

養生時上載圧力がセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす影響

志比 利秀¹⁾, 伊藤 亮哉²⁾

1) 助教, 島根大学大学院自然科学研究科, shibi@riko.shimane-u.ac.jp

2) 中国地方整備局, itou-r87wc@milt.go.jp

本研究では、養生中の上載圧力の負荷がセメント安定処理土の強度・変形特性を向上させるメカニズムについて検討するために、養生時に種々の上載圧力を作用させたセメント安定処理土と、無載荷で養生した含水比の異なるセメント安定処理土に対し、一軸圧縮試験を実施した。その結果、養生時上載圧力が圧密降伏応力より低い場合、載荷による含水比の減少に応じて、若干の強度増加が認められた。一方、養生時上載圧力が圧密降伏応力を超える場合、強度・変形特性の大幅な向上が期待できるが、この向上メカニズムは含水比減少による物理的特性の影響だけではない可能性が示唆された。

キーワード：安定処理土、一軸圧縮強さ、含水比、上載圧力

(IGC : D-06, D-10)

1. はじめに

我が国の国土は、山地がその約75%を占め、安定した平地が少ない。この限られた平地に都市域が広がり、人口が集中している。このような平地は、堆積年代が若い沖積平野であり、飽和された軟らかい粘土やシルトなどから構成され、高い圧縮性と低い強度を有するいわゆる軟弱地盤が多く分布している。そのため、軟弱地盤上に盛土等の建設活動が行われる機会が多くなる。その際、軟弱地盤の沈下や側方流動が懸念され、その対策工法を実施する必要がある。セメント安定処理工法はその対策工法の一つであり、地盤に比較的安価なセメントを混合することで、短期間に土の強度変形特性を改善できる。

高含水比の土をセメント安定処理した際の強度変形特性に関する報告例は多い。例えば、上ら¹⁾は、セメント安定処理土は見かけ上過圧密土となり、圧密降伏応力を境に力学的特性が異なることを報告している。Miura et al.²⁾は、粘土の初期含水比とセメント添加率の比がセメント安定処理土の圧縮特性とせん断挙動を支配する主要なパラメータであると報告している。Horpibulsuk et al.³⁾は、セメント混和粘土と再構成粘土の非排水せん断挙動を比較し、有効拘束圧が圧密降伏応力より低い場合には、主にセメントの結合力が強度発現に寄与することを示し、一軸圧縮強さが設計の検討に適していると報告している。また、Kasama et al.⁴⁾は、セメント安定処理土のせん断強度の粘着成分を表すパラメータを提案しており、それを用いて非排水せん断強さを推定する方法を示している。

安定処理土地盤を施工する場合には、通常所定の養生期間を設ける。しかし深層混合処理のように地中深く施工する場合は、セメントの固化開始前から拘束圧が作用しており、圧密現象が生じている可能性も考えられる。山本ら⁵⁾は、セメント安定処理土の微視的構造を電子顕

微鏡で観察し、上載圧下で養生したセメント安定処理土の構造は大気圧下で養生したものより密実な構造となっていると推察している。その結果に基づき、上載圧下で養生したセメント安定処理土は固化開始前の圧密に伴う密度増加とセメントーションの進行との相乗効果により、その強度・変形特性が大気圧下養生の場合と比較して向上すると報告している。田口ら⁶⁾は、上載圧下で養生したセメント安定処理土を対象に走査型電子顕微鏡による観察および画像解析と水銀圧入型プロシメーターによる間隙径分布の測定を行った結果、セメント安定処理土の強度が養生初期においては上載圧に依存するのに対し、それ以降ではセメント水和物の生成状況に依存することを報告している。Suzuki et al.⁷⁾は、養生中に等方圧密およびK0圧密したセメント安定処理土に対して各種強度試験を実施し、上載圧の載荷までの時間が長くなると圧密養生の強度改善効果が小さくなると報告している。

本研究では、セメント安定処理土の養生中載荷による強度増加が養生中の排水による含水比低下によるものかを明らかにするために、養生中に種々の上載圧力を作用させたセメント安定処理土供試体と異なる初期含水比で作製したセメント安定処理土に対して一軸圧縮試験を実施した。その結果を比較することで、圧密養生がセメント安定処理土の物理的および力学的な特性に及ぼす影響の評価を試みる。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

