

報告 大正期に建てられた建築物のコンクリートの調査報告

石川 伸介*1・立山 創一*2

要旨：大正時代 10 年に建てられた鉄筋コンクリート造建築物の改修工事に当たり、コンクリート材料の調査をおこなった。その結果、圧縮強度は柱で平均 18.5N/mm²、壁で平均 24.6N/mm²であり、良好な強度を維持していたが、ややばらつきが大きかった。中性化深さは平均 87mm と大きな値であった。配合推定からは、比較的水セメント比の大きなコンクリートであることがわかった。セメントは現在のものよりも粒径が大きく、ピーライト分の多いものであり、明治・大正期のセメントの特徴と一致する。

キーワード：圧縮強度、大正期、中性化、細孔径分布、配合分析

1. はじめに

本建物は大正10年（1921年）庁舎として建築されたものである。このたび改修工事を行うにあたり、当時使用された構造材料について調査を行うことができた。建築当初から使用されていたコンクリートについて各種性状の試験を行ったので結果について報告する。

2. 調査概要

2.1 建物概要

本建物は、大正 10 年（1921 年）庁舎として建設された、地上 2 階建ての鉄筋コンクリート造の建造物で、建設地は東京都心部である。歴史的建造物としてこの建物の活用を図るため、築後 86 年経たる躯体の劣化補修と構造体補強の改修工事が行われた。

2.2 試料採取

試料は、改築に伴い解体される柱および壁からコアを採取した。試料の採取位置を図-1に示す。柱壁とも全面屋内に面しており、表面はモルタルによる仕上げが行われていた。鉄筋は柱主筋がφ22mm、壁筋がφ9mmの丸鋼であった。なお壁については、暖炉の部分を避け採取を行った。コアの直径は柱100mm、壁75mmとした。

圧縮強度試験、中性化深さ測定は、図-1で塗りつぶした柱4箇所、壁12箇所で行った。また柱4箇所においては同時にヤング係数の測定を行った。圧縮強度、中性化深さ以外の分析は柱から採取したコアを使用し、配合推定は2-2、それ以外の分析は3-1のコアを用いた。また、細孔径分布及びEPMAによるマッピング分析については、強度と比較するため、3-1の他に、壁から採取し強度の異

