

第三海堡遺構コンクリートの強度

防衛大学校 (学) 因幡 裕・(正) 正垣 孝晴

1 はじめに

我が国には、江戸期から建造された近代土木遺産が数多く残されている。これらの土木遺産の中には、横須賀ドライドックのように、文化・制度を含む我が国の存亡や近代化に大きな役割を果たした施設がある。しかし、地盤工学の視点で、実測や関連資料の収集を伴う技術史的評価を行う検討は十分ではない。また、技術的変遷を系統的に扱った研究も少なく、文化財的価値付けが行われぬまま土木史跡が失われる現実もある。一方、土木史跡の保存修復においても、適切な視点や調査手法を持ち合わせていないままに、修復が進められる事実もある。各時代の土木遺産の評価、修復方法の検討では、技術書全体の把握を踏まえた技術発展経過の考察が必要であるが、十分とは言えない。

このような土木史跡に関する研究の一環として、堡壘・砲台(3施設)、ドライドック(7施設)、港湾(1施設)の計11施設のコンクリート、石、煉瓦の建設材料に対して、シュミットハンマー試験SHT(JGS 3411)²⁾によって強度を測定して、建設年代や施設の用途、材質を考察している³⁾。本稿はこの一連の研究の一環として、第三海堡遺構コンクリートの強度をSHTで測定する。本稿に続く次の段階では石材や遺構コンクリート等から要素試験用の供試体を作成して、圧縮試験と割裂引張強度試験に加え、鉱物組成、間隙径等から、塩類風化等のメカニズムの検討を予定する。本稿はその前段階と位置づけている。

2 第三海堡の概要と調査方法

第三海堡は、明治時代に日本に来航する外国船から首都東京を防護するために建設された海上要塞の一つである。同海堡は、現横須賀市観音崎沖の水深39mの激しい潮流下において、1892年から30年の年月をかけて1921年に完成している。しかし竣工2年後、関東大震災による被災で暗礁化し、海難事故予防のために撤去(2007年)された。引き上げ工事によって、観測所、砲台砲側庫、探照灯の遺構は、横須賀市の追浜緑地に移設され2013年に横須賀市の重要文化財に指定されている。

SHT(JGS 3411)²⁾は、15~50cmの測定面内で9点以上の測定点を設けることになっている。また、測定点に1mm以上の凹凸がある場合は、グラインダーや砥石等で凹凸が1mm未満に成形することになっている。国土交通省官房通達(国管技第61号)(MLIT 61)は、土木学会基準(JSCE-G 504-1999)⁴⁾として、20の異なる位置から得た測定値 S_s の平均値 \bar{S}_s を代表値としている。しかし、本稿が対象とする施設は、日本遺産や国指定の重要文化財等の史跡であるので、石材等の表面加工に加え、材質変化や損傷に繋がる多点測定は許されない。したがって、本稿では測定点は対象材料を代表する位置を目視により決めて、同じ位置を6回打撃して測定した。これらの測定位置を図-1に示す。

測定面の凹凸や測定による測定面の変形がSHTの測定結果に影響していると判断される測定値は、それらを除いた平均値を S_s とした。SHTの打撃は、測定面に対して垂直に行うが、打撃方向によるハンマーの反発度の補正は、JGS 3411²⁾に従った。

写真-1は、第三海堡遺構の全景を示している。SHTによる強度の測定は、表-1に示す各施設の内外壁面に対する複数地点で行った。

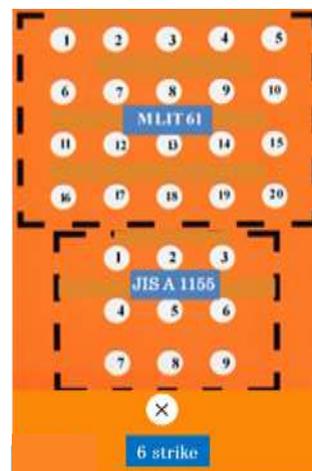


図-1 SHTの測定点



写真-1 第三海堡遺構の全景
表-1 SHTの測定箇所と数量

	Inside (内壁)			Outside (外壁)		
	Upper	Middle	Lower	Upper	Middle	Lower
観測所	140	0	0	140	35	72
砲台砲側庫	105	0	0	142	0	140
探照灯	140	0	70	0	0	0