安定処理土の母材には現地の土が使用されることも多いが、強度変形特性に及ぼす採取地域の違いの影響の排除および同品質の試料を確保のため、本研究では、粒度

調整された工業製品の MC クレーと DL クレーを同量混合した配合試料を使用した。MC クレーは大部分を粘土分が占める試料あり、DL クレーは大半をシルト分が占める試料である。それらの物理的性質を表-1 に示す。なお、土粒子密度 (ρ_s) は JIS A 1202、土の液性限界 (w_L)、塑性限界 (w_p) は JIS A 1205 に準拠して求めた。その結果、配合試料は、塑性指数 (I_p) が 19.8 となり、粘土（低液性限界）に分類される。

安定材には、一般の土木施工にも多用されている高炉セメント B 種を使用した。この安定材は、普通ポルトランドセメントと比較して強度を得やすく安価であるため、強度的にも経済的にも優れている。使用した高炉セメント B 種の品質例は、企業から提供されている資料⁸⁾によると表-2 の通りである。本研究では養生圧密がセメント安定処理土に及ぼす影響に着目しているので、セメント添加率 (C/S : 土試料の乾燥質量に対するセメントの質量の比の百分率) は 7% と固定した。なお既往の研究⁹⁾では、セメント添加率の増加に伴い、一軸圧縮強さは直線的に増加することが報告されている。

含水比の調整には、基本的な特性を検討するために、不純物の混入のない蒸留水を使用する。含水比は、現地でセメントをスラリー化して注入することを想定して、配合試料の液性限界の 2 倍に相当する 68.0% を採用した。

2.2 供試体の作製方法

上載圧力を作用させる場合には、配合試料に所定の含水比 68% に相当する水と C/S=7% に相当するセメントを混合し、ミキサーで 10 分程度攪拌した。なお、載荷なしの供試体を作製する場合は、上載圧力を作用させて養生した場合の結果を考慮し、初期含水比として 68% の他に 61% と 58% のものも用意した。スラリー化した試料が一様に混合されていることを確認の上、モールドに投入した。投入した試料は、養生中 20±2°C の温度下で静置した。24 時間静置した後、所定の上載圧力 (0 kPa~176.8 kPa) を載荷した (図-1)。この条件は、深層混合処理や早期盛土施工をも想定して決定した。

上載圧力の違いに応じて大小 2 種類のモールドを用いた。上載圧力が 26.5kPa, 53.0kPa, 106.1kPa, 176.8kPa と

高い場合、ステンレス製の内径 200mm、高さ 200mm からなる大型モールド（予圧密モールド）を用いた（写真-1）。上面は多孔質板からなり排水が可能である。上部載荷盤は空圧式ピストンであり、ダイヤルゲージ式変位計が取り付けられる。これにより、高い上載圧力を安定に作用させることができになる。試料をモールドに投入する際は、予めモールド内面に薄くグリースを塗布し、摩擦を軽減した。スラリーは 2 回に分けて注入した。その際ゴム製ハンマーで軽く打撃し気泡を取り除いた。モ

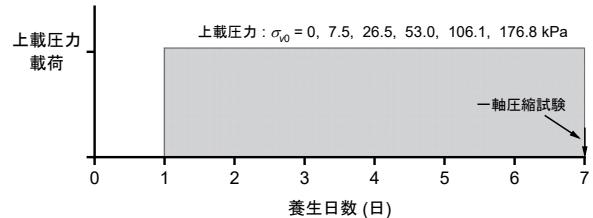


図-1 養生中載荷スケジュール



写真-1 大型モールド（予圧密モールド）

表-1 本研究で用いた試料の物理的性質

	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	砂分(%)	シルト分(%)	粘土分(%)	土質分類
DL クレー	2.627	NP	NP	NP	0	88.1	11.9	シルト
MC クレー	2.634	59.4	25.4	34.0	0	18.0	82.0	粘土(高液性限界)
配合試料	*2.631	34.0	15.2	19.8	*0	*53.1	*46.9	粘土(低液性限界)

*配合比を用いて算出

表-2 高炉セメント B 種の品質⁸⁾

種類	密度 g/cm ³	比表面積 (cm ² /g)	凝結		安 定 性	圧縮強さ(MN/m ²)			強熱減量 (%)	酸化マグ ネシウム (%)	三酸化 硫黄 (%)	塩化物 イオン (%)
			始発 (min)	終結 (min)		3 日	7 日	28 日				
高炉セメント B 種	3.04	3750	180	265	良	22.1	36.9	62.4	1.64	3.01	2.05	0.010