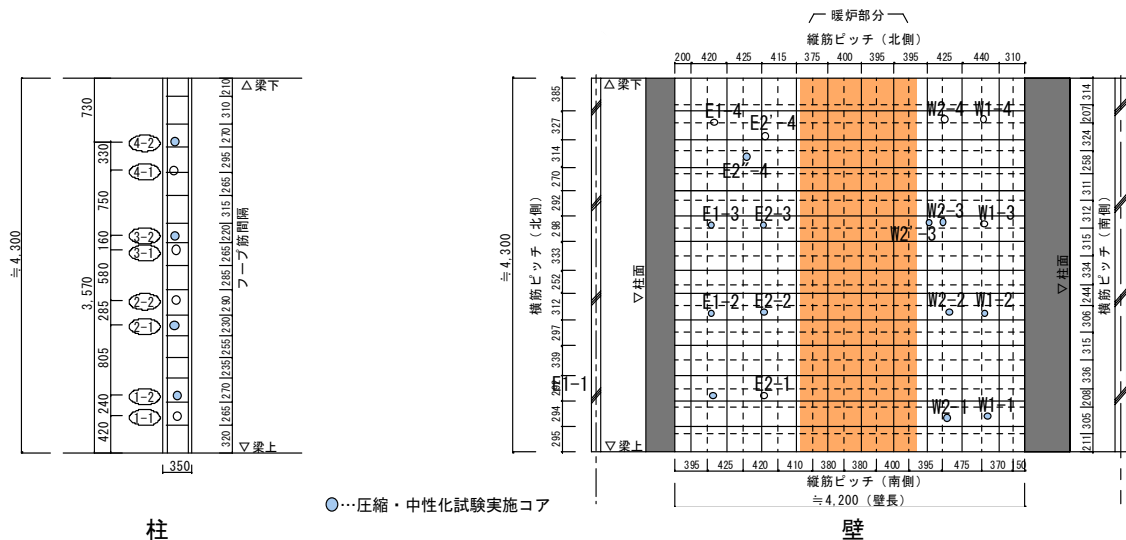


図-1 コア採取位置図

*1 安藤建設（株） 技術研究所材料・施工研究室（正会員）

*2 安藤建設（株） 技術研究所材料・施工研究室長 工修（正会員）

なったW-2-1, E2-3, W2'-3のコアについても行った。

2.3 試験内容

試験項目は以下のとおりとした。

- a. 圧縮強度 (JIS A 1107)
- b. ヤング係数 (JIS A 1149)
- c. 中性化深さ (JIS A 1152)
- d. 配合推定 (セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18 準拠)
- e. 骨材の岩石種類判定
- f. 細孔径分布測定 (水銀圧入式ポロシメーター法)
- g. 気泡間隔係数測定 (ASTM C457-90)
- h. EPMA によるマッピング分析
- i. EPMA による未水和セメント部の点分析
- j. 走査電子顕微鏡観察 (SEM)

3. 試験結果

3.1 圧縮強度およびヤング係数

圧縮強度およびヤング係数の測定結果を表-1に示す。

圧縮強度は、柱は4本測定し平均18.5N/mm²、壁では12ヶ所測定し平均24.6N/mm²であった。

大正8年に公布された「市街地建物法」によれば、施工規則の中で許容応力度を45kgf/cm² (約4.4N/mm²) と定めており当時のコンクリートとしては、十分な強度を保

持していると考えられる。

壁部材において17.9~34.5N/mm²と強度のばらつきが大きい。これは当時コンクリート強度が水セメント比によるという考え方が普及しておらず、打設に適当な軟度になるように水量を加減していたこと、また、当時のミキサーの練混ぜ容量が小さくバッチ数が多くなったことも影響していると考えられる。

ヤング係数は平均24.0kN/mm²でRC基準式と比較すると、圧縮強度のわりには大きな値となっている。これは使用した骨材の特性によるものと考えられる。

3.2 中性化深さ

中性化深さは、圧縮試験終了後割裂を行い、割裂面を測定した。

測定状況を写真-1に、中性化深さを表-2に示す。

柱では中性化深さは平均87mm、壁では厚さ100mm~110mmの部材が中心部まで全面的に中性化していた。また、鉄筋に関しては全面に発錆が見られた。

次に示す配合推定の水セメント比71.3%から、岸谷式により中性化が87mmになる期間を求めると、318年に相当する。実際の経過機関は86年であり、かなり速い中性化速度と考えられる。今回測定したコアはいずれも室内に面したものであるため中性化の進行は早かったと考えられるが、建物の使用状況に不明な点が多いため、使

表-1 圧縮強度およびヤング係数測定結果

部材名	記号	強度 N/mm ²	ヤング係数 k N/mm ²
1F 柱	1-1	19.7	26.4
	2-1	16.9	22.9
	3-2	18.2	21.6
	4-2	19.1	25.0
	平均	18.5	24.0
1F 壁	E1-1	23.2	—
	E1-2	22.3	—
	E1-3	26.4	—
	E2-2	26.5	—
	E2-3	25.4	—
	E2'-4	22.7	—
	W1-1	19.4	—
	W1-2	25.7	—
	W2-1	17.9	—
	W2-2	20.0	—
	W2-3	31.0	—
	W2'-3	34.5	—
	平均	24.6	—

表-2 中性化深さ測定結果

部材名	記号	中性化深さ (mm)
1F 柱	1-1	94
	2-1	99
	3-2	84
	4-2	74
	平均	87
1F 壁	E1-1	全面
	E1-2	全面
	E1-3	全面
	E2-2	全面
	E2-3	全面
	E2'-4	全面
	W1-1	全面
	W1-2	全面
	W2-1	全面
	W2-2	全面
	W2-3	全面
	W2'-3	全面
	平均	全面

用状況との関連を考察することはできなかった。

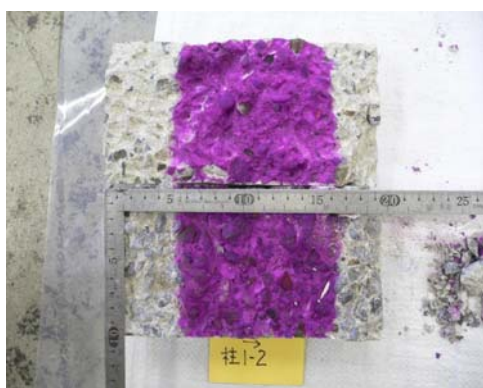


写真-1 中性化測定状況 (柱部材)

