

論文 100年以上経過した地下コンクリート構造物の耐久性について

横関 康祐^{*1}・中曽根 順一^{*2}・柿崎 和男^{*2}・渡邊 賢三^{*1}

要旨：東京都芝給水所は、明治 27～29 年に建設された地下式給水所施設であり、底版や煉瓦作りの側壁・隔壁目地材としてコンクリートやモルタルが使用されている。本構造物の解体・新設工事に伴い、我が国でも数少ない 100 年以上もの長年月を経たセメント系材料の物理的・化学的変質挙動を調査した。その結果、表面から 70mm 程度はカルシウムに代表されるセメント分の溶出に伴い、水酸化カルシウムや C-S-H の化学的変質が進行し、表面部には強度低下が確認されたものの、入念な施工がなされていたため 40mm 以深では、十分な性能を有していることが確認された。

キーワード：地下構造物，コンクリート，煉瓦目地，溶出，配合分析

1. はじめに

現代のコンクリートに用いられている水硬性セメントは、1824 年にイギリスの煉瓦職人 J. Aspdin がその製造法の特許を取ったのが始まりとされており、日本に初めてセメントが輸入されたのが 1865 年、製造が開始されたのが 1875 年と言われている¹⁾。したがって、現代コンクリートの歴史は、世界でも 170 数年、日本では 130 年程度しかない新しい材料であると言える。

一方、コンクリートの耐久性や寿命予測に関する研究が盛んになされ、塩害や中性化といった劣化に対しては、メカニズムや予測手法が確立されつつある。しかしながら、上記のとおりコンクリートは歴史の浅い材料である。したがって、長期間を経た後の性能を調査することは、劣化メカニズムの解明や今後の材料開発において非常に有用なことから考えられる。

この度、明治 27 年 (1894 年) に施工された東京都芝給水所の解体・新設工事に伴い、100 年以上を経過したコンクリートおよび煉瓦目地材の調査を行った。本論文では、明治時代のコンクリートがどのようなもので、かつ 100 年という長期間、地下環境、淡水環境条件下に曝されたセメント系材料の変質挙動を調査した結果につ

いて報告する。

2. 構造物の概要

東京都芝給水所は、東京タワーの北側約 200m の高台に位置し、多摩川から淀橋浄水場を経由した水を、中央、港各区の一部に自然流下方式により 1 日平均 8 万 m³ 以上を給水していたものである²⁾。

工事の歴史について工事誌を参考にまとめると、以下のとおりとなる。淀橋浄水工場、芝給水所と形状・寸法などが同一の本郷給水所、および芝給水所の 3 ヲ所が同時に施工され、その内、芝給水所は明治 26 年 (1893 年) 12 月に掘削を開始した。翌 27 年 5 月までは好調に工事が進むものの、その後日清戦争により作業員、運送馬車が不足して工事が幾分遅延。しかしながら、明治 29 年 8 月に池上盛土が終了し、大部分が完成に至った。その後は付帯工事が進められ、明治 31 年より通水が開始された。その後、関東大震災や戦災などにも耐えたものの、昭和 39 年には、東京オリンピックの開催を間近にして人口の増加が著しく、改造工事がなされた。

コンクリート、煉瓦の施工は明治 27～28 年 (1894～1895 年) になされ、現在までに 103～104

* 1：鹿島建設株式会社技術研究所，第二研究部第 2 研究室，(正会員)

