

報告 雲仙・普賢岳の火砕流で被災した鉄筋コンクリート構造物 (大野木場小学校) の調査報告

金田昌治*1・岳尾弘洋*2・長谷川堯一*3・原田哲夫*4

要旨：雲仙・普賢岳の火砕流(H3.9)で被災した鉄筋コンクリート構造物(大野木場小学校)の現地保存に際して、その被災状況および劣化状況を確認するための調査(H9.7)を行った。本校は、火砕流による災害を受け、被災時の状況にほぼ近い状況で残っている数少ない鉄筋コンクリート構造物の一つである。また、原爆により被災した広島原爆ドームと同様に、被災の実態を継承するために重要なものである。この調査結果は、被災を継承する資料となり、また本校の保存方法の選定、今後の維持管理の資料とするものである。

キーワード：火砕流、被災コンクリート、受熱温度推定、熱分析、EPMA

1. はじめに

火砕流により被災した鉄筋コンクリート構造物(大野木場小学校)の被災状況の把握、またその構造物の保存に当たっての劣化状況の把握、補修対策の選定および対策後の追跡調査における初期値を得るに当たり、今回、表-1に示す調査を行った。本報告では、これらの調査結果より、化学的な受熱温度の推定および化学的影響について報告を行う。調査では、火砕流および火災による影響を考え、C(炭素)、S(硫黄)元素に着目し測定を行った。すなわち、火山性ガスの影響があれば硫酸分に、また火災の影響があれば炭酸カルシウムの分布に変化があらわれるものと考えた。

2. 火砕流概要

火砕流とは火山の噴火にともない、高温の岩塊・火山灰・軽石等が高温ガス(空気と水蒸気)と混じり合い、数百度もの高温のまま(中心温度は800℃程度)、時速100kmにも達する速さで地表を流れる現象をいう。下層部の高密度本体部と上層部の低密度雲状部とで構成される。

被災状況の外観調査より、本校舎は岩塊等による衝突を受けた跡は見受けられず、火砕流の低密度部分の高温ガスにより被害を受けたものと考えられる。目撃者からも、「雲状のものが校舎の北面から南面に包み込むように見えた」との情報が出されている。被災状況のイメージ図を図-1に示す。

表-1 調査項目

外観調査	・ひび割れ ・浮き 等
コンクリート物性調査	・中性化試験 ・圧縮強度試験 ・EPMA(C)(S) ・粉末X線回折(XRD)
受熱温度推定	・化学分析(熱分析・配合推定) ・外観調査
モルタル付着試験	・建研式引張試験

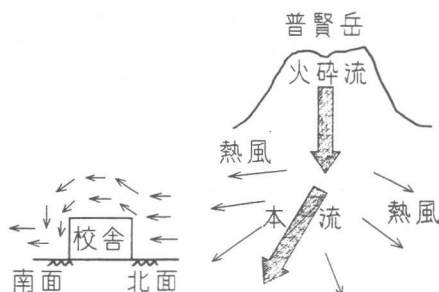


図-1 被災状況のイメージ図

- *1 ショーボンド建設(株) 九州支店技術部技術1課 (正会員)
 *2 ショーボンド建設(株) 九州支店技術部技術1課課長 (正会員)
 *3 (株)シーティーアイ新技術 環境科学部 (非会員)
 *4 長崎大学教授 工学部構造工学科 工博 (正会員)

3. 建物概要

建物概要を表-2に示し、立面図を図-2に示す。また、表面仕上げの仕様を表-3に示す。

表-2 建物概要

	新校舎	旧校舎
所在地	長崎県 深江町	
竣工年次	昭和56年(16年経過)	昭和42年(30年経過)
構造	鉄筋コンクリート(RC)造	
階数	地上3階	地上2階

表-3 表面仕上げ仕様

	新校舎(南北)	旧校舎(南)	旧校舎(北)
屋外側	打放し+リシ	モルタル+リシ (35mm)	モルタル+リシ (35mm)
屋内側	モルタル+リシ (35mm)	打放し+リシ	モルタル+リシ (25mm)

