

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1128 June 2006

セメント安定処理土の
耐久性に関する室内試験

中 村 健
北 詰 昌 樹

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 粘土試料と試験条件	4
2.1 安定処理土供試体の作製と暴露	4
2.2 針貫入試験	5
2.3 カルシウム分析	7
3. 試験結果	7
3.1 密封条件での強度変化	7
3.2 暴露期間による強度分布の変化	7
3.3 暴露条件の影響	8
3.4 初期含水比の影響	9
3.5 固化材添加量の影響	10
3.6 暴露面近傍における強度低下	10
3.7 暴露期間による強度低下の範囲の増加	10
3.8 カルシウム分布	11
4. 結論	12
5. おわりに	12
参考文献	13

Laboratory Tests on Durability of Cement Treated Soils

Takeshi NAKAMURA*

Masaki KITAZUME**

Synopsis

Many methods of soil admixture stabilization have been developed and used for many on-land and marine constructions in the world. In most of them, soft clayey or sandy soil is mixed with a chemical stabilizing agent such as cement or lime. These methods have been applied to various purposes such as stabilizing foundation ground or embankments, reducing settlement, preventing liquefaction of ground and so on. There have been many studies on the physical and mechanical properties of treated soil, the interaction between treated soil and untreated soil, the design and execution methods, and the quality control and assurance. The long-term strength of treated soil was investigated by several research groups, in which the unconfined compressive strength of the treated soil cured in a laboratory or field was measured. There are two aspects when the long-term strength is concerned. One is the strength gain with time in the long run and the other is the possible strength reduction with time due to deterioration. It is easily anticipated that the deterioration (if any) may be triggered at the boundary surface of treated soil and extends inward. There are a few researches so far to investigate the possibility of deterioration and the mechanism of the strength decrease.

The authors started research projects on the durability of cement treated soil under several exposure conditions at the boundary of treated soil. In this study, the strength distributions were measured within the treated soils exposed to fresh water, seawater and untreated clay to investigate the influence of the exposure conditions on the decrease in strength and the extent of the deteriorated portion within the treated soil. The distribution of calcium oxide content in the treated soil was also measured to investigate the mechanism of strength decrease by comparing with the strength distribution.

Key Words: soil stabilization, clay, durability, needle penetration test, unconfined compression strength

* Senior Research Engineer, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Head of Soil Stabilization Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5055 Fax : +81-46-841-8098 e-mail:nakamurat@pari.go.jp

セメント安定処理土の耐久性に関する室内試験

中村 健*
北詰 昌樹**

要 旨

わが国は、これまで地盤安定対策、沈下対策または液状化対策など種々の目的で深層混合処理工法に代表される数多くのセメントおよびセメント系固化材を用いた地盤改良技術が開発されてきている。近年、セメント安定処理土は優れた遮水性と強固な特性を生かして、建設廃棄物や産業廃棄物の処分場の遮水構造にも適用されてきている。しかし、強固な改良地盤であっても地下水や周辺の地盤に暴露されることによって、表面から徐々に劣化し、強度や遮水性が低下することが指摘されている。これらの劣化が進めば、処分場の遮水構造としての機能が満足できなくなるとともに、最悪の場合には構造的安定性も失う危険性がある。

セメント安定処理土の力学的特性は詳細に調べられてきている。しかし、長期間にわたる耐久性に関する研究は限られている。これまでの研究では、安定処理土の長期安定性が確保されたという報告がある一方で、暴露条件によっては安定処理土表面から劣化が進むとする報告もある。そのため、安全で確実な構造物の建設のためには、劣化状況や劣化の進行状況などの長期耐久性に関するデータの蓄積が強く望まれている。

そこで本研究では、セメント安定処理土の長期耐久性に及ぼす配合条件ならびに暴露条件の影響を実験的に検討した。実験では、比較的低強度のセメント安定処理土を真水、海水および未改良の粘土地盤に暴露させ、長期間にわたる強度変化とカルシウム量の変化を調査した。

その結果、真水、海水、未処理の粘土地盤の暴露条件でも暴露期間が半年以上経過すると強度の低下現象が見られた。本研究の結果より 30 年後の強度低下の範囲を外捜すると、管中混合固化処理工法のような比較的低強度の処理土の場合には数 cm～10 数 cm 程度、深層混合処理工法のような高強度の処理土の場合には数 cm 程度と予想される。いずれの場合も、造成される改良地盤の大きさが大きい場合には強度低下の範囲はごく小さく、構造・機能の面で直ちに問題視する必要性は低いと考えられる。

キーワード：土質安定処理，粘土，耐久性，針貫入試験，一軸圧縮強さ

* 地盤・構造部 主任研究官

** 地盤・構造部 地盤改良研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5055 Fax：046-841-8098 e-mail:nakamurat@pari.go.jp

1. はじめに

わが国は、沿岸地域を中心に沖積層が発達し、軟弱地盤を形成していたり、あるいはゆるく詰まった砂質地盤が厚く堆積していることが多く、構造物の建設に際しては何らかの地盤改良が必要となる場合が多い。これまで地盤安定対策、沈下対策または液状化対策など種々の目的で深層混合処理工法¹⁾に代表される数多くのセメントおよびセメント系固化材を用いた地盤改良技術（深層混合処理工法、事前混合処理工法²⁾、SGM工法³⁾など）が開発され、戦後から高度成長期に至るまでの社会基盤の整備に大きな貢献をしてきた。さらに、浚渫土のリサイクルを図るために、最近では管中混合固化処理工法⁴⁾のように初期含水比が高く強度の小さい安定処理土も造成されている。

近年、セメント安定処理土は優れた遮水性と強固な特性を生かして、建設廃棄物や産業廃棄物の処分場の遮水構造にも適用されてきている。廃棄物に含まれる有害物質の場外への流出・溶出を防止するため、処分場には厳密な遮水性が必要とする。しかし、強固な改良地盤であっても地下水や周辺の地盤に暴露されることによって、表面から徐々に劣化し、強度や遮水性が低下することが指摘されている。これらの劣化が進めば、処分場の遮水構造としての機能が満足できなくなるとともに、最悪の場合には構造的な安定性も失う危険性がある。そのため、安全で確実な構造物の建設ためには、劣化の状況と進行速度を精度良く予測することが重要である。

セメント安定処理土は開発されてから約40年経過し、これまでその力学的特性は詳細に調べられてきている⁵⁾。しかし、長期間にわたる耐久性に関する研究は近年行われるようになってきたが⁷⁾⁻¹⁰⁾、その研究成果は限られている。これまでの研究では、安定処理土の長期安定性が確保されたという報告⁸⁾がある一方で、暴露条件によっては安定処理土表面から劣化が進むとする報告⁷⁾もある。そのため、安全で確実な構造物の建設のためには、劣化状況や劣化の進行状況などの長期耐久性に関するデータ