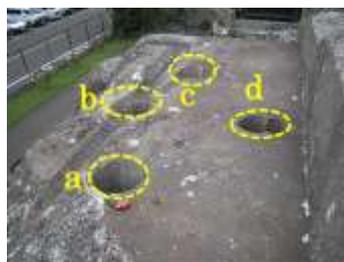


写真-2 探照灯屋上の削孔位置



写真-3 削孔面の状態
(a孔：室内天井部)

3 コンクリート表面と内部の強度の比較

写真-2は探照灯の屋上を示している。

施設の移設に必要なコンクリート強度を確認するために、直径40cm程度の削孔が設けられている。この削孔は、2006年の移設時に設けられているのでSHTによる強度測定は12年間は自然状態下であるが、写真-3に示すように目視によるコンクリートの風化や劣化は認められない。図-2は、写真-2で示す削孔内で行ったSHTの測定位置と数量を示している。削孔の屋上面と天井面から10cm内部の位置の強度を測定しているが、図-2に示す表には、それらの試験数量もまとめている。写真-4と5は、写真-2のaとcの屋上表面のSHTの測定位置を示している。削孔縁側から3.5~20cmの距離で、aとc孔で、それぞれ4と2列の側線上のコンクリート表面の強度を測定した。施設が完成して96年経過しているためコンクリートの材令も96年であるが、大正12(1923)年から平成12(2000)年の間は海中に没していたことになる。すなわちコンクリート表面は海水中77年、空气中19年、そして図-2(写真-3)に示すコンクリート内部は、削孔後12年間に亘り自然環境下の変化を受けた強度を測定することになる。しかし、削孔後のコンクリート表面は、写真-3で述べたように風化や劣化は認められず新鮮な状態であった。

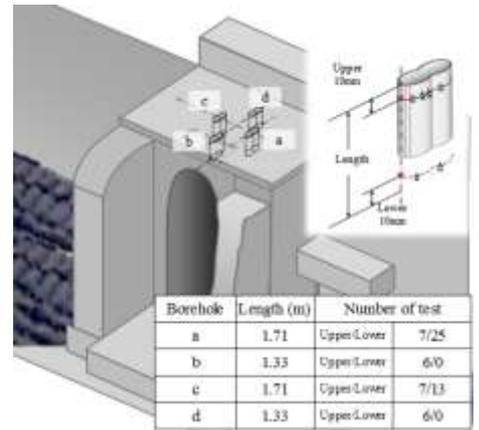


図-2 削孔内のSHTの測定位置と試験数量



写真-4 探照灯屋上(a孔)



写真-5 探照灯屋上(a孔)

図-3は探照灯のSsを示している。図の左は探照

灯屋上部 (Rooftop surface) の写真-4で示すa1列の1打点のSsが、孔壁縁からの距離D_bに対してプロットしている。これらのSsはD_bに対して特徴的な傾向はなく、平均値は38.2 N/mm²である。図-3の中側に示すSsは、図-2に示すa孔の上部 (Borehole upper) で測定した7個所の1打点の結果を示しているが、場所による特徴的な傾向はなく平均値(60.9N/mm²)は、a1の38.2N/mm²より大きい。一方、図-3の右側のSsは、探照灯南側の外壁の上部側 (South upper surface) の1個所を6打点したSsをプロットしている。最初の2打点のSsは同等であり、その平均値Ssは43.0N/mm²とa1(38.2N/mm²)の値と同等である。しかし、3打以降のSsは大きくなり、この間の4打のSsは57.9N/mm²であり、削孔内のSs(=60.9 N/mm²)と同等の値である。これらのことは1打点のSsはコンクリート内部の値より小さく、3打以降に(図-3の場合)内部のSsと同等の値を示していると解釈される。松倉・青木⁵⁾は、砂岩に対する21打点の測定から、最初の数回のSsの値が小さい理由として、表面の風化や緩み層の硬度を反映していると分析している⁵⁾。初回のSsが小さい同じ傾向は、2017年に建設された防衛大学の鉄筋コンクリート構造物(5階建)でも別途確認している。