()内の数値は平均モルタル厚を示す

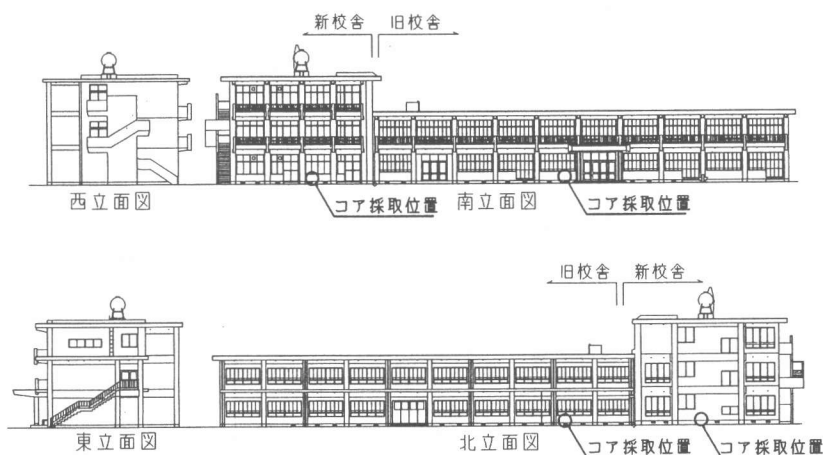


図-2 立面図(大野木場小学校)

4. 供試体概要

試料の採取は、火砕流の影響(屋外)と火災の影響(屋内)を受けたと考えられる箇所から行うこととした。採取位置については図-2に示す新旧校舎の各南北面において、外壁から室内へ貫通するコンクリートコア(φ 70 × 160)を採取し各試験を行った。

コアの本数は各面5本とし、表-4に示すように3本は中性化試験と圧縮試験に、1本は割裂し片面で中性化試験を、対する面でEPMAを行った。また、1本は中性化試験を行いその結果をもとに、コアを図-3に示すように深さ方向に任意の厚さに切断し粗粉碎した後、目視で粗骨材を取り除き微粉碎したものを試料とし

