

地盤の杭引抜孔を対象としたセメントベントナイト系充填材の適用性

○橋本功¹・桑原秀一²・内田幸生³・江口忠臣¹・稲積真哉⁴¹明石工業高等専門学校・²マルシン・³日本マテリアル・⁴芝浦工業大学

1. はじめに

1.1. 研究背景

近年、我が国では昭和30～40年の高度経済成長期に大量に建設された建築物や橋梁、トンネル等の道路構造物の老朽化が進んでおり、深刻な問題となっている。加えて2011年3月に発生した東日本大震災による防災意識の向上、人口減少による公共施設の利用者減少などが伴い、構造物の解体、建替え需要がますます増加している¹⁾。

我が国の多くの都市は軟弱地盤に位置し、多くの構造物が杭基礎を用いているため、構造物取壊し工においては地盤内に存在する既存杭を撤去する必要がある。既設構造物が存在する場所において新たな土地活用を図る場合、新設構造物の杭基礎等に干渉しないよう既存杭を撤去しなければならない。また、地中に残存した既存杭は産業廃棄物となり、土地売却取引等においては瑕疵としてしばしばトラブルが発生する²⁾。従って、既存杭の撤去は必須であるといえる。

既存杭の撤去には一般的に引抜工法が採用されるが、杭の引抜後には地盤内に引抜孔が形成され、周辺地盤環境に悪影響を与える。引抜孔を放置しておくと、土砂の崩壊や周辺地盤の沈下、軟弱化といった問題を引き起こす可能性があり、充填材を注入することによって早急に地盤を安定化させる必要がある。施工現場によって地盤環境は異なり、充填材に求められる強度は異なるが、充填材に関する規定が存在しないのが現状である。上記の背景より、確実な充填および安定した強度を確保できる充填材の構築が求められている。

1.2. 目的

既存杭引抜工により発生する引抜孔を埋め戻すことで、早急に地盤を安定化させる効果を持つ充填材の開発を目指す。容易に現場で配合調整が可能であることから、多くの現場に対応可能なセメントベントナイト系空洞充填材の高度化を目的とする。

炭酸ナトリウム(Na₂CO₃)の混合はセメントベントナイト系空洞充填材の強度発現早期化およびブリージング抑制効果が期待されており、セメントベントナイト及び炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトに対し室内配合試験を行うことで、セメントベントナイト系空洞充填材の高度化及び充填材としての有用性について検討する。充填材の高度化及び有用性の検討は、強度特性、流動性、材料分離の面で比較試験を行う。

1.3. 構成

本研究では、セメントベントナイト系充填材及び炭酸ナトリウム混合セメントベントナイト系充填材に対し軸圧縮試験、貫入試験、ブリージング試験、フロー試験を行い、炭酸ナトリウムの混合によるセメントベントナイト系充填材の高度化及び有用性について比較、検討する。加えて、炭酸ナトリウムの混合により発揮された諸特性の発現メカニズムについて、物理的、化学的観点から考察した(図-1参照)。

2. 既往知見

2.1. 既存杭引抜工法における引抜孔充填

既存杭の引抜工法として、一般に杭頭部ワイヤーロープ玉掛引抜方式が採用されている。施工手順は、地盤内に存在する既存杭の外周をケーシングによって削孔し、ケーシングを引き上げた後に既存杭の頭部にワイヤーロープを玉掛し、クレーン等によって引き抜くことによって地盤内から既存杭を撤去する。この工法では、ワイヤーロープが破断する危険性や、引抜時に地盤内に既存杭の一部が残存する可能性があるというような問題がある³⁾。また、地盤内から既存杭を引き抜くことによって生じる引抜孔には、孔壁地盤の崩壊を防ぐために充填材を注入するが、工法の性質上、引抜孔最深部からの注入が不可能であるため、引抜孔上



図-1 研究フロー

Applicability of cement bentonite typed filling for the hole of drawing out piles

Ko Hashimoto¹, Shuichi Kuwahara², Yukio Uchida³, Takeshi Kondou³, Shinya Inazumi⁴ (¹ National Institute of Technology, Akashi College, ²Marushin Co., Ltd., ³Japan Material Co., Ltd., ⁴Shibaura Institute of Technology)**KEY WORDS:** bentonite, sodium carbonate, bleeding

