

たたき土の力学的特性に関する実験的考察

Experimental Study on Mechanical Properties of 'Tataki' Soil

竹下祐二 Yuji TAKESITA (岡山大学大学院環境学研究科)
 大山孝政 Takamasa OYAMA (岡山大学大学院環境学研究科)
 迫野 涼 Ryo SAKONO (岡山大学大学院環境学研究科)
 田村二郎 Jiro TAMURA (岡山県共同石灰株式会社)

たたき土とは、母材となる土に消石灰と苦汁（にがり）を添加して、適量の水を加えて練り混ぜ、叩き固めのものであり、長期間の使用に耐えた後、自然に帰る環境にやさしい地盤材料である。たたき土は日本古来の伝統的な左官技術として多用されていたが、コンクリート工法の普及により途絶えたため、その地盤材料としての特性は十分に解明されていない。本文では、母材に粘土を用いてたたき土を作成し、消石灰とにがりの添加割合がたたき土の力学的特性に及ぼす影響について室内土質試験結果により考察した。

キーワード：たたき土，にがり，消石灰，土質安定処理 (IGC : D-10)

1. はじめに

循環型社会を構築するためには、土、石、木材といった天然資源を中心として、低環境負荷かつ高機能化を実現した建設材料の方向性を模索することも重要であると考えられる。そのため、地盤材料においては、強度のみならず低環境負荷材料としての価値を考慮することも必要であり、たとえば、公園内の遊歩道の施工や、遺跡・史跡等の文化遺産の保存や修復などでは、高強度は望めなくとも、自然景観に調和し、長期間の使用に耐えた後、やがて自然に帰る地盤材料の適用が望ましい。

著者らは、低環境負荷の地盤材料を施工する方法として、たたき工法に着目している¹⁾。たたき工法とは、母材となる土に固化剤として消石灰を、固化調整剤として苦汁（にがり）を添加して、適量の水と練り混ぜ、板や木槌などで叩き固め、熱エネルギーなどを用いずに土を常温で固化させる日本古来の伝統的左官技術である。にがりとは塩化マグネシウムの水溶液であり、一般には海水から塩を作る際にできる余剰なミネラル分を多く含む液体として知られている。たたき工法によって叩き固められた土は、たたき土（敲き土、叩き土）と呼ばれ、家の玄関や土間、堀などの小規模の土構造物に用いられた他、たたき工法を応用した人造石による土木構造物が施工され、その遺構が現在でも存在している^{2), 3)}。

たたき工法は、当時の左官職人の勘と経験に基づいて施工がなされ、近代的なコンクリート工法の普及により途絶えていったため、その硬化原理や配合設計方法および地盤材料としての特性等は未だに十分な解明はなされていない。そこで、本文では、粘土母材によるたたき土を作成し、たたき土の強度特性、耐久性等の力学的特性に消石灰とにがりの添加割合が及ぼす影響の把握を目的として、室内土質試験を実施した結果を報告する。

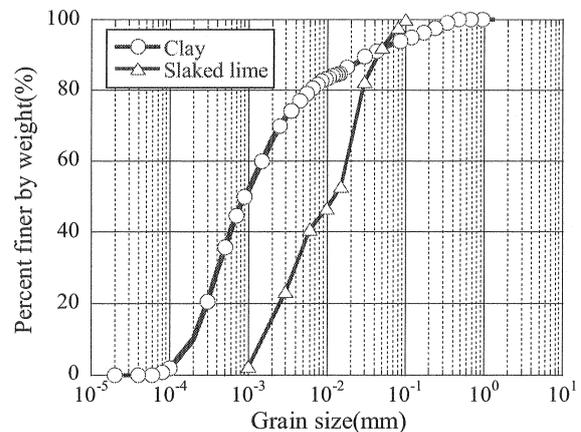


図-1 粒径加積曲線

表-1 母材の諸物性

ρ_s (g/cm^3)	w_0 (%)	pH	W_L (%)	I_p	工学分類	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (g/cm^3)
2.70	32.1	5.86	55.3	24.8	CH	22.0	1.64

2. たたき土の作成

たたき土の母材としては、花崗岩・安山岩などの風化した土や、風化した砂利の混ざった粘土質の土が使用されていた⁴⁾。本研究では、たたき土の母材料として、入手が比較的容易な粘性土に着目し、岡山県北部に位置する阿哲石灰台地にて採取した粘土を使用した。図-1に粒径加積曲線、表-1に諸物性を示す。なお、試験には2mmふるいを通過したものを使用した。消石灰は岡山県新見市で生産されたものを用いた。また、にがりには市販の塩化マグネシウム6水和物の固形粉末試薬⁵⁾ ($MgCl_2 \cdot$