* 2：東京都水道局，建設部

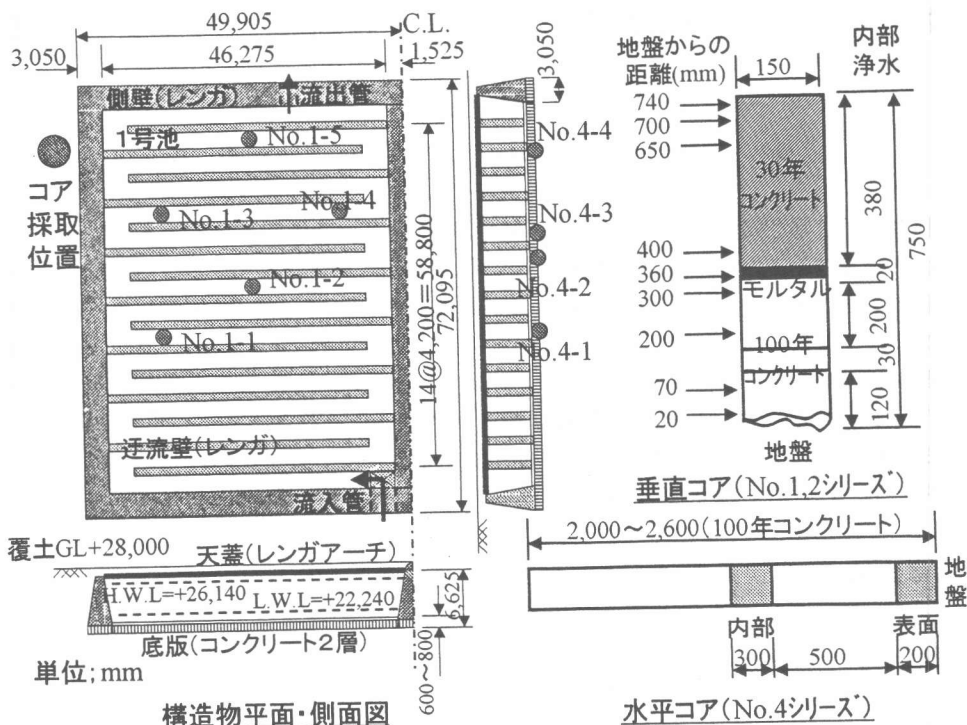


図-1 構造物の概要

年が経過している。

構造物の形状・寸法を図-1に示す。ローム質粘土層の上に建設された幅100m、奥行き70mの池は、中央の隔壁で2池に仕切られている。本構造物は、粘土の上に基礎となる無筋コンク

リートを打設し、この上に煉瓦を積んで、側壁、隔壁、迂流壁などを構築する大規模な煉瓦構造物である。壁の上には鉄骨の格子桁を配置し、桁の間には煉瓦をアーチ状に2段積みして天蓋を形成している。天蓋の上には無筋コンクリートが打設され、さらに1mの覆土が施されている。

表-1 調査項目

調査項目		試験方法	調査位置・コア
外観調査	ひび割れ、浮きなど	目視による	全体
	溶出深さ	ノギスによる深さ測定	迂流壁
力学特性	圧縮強度	JIS A 1108	No.1-2, 1-4, 2-4, 2-5 の上層, 下層
	静弾性係数	JSCE G 502	
	ポアソン比		No.1-2
	ビッカース硬度	JIS B 7734	
耐久性能	中性化深さ	フェノールメチン法	全て
	塩化物イオン量	JCI SC-5	No.1-2 から深さ方向へ9ヵ所
	細孔径分布	水銀圧入法	
水和物の分析*	生成物の同定	X線回折	No.1-2 から深さ方向へ9ヵ所
	生成物の定量	熱分析	
	構成元素の定量	EPMA	
	CSHの変質	化学分析	
配合分析	セメント, 水, 骨材量	セメント協会法 F-18	No.4-3, 4-4
	粗骨材量	面積法	No.4-3

*鈴木らの方法³⁾、船戸らの方法⁴⁾に準拠

3. 調査内容

調査箇所は図-1に示したとおりであり、1、2号池の底版上面から地盤まで垂直に貫通するコア、2号池の側面から側壁煉瓦下の底版コンクリート部分を水平に2.5m程度の長さの水平コア、2号池側壁を水平に貫通する煉瓦コアを採取し、さらに、2号池の迂流壁ブロックを切り出して各種試験を行った。ここで、特にNo.1-2について

は、図-1に示すように深さ方向に9点をそれぞれ1cmスライスにして各種試験を行った。

調査項目および試験方法を表-1に示す。コンクリートの健全性を判断するために、外観調査に始まり、強度などの力学的特性、中性化や塩分の浸透に関する耐久性能、さらに配合分析・コンクリートの変質状況を調査するために水和物の各種分析を行った。