の蓄積が強く望まれている。

そこで本研究では、セメント安定処理土の長期耐久性に及ぼす配合条件ならびに暴露条件の影響を実験的に検討した。実験では、比較的低強度のセメント安定処理土を真水、海水および未改良の粘土地盤に暴露させ、2年間にわたる強度変化とカルシウム量の変化を調査した。本研究では、特に暴露面付近の強度分布に着目し、針貫入試験を行って詳細に調べた。

2. 粘土試料と試験条件

2.1 安定処理土供試体の作製と暴露

本研究に用いた粘土は、本研究室で長年に渡り用いられてきた川崎粘土で、その力学特性を表-1に示す。安定処理土の供試体は、地盤工学会基準¹³⁾の順に従い、含水比を調整した川崎粘土に普通ポルトランドセメントを攪拌混合して作製した。混合した安定処理土は直径10cm、高さ20cm（シリーズ1）または直径5cm、高さ10cm（シリーズ2）のプラスチック製モールドに打設した後、温度20℃、湿度95%の環境下で2週間暴露した。その後、供試体を後述する種々の暴露条件下で所定期間暴露を行った。実験は表-2に示すように2シリーズ実施した。シリーズ1では、暴露条件の影響を検討することを目的に同一配合の供試体について試験を行った。シリーズ2では、粘土試料の初期条件と配合条件の影響を検討することを目的とした。

表-1 川崎粘土の力学特性

比重		2.688
コンシステンシー特性	液性限界(%)	83.4
	塑性限界(%)	38.6
	塑性指数	44.8
粒度分布	砂分(%)	2.8
	シルト分(%)	44.9
	粘土分(%)	52.3

表-2 実験条件一覧

名称	シリーズ1				シリーズ2							
	1-FW	1-SW	1-C	1-S	2-A1	2-A2	2-B1	2-B2	2-C1	2-S1	2-S2	
粘土含水比(%)	80				80	160	85	180	90	85	180	
セメント添加量(kg/m ³)	50				50	50	100	100	150	100	100	
暴露環境	真水	海水	粘土	密封	粘土							
セメントの種類	普通ポルトランド									高炉 B		

暴露条件は、図-1に示すように真水(a)、海水(b)への暴露、ならびに粘土(c),(e)への暴露の3種類とした。さらに、参考として、密封した条件(d)での暴露も実施した。真水暴露で使用した水はイオン交換水で、海水暴露ではイオン交換水に人工海水粉末（米Aqua Craft社製BIO-SEA Marinemix）を溶かしたものである。いずれの暴露でも、真水または海水を満たした水槽内に供試体を設置し、約20℃の室内で暴露した。水槽内の真水ならびに海水は、暴露開始後1ヶ月間は週に1回、その後暴露1年までは針貫入試験の実施時（3ヶ月および6ヶ月）に交換した。一方、粘土への暴露については、シリーズ1では図-1(c)に示すように約20℃の室内において、未処理土を詰めたモールドと安定処理土を打設したモールドの開口部を密着・固定して暴露させた。しかし、後述するように、本方法では粘土の体積が小さく、十分な暴露を与えられなかったことが分かった。そこで、シリーズ2では図-1(e)に示すように当所構内に設置している川崎粘土の貯蔵土槽内にモールドを設置し、開口部を槽内の粘土に暴露する方法とした。なお、粘土貯蔵土槽は屋外に設置されているため、暴露温度は季節により変化している。暴露期間は、シリーズ1では、1ヶ月、3ヶ月、6ヶ月、1年及び2年、シリーズ2では1ヶ月、3ヶ月、6ヶ月、1.5年及び2年とした。

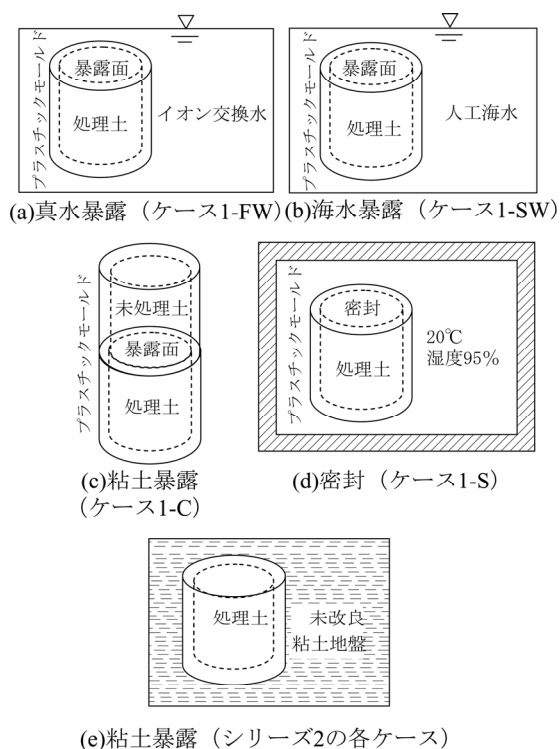


図-1 暴露条件

2.2 針貫入試験

(1) シリーズ1

これまで安定処理土の強度特性の調査では一軸圧縮試験が広く行われている。しかし、当試験では暴露面付近の詳細な強度分布を調査することは困難である。そこで、暴露面からの距離と安定処理土の強度の関係を詳細に測定するため針貫入試験を行うこととした。針貫入試験は、コンクリート工学の分野ではコンクリート構造物の劣化を診断する方法としても利用されている。しかし、地盤工学の分野ではあまり広くは用いられておらず、試験法も確立されていない。そこで、本研究ではコンクリート工学での適用事例などを参考に、独自の試験方法を考案し実施することとした。

図-2に示すように、直径5cm、高さ10cmの供試体の側面に手芸用の針（直径0.56mm）を3mm/minの速さで貫入させ、針の貫入量が2mm、5mmおよび10mmの時の貫入抵抗値を測定した。

針貫入試験により得られた貫入抵抗値と一軸圧縮強さとの関係を求めるために、密封した試料について針貫入試験と一軸圧縮試験を行った。図-3はシリーズ1における密封された試料で得られた一軸圧縮強さ（ q_u ）と貫入抵抗値の関係を示している。図には、貫入量が2mm、5mm及び10mmの時点での貫入抵抗値を示しているが、いずれの貫入抵抗値とも一軸圧縮強さとは強い相関があることが分かる。