て、熱分析・配合推定・粉末X線回折(XRD)を行った。

表-4 試験別供試体一覧

試験内容	
	 中性化 + 圧縮強度
	 EPMA (中性化)
	 (中性化) 熱分析 配合推定 XRD

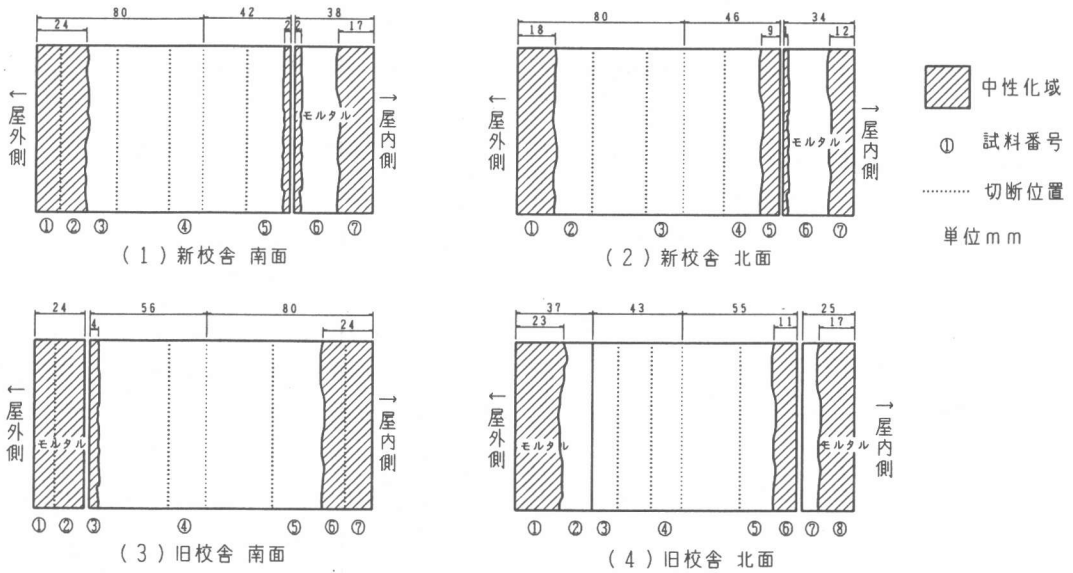


図-3 熱分析・配合推定・粉末X線回折の試料採取位置

5. 試験

5.1 中性化試験

1%フェノールフタレインアルコール溶液を採取コアに噴霧する方法で行った。

また、この中性化は熱の影響を受けた場合、セメント水和物の分解、あるいはC-S-H ($3\text{C}\cdot\text{O}\cdot\text{S}\cdot\text{O}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$)と炭酸ガスとの反応が促進され、進行することが知られている³⁾。すなわち、本校舎の中性化が異常に進んでいた場合は、火砕流および火災の影響であると考えられる。

熱による影響を考察する指標として、標準中性化深さを中性化速度式(岸谷式)¹⁾によって算出し比較した。

中性化速度式(岸谷式:セメント比60%以上の場合)

$$t = \frac{0.3(1.15+3X)}{R^2(X-0.25)^2} C^2 \quad (1)$$

ただし、 t :経過年数(年), C :中性化深さ(cm), X :水セメント比, R :中性化率

表-5 標準中性化深さ(計算値)

		新校舎	旧校舎
条 件	経過年数	16年	30年
	水セメント比	65%	65%
	中性化率	1.0	1.0
中性化深さ		1.66cm	2.27cm

5.2 EPMA (Electron Probe Micro Analyser)

供試体の作成は、着目元素の部材表面から深さ方向での濃度分布をマッピングできるように、サンプリングコアから $80 \times 80 \times 10(\text{mm})$ の寸法で切り出したものとした(図-4参照)。また、この採取位置は中性化試験とEPMAによる相関を確認できるようにした。

サンプリングコア

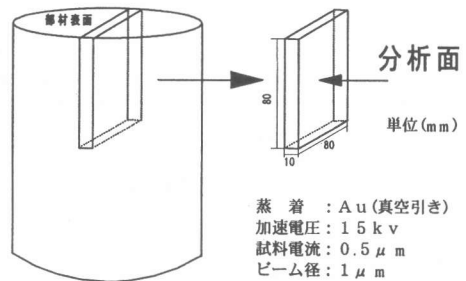


図-4 試験体の切り出し(EPMA)

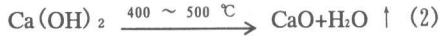
分析は前述したように、火砕流あるいは火災により受けた影響をみるため、C(炭素)およびS(硫黄)元素に着目し行った。火山性ガスの影響があれば硫酸塩化合物および炭酸カルシウムに変化があらわれるものと考えられる。

C(炭素)のコンクリートに与える影響は、中性化が主であり、S(硫黄)ではコンクリートの硫酸劣化が考えられる。

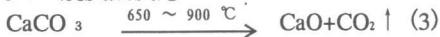
5.3 熱分析(TG-DTA)

熱分析は、温度変化に伴う吸熱、発熱を示差熱分析(DTA: Differential Thermal Analysis)で、質量の増減を重量分析(TG: Thermo Gravimetric analysis)で測定した。分析は式(2)、(3)に示すセメント成分の反応に着目し、受熱温度の推定を行った。

Ca(OH)₂の脱水反応:



CaCO₃の脱炭酸反応:



DTAの吸熱反応の起こっている温度範囲におけるTGの質量減少量からそれぞれの試料中のCa(OH)₂量、CaCO₃量を計算によって求めた。熱分析模式図を図-5に示す。