表-2 配合表

Case	Base material (%)	Slaked lime (%)	MgCl ₂ · 6H ₂ O (%)	ρ _d (g/cm ³)
S0-M0	100	0	0	1.62
S5-M0	95	5	0	1.57
S5-M2	93		2	1.58
S5-M3	92		3	1.59
S5-M5	90		5	1.56
S10-M0	90		10	0
S10-M2	88	2		1.55
S10-M3	87	3		1.56
S10-M5	85	5		1.56

6H₂O) を用い、イオン交換精製水で溶解させた所定濃度の塩化マグネシウム水溶液として母材に添加した。以後、本文および図表中では、にがりとして用いた塩化マグネシウム 6 水和物を MgCl₂ · 6H₂O と表記する。

表-2 に示す配合表に従って、乾燥させた母材に所定量の消石灰を混合した後、所定濃度の MgCl₂ · 6H₂O 溶液を加え、別途実施した母材料の締固め試験で得られた最適含水比 22.0% に調整し、電動ミキサーを用いて 5 分間練り混ぜた。これらの各試料をセメント系固着材による安定処理土の試験方法 (セメント協会標準試験方法 JCAS L-01-1990) ⁶⁾ に基づき、直径 5cm、高さ 10cm のモールドに入れ、1.5kg ランマーを 20cm 自由落下させて、1 層目 5 回、2 層目および 3 層目各 10 回、4 層目 20 回の計 45 回の動的締固めを行い、一軸圧縮試験用供試体を各配合において 3 本ずつ作成した。ここで、本試験方法は、地盤工学会基準 (JGS 0811-2000) による 1000cm³ モールドを用いた安定処理土の突固めによる供試体作成方法と比較して、供試体のばらつきや密度はほぼ同等とみなされることが報告されており、必要な試料土が少量であり、供試体の養生スペースも節約できること等から、実用性を重視した有効な試験方法である⁶⁾ と考えられるため、本研究において採用した。

作成した各供試体はフィルムで密閉し、恒温恒湿槽 (温度 20℃、湿度 80%) にて所定期間の養生を行った。なお、表-2 に示す配合量はすべて乾燥重量比によるものであり、乾燥密度は各供試体作成時の平均値である。

3. 粘土母材によるたたき土の力学的特性

3.1 一軸圧縮強さ

表-2 に示す 9 種類の配合にて、たたき土試料を作成し、一軸圧縮試験を行って、消石灰とにがりの添加割合が一軸圧縮強さの経時変化に及ぼす影響を調べた。

消石灰を 5% 添加した場合の一軸圧縮強さの経時変化

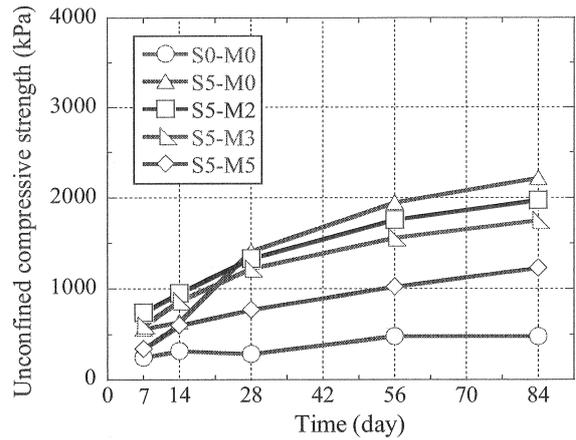


図-2 一軸圧縮強さの経時変化 (消石灰 5% 添加)

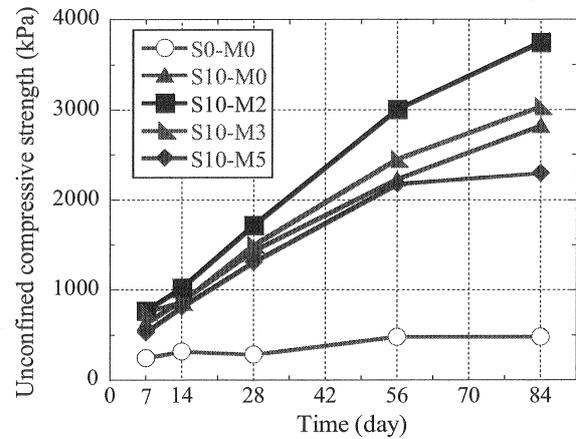


図-3 一軸圧縮強さの経時変化 (消石灰 10% 添加)

を 図-2 に示す。図-2 によれば、にがりの添加量に依存して一軸圧縮強さは小さくなる傾向が認められ、特に、にがりを 5% 添加した試料の一軸圧縮強さは他の供試体と比べて低く、養生 28 日以降その差は明確となっている。にがりの添加量を増加させた場合に短期的な一軸圧縮強さが低下する原因としては、にがりの濃度の増加により、消石灰の溶解度が減少することから、消石灰中のカルシウムはイオン化し難い状態になり、カルシウムイオン交換反応⁷⁾ による土粒子の電氣的凝集や団粒化現象が緩慢になって、消石灰の安定化反応を阻害するためであると考えられる。したがって、消石灰を 5% 添加した場合には、にがりを 5% 添加することは過剰であるといえる。一方、にがりを 0~3% 添加した場合には、ほぼ同様の強度発現傾向を示し、養生 84 日後も有意な差が見られない。このことから、消石灰を 5% 添加する場合には、一軸圧縮強さに対して、にがりを 2~3% 添加することによる効果は明確には現れないと考えられる。