図-2 針貫入試験

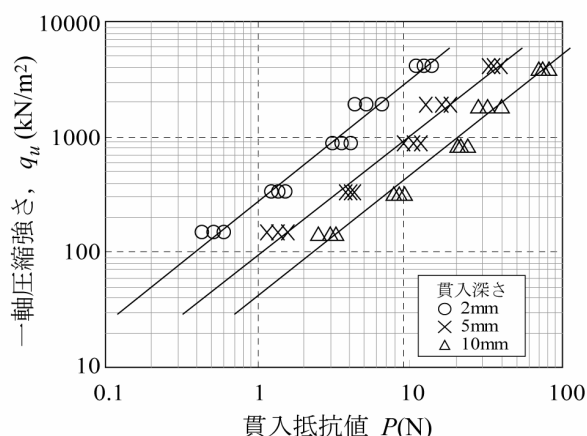


図-3 貫入抵抗値と一軸圧縮強さの関係(シリーズ1)

(2) シリーズ2

シリーズ2では、針を暴露面から鉛直方向に一定速度で貫入し、その貫入抵抗を連続的に測定する方法とした。試験方法を変更したのは、シリーズ1での方法では測定箇所ごとに針の貫入位置を変えるために試験の効率性に欠けること、さらにシリーズ1での結果より供試体内の強度が低下している範囲が針の長さより短いことが確認できたためである。

シリーズ2で採用した試験方法により測定された貫入抵抗値と貫入量 (=暴露面からの距離) との関係について、ケース2-C1の例を図-4に示す。図には暴露期間が3ヶ月と18ヶ月のデータを示した。貫入抵抗値は針先端部の抵抗と周面部での摩擦抵抗の合計であるため、安定処理土の強度が均一であれば貫入抵抗値は貫入量に比例して増加するものと考えられる。図より、暴露期間が3ヶ月の供試体の値は貫入量の増加にほぼ比例して増加しており、安定処理土内の強度が一定と考えられる。一方、暴露期間が18ヶ月の供試体での値について見ると、針の貫入量が4mm程度までは貫入抵抗値はほぼ一様に増加しているが、その増加割合は暴露期間が3ヶ月のものに比べ小さいことが分かる。さらに針の貫入を進めると、徐々に貫入抵抗値の増加割合が大きくなり、貫入量が8mm程度以上になると暴露期間が3ヶ月での測定結果とほぼ同様の増加割合で増加している傾向が見られる。

上記の傾向をより明瞭に示すために、図-4に示したデータを貫入抵抗値の増加割合と貫入量との関係で図-5に示した。データは18ヶ月暴露後のもので、測定値に多少ばらつきが見られるが、針の貫入量が約9mmまでは貫入量にほぼ比例して貫入抵抗増加割合が増加し、貫入量がそれ以上になるとほぼ一定の値に収束していること

が分かる。図には、前半部と後半部での近似直線を描いているが、両直線の交点を境に強度低下の生じている範囲と生じていない範囲に分割できる。

シリーズ2での7種類の安定処理土について、貫入抵抗値の増加率と一軸圧縮強さ (q_u) との関係を図-6に示した。各安定処理土について暴露期間が3ヶ月、6ヶ月、24ヶ月において、暴露の影響がないと考えられる部分でのデータを示している。図より、針貫入抵抗値の増加率は一軸圧縮強さと両対数グラフで直線的な相関を示しており、この図を用いて針貫入抵抗試験から一軸圧縮強さを推定できることが確認された。

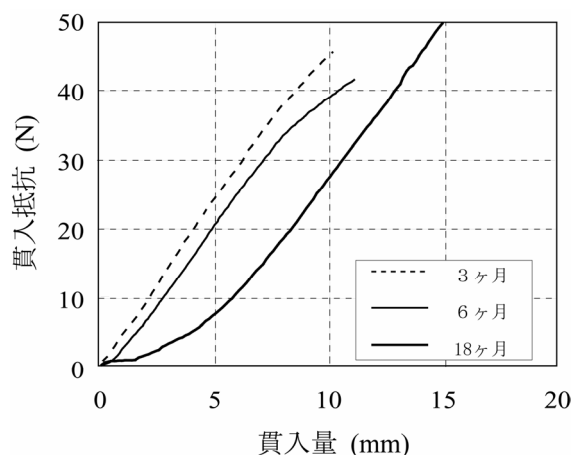


図-4 貫入量～貫入抵抗値(ケース2-C1)

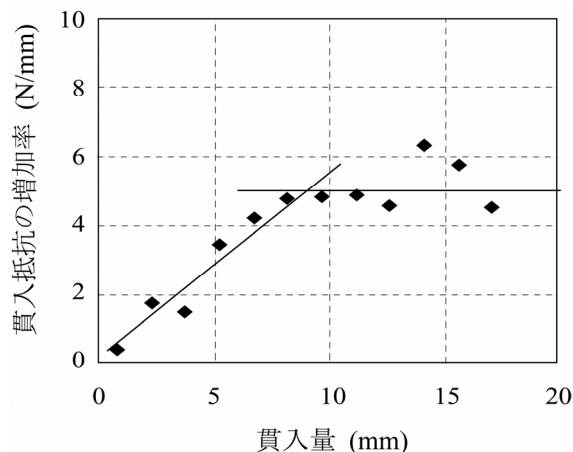


図-5 貫入量～貫入抵抗増加率(ケース2-C1)

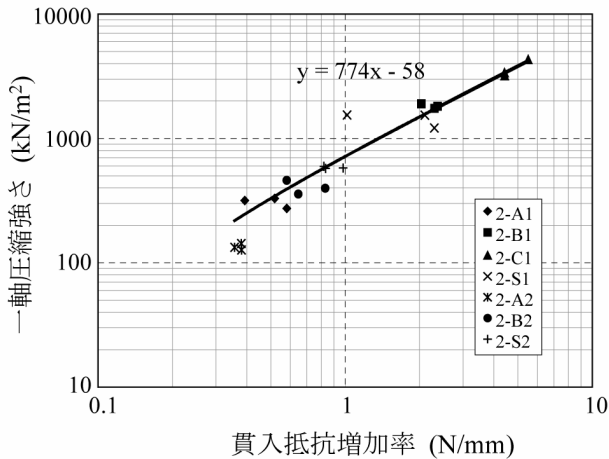


図-6 貫入抵抗の増加率～一軸圧縮強さ

2.3 カルシウム分析

コンクリート工学では、劣化の主な原因としてカルシウムの溶出が指摘されている。セメント安定処理度に関するこれまでの研究でも、セメント安定処理土の強度低下とカルシウム量の減少との関係が指摘されている⁷⁾。そこで、本研究でも、針貫入試験を行った供試体を用いて安定処理土中のカルシウム量の分析を行い、強度低下との関連を調査した。カルシウム分析に用いた試料は、針貫入試験と同じ位置で少量ずつ採取したもので、図-7に示すフローチャートにしたがって原子吸光分光測定法によってカルシウム量を測定した。

