

# 既存杭の引抜孔を対象とした 炭酸ナトリウム混合セメントベントナイト系充填材†

稲積 真哉\* 桑原 秀一\*\* 橋本 功\*\*\*

## Cement-Bentonite Fillings Mixing Sodium Carbonate for Holes Formed by Pulling-Out Piles

by

Shinya INAZUMI\*, Shuichi KUWAHARA\*\* and Ko HASHIMOTO\*\*\*

In a series of studies, it is aimed to develop fillings for holes formed by pulling-out piles. Cement-bentonite is used as a filling in general. Although cement-bentonite has an advantage of being able to perform blending according to circumstance of work on site, cement and water cause segregation, so uniform filling is difficult. In addition, there is a disadvantage that cement-bentonite cannot perform a predetermined strength when diluted by penetration of groundwater and so on. Sodium carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) is a substance expected to suppress the segregation of cement-bentonite and to speed up the development of strength. In this study, we conducted an indoor mixing test on fillings mixed with  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  into cement-bentonite which is a mixture consisting of water, cement and bentonite, and examined various characteristics from the viewpoint of physical and chemical aspects. The following two points were clarified; (i) by mixing  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , bleeding of cement-bentonite is suppressed and (ii) by mixing  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , the strength development time of the cement-bentonite becomes faster and the long-term strength also increases. These two points are considered to be due to the improvement of the swelling property of bentonite, the early strength development of cement and the formation of calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ).

### Key words:

Bleeding, Cement bentonite, Early strength, Sodium carbonate

## 1 緒 言

構造物の建て替えに伴う既存杭の撤去については、一般に引抜き工法が採用される。既存杭の引抜き後には地盤内に引抜孔が形成されるため、充填材による埋戻しが行われる。既存杭の抜き跡などの地盤内に形成された空洞に対する充填材として、セメントベントナイト系充填材が一般的に用いられる。セメントベントナイト系充填材は水、セメントおよびベントナイトによって構成される材料であり、それらの配合を調整することで、力学的な品質管理が容易である。また、汎用のプラント設備によって混練作業を行い、現場の施工状況に合わせて適時作製可能という利点がある。しかしながら、実際に地盤内空洞に充填した場合、想定以上の地下水の浸入によって所定の強度が発揮されない問題や、水とセメントの材料分離によって不均一な強度発現を引き起こすなど、配合調整のみでは管理できない問題がある。充填材の役割は対象地盤の復元性を高めることにある。適切な充填が行われず、原地盤と充填箇所の強度に大きな差異が生じた場合、周辺地盤において沈下等の現象が生じる可能性がある<sup>1)</sup>。

本研究では、セメントベントナイト系充填材に対する上記の課題を解決し、対象の原地盤毎に強度調整が容易に行え、早急かつ確実に所定の強度を確保できる充填材

の開発を目的としている。具体的には、セメントベントナイト系充填材に対して炭酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) を混合することで、材料分離の抑制および早急なゲル化を図った充填材を開発し、さらに充填材としての有用性を物理試験によって検討している。また、セメントベントナイト系充填材に対し  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を混合することで得られる諸特性の発現機構を物理試験および X 線回折 (XRD) 分析の実施によって検討する。

## 2 既往の知見

### 2-1 ベントナイトと炭酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

ベントナイトはスメクタイト系の粘土鉱物であるモンモリロナイトを主成分とする粘土材料であり、モンモリロナイトは薄い板状結晶が積み重なった層状構造をもつ。板状結晶は負電荷を帯びており、結晶層間に陽イオンを吸着することによって電気的な平衡を保っている。さらに、層間陽イオンが水分子を吸着することで、ベントナイトは膨潤性を発揮する。膨潤したベントナイトは結晶層間の電気的な反発により分散効果を発揮し、セメントと水の材料分離を抑制する。また、セメントベントナイト系充填材の粘性を高め、自己充填性を向上させる<sup>2)</sup>。

ベントナイトの性質はモンモリロナイトの層間陽イオンの種類によって異なる。大きくは2種類に大別され、

† 原稿受理 平成30年10月13日 Received Oct. 13, 2018 ©2019 The Society of Materials Science, Japan

\* 正会員 芝浦工業大学 〒135-8548 東京都江東区 Shibaura Institute of Technology, Koto-ku, Tokyo, 135-8548.

\*\* 賛助会員 一般社団法人日本杭抜き協会 〒152-0004 東京都目黒区 Japan Association for Pulling-out Existing Piles, Meguro-ku, Tokyo 152-0004.