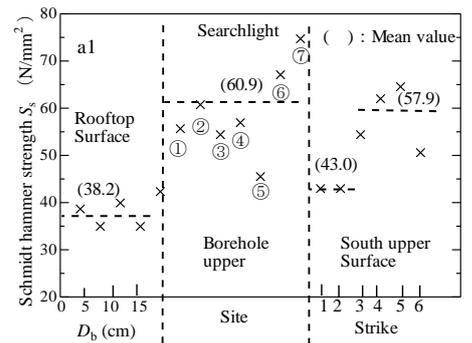


図-3 探照灯のSs

表-2 削孔内のSsの統計量 (削孔の比較)

Site	Borehole内のSs			
	a	b	c	d
n	32	6	20	6
\bar{S}_s (N/mm ²)	58.8	61.8	61.3	59.3
σ	10.4	4.7	9.1	13.3
VSs(%)	17.7	8.6	14.8	22.4

表-3 削孔内のSsの統計量 (材質の比較)

材質	Stone	Concrete	S/C	Steel
n	12	19	33	2
\bar{S}_s (N/mm ²)	72.5	54.1	58.8	62.0
σ	1.7	8.1	8.8	1.5
VSs(%)	2.3	15.0	15.0	2.0

削孔内のSsの統計量を表-2にまとめた。総計64の測定値の中で、各孔のSsは58.8~61.8 N/mm²の範囲内にあり、これらの値はa~dの削孔の違いに依存していない。また、変動係数VSsも8~22%と小さい。このVSsは軟鋼の上降伏点やガラスの破壊強度のそれら⁶⁾の同等以下と小さい。

表-3は削孔内で行ったSsの統計量をコンクリート骨材である石(Stone)、コンクリート(Concrete)、両者の判別が困難であった箇所(S/C)と鉄筋(Steel)に区別してまとめている。

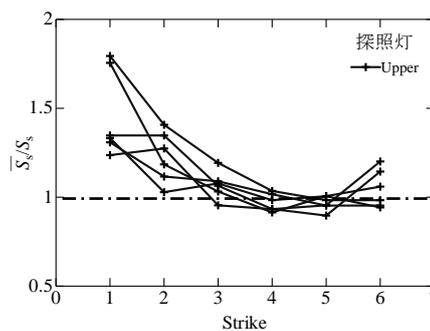


図-4 \bar{S}_s/S_s と打点数の関係 (探照灯外壁上部)

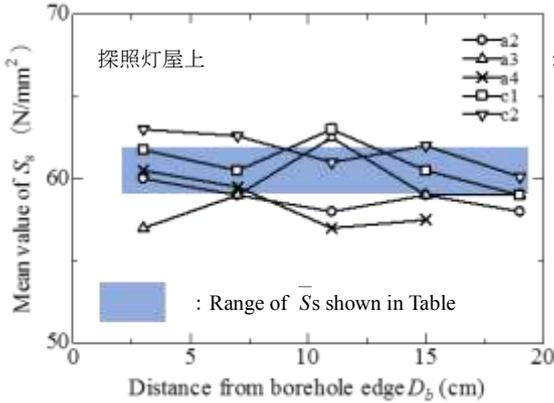


表-4 削孔内 Ss の統計量 (探照灯)

Borehole	Upper	Lower
n	26	38
$\bar{S}s$ (N/mm ²)	59.4	60.3
σ	8.4	10.9
VS s(%)	14.1	18.0

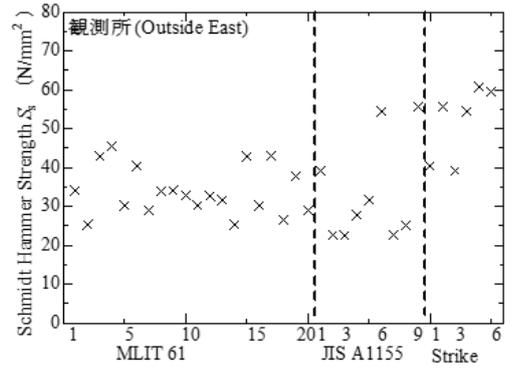


図-6 観測所の Ss (外壁南面)