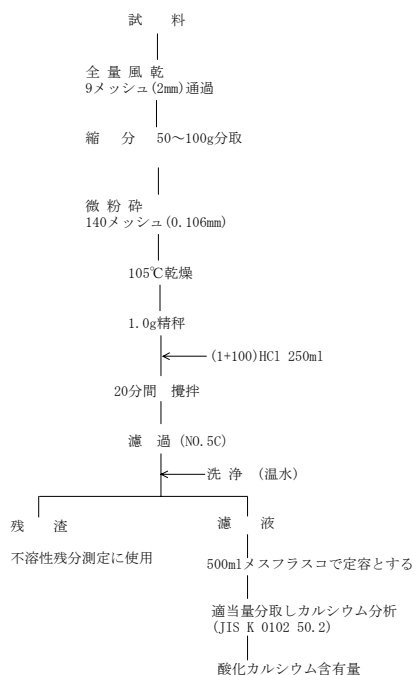


図-7 カルシウム分析の手順

3. 試験結果

3.1 密封条件での強度変化

図-8は、シリーズ1において密封状態で暴露した供試体について、暴露期間と一軸圧縮強さとの関係を示したものである。図より、密封したセメント安定処理土の一軸圧縮強さが暴露期間に応じて増加し、その関係はおおむね暴露期間の対数に比例していることが分かる。

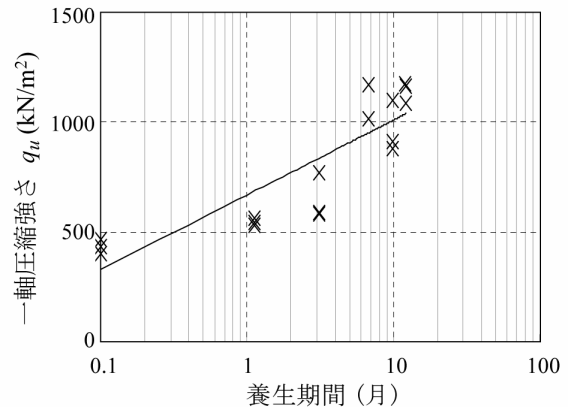


図-8 暴露期間と一軸圧縮強さの関係(密封条件)

3.2 暴露期間による強度分布の変化

シリーズ1において真水に暴露した供試体内の一軸圧縮強さの分布の経時的変化を図-9に示す。図中、横軸は暴露面からの深さを、縦軸は針貫入抵抗値から換算した一軸圧縮強さ (q_u) をそれぞれ示している。暴露面から離れた供試体深部での強度分布を見ると、暴露期間の増加にともない徐々に強度が増加する傾向が見られる。この傾向は、密封条件での一軸圧縮強さ (図-8) での傾向と同じである。一方、暴露面に近い部分での強度について見ると、中央部よりも強度が小さく、暴露期間の増加にともない徐々に小さくなっていることが分かる。さらに、強度の低下している範囲は、暴露期間の増加にともない供試体深部に広がっていく傾向が見られる。このように、暴露期間の経過により供試体の中央部では強度増加傾向が、暴露面の近くは強度低下傾向という相反する現象が生じていることが分かる。

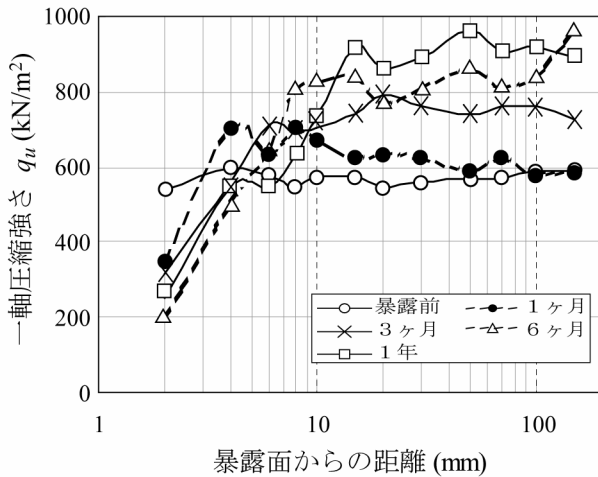


図-9 供試体内の強度分布 (ケース1-FW).

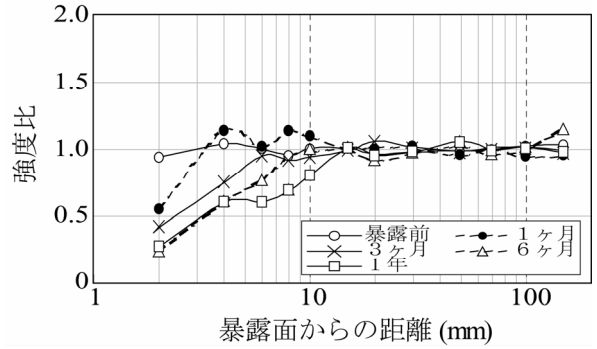
3.3 暴露条件の影響

暴露による強度低下現象を詳細に検討するために、各測定点で計測された針貫入値を暴露の影響のない供試体内部での針貫入抵抗値で除して強度比を求め、図-10に示した。図では、4種類の暴露条件について暴露期間が1年までの値を示している。なお、各図での「暴露前」で示される強度分布は供試体作製時（暴露直前）の値を示しており、全ケースで同じ値をプロットしている。暴露直前の強度分布を見ると、供試体内ではほぼ一定であることが確認できる。

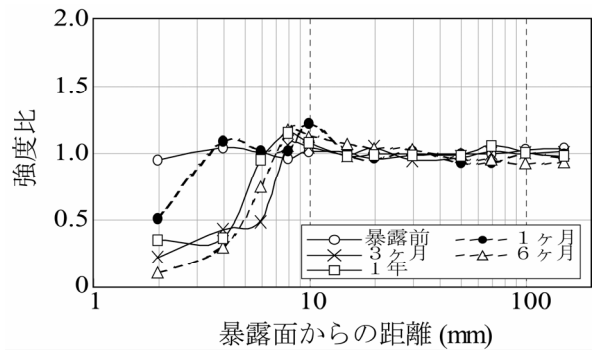
まず、真水に暴露したケース1-FWについて見ると（図-10(a)）、試験開始時にほぼ一定の強度分布であったものが、1ヶ月暴露後には暴露面から約2mmの位置での強度比が約0.5にまで低下しており、暴露の影響が明確に確認できる。1ヶ月暴露の時点では、暴露面から約5mm以上離れた部分での強度低下傾向は見られていないが、暴露期間が長くなるにともなって、強度比が徐々に低下していく傾向が見られ、暴露の影響が供試体深部にまで徐々に広がっていく傾向が見られる。