3.3 配合推定

顕微鏡観察等により、骨材には石灰石は使用されておらず、セメントはポルトランドセメントであると推定された。そこで推定にあたっては、普通ポルトランドセメントの一般的な値として、CaO量 64.5%、強熱減量 0.6%、骨材については現在の平均値である、不溶残分 95.2%、CaO量 0.4%、強熱減量 1.2%を用いた。

配合推定の結果を表-3に示す。水セメント比は70%を超え高い値といえる。

明治38年の鉄筋コンクリートの出現以降、建築用コンクリートには施工しやすさが重視され軟練り化する傾向にあった¹⁾。当工事においても、配筋はかなり密であり軟練りのコンクリートが使用された可能性がある。当時は水セメント比が圧縮強度や耐久性と関連することが認識されていなかったため、単位水量は所望の流動性が得られるよう現場の判断で決められていた²⁾。

当時のコンクリートの配合は、セメント、細骨材、粗骨材の容積比で定められていた。大正8年に公布された「市街地建物法」によれば、容積比でセメント：砂：砂利=1:2:4の配合で許容応力度を45kgf/cm²、1:3:6の配合で許容応力度を30kgf/cm²とすることなどの規定があり³⁾、水量の規定はなかった。コンクリート強度はセメントと骨材の比率で変わるものと考えられていたようである。セメントの単位容積質量を1500kg/m³、骨材の単位容積質量を1650kg/m³と仮定すると、セメントと骨材の比率は、1:7となり、細骨材粗骨材の比率は不明であるが、セメント、細骨材、粗骨材の比率は1:2:4に近いと思われる。

表-3 配合推定試験結果

単位量 (kg/m ³)			水セメント比 (%)
セメント	水	骨材	
251	179	1937	71.3

3.4 骨材の岩石種類

写真-2に骨材観察面を、表-4に岩石種別を示す。粗骨材の最大寸法は20mm程度であり、よく円磨された砂利からなるものであった。安山岩質または玄武岩質の火山岩類を多く含むもので、関東地方の主な河川では相模川水系の河床の礫と一致する。細骨材は、粗骨材と同様の岩石種からなる岩片および石英や長石などの結晶片を多く含む砂からなり、貝殻片はほとんど認められず川砂と判断された。



写真-2 骨材の観察面

岩石種		構成割合 (%)
堆積岩	礫岩	4
	砂岩	44
	頁岩	7
	チャート	8
火山岩	玄武岩	3
	ドレライト	9
	玄武岩質火山礫凝灰岩	8
	玄武岩質ラピリストーン	
	安山岩	11
	安山岩質溶結凝灰岩	3
	流紋岩質溶結凝灰岩	1
深成岩	閃緑岩	1
	計	100

表-4 粗骨材の岩石種別構成割合

3.5 細孔径分布

図-2に柱から採取したコア3-1の細孔径分布測定結果を示す。気孔率は22.58%であった。また、直径0.03 μmより大径側の空隙が多く、毛細管空隙の多い疎な構造といえる。このことは中性化速度が速いこととも一致する。また、コンクリートの強度は所定以上の大きさの細孔

量と高い相関関係を持つことが知られているため⁴⁾、壁から採取した強度の異なった3本の試験体について細孔径分布を測定した。測定結果を表-5に示す。

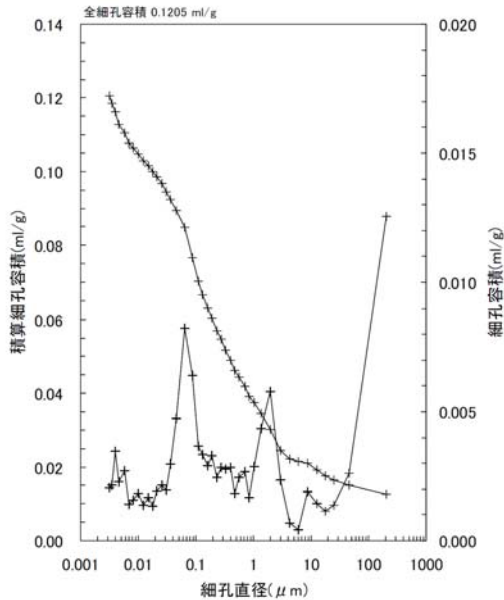


図-2 細孔径分布測定結果 (コア3-1)