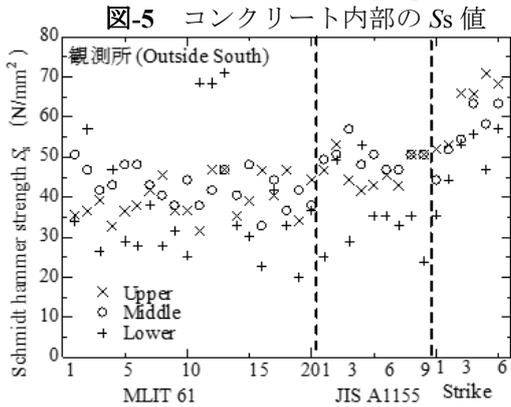


図-7 観測所の Ss (外壁東面)



写真-6 観測所外壁測定面

表-6 コンクリート内部の Ss の推定値

Facility	Site	Wall	Strike						
			1	2	3	4	5	6	
観測所	Upper (outside)	South	61.9	57.0	59.8	63.3	58.2	63.3	
		South	72.6	58.4	72.4	65.8	70.9	68.4	
		East	56.6	61.2	43.1	54.4	60.7	59.5	
		North	79.7	64.0	72.4	63.3	62.0	62.0	
		West	47.7	43.1	52.8	54.4	46.8	51.9	
		West	47.7	47.3	57.0	56.9	53.1	50.6	
	Upper (inside)	South	74.4	72.4	68.2	63.3	58.2	63.3	
		East	70.8	66.8	66.8	60.7	60.7	59.5	
		North	54.8	51.4	64.0	56.9	58.2	60.7	
		West	47.7	47.3	57.0	56.9	53.1	50.6	
		Lower (outside)	South	53.0	53.1	53.1	61.2	51.4	56.9
			West	54.9	59.2	50.6	47.3	58.4	56.9
砲台砲側庫	Upper (outside)	South	65.5	52.8	55.7	51.9	53.1	54.4	
		East	54.8	51.4	48.0	53.1	56.9	56.9	
		North	61.9	52.8	59.5	59.5	62.0	60.7	
		West	61.9	59.8	58.2	59.5	59.5	59.5	
	Lower (outside)	South	44.9	43.5	38.9	48.7	46.8	48.0	
		East	50.2	45.4	50.1	58.4	55.7	56.9	
	Upper (inside)	South	69.0	65.4	68.4	56.9	55.7	56.9	
		East	58.4	54.2	55.7	55.7	53.1	55.7	
		West	49.5	65.4	68.4	50.6	62.0	58.2	
		North	66.2	56.8	55.6	58.4	56.9	50.6	
		West	44.9	54.9	51.4	43.1	50.6	53.1	
		探照灯	Upper (outside)	South	64.4	55.8	59.8	62.0	64.6
East	41.6			45.9	45.9	48.0	50.6	55.6	
West	43.5			55.8	54.2	55.7	50.6	52.8	
Lower (outside)	North		64.4	54.2	61.2	56.9	55.7	48.7	
	South		55.8	61.2	58.4	58.2	56.9	54.7	
	East		57.5	57.0	58.4	56.9	60.7	54.7	

それらの $\bar{S}s$ は、それぞれ 72.5, 54.1, 58.8, 62.0

であり、材質によって異なる。しかし、石の $\bar{S}s$ は 73 N/mm²と大きく、S/C と鉄筋の $\bar{S}s$ は同等であり、コンクリートの $\bar{S}s$ は 54N/mm²と小さい。また、石の VSs が小さいのも特徴的である。なお、石と鉄筋径は、それぞれ 29.8mm, 20.1mm であり、SHT は、それらの中心で行った。

表-5 各打数と $\bar{S}s/Ss$ の平均値 (コンクリート内部の Ss を推定する補正值)

