇
6	⊕
7	⊕

写真-1 石材の立体写真例（中央上の石材が浸食量測定の対象であるが、その右側や上側の浸食をほとんど受けていない石材も同時に写し込む）

建設当時（侵食無）の面を推定して、これを四角枠で図化する。そして、四角枠内の侵食を受けた石材の現在の表面を三次元にモデル化した。写真-2は、写真-1の上半部の石面を下から鳥瞰した三次元表面モデルであるが、このモデルは三角形群で構成している。

写真-2から、四角枠の面積 A とその領域内の最大侵食深度 $h(\max)$ 、侵食体積 V を計算することができる。また V を A で割れば、平均侵食深度 $\bar{h}$ になる。

写真測量は、風化が著しい（風化大）、風化が少ない（風化小）、記号や数字が刻印された（刻印）3カテゴリーの石材として、それぞれ13、7、21個を選定した。なお、刻印は表-1に示す7種類が分かっている。

2.2 シュミットハンマーによる岩石強度の推定

風化による侵食量は、日射量以外にも岩質や強度の影響を受けると推察される。ドック壁面に使用されている石材の強度を直接求めることはできないので、強度の一つの指標であるシュミットハンマーの反発値から強度 S を推定する。シュミットハンマー試験は、写真測量を行ったすべての石材に対して行うが、1つの石材に対して、9点の異なる位置の反発値を測定した。

3. 写真測量から推定した石材侵食量

表-2は写真測量から得た石材侵食量の推定結果を示している。また、写真-3(a)と(b)は、表-2のNo.10の石材の風化の状況とこの石材の侵食量を推定する領域を赤の矩形で示している。表-2の最大深度 $h(\max)$ と A は、この赤の矩形部の領域の $h(\max)$ と A を意味し、 $\bar{h}$ は V/A である。 $h(\max)$ が実態と対応していることは、写真-4に示すように、ノギスで確認している。風化大の場合、 $A=961\sim4,703\text{cm}^2$ 、 $h(\max)=$

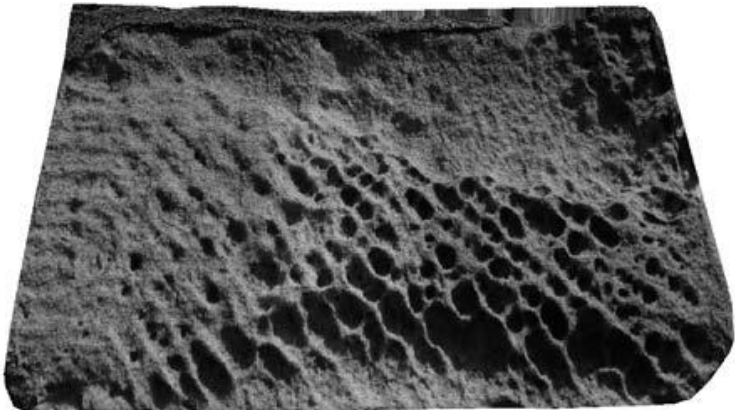


写真-2 侵食を受けた石材表面の三次元モデル（写真-1の上半部の石材表面を下から鳥瞰している）



写真-3 (a) 石材の風化の状況 (No.10)

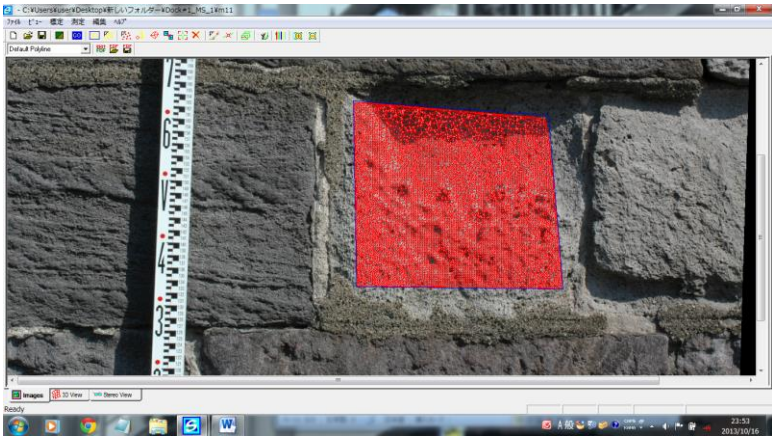


写真-3 (b) 石材の侵食量の推定領域 (No.10)



写真-4 ノギスによる最大侵食量の測定 (No.10)

表-2 写真測量による風化侵食量

番号	面積 $A(\text{cm}^2)$	$h(\text{max})$ (cm)	体積 $V(\text{cm}^3)$	$\bar{h}$ (cm)
1	4,703	7.22	20,155	4.29
2	1,951	6.92	7,111	3.64
3	2,016	6.84	6,869	3.41
4	1,453	6.98	3,649	2.51
5	1,462	7.51	5,277	3.61
6	1,528	6.93	3,514	2.30
7	1,206	10.25	6,983	5.79
8	961	5.28	2,650	2.76
9	2,564	7.77	6,894	2.69
10	1,049	8.18	3,493	3.33
11	2,329	5.38	5,703	2.45
12	2,381	6.39	9,104	3.91
13	1,337	3.29	1,692	1.27

$h(\text{max})$: 写真測量による最大侵食深度(cm)

$\bar{h} : V/A(\text{cm})$

3.29～10.25cm, $V=1,692\sim20,155\text{cm}^3$ である。この場合の $h(\text{max})$ と V の最大値は 10.25cm と 20,155 cm^3 であり、ドック開渠後 142 年間の風化量は大きく、この風化量がドックの安定に及ぼす影響の検討が必要である。風化小と刻印の石材に対する同様の検討は、今後の課題である。