表-5 細孔径分布試験結果

試料名	W2-1	E2-3	W2'-3	3-1 (柱)
圧縮強度 (N/mm ²)	17.9	25.4	34.5	---
全細孔容積 (ml/g)	0.1277	0.1082	0.0954	0.1205
気孔率 (%)	24.45	21.44	21.23	22.58
0.1 μm以上の細孔容積 (ml/g)	0.0818	0.0736	0.0565	0.0608

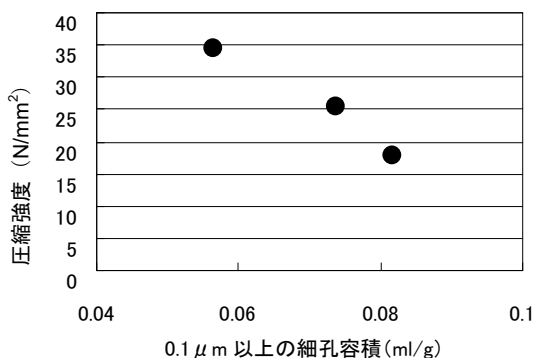


図-3 0.1μm以上の細孔容積と圧縮強度の関係

全細孔容積、および強度など物理的性質と関係の強い0.1 μm以上の細孔容積は、いずれも強度の低いコンクリートほど大きい結果となった (図-3)。この大きさの細孔は、毛細管空隙に相当し、強度の違いは、製造時の水セメント比の違いによる可能性が高いと考えられる。また、壁から採取したコアについては、全面的に中性化していたため、主としてC-S-H水和物の内部空隙 (ゲル空隙) に相当する直径0.01 μm以下の細孔はほとんど認められなかった。

3.6 気泡間隔係数

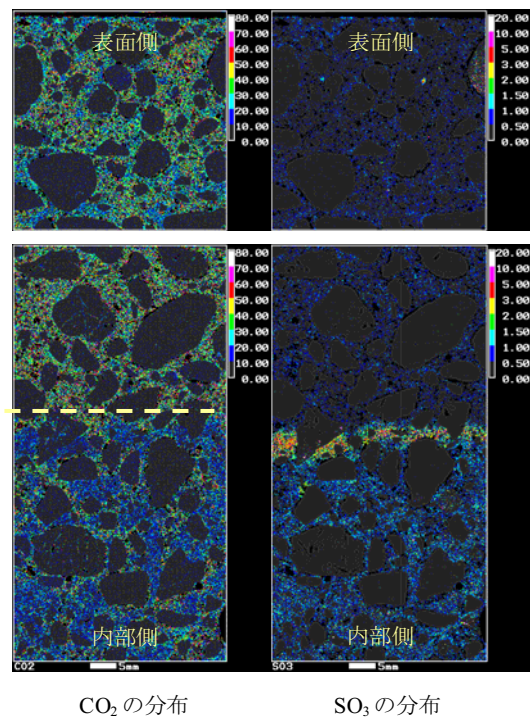
空気量は2.0%、気泡間隔係数は0.376であった。気泡間隔が0.2~0.25mm以上では凍結融解による劣化が生じやすいといわれている。AE剤の日本への導入は昭和23年であり、本コンクリートは開発前のもので、AE剤は使用されていないと考えられる。

また、本建物は東京都心部に立地しており、凍結融解による劣化は少ないと思われる。

3.7 EPMAによるマッピング分析結果

結果の一例を写真-3に示す。CO₂濃度結果を見ると、中性化深さ試験で中性化が見られた部分の濃度が高くなっており、炭酸化により中性化が進んだと思われる。また、SO₃、Clの濃度は、中性化した部分が低くなり未中性化部分との境界部分に濃縮された部分が見られた。

また、細孔径分布と同じく、強度の違った3種類の試験体を用い比較を行ったところ、CaO濃度が異なり、強度の低い試験体W2-1では他の2本より低い濃度となった。



CO₂の分布

SO₃の分布

写真-3 EPMAマッピング分析

CaO濃度が低いことは、セメント量が少ないか、水セメント比が高いと考えられる。SO₃濃度分布では、強度の低いW2-1において濃度が高くなっていた。強度が低くセメント量も少ないと思われるW2-1のSO₃濃度が高いことから、SO₃分はセメント由来ではなく、外部から侵入したSO₃が主であると考えられる。

3.8 EPMAによる未水和セメント部の点分析

写真-4に未水和セメント粒子の組成像の一例を、表-6に写真中の各点の組成を示す。長径はおよそ130μmほどであり現代のものよりも大きく、粉碎、分級技術が発達途上にあった大正期のセメントの特徴と考えられる。