\*\*\* 明石工業高等専門学校 〒674-8501 明石市魚住町 National Institute of Technology, Akashi College, Uozumi-cho, Akashi, 674-8501.

ナトリウムイオン ( $\text{Na}^+$ ) を多く吸着している場合を Na 型、カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ) を多く吸着している場合を Ca 型と呼ぶ<sup>3)</sup>。Ca 型と比較して Na 型は単位層間の電気的な引力が弱い<sup>3)</sup>ため、Na 型の膨潤性は Ca 型と比較して高い。 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  は水に溶解して電離することで  $\text{Na}^+$  が発生し、ベントナイト中の層間陽イオンに含まれる  $\text{Ca}^{2+}$  とイオン交換される。層間陽イオンのイオン交換性は  $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+}$  の順に増し、1 価陽イオンよりも 2 価陽イオンの選択性が高い<sup>4)</sup>。しかしながら、 $\text{Na}^+$  と  $\text{Ca}^{2+}$  のイオン交換は可逆反応であり  $\text{Na}^+$  濃度が高い環境下では層間陽イオンに  $\text{Na}^+$  が選択されやすくなる<sup>5)</sup>。よって、水中で炭酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) とベントナイトを混合した場合、Na 型としての性質を強め、ベントナイトの膨潤性が増加する。

以上のことから、セメントベントナイト系充填材に  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を混合することで、材料分離抑制の性質向上が期待される。

## 2.2 セメントと炭酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

セメントは水との水和反応によりエトリンガイト ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) や珪酸カルシウム水和物 (C-S-H) を生成して強度を発現するため、セメントベントナイト系充填材において硬化性能を発揮する主成分である。具体的には、セメントは水と混合することでエーライト ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) とアルミネート相 ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) の溶解反応が生じ、数分で緩慢となった後に水和反応が停滞する水和潜伏期に入る。その後数時間で加速度期に入ると、エーライトが再度活発に水和反応を起こし、C-S-H や水酸化カルシウム ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) が生成される。重ねて石膏の消費に伴うアルミネート相の水和反応が生じ、エトリンガイトが生成される<sup>6,7)</sup>。炭酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) を混合することで、初期水和後のエーライトと水の接触を妨げることなく水和潜伏期間を見かけ上省くため、エーライトおよびアルミネート相の水和反応が促進される<sup>8)</sup>。

以上のことから、セメントベントナイト系充填材に  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を混合することで、早急なゲル化および早期強度発現性能が期待される。

## 3 充填材の物理特性

### 3.1 供試体の配合・作製

本研究で作製する充填材の構成材は水 (W)、ベントナイト (B)、普通ポルトランドセメント (C) および  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (S) である。ベントナイトについて、A.C.C.法 (American Colloid Company 規格) における膨潤度 4 の低膨潤ベントナイトを用い、ベントナイトの種類による比較を行う際には膨潤度 20 の高膨潤ベントナイトを用いる。一般的なセメントベントナイト系充填材ではセメント (C) とベントナイト (B) の重量比: C/B=4~6 程度、水 (W) とセメント (C) の重量比: W/C=300~500%程度の範囲で用いられる。なお、予備試験の結果、充填材の総重量に対して 50%以上 90%以下の水、1%以上 10%以下のベントナイト、10%以上 40%以下のセメントおよび 0.5%以上 3%以下の  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を用いることで、適度な流動性、強度および材料分離抵抗性が発揮されることを確認している。そのた

め、本研究においても以上の条件内で供試体を作製する。すなわち、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  については一律で  $20\text{ kg/m}^3$  投入し、その他の構成材の配合量をパラメータとして変化させ、各試験結果の比較を行う。各試験結果は 3 個の供試体の平均値によって示す。

充填材の目標強度は  $0.3\sim 0.5\text{ N/mm}^2$  と設定している。これは「公共建築工事標準仕様書 (建築工事編)」<sup>9)</sup> で規定されている既製杭打設工法であるセメントミルク注入工法において杭周固定液の材齢 4 週の一軸圧縮強さ  $0.5\text{ N/mm}^2$  が地盤と同程度の強度であるとみなされていることから、一般に標準強度として採用されている値である。供試体は、あらかじめ水を加えた攪拌機に適当な順序でその他の構成材を投入し、各構成材を投入するごと一定の時間および速度で攪拌を行い作製する。