4. 調査結果

4.1 外観調査

解体前・解体中の外観調査によれば、底版コンクリートは、表面にモルタルの浮きや剥離が見られたが、側面から観察したところ、内部にひび割れはほとんど見られず健全であると判断された。

側壁・隔壁表面にはメッシュ筋のはいった厚さ5mm程度の防水モルタルによる補修が施されていたが、ほとんどが浮いた状態であった。

迂流壁は表面被覆などの補修は施されていないが、ひび割れなどの劣化は生じておらず、煉瓦と目地モルタルの境界やモルタル内部には空隙がほとんど観察されなかった。ここでは、100年間に渡って浄水された水が作用していた目地モルタルの溶出深さを測定した。その結果、常に水道水に浸漬されていた底面から30cm～2mまでの部分では溶出深さが平均3.0mm、常に気中にあった天蓋から50cm

の範囲では1.4mmと、浸漬部以下では、水流による摩擦と溶出によりモルタル分が減少している。水が作用していた部分の目地モルタルは、セメント分が少なく、砂状で手により掻き出せる状態にあった。

No.1-2 コアの状況から、底版コンクリートは2層に分かれており、下層が約104年前のもの（以下100年コンクリートと称す）で、上層は昭和39年に改造された際に補修された約34年

前のもの（以下30年コンクリートと称す）と判断される。さらに、100年コンクリートは打継目と考えられる層が下面から100～150mm程度の位置に存在し、表面には厚さ10mm程度のモルタル層が見られた。これらのことは、工事誌中の示方書に記される以下の施工法にしたがって正確な施工が行われたものと考えられる。すなわち、「結成石（コンクリート）の築造は厚さ5寸（約150mm）毎に十分突き固め、表面に水気の現れるのを以て丁度とする。結成石の表面には厚さ3分（約10mm）のモルタルを以て被覆する。」との記述に合致する。さらに示方書では水によりモルタルを流し込むことを禁じたり、寒中コンクリート施工に対して施工時間の制限や、華氏32度（0℃）以下の場合は練混ぜ水に岩塩を混和するなどの対策が記述されている。

4.2 力学的特性

力学的特性試験結果を表-2に示す。試験体数は少ないものの、30、100年コンクリートの圧

表-2 力学性能試験結果

材齢 年	試験体 No.	単位容積質量 kg/m ³	圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数	ポアソン比
30	1-2	2,354	33.4	22,400	0.19
	1-4	2,399	33.1	28,600	0.17
	2-4	2,393	38.0	28,000	0.23
	2-5	2,315	39.3	28,600	0.25
	平均	2,365	36.0	26,900	0.21
	標準偏差	39	3.2	3,010	0.037
100	1-2	2,289	16.4	20,100	(0.06)
	1-4	2,262	12.4	17,800	0.18
	2-4	2,215	10.9	15,500	0.27
	平均	2,255	13.2	17,800	0.23
	標準偏差	37	2.8	2,300	0.064

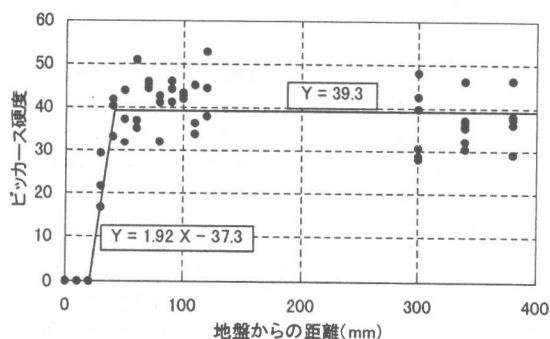


図-2 ビッカース硬度

縮強度はそれぞれ、約36、約13N/mm²であった。両者ともに単位容積質量、圧縮強度、ヤング係数のばらつきは同程度であり、厳しい品質管理の下で施工されたものと考えられる。