ケース1と同様の傾向は、海水に暴露したケース1-SW（図-10(b)）でも明瞭に見られる。しかし、真水暴露の場合と比較すると強度低下傾向は海水暴露の方が大きいことが分かる。一方、未改良の粘土に暴露したケース1-C（図-10(c)）では、ケース1及び2で見られたような暴露による強度低下傾向がほとんど見られておらず、逆に暴露面から2mmの位置では強度増加傾向が見られている。密封状態のケース1-Sでは（図-10(d)）、供試体の全周囲を密封して恒温恒湿槽で暴露したにもかかわらず、図に示すように強度が低下する傾向が見られる。

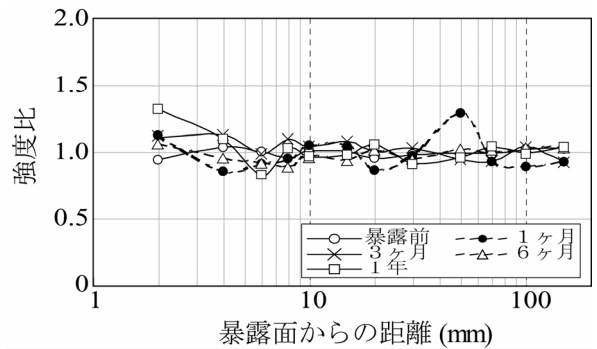
未改良の粘土に暴露した供試体の強度低下現象につ



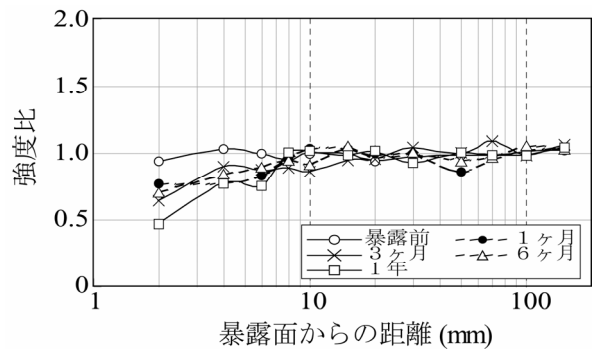
(a) 真水暴露 (ケース1-FW)



(b) 海水暴露 (ケース1-SW)



(c) 粘土暴露 (ケース1-C)



(d) 密封 (ケース1-S)

図-10 強度比の分布(シリーズ1)

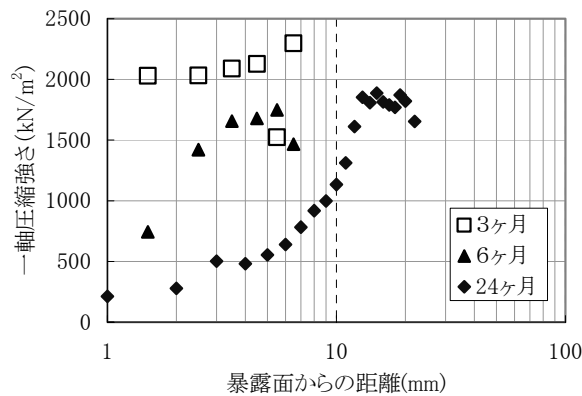
いては、寺師ら⁷⁾は一軸圧縮試験を行って強度の低下を確認している。今回の実験結果はそれと矛盾するものである。このような結果を示した原因として、ケース1-Cでは試料準備の容易さを考えて図-1(c)に示すように安定処理土と同体積の未処理土をモールドに詰めて両方のモールドの開口部を密着させたため、ケース1-FW、1-SWや以前の試験結果の供試体に比べて安定処理土からのカルシウムイオンなどの溶出が制限されたことが考えられる。そのため、シリーズ2では安定処理土の体積に比して未処理の粘土の体積ははるかに大きい条件での暴露試験を別途実施し、その結果から未処理の粘土に暴露したケースの耐久性を評価することとした。

3.4 初期含水比の影響

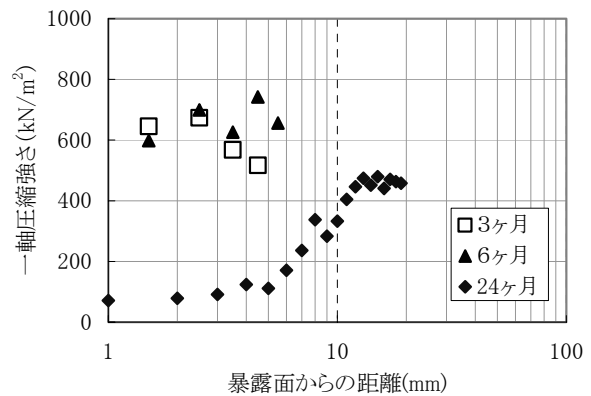
シリーズ2のうち、供試体の初期含水比が異なる4種類のケースについて、暴露期間が3ヶ月、6ヶ月、24ヶ月での強度分布を図-11に示した。図中、横軸は暴露面からの距離を、縦軸は貫入抵抗の増加率から推定した一軸圧縮強さをそれぞれ示している。

粘土の初期含水比の影響を見るため、ケース2-B1(初期含水比85%、図-11(a))とケース2-B2(初期含水比180%、図-11(b))とを比較する。まず、ケース2-B1の強度分布について見ると(図-11(a))、暴露期間が3ヶ月では暴露面付近で目立った強度の低下が見られていないが、暴露期間が6ヶ月になると暴露面から約2mm、24ヶ月では約13mmまでの範囲で強度低下が生じていることが分かる。次に図-11(b)の分布図を見ると、このケースでも暴露期間が3ヶ月までは強度の低下現象が見られていないが、暴露期間が6ヶ月では暴露面から約2mm、24ヶ月では約13mmの範囲まで強度低下現象が見られる。このような強度低下が生じている範囲は、初期含水比が低いケース2-B1とほぼ同じであり、含水比の違いは強度低下の範囲にはあまり大きな影響を及ぼさない結果となった。