部からの流し入れとなり、深度方向に関係なく全長にわたって均一な充填材注入を行うことは困難である。不完全な注入は空隙や軟弱部を発生させ、周辺地盤の地盤沈下、新設杭の施工品質及び工期への悪影響、作業地盤不良による重機の転倒などの重大事態の原因となる。

これらの施工上の問題点を解決するべく考えられた新工法として杭先端チャッキング工法がある⁴⁾。この工法では、地盤内に存在する既存杭の外周をケーシングにより削孔し、既存杭の先端にケーシングが到達すると、既存杭を先端から抱え込むようにチャック爪を突き出し、ケーシング内に既存杭を内包したまま引き上げるという施工手順をとる。この工法では、ケーシングを一旦地上に引き上げる必要がないため杭周面摩擦の増加はなく、ワイヤーロープも使用しないため一般工法のような危険性が存在しない。また、地盤内の既存杭全体を下部から抱え込んで引き上げるため、分裂している杭でも確実に撤去することが可能である。

充填材注入においては、ケーシングの先端から充填材を吐出可能であり、引抜作業と同時に引抜孔への充填が行える。これにより、埋戻し工程の省略が可能となり工期短縮につながる。引抜孔最深部からの充填材注入となるため、引抜孔全長にわたって均一な充填が可能である（図-2参照）。また、液面管理を行うことにより、予定よりも引抜孔が拡大した場合でも確実に必要量の充填材を注入することが可能である。

2.2. 充填材に求められる性質

新工法の採用により引抜孔全長にわたる均一な充填材注入が可能となるが、強度的な均質性は保証されない。充填材が材料分離を起こすと深度方向によって質的に不均一になってしまい、引抜孔全長にわたって均質に所定の強度が発揮されない。また、地盤内では地下水が侵入してくる可能性があり、充填材に地下水が混入することで配合設計時の水量を上回り、所定の強度が発揮されないという問題がある。これらの課題を解決するためには、材料分離を起こさずに深度方向に関係なく均質な強度を発揮する性質および早急に固化性能を発揮して地下水の侵入を防止する性質を有する充填材が求められる。

2.3. 一般に用いられる充填材

地盤内に発生する既存杭引抜孔への充填材は大きく分けて、土砂による埋め戻し、流動化処理土、貧配合セメントミルクの三種類がある⁵⁾。土砂による埋め戻しは施工が容易で安価であるという点が利点として挙げられる。しかし、充填しながら転圧作業を行うことが不可能であることから均一な充填が難しく、安定した強度を確保できない。また、埋め戻しから一週間程度まで埋め戻し部の沈下が発生するという問題がある。

流動化処理土とは土砂、水、セメント系固化剤を配合して得られる充填材で、土砂に建設汚泥を用いるリサイクル材である。流動性を有するため作業性が高く施工が容易であり、機械による転圧を要しない、遮水効果を有する、安定した強度を発揮するという利点がある。しかし、外部からの搬入となるため現場施工に合わせての打設が難しいという欠点がある。

貧配合セメントミルクは前述のように、水とセメントの材料分離により深度方向によって強度が不均一および地下水侵入によって強度が低下という可能性がある。しかし、水、セメントの配合管理によって品質管理が容易であり、汎用のプラント設備にて混練作業ができるため、現場施工に合わせて適時打設することが可能である。

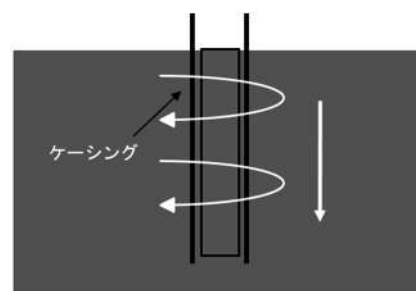
3. 試験方法

3.1. 使用材料と混合条件

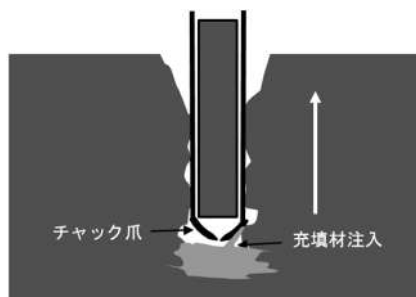
(1) セメント

本研究で用いたセメントの種類は普通ポルトランドセメントであり、密度が 3.16 g/cm^3 、比表面積 $3200 \text{ cm}^2/\text{g}$ のものを使用する。