Mean value of $\bar{S}s/Ss$	観測所	Strike	1	2	3	4	5	6
			砲台砲側庫	Upper	1.35	1.15	1.08	0.99
	Lower	1.50	1.21	1.05	1.06	1.09	0.96	
	探照灯	Upper	1.53	1.3	1.06	0.95	0.96	1.10
	Lower	1.32	1.07	1.08	1.00	0.98	0.95	

図-4 は、探照灯外壁の上側の測定値として Ss が一定値になった $\bar{S}s$ に対する Ss の比 ($\bar{S}s/Ss$) を打点数に対してプロットしている。1 打点の $\bar{S}s/Ss$ は 1.2~1.8(平均値は 1.4)である。また、2 打点と 3 打点のそれらは、それぞれ 1.1~1.4 (平均値 1.2), 0.9~1.2 (平均値 1.0) であるが、4 打点以降の平均値はほぼ 1 となる。すなわち、図-4 は、探照灯外壁の上側では、コンクリート内部の $\bar{S}s$ を知るには 4 打点程度必要であることを示している。図-4 の $\bar{S}s/Ss$ の平均値は、各打点の Ss を乗ずることでコンクリート内部の Ss に補正する値として利用できる。図-5 は探照灯屋上の a-2, a-3, a-4 と c-1, c-2 の削孔毎に測定した Ss にこの補正値を乗じて推定したコンクリート内部の Ss を D_b に対してプロットしている。 $\bar{S}s$ は D_b に依存していないことは図-3 の左側に示した図と同じ傾向であるが、表-2 に示した c 孔の Ss が a 孔のそれより幾分大きいことを含め、Ss も同等である。

表-4 は別の削孔の上部と下部の Ss の統計量をまとめている。探照灯の天井は図-2 に示すように 1.3~1.7m のコンクリート厚を有するが、削孔内の測定位置が深度に関係なく $\bar{S}s=60N/mm^2$ の値を有し、VSs が 14~20%と小さいことから均一性の高いコンクリート構造であることがわかる。

4 観測所, 砲台砲側庫, 探照灯の強度

図-6, 7 は観測所外壁のそれぞれ南と東側の Ss を示している。図-6 の MLIT の図中の凡例に示す × (Upper), ○ (Middle), + (Lower) は、写真-6 に示す構造物の上, 中, 下の部分を示している。下部は地表面下に位置した部分であるが、中部と上部の Ss に比較して値が小さい。図-3 (探照灯) で明らかにした MLIT61, JIS A 1155, 6 打法

の関係は観測所の南壁(図-6)と東壁(図-7)でも同様であることがわかる。砲台砲側庫外壁の西と南側に加え、探照灯に対しても同様な分析をして図-6に示した観測所と同じ傾向であることを確認している。

表-5は \bar{S}_s/S_s の平均値を打数に対してまとめている。 \bar{S}_s/S_s の平均値は、数字に着色しているように、打数3~6で1になる。各打点の S_s からコンクリート内部のそれを推定するには、測定値に表-5の値を乗ずることになる。

表-6はMLIT 61で測定した構造物内外の壁面の S_s に、表-5の \bar{S}_s/S_s の平均値を乗じて推定したコンクリート内部の S_s の統計量をまとめている。表-7と表-8は、表-6で示した S_s の統計量を、それぞれ施設の上部和下部でまとめている。表-5の補正値を用いて推定した S_s の範囲は、上部で53~63 N/mm²(表-7)、下部で45~59 N/mm²(表-8)と小さい。また、図-8は、一例として、探照灯上部の測定値と表-7で示した推定値を打数に対してプロットしている。

3打点までの測定値の補正の状況が視覚的に理解できるが、他の施設に関しても同じ傾向であることを確認している。

5 おわりに

本稿の結論は、以下のように要約される。

1) シュミットハンマーで同じ位置を複数回打点したコンクリート表面の強度 S_s は、最初は小さいが数回の打点で一定値になった。この値は、コンクリートに削孔されたその面の新鮮な S_s (≒60 N/mm²)と同等であり、削孔面の場所によらずほぼ一定の値であった。 S_s の変動係数は14~20%と小さいことから、均質性の高いコンクリート構造であることが分かった。