### 3.2 試験方法

**3.2.1 一軸圧縮試験および簡易貫入試験** 充填材の初期・長期強度および強度発現の傾向について検討するため、日本工業規格 (JIS A 1216) 「土の一軸圧縮試験方法」に準じて試験を実施する。各構成材を混合攪拌し、直径  $50\text{ mm}$  および高さ  $100\text{ mm}$  のモールドに流し込み供試体を作製する。その後  $20^\circ\text{C}$  の恒温室で所定の日数養生を行い、各養生日数において、ひずみ速度  $1\%/\text{min}$  で連続的に供試体を圧縮する。また、各構成材の混合攪拌直後から 24 時間後までのゲル化について、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を配合することによる変化を評価するため、簡易的な貫入試験を実施する。各構成材の混合攪拌後バット上に供試体を厚さ  $20\text{ mm}$  で広げ、簡易測定器の測定部を供試体表面に鉛直に設置し、加速度がかからないように自重で貫入させる。混合直後、30 分、1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12 および 24 時間における貫入抵抗値を簡易測定器 (IMADA 社製 DPRSX-5T) によって測定する。

**3.2.2 ブリージング試験** 充填材における水とセメントの材料分離性について検討するため、土木学会規準 (JSCE F 522) 「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリージング率および膨張率試験方法 (ポリエチレン袋方法)」に準じて試験を実施する。直径  $50\text{ mm}$  のポリエチレン袋に  $200\text{ mm}$  の高さまで各構成材を混合攪拌した供試体を投入し、1, 3, 24 時間後のブリージング水量を測定し、式(1)によりブリージング率を求める。

$$\text{Br} = \frac{W_b}{V} \times 100 \quad (1)$$

ここで、Br: ブリージング率 (%),  $W_b$ : 各経過時間におけるブリージング水量 (mL), V: 供試体の体積 (mL) である。

**3.2.3 流動性試験** 充填材の流動性について検討するため、土木学会基準 (JSCE F 521) 「プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法 (P 漏斗による方法)」に準じて試験を実施する。流出管内径  $13\text{ mm}$ 、流出管長  $38\text{ mm}$  および漏斗部高さ  $192\text{ mm}$  の P 漏斗試験器に各構成材を混合攪拌した供試体を満たし、流出管から指を離して充填材を流下させ、充填材の流れが初めて途切れるまでの流下時間をストップウォッチで計測する。

### 3.3 試験結果と考察

#### 3.3.1 配合条件の変化

##### (1) 各構成材の投入順序

Table 1 は、各構成材の投入手順による充填材のブリージング率とゲル化時間の変化を示している。ここで、A-1 は水 (W) に対しベントナイト (B), セメント (C),  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (S) の順で投入している。A-2, A-3, A-4 および A-5 については Table 1 に示すと通りの投入手順である。各構成材はいずれの配合においても同量加える。

以上の配合について比較を行うと、A-1 および A-2 のブリージング率が低く、初めにベントナイトを投入している点で共通する。加えて、A-2 と A-4 の比較より、ベントナイトを水中に分散させてから  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を投入することが、ブリージング抑制に重要であるといえる。また、A-1, A-3, A-4 および A-5 はゲル化に要する時間が 1~1.5 時間であるが、最後に  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を投入している A-1 および A-3 において最も早急なゲル化を起している。よって、ベントナイトおよびセメントを十分に分散させた後に  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を投入することが、早急なゲル化に重要であるといえる。

以上より、A-1 と同様に水に対しベントナイト、セメント、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の投入順序で充填材を作製するケースが最も早急にゲル化し、最もブリージングが発生しない投入順序である。以降の各試験に用いる供試体は A-1 と同様の投入順序で作製する。

##### (2) 攪拌時間および回転数

Table 2 は  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を配合したセメントベントナイト系充填材について、攪拌翼の回転速度と攪拌時間によるブリージング率の変化を示している。高速で長時間攪拌する B-1 と高速で短時間攪拌する B-2 を比較すると、3 時間後と 24 時間後のいずれも B-1 のブリージング率の方が低い。攪拌時間が長い方がより分散されるため、ブリージングが抑制されたと考えられる。また、B-2 と低速で長時間攪拌する B-3 を比較すると、3 時間後と 24 時間後のいずれも B-2 のブリージング率の方が低い。すなわち、ブリージングを抑制するには低速で長時間の攪拌を行うよりも、回転速度を大きくすることで各構成材を十分に分散させることが重要であると考えられる。以降の各試験に用いる供試体は B-1 と同じ攪拌翼の回転速度および攪拌時間で作製する。