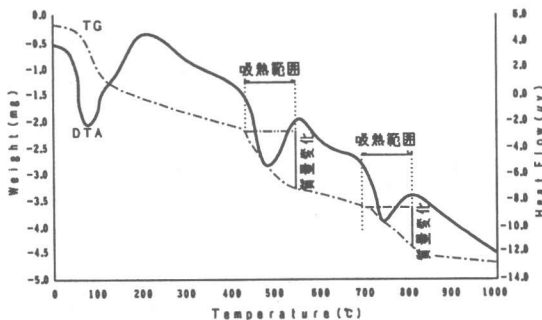


図-5 熱分析模式図

5.4 配合推定(湿式分析)

CaOをセメント協会コンクリート専門委員会「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告F-18」で、SO₃を「JIS-R-5202、セメントの化学分析方法」により測定した。

この結果より、セメント量を算出し(使用セメントのCaO=65%と仮定)、また、水和反応の際セメント量の25%がCa(OH)₂を生成すると仮定しCa(OH)₂量を求めた。また、その全体がCaCO₃に変化した場合の理論値も同時に算出した。これらの計算式を以下に示す。

セメント量(計)

$$= \text{CaO \% (湿式分析値)} / 0.65 \quad (4)$$

SO₃%(計)

$$= \text{SO}_3 \% (\text{湿式分析値}) / \text{セメント量} \% (\text{計算値}) \times 100 \quad (5)$$

CaCO₃%(計)

$$= \text{セメント量} \% (\text{計}) \times 0.25 \times (\text{CaCO}_3 \text{分子重量} / \text{Ca(OH)}_2 \text{分子重量}) \quad (6)$$

ただし、(計): 計算値

5.5 外観目視による受熱温度推定

コンクリートからの化学的な受熱温度推定は熱分析で記述する温度での判断となるが、他の材料(樹脂、木材、金属等)の性質(融点、着火温度等)が様々であることに着目すれば、コンクリート周辺の温度がどの程度であったか判断できると考えた。

また、化学的受熱温度推定は、試料となるコンクリートが被災より調査までの約6年間、風雨に曝された状態であることより、性質上困難も予想されるため⁴⁾外観目視による調査を同時に行った。

6. 結果および考察

6.1 中性化試験

中性化試験および中性化速度式によって算出した中性化深さを表-6、表-7に示す。測定値と計算値には大きな差はないことがわかる。

このことより中性化の異常な進行は認められず、熱による中性化への影響はほとんどなかったものと考えられる。

表-6 中性化深さ測定結果(新設:16年経過,mm)

位置 (仕上)	屋外(リシン)		屋内(モルタル+鉄)		中性化 速度式
	測定値	平均値	測定値	平均値	
南面	23	1.6	(34) 15	1.4 (3.5)	(階式) 1.7 mm
	13		(35) 13		
	11		(36) 14		
北面	7	1.0	(31) 8	9 (3.5)	
	14		(37) 10		
	10		(38) 9		

表-7 中性化深さ測定結果(旧設:30年経過,mm)

位置 (仕上)	屋外(モルタル+リシン)		屋内(リシン)		中性化 速度式
	測定値	平均値	測定値	平均値	
南面	(37) 27	2.9 (3.2)	15	1.6	(階式) 2.3 mm
	(28) 28		15		
	(31) 31		17		
	(35) 21		9		
北面	(43) 20	2.0 (3.8)	21	1.3	
	(36) 20		9		

()内の数値は、モルタル厚さを示す。

6.2 EPMA

EPMAによるC, Sについての結果を図-6に示す。なお、この供試体に対する中性化試験の結果は図-3(1)である。

Cの量が多い部分と中性化部分はほぼ一致しており、相関が認められる。また、表面付近ではCの量が多いことがよみとれる。この現象は特に屋内側で著しいことがわかる。このことから表面的ではあるが、屋内では火災による熱の影響を受け炭酸ガスとの反応が起こったものと考えられる。

つぎにSとCを比較すると、Sの量はCの量が多い部分では少なくなっていることがわかる。図-7のSO₃量からもわかるようにその差はわずかであるが、これは、中性化(炭酸化)による硫酸イオンの非中性化(非炭酸化)域への移動により生じたものと考えられる²⁾。火山性ガスによりSの影響を受けていれば表面部分にSの多い部分があられると考えられるが、この結果からは認められなかった。このことから火砕流による硫黄(S)の影響はほとんどなかったものと考えられる。