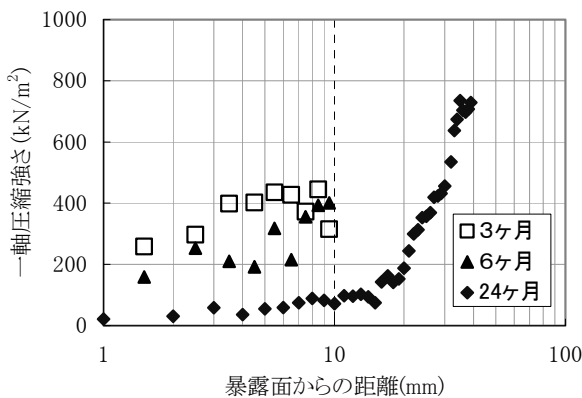
しかし、ケース2-B1と2-B2での供試体深部での一軸圧縮強さを比較すると、初期含水比の低い2-B1では一軸圧縮強さが1600~2100kN/m²であるのに対し、2-B2では400~700kN/m²と約1/3になっており、初期含水比の違いが一軸圧縮強さに大きく影響していることが分かる。



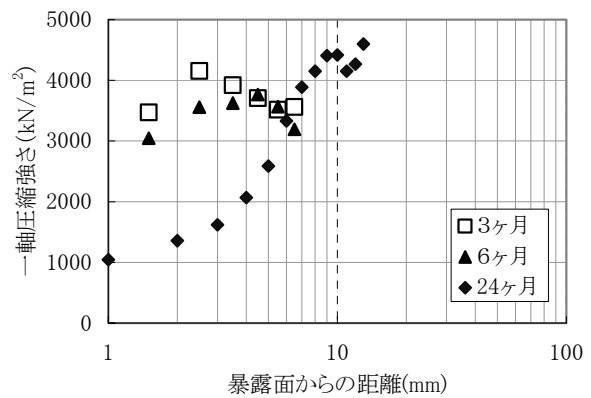
(a)ケース 2-B1



(b)ケース 2-B2



(c)ケース 2-A1



(d)ケース 2-C1

図-11 安定処理土の強度と暴露面からの距離との関係

3.5 固化材添加量の影響

ここでは、粘土の初期含水比が同じで固化材の添加量が異なる2つのケースについて暴露の影響を検討する。

図-11(c)は、固化材の添加量が 50kg/m^3 と最も少ないケース 2-A1 の強度分布を示している。図より、暴露期間が3ヶ月の時点で既に暴露面から約4mmの範囲まで強度低下が生じていることが分かる。特に、最も暴露面に近い位置での強度は、暴露前の強度の約1/2まで低下していることが分かる。さらに、暴露期間が6ヶ月、24ヶ月での強度分布とあわせて見ると、暴露期間が長くなるほど強度低下の範囲が拡大し、24ヶ月暴露の場合には暴露面から30mm以上の深さにまで達していることが分かる。また、暴露期間の経過とともに暴露面に近い位置での強度は低下し、暴露期間が24ヶ月では供試体深部での強度の5%以下にまで低下する傾向が見られる。

一方、固化材の添加量が 150kg/m^3 と最も多いケース 2-C1 の強度分布を図-11(d)に示したが、暴露期間が3ヶ月の時点では暴露面付近でも強度の低下現象はほとんど見られていない。暴露期間が6ヶ月の時点では約3mm、24ヶ月では約8mmの範囲で強度低下していることが分かる。なお、暴露期間が24ヶ月での暴露面付近の強度は、供試体内部での強度の約1/4にまで低下する傾向が見られる。

強度低下が生じている範囲について、ケース 2-A1 と 2-C1 を比較すると、暴露期間が6ヶ月の時点で2-A1 は 2-C1 のおよそ3倍、暴露期間が24ヶ月では4倍以上となっており、固化材の添加量が強度低下に大きな影響を与えていることが分かる。

3.6 暴露面近傍における強度低下

暴露面付近での強度低下現象への暴露条件の影響を比較するために、ケース1～3について、暴露面から2mmの位置での強度比と暴露期間との関係を図-12に示した。図中、横軸には暴露期間を対数で表示した。なお、暴露開始時の測定値は便宜上0.1ヶ月での値として図示している。図より、真水または海水へ暴露した場合、強度比は暴露期間の対数にほぼ比例して減少し、暴露期間が1ヶ月時には約0.5まで減少していることが分かる。その後も、強度比は暴露期間とともに減少し、暴露期間が6ヶ月時には強度比が0.2程度まで低下している。なお、暴露期間が12ヶ月時の強度比が6ヶ月時の値より大きくなっていくケースが見られるが、試験した供試体の違いによるものと思われる。未改良の粘土内に暴露したケース3については、強度比が徐々に増加する傾向を示している。

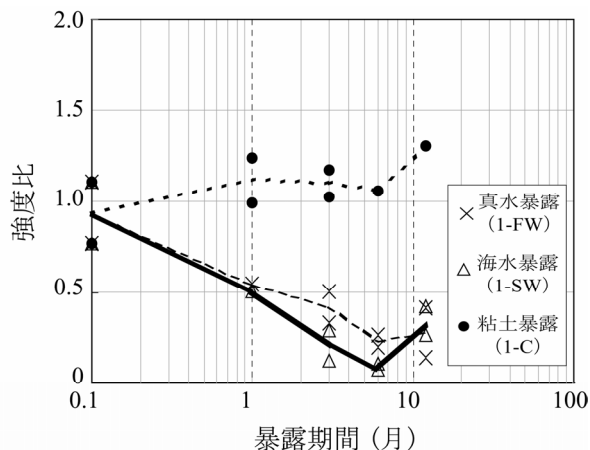


図-12 暴露面近傍における強度比の変化

3.7 暴露期間による強度低下の範囲の増加

(1) シリーズ1の結果

先に議論したように、暴露によって境界面付近での強度が著しく低下し、さらに強度が低下する範囲（以降、劣化部と呼ぶ）が暴露期間とともに供試体内部に進展していくことが分かった。ここでは、劣化部の進展状況について検討する。図-10に示した強度比の分布図において、強度比が1を下回る範囲を劣化部と判断し、図-13にその進展状況を示した。図より、真水に暴露したケース1の場合には、暴露期間とともに劣化部が徐々に進展し、暴露期間が6ヶ月以降からはその傾向が著しく、12ヶ月時には劣化部の深さは15mm程度までに達していることが分かる。一方、海水中に暴露したケース2でも暴露期間とともに劣化部が進展して行く傾向が見られるが、その傾向は暴露期間が6ヶ月までは真水暴露の場合よりもわずかに大きいことが分かる。今回の実験結果について見ると、暴露期間が6ヶ月までは、真水暴露（ケース1）、海水暴露（ケース2）とも、暴露期間が長いほど劣化部の範囲が拡大していることが分かる。なお、暴露期間が3ヶ月後は、劣化部の深さはほぼ一定値となり、試験した範囲（12ヶ月）ではそれ以上進展する傾向は見られなかった。