#### 3.3.2 強度特性

##### (1) 初期強度

Fig. 1 は  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の有無によるセメントベントナイト系充填材の一軸圧縮強さの経時変化を示している。C は W/C  $\cong$  375%, D は W/C  $\cong$  295% であり、それぞれ No. 1 は  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  無し, No. 2 は  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  有りである。これより、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の有無による充填材の初期圧縮強度を比較する。C-1 の材齢 7 日強度が  $0.09 \text{ N/mm}^2$  であるのに対して、C-2 では材齢 7 日強度が  $0.30 \text{ N/mm}^2$  となっており、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を配合した場合の方が大きい。D-1 と D-2 の比較においても同様に、D-1 の材齢 7 日強度が  $0.37 \text{ N/mm}^2$ 、D-2 の材齢 7 日強度が  $0.59 \text{ N/mm}^2$  であり、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を配合した場合の方が大きい。よって、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を配合することによりセメントベント

Table 1 Difference due to order of mixing.

No.	Order of mixing	Bleeding ratio (%)		Curing (hours)	Remarks
		1 hour	3 hours		
A-1	B→C→S	1.4	1.9	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C/B = 5.6</li> <li>• W/C = 316%</li> <li>• Rotation speed = 1500 rpm</li> <li>• Mixing duration = 3 minutes</li> </ul>
A-2	B→S→C	9.0	15.0	6.5	
A-3	C→B→S	25.0	32.0	1	
A-4	S→B→C	25.0	31.0	1.5	
A-5	C→S→B	38.0	44.0	1.25	

Table 2 Bleeding ratio due to difference of mixing conditions.

No.	Rotation speed (rpm)	Mixing duration (min.)	Bleeding ratio (%)		Remarks
			3 hours	24 hours	
B-1	1500	3	1.0	0.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C/B = 4.8</li> <li>• W/C = 3746%</li> </ul>
B-2	1500	1	2.0	1.5	
B-3	500	3	2.5	2.0	

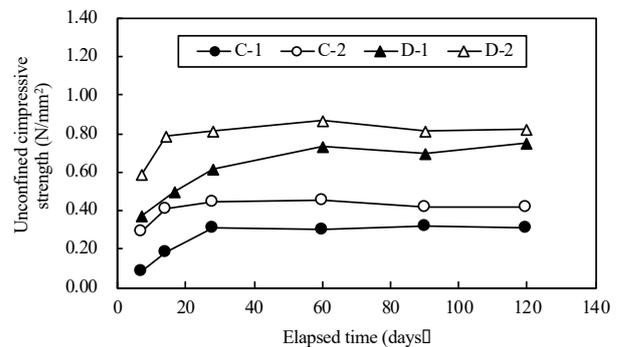


Fig. 1 Results of the unconfined compression test. (Open : with  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , Closed : without  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

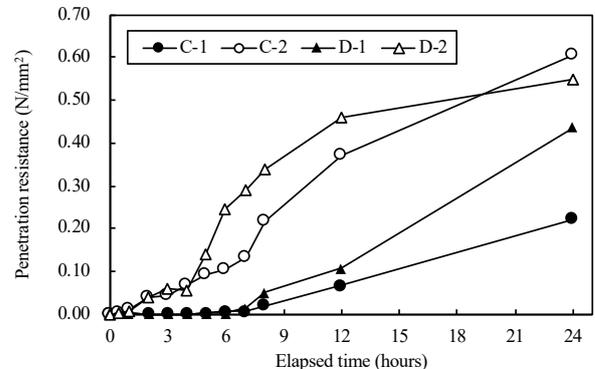


Fig. 2 Results of the penetration test. (Open : with  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , Closed : without  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

イト系充填材の初期強度が増加すると考えられる。

Fig. 2 は  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の有無によるセメントベントナイト系充填材の簡易貫入試験結果 (抵抗値) の経時変化を示している。これより、C-1 および D-1 では混合攪拌後約 8 時間が経過してから抵抗値が上昇しているが、C-2 および D-2 では混合攪拌後約 1 時間が経過してから抵抗値が上昇している。すなわち、ゲル化開始時間が早期化しており、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の配合がセメントベントナイト系充填材の材齢 1 日レベルでの強度発現性能を向上させている。