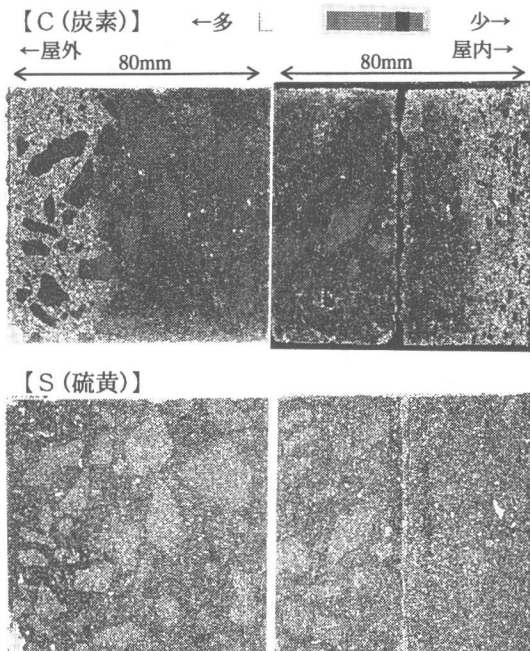


図-6 EPMA結果(新校舎 南面)

6.3 熱分析・配合推定

熱分析, 配合推定の結果を図-7に示す。

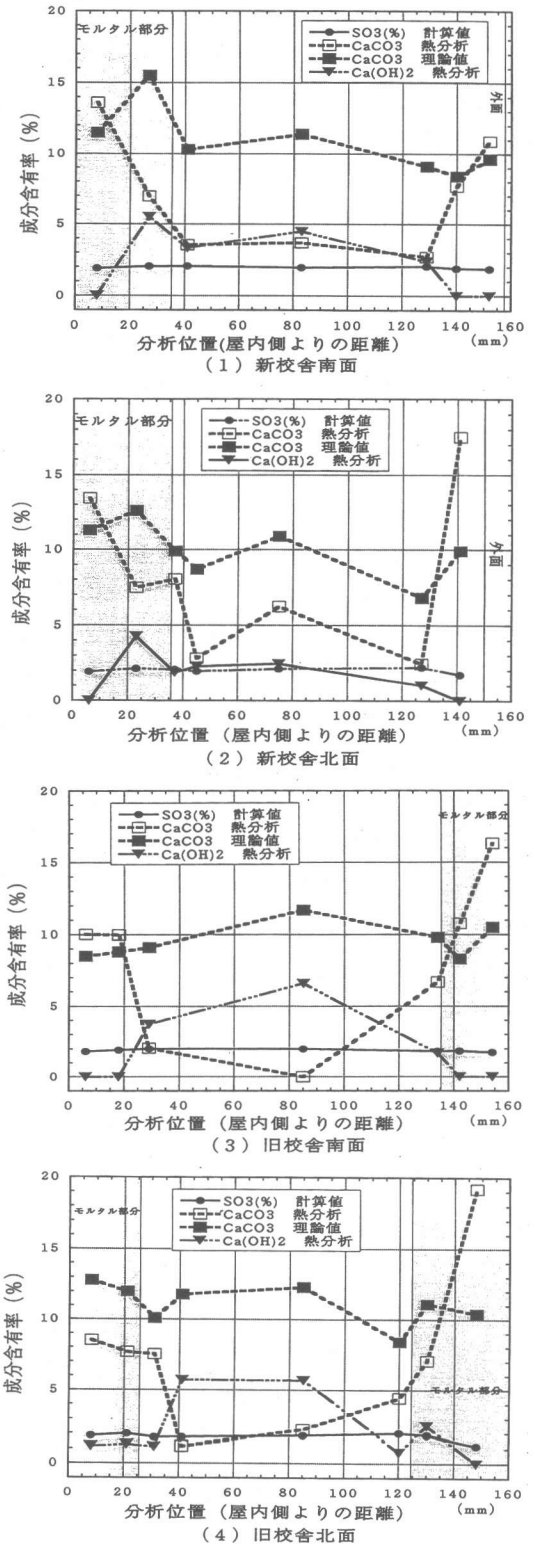


図-7 熱分析・配合推定の結果

(1) 熱分析より求めた $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量, CaCO_3 量は中性化の測定結果と傾向が一致していた。中性化測定結果より, 中性化の異常な進行は認められなかったため, この熱分析結果から考えられることを以下に示す。

①表面部分(10mm 以内)で 400 ~ 500 °C 以上の熱の影響を受けている: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量が表面部分で極めて少ない。

②全体では熱による影響はほとんどない: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量等の変化は中性化によるものが大。

③熱により影響を受けていたが経年により雨水を受け元の状態になった: 反応 I により脱水反応が起きたが, 雨水等により反応 I の逆の反応が起こり元の状態になった⁴⁾。XRD 同定結果 CaO が認められなかった。

(2) 表面部分で, 熱分析より求めた CaCO_3 量が, 配合推定より求めた理論量以上の値が得られた。このことより表面では, 火災による高濃度の二酸化炭素とセメント水和物(C-S-H 等)が反応したものと推測できる³⁾。

(3) 配合推定から得られた SO_3 量の平均値は 1.9 ~ 2.0% 程度で, 使用されたセメントを普通ポルトランドセメントと考えるとこの値は一般的であり⁵⁾, 硫酸分の外部からの侵入はないと考えられる。また, EPMA(S)の結果からもそれが確認できた。

6.4 外観目視による受熱温度の推定

化学的受熱温度推定と同時に, 外観目視による受熱温度の推定も行った。結果を表-8に示す。

表-8 外観目視結果