四角錐のダイヤモンド圧子(荷重1N)により、地盤に接していた面より表層は10mm 毎および深さ300~400mmの位置でビッカース硬度を測定した。結果を図-2に示す。地盤側から20mmまでは、粗骨材とその周囲に付着したペーストが骨格をなしており、粗骨材間のモルタル分はほとんどが溶出していた。したがって、深さ20mmまでのビッカース硬度は0とした。深さ20~40mmまでは硬度が直線的に増加し、40mm以深ではほぼ横ばいの傾向を示した。ビッカース硬度は、圧縮強度と相関がある⁵⁾ことが知られていることから、地盤に接して100年を経過したコンクリートは力学的に3層(強度が期待できない層、中間層、健全層)に分類して考えることができ、表面のみ強度低下が生じることが分かった。

4.3 耐久性能

中性化試験の結果、底版コンクリート、迂流壁煉瓦目地ともに、ポーラスな部分やひび割れ付近では、数mm程度中性化が進行していることが分かったが、全体的には、外部は地盤と接し、内部は水道水と接しているため、中性化はほとんど進行していないと判断できる。

塩化物イオン量の分布を図-3に示す。100年コンクリート中に塩化物イオンはほとんど存在せず、30年コンクリート表面付近に若干量が確認された。この結果から判断すると、寒中コン

クリート対策としての岩塩は使用されず、昭和に入ってから水道水に使用され始めた塩素が進入しているものと考えられる。ここで、鉄筋腐食限界塩化物イオン量を1.0kg/m³⁶⁾とすると、30年コンクリートの表面から20mm程度が限界量を超えているものの、底版は無筋であるため塩化物イオンによる劣化は生じていない。

水銀圧入法による細孔径分布測定結果を図-4に示す。総細孔量は、30年コンクリートに比べて100年コンクリートの方が多く、ポロシティに換算して5%程度多くなっているが、これは設計基準強度の差によると考えられる。細孔径の分布は、両者ともに1,000nm(1μm)以上の大きい細孔は少なく、全般的に長期間水分の補給を受け、十分に水和が進行して細孔が小径へ推移していったものと推察される。

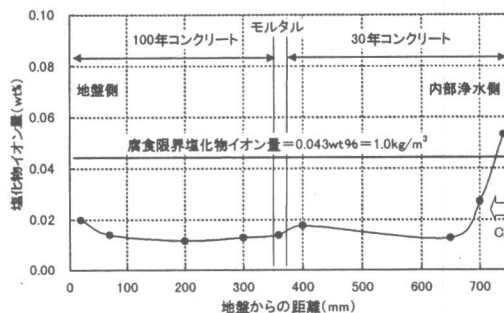


図-3 塩化物イオン量分布

4.4 配合および水和物

側面地盤から1m、底面地盤から1mの位置にあり、100年コンクリートとしては最も内部にあって、劣化を生じにくい場所にあったNo.4-3コアについて、セメント協会コンクリート専門

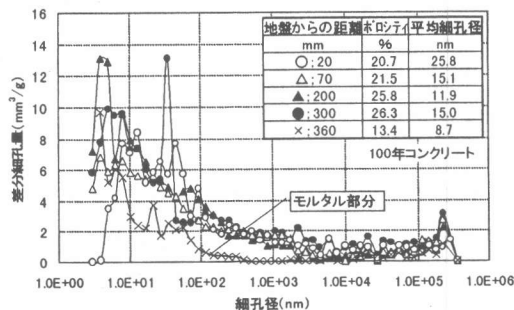
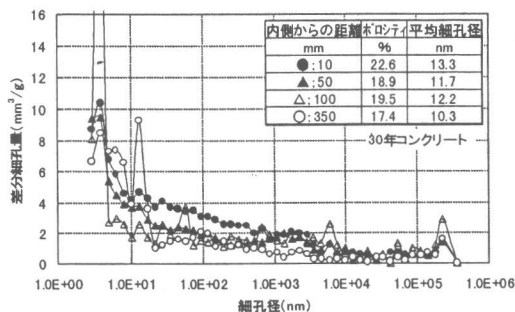


図-4 細孔径分布

表-3 配合推定の結果

試料 No.	ig. loss (%)		insol. (%)	CaO (%)	単位容積質量 (kg/m ³)		推定単位量 (上段:kg/m ³ , 下段:m ³ /m ³)				推定水セ ト比(%)
	600℃	1000℃			表乾	絶乾	セメント	水	細骨材	粗骨材	
4-3 内部	3.2	3.8	87.0	4.4	2379	2269	152 0.05	109 0.11	688 0.27	1431 0.57	71.7