混合攪拌後 1 時間でゲル化が生じることは地盤内において地下水の浸入を防ぎ、セメントベントナイト系充填材が安定した強度を発現する一助となり得る。また、深さ

によって強度が異なる原地盤に対しては、強度の異なる複数の充填材を深度ごとに分割して埋め戻し作業を行うことで原地盤の再現性は高くなるが、各充填材が互いに混合することなく鉛直方向に整列した状態で、大きな時間のロスなく充填することが可能となる。以上より、セメントベントナイト系充填材への  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の配合は、混合直後からゲル化を促進し、地盤内空洞を対象とした充填材として有用な効果を発揮する。

## (2) 材齢による強度変化

Fig. 1 より、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の有無によるセメントベントナイト系充填材のを比較する。C-1 と C-2, D-1 と D-2 を比較すると、いずれの材齢においても  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を配合した場合の方が大きな強度を示している。一方、強度発現の傾向としてはいずれの配合においても材齢 28 日程度まで強度が増加し、それ以降はほぼ強度増加しない傾向が確認できる。

Fig. 3 は、Fig. 1 を基本として材齢 28 日の一軸圧縮強さで正規化した値（以下、圧縮強度比とする）でまとめている。Fig. 3 の圧縮強度比より各配合を比較すると、材齢 28 日以降の強度発現挙動において  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の有無による大きな違いは確認されず、圧縮強度比は 1.0 付近の値である。よって、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を配合することによるセメントベントナイト系充填材の材齢 28 日以降の強度発現への影響は確認できない。

Fig. 4 は  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を配合したセメントベントナイト系充填材における水セメント比の違いによる一軸圧縮強さの経時変化を示している。E-1, E-2, E-3, E-4 および E-5 では水セメント比の小さいものから順に各材齢における一軸圧縮強さが大きくなる傾向がある。また、Fig. 4 を基本として材齢 28 日の一軸圧縮強さで正規化した圧縮強度比を示した Fig. 5 より、E-1 を除いていずれの配合においても強度発現の傾向に大きな違いがなく、材齢 90 日における圧縮強度比は 1.15 程度である。よって、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の配合は長期の強度発現挙動に関与していないと考えられる。E-1 については、最も水セメント比が大きくセメント量に対する  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の割合が高いことから、水和反応がその他の配合よりも促進されたと考えられる。

**3・3・3 材料分離性** Table 3 は  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の有無によるセメントベントナイト系充填材のブリージング試験と流動性試験の結果を示している。C-1 および D-1 では時間の経過とともにブリージング率が大きくなる傾向に対し、C-2 および D-2 では混合攪拌 1 時間後に約 0.5% のブリージング現象が確認されたのみであり、その後はブリージング現象が生じていない。よって、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を混合することによりセメントベントナイト系充填材の材料分離性が抑制されると考えられる。

**3・3・4 流動性** Table 3 における流動性試験の結果より、各配合においてフロー値は 7.7 秒程度であり、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を混合することによるセメントベントナイト系充填材の流動性は生じない。強度試験結果より混合攪拌から 1 時間程度でゲル化が始まっているが、打設時の流動性に影響を及ぼさないことが考えられる。また、流動性が高い場

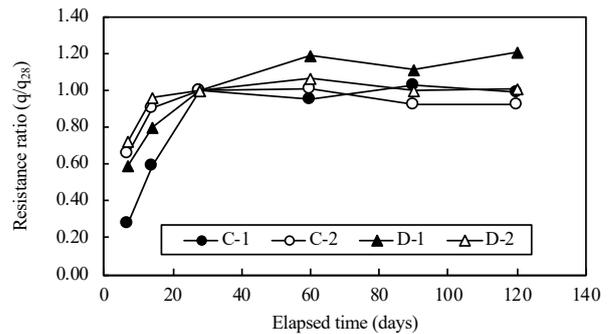


Fig. 3 Resistance ratio based on the unconfined compression test. (Open : with  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , Closed : without  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

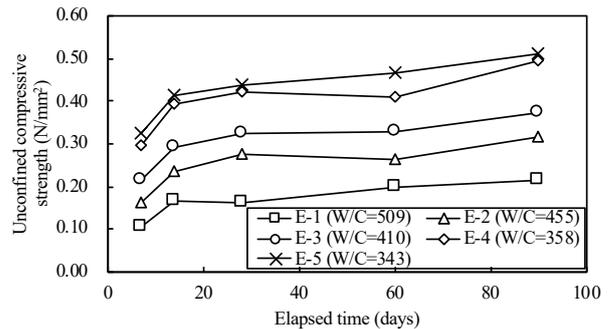


Fig. 4 Results of the unconfined compression test. (Open : with  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