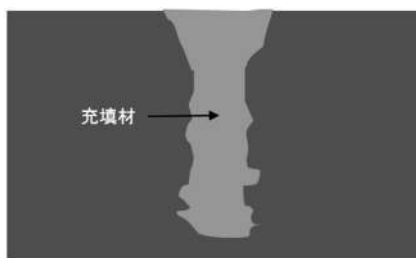
セメントは水との水和反応によるエトリンサイトおよび珪酸カルシウム水和物(C-S-H)の生成によって初期、長期強度を発現するため、セメントベントナイト系空洞充填材としての硬化機能を発揮する主成分である。



① ケーシングによる回転削孔



② チャック爪で抱え込み引上げ



③ 引抜と同時に充填材注入完了

図-2 既存杭引抜工法(イメージ図)

(2) ベントナイト

使用したベントナイトの化学成分を表-2に示す。ベントナイトはセメントベントナイト系空洞充填材において、膨潤性により水をベントナイト中に取り込むことでセメントと水の材料分離を抑制する効果、増粘性により材料を空洞内に偏りなく行き届かせる自己充填性増加の効果がある⁶⁾。

ベントナイトとはモンモリロナイトを主成分とするスメクタイト系の粘土鉱物であり、薄い板状結晶が積み重なった層状構造をしている。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。モンモリロナイトの層間陽イオンは主としてナトリウムイオン (Na^+)、カルシウムイオン (Ca^{2+})、カリウムイオン (K^+)、マグネシウムイオン (Mg^{2+}) からなり、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。大きくは二種類に大別され、 Na^+ および K^+ の1価の陽イオンを多く吸着している場合をNa型、 Ca^{2+} および Mg^{2+} の2価の陽イオンを多く吸着している場合をCa型と呼ぶ⁷⁾。本実験で使用するベントナイトは層間陽イオンに Na^+ を多く有するNa型ベントナイトである。

(3) 炭酸ナトリウム

セメントベントナイト系空洞充填材に混和剤として炭酸ナトリウムを混合する際、 300°C 以上の高温で熱処理を行い無水塩とした白色粉末状のものを使用する。表-1に炭酸ナトリウム混和剤の化学成分を示しており、 Na_2CO_3 含有量は99.41%である。

炭酸ナトリウムはセメントと水の水和反応を促進させ、早期強度発現の効果を発揮する添加剤として期待される⁸⁾。

(4) 配合条件

表-3は本研究における一連の試験で用いる供試体について、各材料の配合条件を示したものである。配合条件は目標強度を $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ として設定している。「公共建築工事標準仕様書（建築工事編）」⁹⁾において規定されている、既製杭打設工法であるセメントミルク注入工法の杭周固定液の4週圧縮強度 $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ が地盤と同強度とみなされていることから、一般に標準配合として採用されている値である。配合A, Bではセメント(C)とベントナイト(B)の重量比 $C/B=5, 6$ のセメントベントナイトと炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトをそれぞれ作成し、炭酸ナトリウムの混合によるセメントベントナイトの諸特性の変化を調べるため比較を行う。配合C, D, E, F, Gではセメント(C)の混合量のみを変化させて炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトを作成し、炭酸ナトリウムとセメントの相互関係について検討する。

混合手順は、回転数 $1500\text{rpm}/\text{min}$ の攪拌機に水(W)とベントナイト(B)を加えて3分間攪拌した後、普通ポルトランドセメント(C)を投入して3分間攪拌、更に炭酸ナトリウム(S)を投入して3分間攪拌を行う(図-3参照)。

3.2. 強度試験

炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトの強度発現については、日本工業規格(JIS A 1216)「一軸圧縮試験」によって検討する。配合条件に従って各試料を混合し、直径 50mm 、高さ 100mm のモールドに流し込んで供試体を作成する。 20°C の恒温室で7, 14, 28, 60, 90, 120日間養生を行い、各養生日数において一軸圧縮試験を実施する(図-4①参照)。