明治 29 年三河セメント社の試験報告より、セメントの CaO 量を 61.1%、強熱減量を 0.3%、比重 3.15 骨材の不溶残分 95.1%、CaO 量 0.4%、強熱減量 1.7%、吸水量 1.8%、比重を 2.51 と仮定
粗骨材量は、コア断面の粗骨材面積を測定することで推定

委員会報告 F-18 の方法に従い、
配合分析を行った。結果を表-
3 に示す。セメント量は、152
kg/m³、水量は 109kg/m³、水セ
メント比は 72% と推定された。

工事誌にはセメントと砂の割合は 1:4、セメン
トは三河セメント（現三河小野田セメント）社
製を中心に鈴木、大阪、日本セメントを使用、
砂利は泥・土・塵・埃を洗浄した多摩川産同等
品（12~36mm）を使用したと記録されている。
また、コンクリートの製造は練舟中においてセ
メントおよび砂を空練りし、適度の水を加えて
数回攪拌し、敷き均した砂利の上に散布して 3
回以上切り返すこととされている。配合分析で
もセメントと砂の比は 1:5 と工事誌に近い値を
示していた。一方、文献¹⁾によ

れば、当時はセメント、砂、砂
利の比が、1:2:5、1:3:6 と
いった配合比が多く使用されて
いたとのことであるが、本配合
は 1:5:11 と骨材が多く、ダム
コンクリートのような貧配合と
なっている。

30 年コンクリートは、試験を
しておらず、配合は不明である
が、粗骨材最大寸法 20mm、強
度から水セメント比が 50%程度
と推定される。

次に、No.4-4 コアの地盤側表面 30cm および配
合試験に供した No.4-3 について、鈴木らの方法
³⁾ 船戸らの方法⁴⁾に従い、水和物の定量を行っ
た。結果を表-4 に示す。地盤側では内部より

表-4 水和物の定量結果

試料 No.	ペースト中の水和物の組成比 (wt%)						
	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	AFm 相	Aft 相	シリカゲル	CSH	付着水
4-4 表面	0	8	29	3	1	55	4
4-3 内部	4	4	19	3	1	65	4

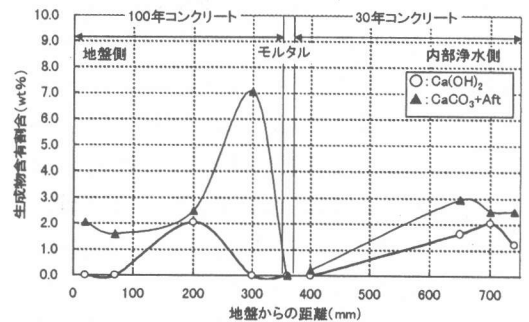


図-5 熱分析試験結果

表-5 EPMA 面分析の結果

種別		100年コンクリート				モルタル	30年コンクリート			
化学成分	単位	地盤からの距離(mm)								
		20	70	200	300	360	400	650	700	740
NO ₂	mol%	0	0	0	0	5.1	0	0	0	0
Na ₂ O		0.4	0.2	0	1.4	3.4	3.4	1.2	2.0	3.2
MgO		1.4	1.2	0.7	0.8	1.9	1.9	1.6	2.6	2.2
Al ₂ O ₃		7.9	7.3	8.6	6.6	8.4	10.2	10.9	10.4	9.4
SiO ₂		36.7	36.4	32.8	28.6	35.9	36.7	35.5	38.9	40.8
SO ₃		0.5	1.0	0.9	0.7	0.7	1.1	2.1	1.3	1.2
K ₂ O		0.4	0.5	0.2	0.2	0.6	0.7	1.1	0.6	0.1
CaO		50.6	51.4	55.8	60.6	42.4	43.6	46.5	43.0	41.1
Fe ₂ O ₃		1.8	1.7	0.6	1.0	1.5	1.8	1.1	1.2	1.9
CaO SiO ₂	mol比	1.38	1.41	1.70	2.12	1.18	1.19	1.31	1.11	1.01