図には寺師ら⁷⁾による粘土暴露と海水暴露での試験結果もあわせて示している。実験結果は、海水暴露と未処理土暴露のいずれのケースとも暴露期間の経過とともに劣化部が進展しており、本実験で見られたような一定となる傾向は見られなかった。海水暴露と未処理土暴露とを比較すると、海水暴露の方が劣化部の進展は大きいことがわかる。

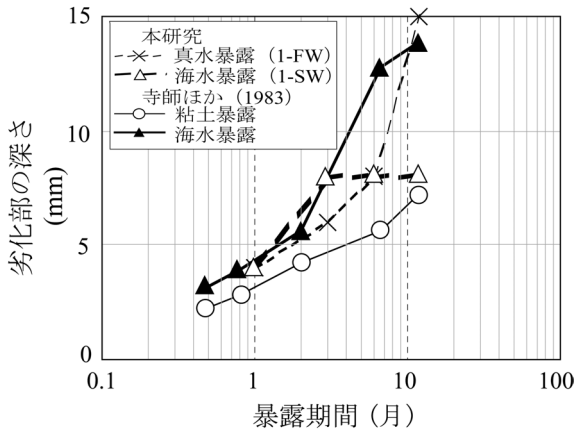


図-13 強度低下の範囲の変化(シリーズ1)

(2) シリーズ2の結果

7種類の配合すべてについて、強度低下部の範囲の値を求め、図-14に暴露期間との関係を示した。図中、横軸には暴露期間を対数で示している。同図より、粘土に暴露した安定処理土も、暴露期間が長くなると強度低下が見られること、強度低下の範囲はほぼ暴露期間の対数に比例していることが分かる。ただし固化材の配合量が最も少ない2-A1と2-A2のケースでは、暴露期間が24ヶ月時の強度低下の範囲が他のケースに比べて著しいことが分かる。

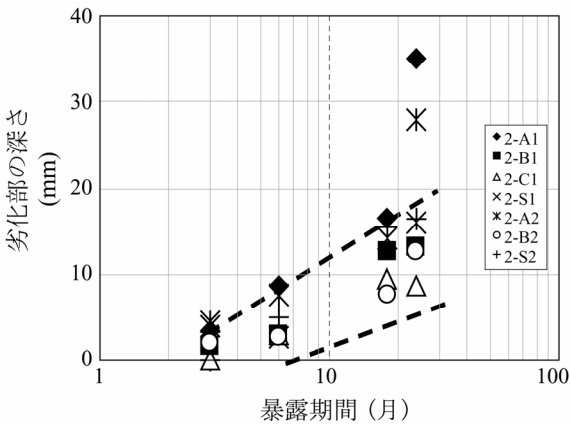
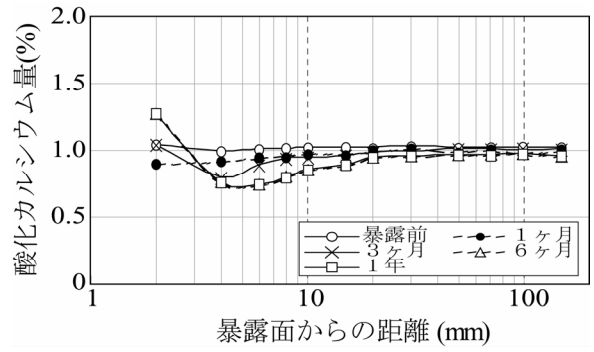


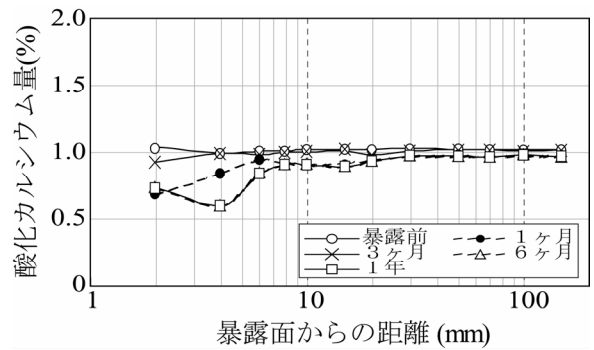
図-14 強度低下の範囲の変化 (シリーズ2)

3.8 カルシウム分布

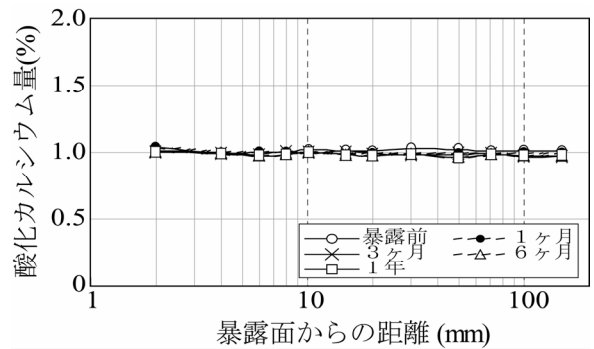
図-15に、シリーズ1の全試験ケースについてのカルシウム含有量の分布を示した。まず、真水に暴露したケース1-FWを見ると、暴露期間にともない暴露面から2mmの位置を除き暴露付近のカルシウム含有量が徐々に減少していく傾向が見られる。カルシウム含有量は暴露期間と



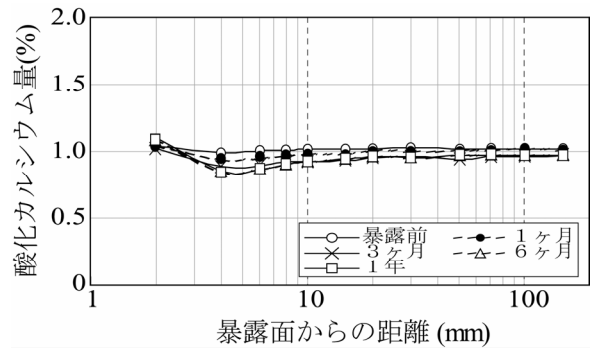
(a) 真水暴露 (ケース1-FW)



(b) 海水暴露 (ケース1-SW)



(c) 粘土暴露 (ケース1-C)



(d) 密封 (ケース1-S)

図-15 カルシウム量の分布図

ともに減少し、その範囲も供試体深部へと進展していく傾向が見られる。強度試験結果では暴露期間が12ヶ月後も暴露面から15mm以深では強度低下が見られなかったが、カルシウム含有量もほとんど一定であり、強度とカルシウム含有量とが密接な関係にあることが分かる。