2) S_s が一定値に達するまでの少ない打点の S_s からコンクリート内部の S_s を推定する方法を提案した。提案法を用いたコンクリート内部の S_s の平均値は、構造物の上部で53~63 N/mm²、下部で45~59 N/mm²であった。これらの値は、観測所、砲台砲側庫、探照灯の施設にも依存していない。下部は地表面下に位置しているが、上部との構造の違いを意図した施工が行われたかの判断は、骨材の状況を含む今後の調査の結果を待ちたい。

参考文献

- 1) 正垣：近代日本の土木遺産の地盤工学的分析と保存，地盤工学会誌，Vol.62, No.4, pp.1-5, 2014.
- 2) (公社)地盤工学会：岩盤のシュミット式ハンマー試験方法(JGS 3411-2012)，岩の調査と試験，pp.433-447, 2013.
- 3) 正垣・因幡・奥田：明治以降の土木史跡の建設材料の強度，地盤工学会関東支部発表会，pp.122-125, 2017.
- 4) (公社)土木学会：硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法，(JSCE-G504-1999)，土木学会資料.
- 5) 松倉・青木：シュミットハンマー：地形学における使用例と使用法にまつわる諸問題，地形，第25巻，第2号，pp.175-196, 2004.
- 6) 横堀：強度の一般的特性，材料強度学，技報堂出版，pp.1-18, 1974.

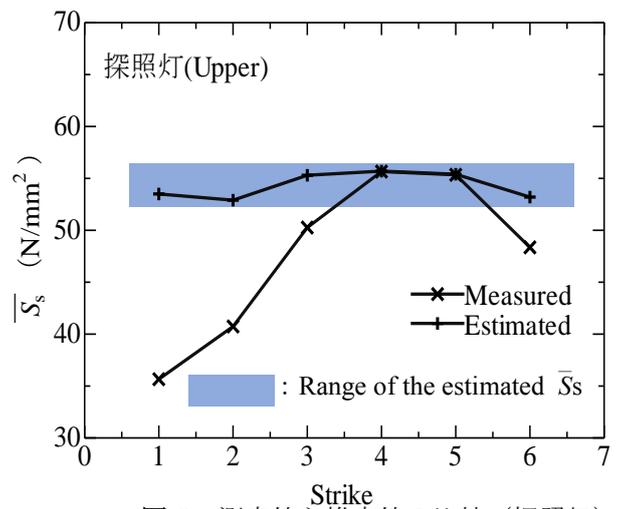


図-8 測定値と推定値の比較(探照灯)

表-7 推定値の統計量(Upper)

	n	Strike	$S_s(N/mm^2)$	σ	$VS_s(\%)$
観測所	54	1	62.9	11.3	18.0
		2	58.1	8.9	15.3
		3	61.8	9.1	14.7
		4	59.9	4.1	6.8
		5	58.8	6.2	10.5
		6	59.9	5.3	8.8
砲台砲側庫	54	1	59.1	7.6	12.9
		2	57.1	5.0	8.8
		3	57.9	6.5	11.2
		4	54.3	5.0	9.2
		5	56.6	3.8	6.7
		6	56.2	3.0	5.3
探照灯	24	1	53.5	10.9	20.4
		2	52.9	4.1	7.8
		3	55.3	6.0	10.8
		4	55.7	5.0	9.0
		5	55.4	5.7	10.3
		6	53.2	2.8	5.3

表-8 推定値の統計量(Lower)

	n	Strike	$S_s(N/mm^2)$	σ	$VS_s(\%)$
観測所	12	1	54.0	0.9	1.7
		2	56.2	3.1	5.5
		3	51.9	1.3	2.5
		4	54.3	6.9	12.7
		5	54.9	3.5	6.4
		6	56.9	0.0	0.0
砲台砲側庫	12	1	47.6	2.7	5.7
		2	44.5	0.9	2.0
		3	44.5	5.6	12.6
		4	53.6	4.9	9.1
		5	51.3	4.5	8.8
		6	52.5	4.5	8.6
探照灯	12	1	56.7	0.9	1.6
		2	59.1	2.1	3.6
		3	58.4	0.0	0.0
		4	57.6	0.7	1.2
		5	58.8	1.9	3.2
		6	54.7	0.0	0.0