モールド内の試料は 110mm 程度の高さとなり、養生中載荷を経て 100mm 程度の高さとなる。なおスラリーの一部に対し、含水比試験を実施し、初期含水比とした。

上載荷が無い場合と 7.5kPa と低い場合には、内径 50mm、高さ 100mm の小型のモールドを用いた。小型モールドを用いた供試体作製手順は、Shibi and Ohtsuka⁹⁾に倣ったので、ここでは詳細を省く。なお小型モールドを用いた供試体作製では上面排水であり、大型モールドの両面排水とは異なっているため注意を要する。本研究では、養生中載荷に伴い排水が許容される場合のセメント安定処理土の強度特性に着目する。

7 日間養生後、供試体を作製した。なお養生後のセメント安定処理土は、直ナイフ等で容易に成形可能であった。大型モールドから取り出した安定処理土は、直ナイフで 4 つに切り分け、それぞれ直径 50mm、高さ 100mm 程度の供試体に成形した。一方、小型モールドから取り出した安定処理土は、端面を整えて、供試体とした。その後、得られた供試体に対し一軸圧縮試験を実施した。

一軸圧縮試験は、ひずみ制御方式で行い、せん断時のひずみ速度は 1%/min とした。強度変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するため、上下加圧板の表面にシリコングリースを薄く塗布した。試験終了後、供試体の含水比を測定し、(試験時の) 含水比とした。

3. 実験結果および考察

3.1 養生中載荷が沈下量に及ぼす影響

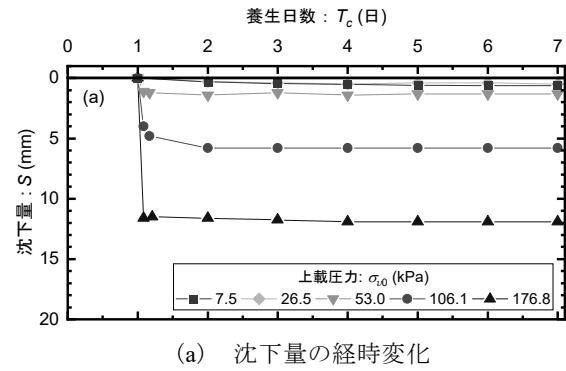
上載荷載荷後の沈下量の経時変化を図-2(a)に示す。上載荷 53.0kPa 以上では、載荷直後から数時間以内に顕著な沈下が発生し、その後終息している。上載荷 7.5kPa と 26.5kPa の最終沈下量の差は非常に小さいことがわかる。したがって、この程度の上載荷では養生中の排水条件の違いが沈下量に及ぼす影響は無視できるものと考えられる。なお、上載荷 7.5kPa, 26.5kPa の場合の載荷直後の沈下量は計測できなかったが、他の上載荷の場合と同様な計時変化を迎るものと考えられる。

図-2(b)は、上載荷と最終沈下量の関係を示している。最終沈下量は、上載荷が 53.0kPa 以下ではわずかに増加する程度であるが、106.1kPa を超えると大幅に増加した。したがって、53.0kPa~106.1kPa の範囲内に圧密降伏応力があるものと推察される。

既往の報告では載荷時間が 100 分程度遅れると沈下量がほとんど生じないと報告している^{5)~7)}。本研究では、初期含水比を液性限界の 2 倍としたため、セメント処理土の流動性が高い。そのため、セメントの固化に長い時間を要し、養生開始 24 時間後の載荷においても有意な沈下が生じたものと考えられる。