も C-S-H が少なく、水酸化カルシウムは存在し
なかった。一方、地盤側では内部よりも炭酸カ
ルシウム、モノサルフェートの割合が多く見ら
れた。この傾向は、溶出による劣化を代表する

結果と言える。すなわち、最初に水酸化カルシウムが溶出し、その後、C-S-H の溶出が始まるという変質メカニズム⁷⁾に合致する。

No.1-2 コアについて、熱分析を行った結果を図-5に示す。30、100年コンクリートともに、地盤あるいは水道水に接していた面では水酸化カルシウム量が少なく、溶出あるいは水や地盤中に含まれる炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムなどに变化したものと考えられる。ただし、水に接していないはずの深さ400mmの位置でも水酸化カルシウム、炭酸カルシウムが検出されなかった。これは、接する水分や気体が少ないため、炭酸カルシウムは生じていないが、水酸化カルシウムについては打継目を通じて溶出が生じた、あるいは100年コンクリート側への物質移動が生じたなどが考えられる。

No.1-2の供試体で図-1に示す深さ方向に2.5×2.5mm試験片を採取し、EPMA元素分析を行って、酸化物に換算した結果を表-5に示す。EPMAの結果でも、CaO/SiO₂モル比が地盤側から70mm程度、水道水側から50mm程度については、内部よりもその値が低い傾向を示しており、地盤や浄水に存在する物質による化学的な作用と水分の攻撃による溶出現象が100年コンクリートは70mm程度、30年コンクリートは50mm程度進行していると判断される。

5. おわりに

明治・昭和時代に製造され、地下・淡水環境で約100、30年経過したセメント系材料を調査したところ、不確定な部分もあるが、地盤や水に接している部分ではセメント分の溶出による劣化が進行しているが、全般的には健全であることが分かった。結論を以下にまとめる。

- 1)底版は無筋コンクリートであるため劣化形態としては、化学的な変質が中心となるが、地盤側や水道水接触面では溶出による劣化が進行しているものの、内部は健全であり、またひび割れも少ないため、機能上の問題はない。
- 2)100年コンクリート地盤側表面では、施工時の

影響、地盤に含まれる物質と水分の影響などによりカルシウムの溶出が地盤から70mm程度まで進行している。

- 3)30年コンクリート水道水側では、化学的に50mm程度の溶出現象が進行している。
- 4)力学的には、地盤側表面の20mmについては強度を期待できないが、強度が低下している深さは化学的な変質深さよりも小さく、40mm以深では内部と同等の強度を保持している。

今後、地盤に含まれる物質の同定や、目地モルタルの化学的な分析を行い、セメント系材料に影響を及ぼす物質や水の影響を検討していく予定である。

謝 辞

本論文を執筆するに際して、東京工業大学 大即教授、大門教授、坂井助教授、新潟大学 久田助教授のご指導を頂いた。三河セメントの明治時代のデータは、秩父小野田セメントから提供して頂いた。各位に紙面を借りて感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1)長滝重義監修：コンクリートの長期耐久性 [小樽港百年耐久性試験に学ぶ]、技報堂出版、1995
- 2)芝区史、1934
- 3)鈴木一孝ら：コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析方法に関する研究、コンクリート工学論文集No.34, pp.39-49, 1990
- 4)船戸已知雄ら：セメント水和物の炭酸化によって生成するシリカゲルの定量方法、セメントコンクリート論文集No.45, pp.252-257, 1991
- 5)藤井卓、藤田嘉夫：凍結融解作用をうけるセメントペーストの微小硬度変化、土木学会第44回年次学術講演会、第V部門, pp.622~623, 1989
- 6)堤ら：若材令で海水に接するコンクリート中の鉄筋腐食に関する一実験、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.13-1, pp.651~656, 1991
- 7)古澤靖彦：カルシウムの溶出によるコンクリートの劣化とモデル化に関する研究動向、コンクリート工学, Vol.35, No.12, pp.29~32, 1997