4. シュミットハンマーの反発値から推定した岩石の強度

シュミットハンマーによる反発値から推定した岩石強度 S を表-3 にまとめた。1つの岩石で異なる 9箇所の測定値があるので、その平均値 $\bar{S}$ と変動係数 V_s の値を示している。3つのカテゴリー毎の S の統計量を表-4 示す。また、表-4 の統計量を用いた正規分布曲線を図-1 に示している。風化大、小、刻印の $\bar{S}$ は、それぞれ、31.8, 29.6, 33.9 N/mm^2 である。刻印の $\bar{S}$ が大きく、強度が大きい石材に数字や記号が刻印されたことを窺わせるが、風化大の $\bar{S}$ が風化小のそれより大きいことに加え、この差が僅かであることを考えれば、風化による侵食量とシュミットハンマーから得た強度の間には緊密な関係がないことが分かる。日射量や湿度・岩質等の複合的環境の影響の検討は、今後の課題である。

5. おわりに

本稿の主要な結論は、以下のように要約される。

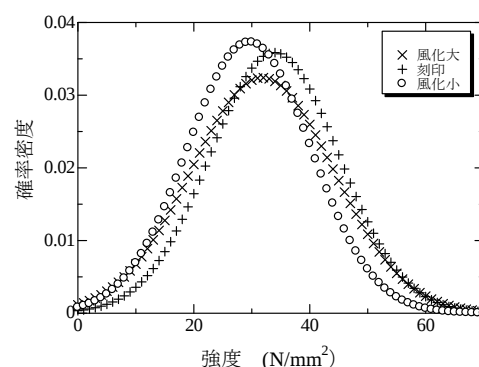
- 1) 風化大の場合, $A=961\sim4,703\text{cm}^2$, $h(\text{max})=3.29\sim10.25\text{cm}$, $V=1,692\sim20,155\text{cm}^3$ である。この場合の $h(\text{max})$ と V の最大値は 10.25cm と 20,155 cm^3 であり、ドック開渠後 142 年間の風化量は大きく、この風化量がドックの

表-3 石材の強度の統計量 (各石材)

No	劣化と 刻印	強度 $\bar{S}$ (N/mm ²)	変動 係数 V_s	No	劣化と 刻印	強度 $\bar{S}$ (N/mm ²)	変動 係数 V_s
1	大	45.8	0.26	21	刻印	34.9	0.25
2		31.7	0.26	22		33.5	0.21
3		35.6	0.21	23		48.7	0.14
4		36.6	0.27	24		48.5	0.12
5		37.7	0.15	25		40.1	0.24
6		32.8	0.21	26		13.9	0.20
7		29.0	0.19	27		24.1	0.21
8		47.5	0.25	28		27.7	0.28
9		15.3	0.35	29		24.8	0.43
10		22.2	0.40	30		27.2	0.29
11		19.1	0.38	31		19.7	0.30
12		37.3	0.24	32		38.3	0.15
13		22.8	0.31	33		41.1	0.21
14	小	35.9	0.24	34		31.8	0.34
15		38.6	0.20	35		31.1	0.12
16		37.5	0.09	36		32.5	0.28
17		30.8	0.36	37		38.9	0.14
18		18.5	0.50	38		37.2	0.20
19		27.2	0.21	39		39.0	0.12
20		19.0	0.31	40		40.8	0.25
				41	38.0	0.18	

表-4 石材強度の統計量 (カテゴリー)

風化の 程度	風化大	刻印	風化小
個数	117	189	63
平均値	31.8	33.9	29.6
標準偏差	12.3	11.1	10.7
変動係数	0.387	0.328	0.361

図-1 石材強度の正規分布曲線
(カテゴリー)

安定に及ぼす影響の検討が必要である。

- 2) 風化大, 小, 刻印の $\bar{S}$ は, それぞれ, 31.8, 29.6, 33.9 N/mm² である。刻印の $\bar{S}$ が大きく, 強度が大きい石材に数字や記号が刻印されたことを窺わせるが, 風化大の $\bar{S}$ が風化小のそれより大きいことに加え, この差が僅かであることを考えれば, 風化による侵食量とシュミットハンマーから得た強度の間には緊密な関係がないことが分かる。

本研究は, 公益信託大成建設自然・歴史環境基金の助成を用いて, 土木史跡委員会の活動の一環として行った。現地調査にご協力頂いた米海軍横須賀基地と同基金の関係各位に深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 菊地勝広：慶応元年柴田日向守一行のフランス軍港視察と横須賀製鉄所の建設事業について—横須賀製鉄所におけるフランス系技術の導入に関する研究(その1)—, 横須賀市博物館研究報告(人文科学)第54号, 横須賀市自然・人文博物館, pp. 13-51, 2009.
- 2) 正垣孝晴・渡邊邦夫・藤井幸泰・中山健二：土木史跡委員会の活動から～横須賀市の軍事遺産～, 地盤工学会誌, Vol.61, No.5, pp.30～33, 2013.
- 3) 正垣孝晴・宮川真国・藤井幸泰・菊地勝広・西澤泰彦：横須賀造船所1号ドライドックの編年変化, 地盤工学会関東支部発表, CDR, 2013.
- 4) 藤井幸泰・正垣孝晴・宮川真国・菊地勝広・渡辺邦夫：写真測量による横須賀製鉄所第1号ドックの記録活動, 地盤工学会誌, Vol.62, No.4, 2014.