3.2 応力-ひずみ曲線

上載荷を作用させたセメント安定処理土の一軸圧縮



(a) 沈下量の経時変化

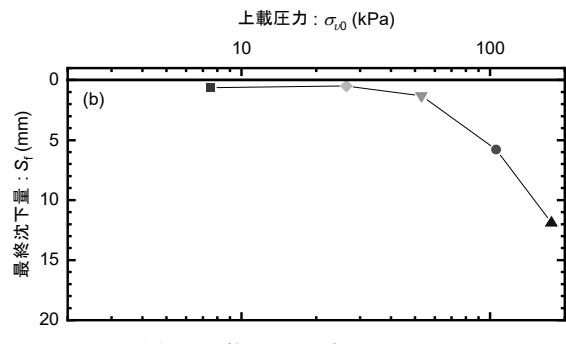


図-2 養生中載荷が沈下量に及ぼす影響

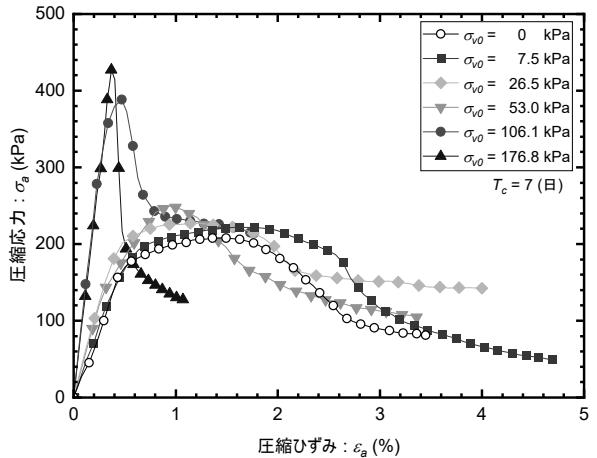


図-3 養生中載荷が応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

試験から得られた代表的な応力-ひずみ曲線を図-3 に示す。上載荷が 26.5kPa 以下の応力-ひずみ曲線は、上載荷を作用させないものと同様に、圧縮応力がピーク応力付近において緩やかに増加し、その値をある程度維持する粘り強さを示しており、いわゆる延性的な挙動となっている。一方、上載荷が 106.1kPa 以上では、著しく大きなピーク応力が認められ、ピーク後は応力が急激に低下する顕著な脆性的挙動を示した。その結果、応力-ひずみ曲線は小さな破壊ひずみと大きなピーク応力を有するようになり、その初期勾配は長く急勾配となっている。

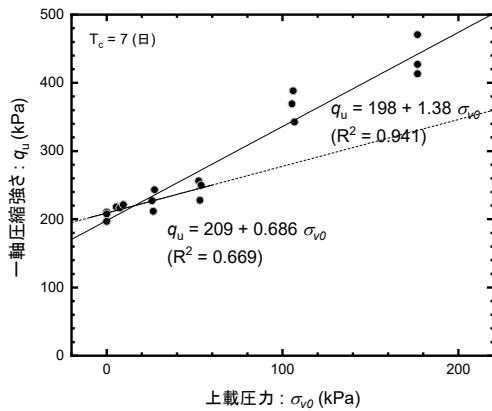


図-4 一軸圧縮強さと上載圧力の関係

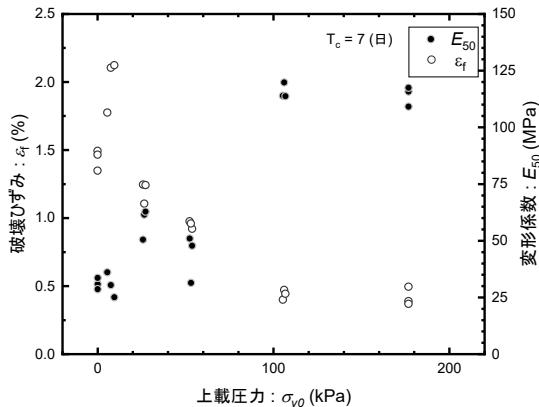


図-5 破壊ひずみおよび変形係数と上載圧力の関係

3.3 上載圧力が一軸圧縮特性に及ぼす影響

養生中の上載圧力がセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす影響を明らかにするために、図-4に上載圧力と一軸圧縮強さ q_u の関係を、図-5に上載圧力と破壊ひずみ ϵ_f および変形係数 E_{50} の関係を示す。

一軸圧縮強さは、上載圧力の増加に伴って一貫して増加した。とくに上載圧力が53.0kPaまでの一軸圧縮強さは直線的に増加した。53.0kPa以下の結果からその回帰直線を求めると、本研究の条件では $q_u = 209 + 0.686 \sigma_{v0}$ と表すことができる。一方、上載圧力が106.1kPa以上になると、一軸圧縮強さは顕著に増加し、無載荷の場合の2倍近くとなった。このことは、強度の増加要因が上載圧力53.0~106.1kPaにかけて変化している可能性を示唆している。圧密降伏応力と養生中の上載圧力の大小関係がセメント安定処理土の強度変形特性に違いをもたらすとの報告¹⁰⁾もあり、本研究の結果を支持するものである。なお、106.1kPa以上の上載圧力も含める全データを用いた場合、その回帰直線は、 $q_u = 198 + 1.38 \sigma_{v0}$ となった。したがって、上載圧力が106.1kPa以上の強度増加率は、53.0kPa以下の場合と比較して2倍近くなることがわかる。