各試料の混合、攪拌から24時間後までのセメントベントナイトの硬化作用について、炭酸ナトリウムを混合することによる変化を調べるため、配合A, Bの条件で作成した供試体に対して簡易的に貫入試験を行う。試料混合直後から30分, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 24時間における貫入抵抗値について簡易測定器を用いて計測する(図-4②参照)。

3.3. ブリージング試験

セメントベントナイトおよび炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトについて、水とセメントの材料分離の有無を

表-1 混和剤の化学成分

化学成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	強熱減量
含有率(%)	67.1	16.8	3.7	3.3	2.7	2.2	1.3	2.9

表-2 ベントナイトの化学成分

化学成分	Na_2CO_3	NaCl	Fe_2O_3	水不溶分	強熱減量
含有率(%)	99.41	0.35	0.0003以下	0.001以下	0.15

表-3 配合条件

配合No.	B (kg/m^3)	C (kg/m^3)	S (kg/m^3)	W (kg/m^3)	W/C (%)
A-1	50	240	0	905	377
A-2	50	240	20	897	374
B-1	50	300	0	886	295
B-2	50	300	20	878	293
C	50	180	20	916	509
D	50	200	20	910	455
E	50	220	20	903	410
F	50	250	20	894	358
G	50	260	20	891	343



図-3 試料の混合、攪拌

評価する。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)」に準じて試験を行った (図-4 ①参照)。直径 50mm のポリエチレン袋に 200mm の高さまで各試料を混合、攪拌した充填材を入れ、1, 3, 24 時間後のブリージング水量を測定し、以下の式を用いてブリージング率を求める。

$$Br = \left(\frac{Wb}{V} \right) \times 100$$

ここで、Br(%)はブリージング率、Wb(ml)は各経過時間におけるブリージング水量、V (ml) は試料全体の体積を示す。

3.4. 流動性試験

セメントベントナイトおよび炭酸ナトリウムを混合したセメントベントナイトの流動性は、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)」により評価する。流出管内径 13 mm, 流出管長さ 38 mm, 漏斗部高さ 192 mm の P 漏斗試験機に各材料を混合、攪拌した充填材を満たし、流出管から指を離して充填材を流化させ、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 (図-4 ②参照)。

4. 考察

4.1. 強度試験に関する考察

(1) 初期強度発現

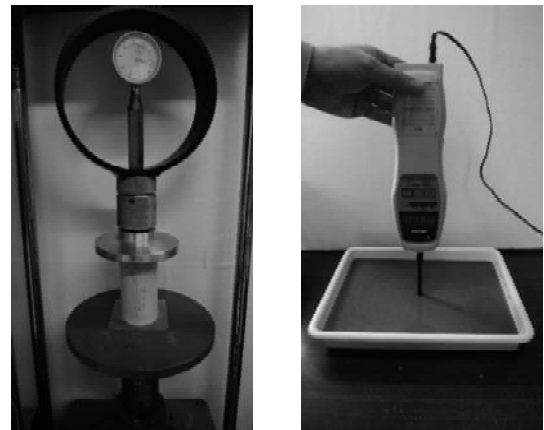
図-5a の一軸圧縮試験結果より、セメントベントナイトと炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトの初期強度を比較する。配合 A-1 の材齢 7 日強度が 0.09N/mm² であるのに対して、配合 A-2 は材齢 7 日強度が 0.30 N/mm² となっており、炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトの方が大きい。配合 B-1 と配合 B-2 の比較においても同様に、配合 B-1 の材齢 7 日強度が 0.37 N/mm²、配合 B-2 の材齢 7 日強度が 0.59 N/mm² であり、炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトの方が大きい。よって、炭酸ナトリウムの混合によりセメントベントナイトの初期強度が増加するといえる。また、材齢 28 日までの強度発現挙動に大きな違いが見られないことから、炭酸ナトリウムは材齢 7 日以前の強度発現に影響していると考えられる。

図-6 貫入試験結果より、配合 A-1, B-1 のセメントベントナイトでは各試料の混合、攪拌から約 8 時間後から抵抗値が上昇しているが、配合 A-2, B-2 の炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトでは混合、攪拌から約 1 時間後から抵抗値が上昇している。セメントベントナイトの凝結開始時間が早期化していることから、炭酸ナトリウムの混合が材齢 1 日レベルでの固化性能に影響しているといえる。打設後 1 時間で固化性能を発揮することは地盤内において地下水の浸入を防ぐ効果を発揮し、セメントベントナイト系空洞充填材が安定した強度を発現することの一助となる。