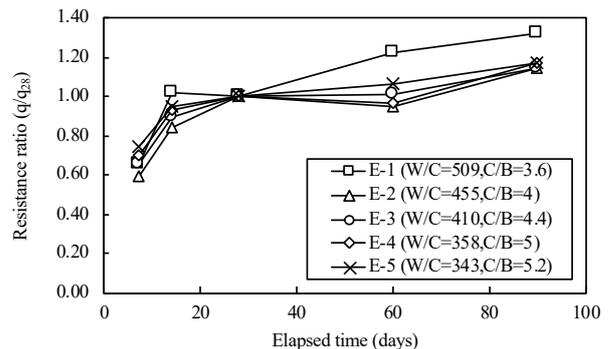


Fig. 5 Resistance ratio based on the unconfined compression test. (Open : with  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

Table 3 Results of bleeding and fluidity test.

No.	C/B	W/C (%)	flowing down time (s)	Bleeding ratio (%)		
				1 hour	3 hours	24 hours
C-1	4.8	377	7.7	3.6	9.3	9.5
C-2	4.8	374	7.6	0.5	0.0	0.0
D-1	6	295	7.8	4.0	9.5	9.8
D-2	6	293	7.6	0.4	0.0	0.0

Table 4 Bleeding ratio due to difference in degree of swelling.

No.	C/B	W/C (%)	Bleeding ratio (%)		
			1hour	3hour	24hour
F-1	4.4	410	2.0	2.5	2.5
F-2	5.6	316	1.4	1.9	1.4
G-1	4.4	416	1.0	1.0	0.0
G-2	5.6	320	1.0	1.0	0.0

合は粘性が低くなり材料分離を生じやすくなるが、流動性試験結果より、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を配合した場合セメントベント

ナイト系充填材はブリージングがほぼ発生せず材料分離が生じない。よって、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ を配合したセメントベントナイト系充填材は、材料分離を引き起こすことなく充填材としての作業性が確保されている適度な粘性を有していると考えられる。

**3.3.5 ベントナイトの膨潤度** Table 4 は  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ を配合したセメントベントナイト系充填材について、膨潤度の異なる2種類のベントナイトを用いた場合のブリージング率の変化を示している。Fでは膨潤度4の低膨潤ベントナイト、Gでは膨潤度20の高膨潤ベントナイトを用いている。F-1とG-1、F-2とG-2を比較すると、いずれもGのブリージング率が低い値を示す。Fのブリージング率は時間経過に伴い一定あるいは増加する傾向が見られるのに対し、Gは時間経過に伴い増加することなく24時間後には0%を示している。これより、膨潤度が高いベントナイトを使用することで、セメントベントナイト系充填材において高いブリージング抑制効果を発揮する。

#### 4 充填材の諸特性発現メカニズム

##### 4.1 強度発現メカニズム

X線回折(XRD)分析を行い、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ を配合したセ

ントベントナイト系充填材の強度発現機構について考察する。ここで、(株)リガク製 Smart Lab を用いた粉末X線回折法を行っており、使用するX線は  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.5418\text{\AA}$ ) である。Fig. 6 に粉末X線回折法によるXRD分析の結果を示す。供試体 No. 1 には  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ を未配合の充填材、No. 2 には  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ を配合した充填材、No. 3 には高膨潤度ベントナイトを使用し  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ を配合した充填材を用いる (No. 1 は C-1、No. 2 は C-2、No. 3 は G-1 と同様)。

材齢3時間において、No. 1 では水酸化カルシウム ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) が検出されているのに対し、No. 2、No. 3 では検出されていない。しかしながら、材齢1日においては No. 1 で  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は検出されず、No. 2、No. 3 では検出されている。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が検出されていない場合には、 $46^\circ$ 付近に炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) のピークが現れており、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ から電離する炭酸イオン ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) によって  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が炭酸化し、 $\text{CaCO}_3$ を生成した可能性が考えられる。また、 $\text{CaCO}_3$ はベントナイト中の層間陽イオンに含まれるカルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ) が、陽イオン交換反応の中で  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ から電離する  $\text{CO}_3^{2-}$ と結合することで生成された可能性も考えられる。 $\text{CaCO}_3$ は非水溶性の物質であり、分子同士が結び