破壊ひずみは、上載圧力7.5kPaにおいて、無載荷の場合の1.5倍程度に増加している。これはピーク応力の微

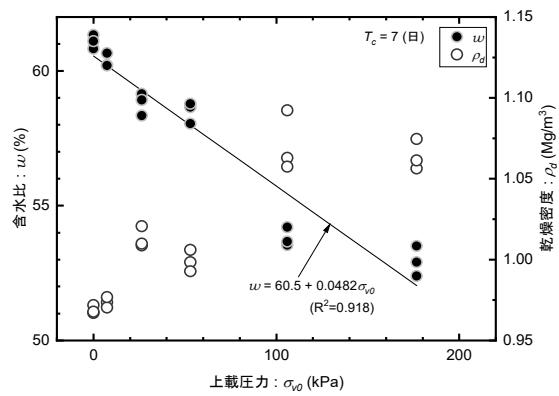


図-6 含水比および乾燥密度と上載圧力の関係

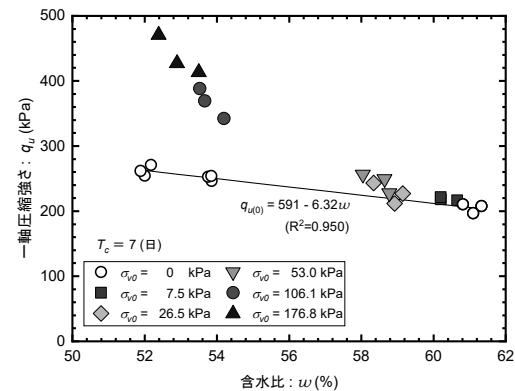


図-7 一軸圧縮強さと含水比の関係

増と粘り強さによるものであろう。しかしその程度は、上載圧力26.5kPaを超えると減少し始め、106.1kPa以上では0.3倍程度となる。その結果、変形係数は、上載圧力が53.0kPa程度までは明瞭な関係が得られないが、106.1kPa以上の上載圧力では無載荷の場合の4倍近くになる。したがって、養生中に高い上載圧力を作用させることで、セメント安定処理土は高い变形抵抗を得ることができる。

3.4 上載圧力が含水比および乾燥密度に及ぼす影響

養生中の上載圧力の作用がセメント安定処理土の物理的特性に及ぼす影響を明らかにするために、上載圧力と含水比および乾燥密度との関係を図-6に示す。図より含水比は上載圧力の増加に伴い減少している。一方、乾燥密度には、上載圧力の増加に伴い増加する傾向が認められる。これらの傾向は、上載圧力の作用が圧密を生じさせ、水分量の低下と体積減少を引き起こすためと考えられる。乾燥密度の結果が含水比の結果に比べてバラツキが大きくなっているが、このことはセメント安定処理土内に時折認められる直径数mm程度の空隙の偏在等が影響したものと考えられる。このような空隙の影響を受けにくい含水比に着目し、その回帰式を求めるとき、 $w = 60.5 + 0.0482 \sigma_{v0}$ と表せた。

なお、セメント水和反応は、水分量の減少とマトリクスの増加を促し、含水比の低下と乾燥密度の増加に寄与する。しかし本研究では、養生日数、セメント添加率とともに一定としたので、この影響は供試体間では等しいものと推察できる。

3.5 一軸圧縮強さと含水比の関係

養生中に上載圧力を作用させたセメント安定処理土の一軸圧縮強さと含水比の関係を図-7に示す。併せて、初期含水比を変えて作製したセメント安定処理土の一軸圧縮強さと含水比の関係も示す。

まず、初期含水比の低下により含水比を低下させた場合に着目する。一軸圧縮強さは含水比低下に伴って直線的に増加した。その回帰直線は、本研究の条件では $q_u = 591 - 6.32 w$ と表すことができる。

養生中に上載圧力を作用させた場合も、上載圧力の増加について含水比が低下し、それに伴って一軸圧縮強さも増加している。とくに上載圧力が 53.0kPa 程度以下では、初期含水比を変化させて作製した結果とほぼ一致する結果となった。しかしながら、上載圧力が高い場合は、初期含水比を変化させた場合と比較して、著しく大きな一軸圧縮強さが得られた。その違いは上載圧力が大きくなるほど顕著になった。したがって、含水比等の物理的特性のみから強度を予測することは注意を要する。