以上のことから、セメントベントナイトへの炭酸ナトリウム混合は、セメントベントナイトの混合直後から固化性能を促進し、充填材として有用な効果を発揮する。

(2) 長期強度

図-5a の一軸圧縮試験結果より、セメントベントナイトと炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトの長期強度を比較する。配合 A-1 と配合 A-2, 配合 B-1 と配合 B-2 を比較すると、いずれの材齢においても炭酸ナトリウム混合セメン



①一軸圧縮試験

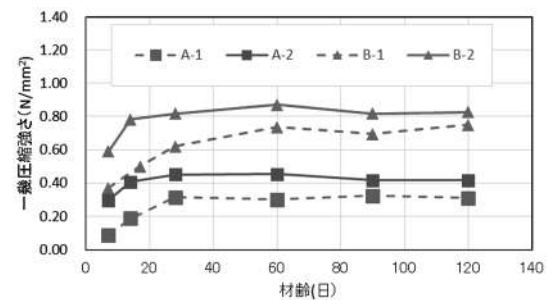
②貫入試験



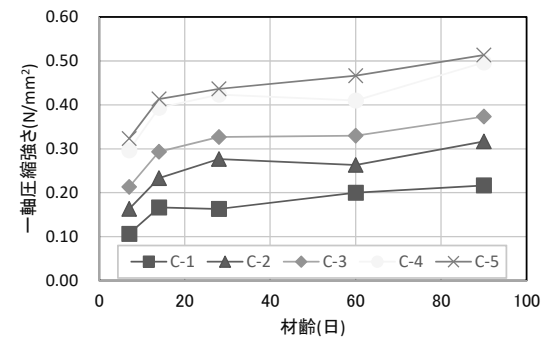
①ブリージング試験

②流動性試験

図-4 各種試験方法



a. 炭酸ナトリウムの有無による違い



b. セメント量による違い

図-5 一軸圧縮試験結果

トベントナイトの方が強度は大きい。しかし、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、それ以降はほとんど強度増加しないという傾向が見られる。また、図-7 は材齢 28 日強度で正規化した値（以下、圧縮強度比とする）でまとめた結果である。図-7a より各配合を比較すると、材齢 28 日以降の長期強度発現挙動に大きな違いは見られず、配合 B-1 を除いて圧縮強度比は 1.0 付近の値をとっている。炭酸ナトリウムを混合することによる長期強度発現への影響は見られないことから、各材齢において炭酸ナトリウム混合時の方がセメントベントナイトの強度が大きい要因は、初期強度の増大分が長期強度に影響しているためであるといえる。

(3)初期・長期強度の増加メカニズム

図-5b の一軸圧縮試験結果より、配合 C, D, E, F, G では炭酸ナトリウムを混合したうえでセメント量を変化させており、セメント量が多く水セメント比の小さいものから順に各材齢における強度が高くなる傾向がある。また、図-7b より配合 C を除いてはいずれの配合においても強度発現の傾向に大きな違いは無く、材齢 90 日における圧縮強度比は 1.15 程度の値となっている。セメント量の違いによる炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトの初期・長期強度発現挙動に違いがないことから、炭酸ナトリウムはセメントに対しては影響していないといえる。よって、炭酸ナトリウムの混合によるセメントベントナイトの初期強度増加は、セメントと水の水和反応を促進しているのではなく、セメント水和物とは異なる硬化体を形成していると考えられる。

ここで、炭酸ナトリウムとベントナイトに着目する。前述の通りベントナイトはモンモリロナイトの層間陽イオンの種類によって性質が異なるが、イオン交換性を有していることから、他種類の陽イオンとイオン交換をすることによって容易に性質を変化する。層間陽イオンの交換性は



の順に増していく¹⁰⁾。炭酸ナトリウム (Na_2CO_3) は水に溶解するとナトリウムイオン ($2Na^+$) と炭酸イオン (CO_3^{2-}) に電離する。よって、セメントおよびベントナイト中の層間陽イオンに含まれる Ca^{2+} と炭酸ナトリウムから電離した Na^+ がイオン交換を行い、 Ca^{2+} と CO_3^{2-} が結合することにより炭酸カルシウム ($CaCO_3$) が生成される。炭酸カルシウムは非水溶性の物質であり、分子同士が結びつくことによって硬化体を形成する。炭酸ナトリウムを混合することによるセメントベントナイトの早期強度発現および長期強度の増加は、試料の混合直後から生成される炭酸カルシウムの硬化性能に起因しているといえる。