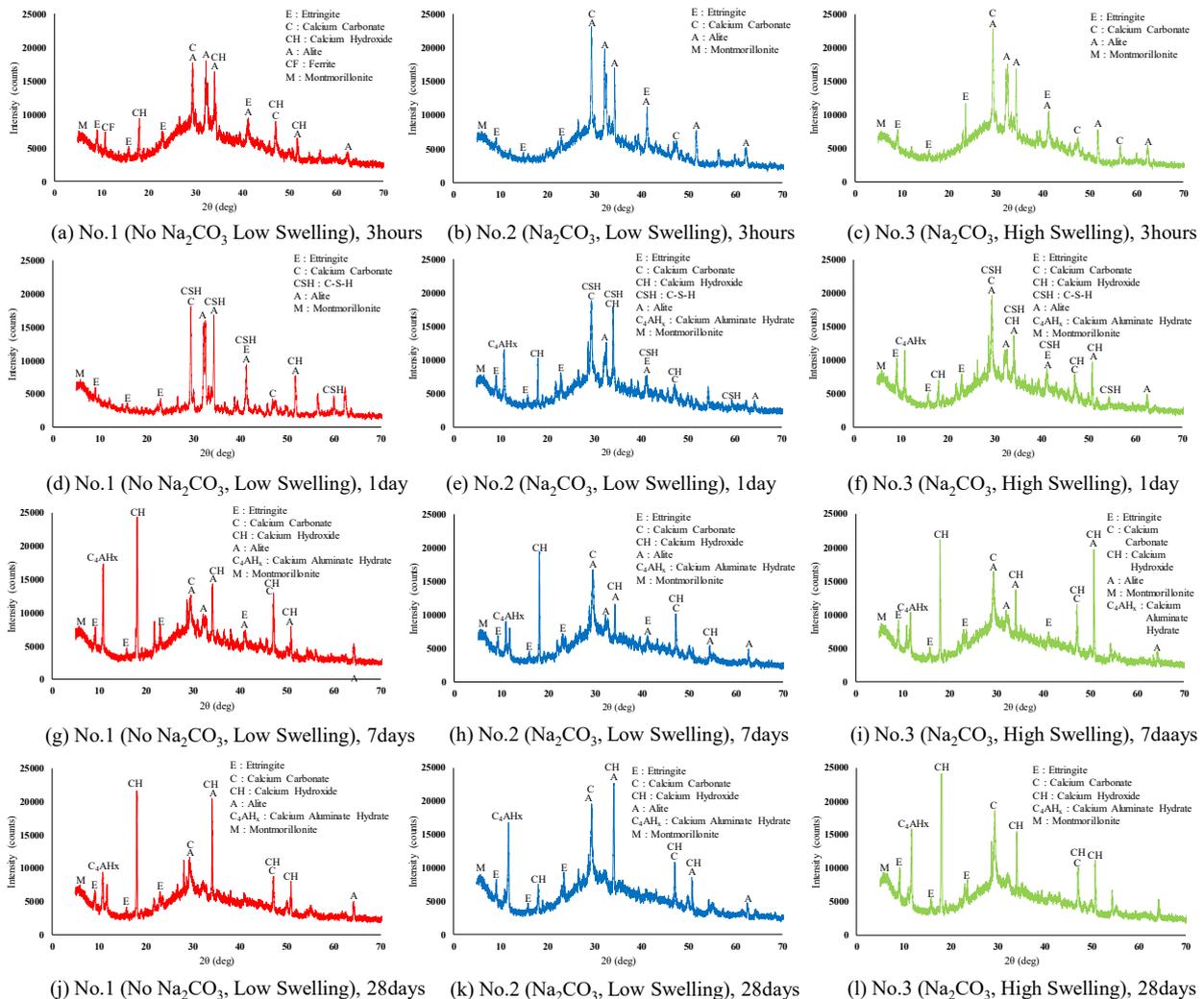


Fig. 6 Results of XRD analysis.

つくことによって硬化体を形成する。Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を配合することによるセメントベントナイトの初期強度発現は、混合攪拌直後から生成されるCaCO<sub>3</sub>による硬化体形成に起因する可能性が考えられる。また、CaCO<sub>3</sub>の形成に伴う初期強度の増加分は、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を配合したセメントベントナイト系充填材の材齢28日以降の強度の増加分としても現れていると考えられる。