未水和セメント部の点分析の結果、クリンカー鉱物は、カルシウムシリケート相の大部分がビーライトであり、エーライトは注意深く探さないと見つからない程度であった。明治や大正のセメントは、原料や製造設備の事情により現代よりCaO含有率の低いものであったという記録があり史実と一致する⁵⁾。クリンカー鉱物の組成については、現在のものと大きな差は見られなかった。

写真-4 EPMAによる未水和セメント部の点分析

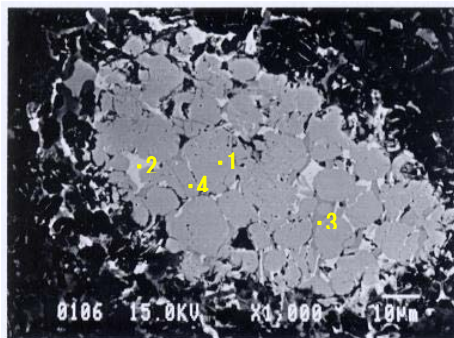


表-6 写真-4の各点の組成

単位(%)	1	2	3	4
CaO	62.3	45.7	52.1	63.5
SiO ₂	33.6	4.1	6.7	34
Al ₂ O ₃	0.5	19.5	27.2	0.6
Fe ₂ O ₃	0.6	23.4	5.5	0.5
MgO	0.3	2.9	2.2	0.2
SO ₃	0.2	0	0.2	0.3
Na ₂ O	0.3	0.3	3.8	0.3
K ₂ O	0.5	0	1	0.4
Total	98.2	95.9	98.6	99.7
推定 鉱物	ビーラ イト	フェライ ト相	アルミネ ート相	ビーライ ト

3.9 走査顕微鏡 (SEM) による観察結果

観察結果の一例を写真-5に示す。形状及び装置付属の成分分析装置により水和物の判定を行った。観察された

主な水和物は、水酸化カルシウム、カルシウムシリケート水和物(繊維状、網目状、ゲル状)、エトリンガイト、モノサルフェート、フリーデル氏塩であった。

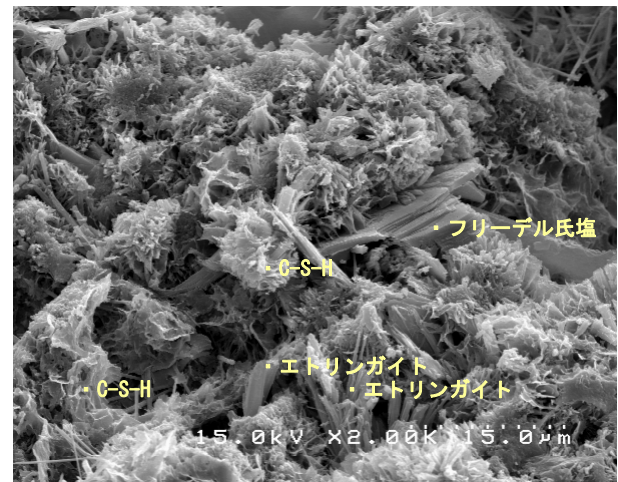


写真-5 走査顕微鏡による画像

4. まとめ

- 1) 本コンクリートは水セメント比が大きく、細孔径分布からも毛細管空隙の大きい疎な構造といえる。また、圧縮強度、水セメント比のばらつきも大きいと考えられ、水セメント比と強度の関係が知られておらず、ミキサ容量も小さかった大正期のコンクリートの様子がうかがえる。
- 2) 本コンクリートは中性化が顕著であった。EPMAによる元素マッピング分析でも炭酸化による中性化の顕著な進行が確認された。
- 3) 未水和セメントの性状は、形状、成分ともに大正期のセメントの性状と矛盾しない結果であった。

参考文献

- 1) 長瀧重義：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、pp.54、1996
- 2) 山崎和夫、浅岡宣明、小石川功：大正時代に築造された鉄筋コンクリートの調査、セメント工業、No.118、pp.1-11、1985
- 3) 加賀秀春：コンクリートの品質管理に関する歴史的考察、コンクリート工学、Vol. 21、No7、pp12-19、1983
- 4) 内川浩、羽原俊祐、沢木大介：混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化体構造が強度発現性状に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No44、pp.330-335、1990
- 5) 中尾龍秀：わが国のセメント品質 -とくに外国セメントとの比較-、セメント・コンクリート、No253、pp.27-40、1968