本研究では、先に述べたように圧密降伏応力が 53.0kPa ~106.1kPa の範囲にあるものと推察される。したがって、圧密降伏応力を超えない程度の上載圧力をセメント安定処理土に作用させた場合の強度増加要因は、含水比の低下が支配している、すなわち含水比低下に伴う密実化の影響と考えられる。一方、上載圧力が圧密降伏応力を超えるような場合は、セメント安定処理土の強度増加要因は、含水比の低下に加えて、上載圧力の大きさの影響が生じているものと推察される。今後、セメント安定処理土地盤の経済的な設計を行う上で、養生中載荷による強度増加の活用が期待されるが、安全性を鑑みるとその強度発現メカニズムの解明が望まれる。

4. まとめ

本研究では、セメント安定処理土の強度変形特性に及ぼす養生時上載圧力の影響について検討した。以下に本研究から得られた主要な知見を列記する。

- (1) セメント安定処理土の養生中に上載圧力を作用させると、上載圧力が低い場合にはほとんど沈下が認められないが、圧密降伏応力を超えるような上載圧力を作用させると顕著な沈下が発生する。
- (2) 圧密降伏応力より低い上載圧力を作用させて養生したセメント安定処理土の強度増加はわずかであり、その一軸圧縮強さは含水比を用いて推定可能である。
- (3) 圧密降伏応力を超える上載圧力を作用させて養生することにより、セメント安定処理土は著しく強度増加した。その強度増加は、養生中載荷による排水効果に加えて、上載圧力の大きさの寄与も示唆された。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K07658 の助成を受けて行われたものです。記してここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 上 俊二, 藤原東雄, 竹内 潤, 福田 靖, 酒井敏明, 柳原勝也:セメント系固化材により安定処理されたカオリין粘土の力学的特性, 土木学会論文集, No.582/III-41, pp.217-228, 1997.
- 2) Miura, N., Horpibulsuk, S., Nagaraj, T.S.: Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, Soils Found, 41(5), pp.33-45, 2001.
- 3) Horpibulsuk, S., Miura, N., Bergado, D.T.: Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content, J. Geotech. Geoenvir. Eng., ASCE, 130(10), pp.1096-1105, 2004.
- 4) Kasama, K., Zen, K., Iwataki, K.: Undrained shear strength of cement treated soils, Soils Found., 46(2), pp.221-232, 2006.
- 5) 山本哲朗, 鈴木素之, 岡林茂生, 藤野秀利, 田口岳志, 藤本哲生:上載圧下で養生したセメント安定処理土の一軸圧縮特性, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.387-399, 2002.
- 6) 田口岳志, 鈴木素之, 平岡真樹, 藤野秀利, 藤本哲生, 山本哲朗:養生時に上載圧の影響を受けたセメント安定処理土の微細構造, 土木学会論文集 C, 64(1), pp.67-78, 2008.
- 7) Suzuki, M., Fujimoto, T., Taguchi, T.: Peak and residual strength characteristics of cement-treated soil cured under different consolidation conditions, Soils Found., 54(4), pp.687-698, 2014.
- 8) (株)太平洋セメント:高炉セメント, https://www.taiheiyo-cement.co.jp/service_product/cement/pdf/bb cement_2021.pdf, (参照 2025.6.4)
- 9) Shibi, T., Ohtsuka, Y.: Influence of applying overburden stress during curing on the unconfined compressive strength of cement-stabilized clay, Soils Found, 61, pp.1123-1131, 2021.
- 10) Nishimura, S., Abe, K.: Effects of Early-age consolidation on strength development in cement-treated clay, 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2(60), pp.2053-2058, 2016.

(2025年6月16日 受付)

Effect of Overburden Pressure during Curing on Unconfined Compressive Properties of Cement-stabilized Soil

Toshihide SHIBI¹ and Ryoya ITO²

1 Assistant Professor, Shimane University, Graduate School of Natural Science and Technology

2 Chugoku Regional Development Bureau

Abstract

This study examines the mechanism by which the application of overburden pressure during curing enhances the strength and deformation properties of cement-stabilized soil. Unconfined compression tests were conducted on cement-stabilized soils that had been cured with various overburden pressures and on cement-stabilized soils of different water contents that had been cured without overburden. As a result, when the overburden pressure during curing was lower than the consolidation yield stress, a slight increase in strength was observed in response to the decrease in water content caused by loading. On the other hand, when the overburden pressure exceeds the consolidation yield stress, a significant improvement in strength and deformation characteristics can be expected. However, it was suggested that the reason for this improvement is not entirely set by the decrease in water content.

Key words: stabilized soil, unconfined compressive strength, water content, overburden pressure