材 料	温 度		判定	使用例
鉄	1535℃	熔融	○	窓枠・くぎ
アルミニウム	659℃	熔融	△	窓枠
ガラス	600℃	熔融	△	窓
木材	260℃	着火	×	床・机
塩化ビニル	70℃	変形	×	排水管

○: 表記温度を受けていないと判断

△: ○×が混在

×: 表記温度を受けたと判断

屋外で, 火災の影響がほとんどないと考えられる箇所では, 塩化ビニルの変形は確認されるが溶け落ちているものはなかった。これより判断すると火砕流のみの影響は 100 °C 前後と判断できる。また, コア採取した箇所もこの部分に相当する。

屋内では, ほとんどの教室で木材は焼失していた。また, 火災のひどいところではアルミニウム製窓枠の熔融も確認された。コア採取した箇所では状況から影響温度は 260 °C ~ 600 °C の範囲と判断できる。

なお本火災の最高到達温度は, アルミニウムの熔融から判断し 650 °C 以上であったと考えられる。

7. まとめ

本事例においては, 火砕流および火災がコンクリートにおよぼした影響は少なく, 表面に火災による高濃度の二酸化炭素の影響が認められる程度であった。

受熱温度については, 影響は表面的ではあるが, 火砕流から 100 °C 前後, 火災では 260 °C ~ 600 °C の範囲であると考えられる。

硫酸分の外部からの侵入はほとんどないと考えられる。

参考文献

- 1) 岸谷孝一, 西澤紀昭: コンクリート構造物の耐久性シリーズ中性化, 技報堂出版, pp36-37, 1986.8
- 2) 小林一輔: コンクリート構造物の早期劣化と耐久性 診断, 森北出版株式会社, pp51-65, 1991.6
- 3) 小林一輔・宇野祐一: コンクリートの炭酸化とその評価, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, 1988
- 4) 岸谷孝一, 森 実: 火災をうけた鉄筋コンクリート建物の受熱温度の推定, セメント・コンクリート No.302, 1972.4
- 5) 村橋均次郎: 最近 11 年間のわが国セメント品質の推移, セメント・コンクリート, No.379, 1978.9