次に、海水暴露のケース1-SWについて見ると、真水暴露の場合と同様に暴露期間とともにカルシウム含有量が減少し、その範囲も深部に広がっていく傾向が見られる。一方、未処理の粘土に暴露したケース1-Cでは、カルシウム含有量は暴露期間にかかわらず供試体内部でほぼ一定の分布を示している。前に述べたように、本ケースでは供試体の強度の減少傾向がほとんど見られなかったが、カルシウム含有量の分布も強度がほぼ一定であったことを裏付けている。

密封したケース1-Sでは、真水暴露や海水暴露ほど顕著ではないが暴露面に近い位置でカルシウム含有量がわずかに減少する傾向が見られる。図-10に示したように、本ケースの場合には長期間の暴露によって強度の減少が見られているが、カルシウム含有量の減少はこれを裏付けているものと考えられる。

4. 結論

シリーズ1、シリーズ2の安定処理土について、供試体の暴露面付近を中心に針貫入試験を行い、シリーズ1についてはカルシウム分析もあわせて行った。その結果、得られた主な知見を以下に示す。

(1) 針貫入試験の有効性

コンクリートの劣化の判定に用いられている針貫入試験による強度評価の手法を安定処理土の強度低下の判定に応用した。その結果、供試体の暴露面付近での強度とその低下状況が確認できた。また、針貫入試験での貫入抵抗値は安定処理土の一軸圧縮強さと相関性があり、安定処理土の強度分布を定量的に評価できることが分かった。

(2) 暴露条件の影響

安定処理土を暴露する条件に、真水、海水、未処理の粘土地盤の3種類を設定し、最大2年間の暴露を行った。その結果、いずれの暴露条件でも暴露期間が半年以上経過すると強度の低下現象が見られた。粘土に暴露したケースでも、粘土粘土の初期含水比や固化材の添加量に拘わらず強度低下現象が確認された。

暴露条件の影響を比較すると、海水暴露の場合が最も強度低下が著しく、真水暴露の場合がそれに続く。強度低下の範囲を比較すると、暴露期間が1年未満で

は海水暴露が最も大きく、真水暴露の場合はそれ以下であったが、暴露期間が1年以上になると両者はほぼ同程度の結果となった。

(3) 粘土の初期含水比の影響

初期含水比の影響について、粘土の暴露の場合安定処理土の強度そのものは初期含水比の低いケースの方が高かったが、暴露面付近での強度の低下範囲については有意な差が見られなかった。

(4) 固化材の添加量の影響

粘土固化材の添加量が小さい場合には暴露面近傍の強度低下の範囲が大きく、添加量が大きい場合には強度低下の範囲が小さいことが確認された。

(5) カルシウム量と強度低下の関係

強度低下が見られた範囲でのカルシウム量は、試験開始時よりも低下する傾向が見られ、安定処理土内のカルシウムの溶出が強度低下の大きな要因と考えられる。

5. おわりに

本研究の結果より、長期間にわたり暴露面から徐々に強度低下が生じることが分かった。その範囲は、安定処理土の強度に大きく影響を受け、強度の小さい安定処理土の方が強度低下を生ずる範囲が大きいことが明らかになった。本研究では暴露期間が2年間と短い、その結果より30年後の強度低下の範囲を外推すると、その大きさは数cm～10数cm程度と予想される。管中混合処理土工法の場合には、造成される改良地盤はきわめてマシブなものであり、この程度の強度低下の範囲であれば構造上・機能上問題が生じるとは考えにくい。

深層混合処理工法のような場合には、一般に高強度の安定処理土を造成するため、強度低下が生ずる範囲も小さく、30年間で数cm程度と予測される。港湾地域での深層混合処理の場合、改良地盤はブロック式や壁式改良などのマシブな改良形式が多く適用されており、数cm程度の範囲で強度低下が生じて、大きな問題を生じさせるとは考えられない。そのため、現時点では改良地盤の設計において直ちに劣化の影響を考慮する必要性は小さいと思われる。

一方、陸上工事での深層混合処理の場合には杭式改良地盤が多く適用されている。杭式改良地盤の場合には、直径が1m程度の改良杭を造成するため、数cm程度の範囲の強度低下であっても改良杭全体への影響も大きい場合もある。そのため、この様な場合には、設計当初から強度低下の影響を考慮する必要があると思われる。具体的

には、強度低下分を見込んで、改良杭の強度を高めを設定するとか、改良杭を本数に余裕を持たせるなどの対処が考えられる。いずれにせよ、セメント安定処理土の長期耐久性に関する研究は緒に着いたばかりで未解明なことも多い。そのため、今後、耐久性のメカニズムの解明や現地土の耐久性調査などの研究を進めていく必要がある。

(2006年3月10日受付)

参考文献

- 1) Coastal Development Institute of Technology: The Deep Mixing Method - Principle, Design and Construction-, A. Balkema Publishers, 123p., 2002.
- 2) 善 功企：液状化対策としての事前混合処理工法の開発，土と基礎，Vol.38, No.6, pp.27-32, 1990.
- 3) 土田 孝：港湾空港事業における軽量混合処理土工法の開発と適用事例，港湾技術研究所報告，第38巻，第2号，pp.131-167, 1999.
- 4) 佐藤恒夫：海上空港用地造成への管中混合固化処理工法の適用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1076, 81p., 2004.
- 5) (社)地盤工学会編：セメント系安定処理土に関するシンポジウム講演集，240p., 1996.
- 6) (社)地盤工学会編：セメント及びセメント系固化材を用いた固化処理土の調査・設計・施工方法と物性評価に関するシンポジウム講演集，390p., 2005.
- 7) 寺師昌明，田中洋行，光本 司，本間定吉，大橋照美：石灰・セメント系安定処理土の基本的特性に関する研究（第3報），港湾技術研究所報告，第22巻，第1号，pp.69-96, 1983.
- 8) 寺師昌明，北詰昌樹：締め固めを伴わない石灰安定処理土の耐久性調査，港湾技研資料，No.732, 14p., 1992.
- 9) Kitazume, M., Nakamura, T., Terashi, M. and Ohishi, K.: Laboratory tests on long-term strength of cement treated soil, *Proc. of the 3rd International Conference on Grouting and Ground treatment*, Vol. 1, pp.586-597, 2003.
- 10) Hayashi, H., Nishikawa, J., Ohishi, K. and Terashi, M.: Field observation of long-term strength of cement treated soil, *Proc. of the 3rd International Conference on Grouting and Ground treatment*, Vol. 1, pp.598-609, 2003.

港湾空港技術研究所資料 No.1128

2006.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(844)5040 URL.http: www.pari.go.jp

印刷所 ニッセイエプロ株式会社

Copyright © (2006) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。