4.2. ブリージング試験に関する考察

表-4 にブリージング試験の結果を示す。配合 A-1, B-1 のセメントベントナイトでは時間の経過と共にブリージング率が大きくなるのに対し、配合 A-1, B-1 の炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトでは 1 時間後に約 0.5% のブリージングが確認されたのみで、その後はブリージングを起こしておらず、供試体表面の水分はなくなっている。同様に、配合 C, D, E, F, G においても試料の混合、攪拌から 24 時間以内にブリージング率が 0% となる傾向が確認できる。

炭酸ナトリウムの混合によるセメントベントナイト充填材のブリージング率の減少は、ベントナイトの膨潤性増加およびセメントベントナイトの早期強度発現性能が要因として挙げられる。ベントナイトはモンモリロナイトの層間陽イ

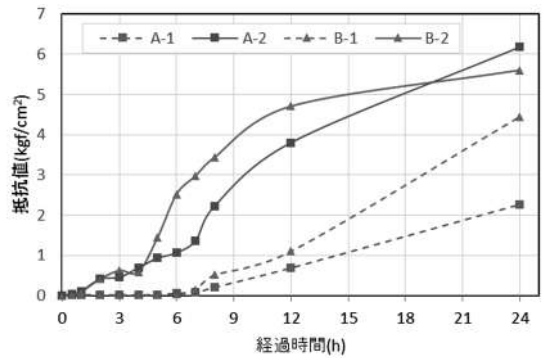
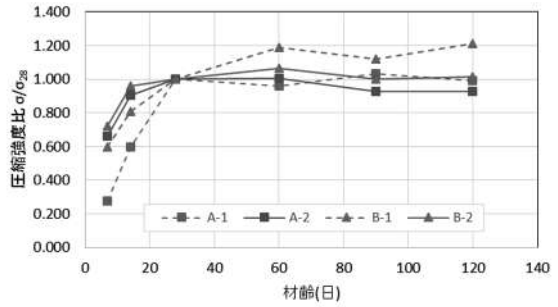
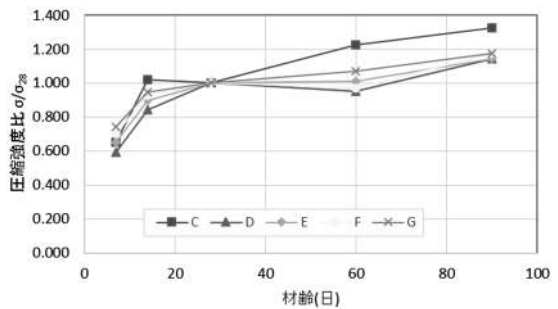


図-6 貫入試験結果



a. 炭酸ナトリウムの有無による違い



b. セメント量による違い

図-7 圧縮強度比

表-4 フロー試験及びブリージング試験結果

配合 No.	フロー値 (秒)	ブリージング率 (%)		
		1時間後	3時間後	24時間後
A-1	7.7	3.6	9.3	9.5
A-2	7.6	0.5	0.0	0.0
B-1	7.8	4.0	9.5	9.8
B-2	7.6	0.4	0.0	0.0
C	7.7	0.9	0.8	0.0
D	7.7	0.7	0.5	0.0
E	7.7	0.5	0.0	0.0
F	7.7	0.5	0.0	0.0
G	7.7	0.5	0.0	0.0