材齢1日においてNo.2およびNo.3で現れているCa(OH)<sub>2</sub>に関しては、エーライト(3CaO·SiO<sub>2</sub>)のピークが小さくなり、珪酸カルシウム水和物(C-S-H)の鋭いピークが現れていることから、エーライトの水和反応が進行したために出現したものと考えられる。また、No.2およびNo.3では材齢1日からカルシウムアルミネート系水和物(4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·XH<sub>2</sub>O)が確認できるのに対し、No.1では材齢7日から確認できることから、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を加えている場合、水和反応が促進され、緻密な結晶化がされると考えられる。材齢7日、28日ではNo.1に比べてNo.2およびNo.3の方が水和生成物のピークがより鋭く現れており、水和反応が十分に進んでいることが判る。特に高膨潤ベントナイトを用いたNo.3で明瞭に鋭いピークが現れている。すなわち、結晶性の高い物質が生成されることが、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を混合することで強度が増加した要因の一つと考えられる。

#### 4.2 ブリージング抑制メカニズム

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>の配合によるセメントベントナイト系充填材のブリージング率の減少は、ベントナイトのNa型化による膨潤性増加、およびセメントベントナイト系充填材の早期ゲル化性能が要因として挙げられる。加えて、CaCO<sub>3</sub>が生成されることで早急に硬化体が形成されるためセメント粒子の沈降を抑制する。また、セメントとの水和反応に水分子が消費されることから水量が減少する。これらの複数の現象が関係して、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を配合したセメントベントナイト系充填材では混合攪拌直後から数時間以内にブリージング現象が生じなくなったと考えられる。

### 5 結 言

本論文では、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を配合したセメントベントナイト系充填材について強度特性、材料分離特性および流動性を検討し、既存杭の引抜孔に対する充填材として、有用な性質を発揮することを明らかにした。また、既往知見ならびに分析試験より、発揮される性質の発現メカニズムについて考察した。得られた知見を以下に示す。

- (1) Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を配合することでセメントベントナイト系充填材の強度が増大する。初期強度増大効果より、早急に地盤を安定化させることが可能である。
- (2) Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を配合することでセメントベントナイト系充填材は打設後1時間程度からゲル化する。早急なゲル

ル化は地下水の浸入を防ぎ、充填材が安定して所定の強度を発揮することが可能となる。

- (3) Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を配合することでセメントベントナイト系充填材のブリージング現象が抑制される。深度方向による強度の違いが生じにくくなる。
- (4) Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を配合することによってセメントベントナイト系充填材の流動性は失われず、作業性は確保される。
- (5) 水に対してベントナイト、セメント、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>の順に混合し、各材料の投入ごとに十分攪拌することで、材料分離抑制効果および早急なゲル化を発揮する。
- (6) Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>によるベントナイトの膨潤性増加ならびにセメントの早急なゲル化が材料分離抑制に起因し、炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)の生成が強度増加の要因である可能性が示唆される。

今後の取り組みとして、更なる分析試験を重ね、材料分離抑制、早急なゲル化、強度増加のメカニズムを明らかにし、化学的根拠を明確にする必要がある。

### 参 考 文 献

- 1) K. Noshio, T. Torigoe, S. Inazumi and S. Kuwahara “Dynamic analysis on influence of pull-out holes of pile foundations to dynamic behaviors of surrounding grounds”, 51st Japan National Conference on Geotechnical Engineering, pp.1201-1202 (2016).
- 2) K. Horii, T. Yamazaki, J. Sakemoto, D. Michimae, M. Nishi and Y. Udaka, “Development of stuffing material using crushed cement bentonite slurry”, Summaries of technical papers of annual meeting by AIJ, pp.487-488 (2007).
- 3) Y. Takashi, “Estimation of smectite exchangeable cations by powder X-ray regression method”, Geotech Forum 2011 by JGCA, No. 40 (2011).
- 4) O. Masanobu, “Characteristics and application of bentonite”, Journal of the Clay Science Society of Japan, Vol.46, No.2, pp.131-138 (2007).
- 5) H. Koshimizu and R. Otsuka, “Ion exchange of clay minerals”, Gypaum & Lime, No.204, pp.72-79 (1986).
- 6) Japan Cement Association, “Ground Improvement Manual with Cement-based Solidifying material”, GIHODO SHUPPAN Co., Ltd., pp.23-32 (2003).
- 7) T. Miyagawa and K. Okamoto, “Illustration easy to understand materials (Make civil engineering, environment and infrastructure facilities”, Gakugei Publishing, pp.19-26 (2013).
- 8) E. Handa, “Cement-concrete and inorganic industrial chemicals, CREATIVE Technical Report, No.4, pp.23-31 (2003).
- 9) Ministry of Land, “Standard specification of public building construction (Construction work session) (ver.H.25)”, pp.15-24 (2014).