オンが水分子を吸着することによって吸水膨潤性を発揮している。Ca型ベントナイトと比較してNa型ベントナイトの方が単位層間の電気的な引力が弱いので、層間陽イオンが水分子を吸着した際に膨潤しやすいという性質を持つ。前述のように、炭酸ナトリウムが水に溶解して電離することでNa⁺が発生し、ベントナイト中の層間陽イオンに含まれるCa²⁺とイオン交換される。ベントナイトの層間陽イオンにNa⁺が多く含まれるようになることによって、ベントナイトの膨潤性が増加したと考えられる。加えて、炭酸カルシウムが生成されることによって早急に硬化体が形成され、セメントベントナイト中の水分子の移動が阻害される。また、セメントとの水和反応に水分子が消費されていることによる水量の減少もある。よって、炭酸ナトリウムの混合によるベントナイトの膨潤性増加およびセメントベントナイトの早期強度発現、セメントと水の水和反応という複数の現象が関係して、混合、攪拌から数時間後にはブリージングが発生しなくなったといえる。

4.3. 流動性試験に関する考察

表-4に流動性試験の結果について示す。各配合においてセメントベントナイトのフロー値は7.7s程度となっており、炭酸ナトリウムを混合することによるセメントベントナイトの流動性低下は見られない。前述のように混合、攪拌から一時間程度で凝結が始まっていることから、早期強度発現性能が混合直後の打設時の流動性には影響していない。また、セメントベントナイトが流動することによって材料分離を生じる可能性があるが、ブリージング現象がほとんど発生していないことから、各材料が偏って分離することのない適度な粘性を有した流動性の値であるといえる。よって、炭酸ナトリウム混合セメントベントナイトは、空洞充填材としての作業性が確保されている。

5. おわりに

5.1. 成果

本研究では、セメントベントナイトに炭酸ナトリウムを混合した空洞充填材について、強度特性、材料分離および流動性の観点から有用性を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 一軸圧縮試験より、炭酸ナトリウムを混合することでセメントベントナイトの初期・長期強度が増大する。早期強度発現効果より、早急に引抜孔を有する地盤を安定させることが可能である。
- (2) 貫入試験結果より、炭酸ナトリウムを混合することによってセメントベントナイトは打設後1時間程度から固化性能を発揮する。早急なゲル化は地盤内において地下水の充填材への侵入を防ぎ、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) ブリージング試験より、炭酸ナトリウムを混合することによってセメントベントナイトのブリージングが抑えられる。地盤内の杭引抜孔へ注入した場合、ブリージングを起こさないため材料は均質に保たれ、充填材の強度に深度方向による違いが生じにくくなる。
- (4) 流動性試験より、炭酸ナトリウムを混合することによってセメントベントナイトの流動性は失われない。地盤内の引抜孔への充填材注入において作業性が確保されている。

5.2. 課題

本研究では、炭酸ナトリウムを混合することによってセメントベントナイトが空洞充填材として有用な性能を発揮することを示した。また、物理試験結果および既往知見から早期強度発現並びに材料分離抑制のメカニズムについて考察した。今後は、物理化学的観点からの検証を行うことで、諸特性発現のメカニズムを明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 総務省：公共施設等の解体撤去事業に関する調査結果，総務省，2012
- 2) 村上隆生：基礎杭の残置，埋戻し部分の地盤支持力の瑕疵を否定し，代理業者の説明義務違反も否定した事例，RETIO，No.82，pp.166-167，2011
- 3) 桑原秀一，濱田聡一郎：構造物とりこわし工における既存杭の引抜工事について，平成27年度近畿地方整備局研究発表会論文集，2015
- 4) (株)マルシン：杭先端パワーチャッキング(PG)工法(<http://www.marushinn.jp/pg/>)，2017.2.17参照。
- 5) 既存杭引抜工法協会：既存杭引抜工事「その目的から計画～工事」(<http://kui-hikinuki.com/mokuteki.html>)，2017.2.17参照。
- 6) 堀井宏謙，西正晃，山崎勉，酒本純一，道前大三，宇高泰：コンクリート再生材を利用したセメントベントナイト複合固化体の開発，日本建築学会大会学術講演概要集，2007
- 7) 八島隆志：粉末X線回帰法によるスメクタイト交換性陽イオンの推定，全地連技術フォーラム2011講演集，No.40，2011。
- 8) 加藤清志，加藤直樹，湯沢敏雄，増川勲：急速硬化促進されたコンクリートの極初期強度による長期強度及び単位セメント量の迅速評価法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，1990
- 9) 国土交通省：公共建築工事標準仕様書（建築工事編）平成25年版，国土交通省，2014。
- 10) 鬼形正伸：ベントナイトの特性とその応用，粘土科学第46巻第2号，pp.131-138，2007