図-3 に消石灰を 10% 添加した場合の一軸圧縮強さの経時変化を示す。図-3 によれば、にがりを 2% 添加した供試体の一軸圧縮強さは養生 28 日以降大きく増加し、他の配合と比べ有意な強度差を確認できる。また、養生

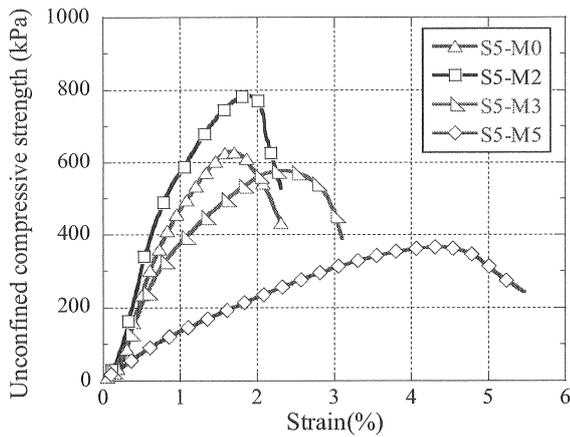


図-4 応力ひずみ曲線 (消石灰 5%添加)

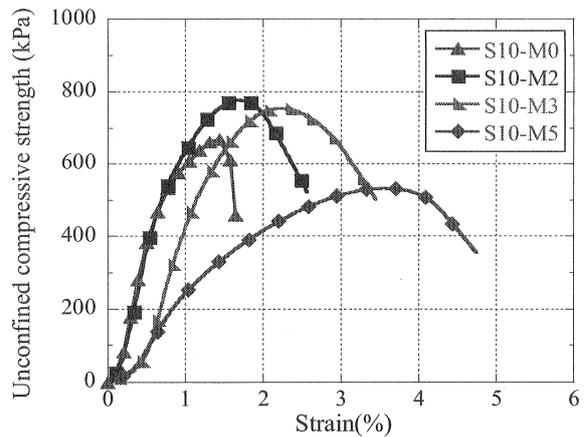


図-5 応力ひずみ曲線 (消石灰 10%添加)

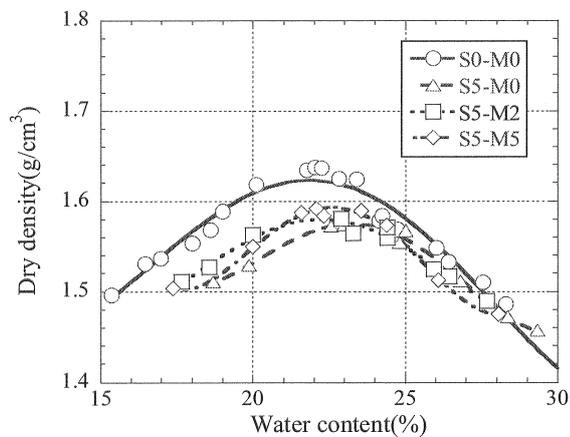


図-6 締固め曲線 (消石灰 5%添加)

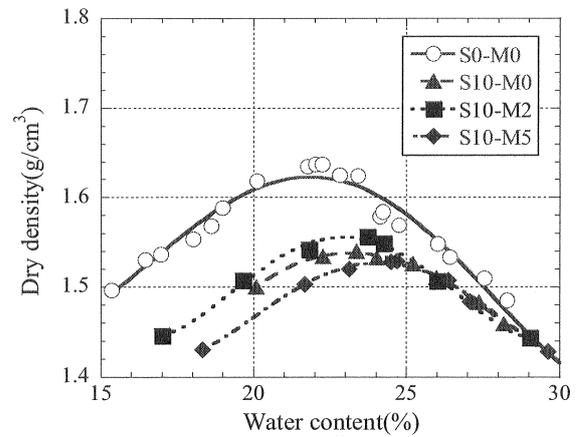


図-7 締固め曲線 (消石灰 10%添加)

84 日後において、にがりを 3%添加した供試体の一軸圧縮強さは、にがりを無添加の供試体に比べてやや大きく、にがりを 5%添加した供試体の一軸圧縮強さは最も小さい。このことから、消石灰の配合量を増加させると強度特性が改善され、にがりの適度な添加によって、その改善効果が大きくなると思われる。本実験によれば消石灰を 10%添加した場合には、にがりの添加量を 2%程度にすることで、母材の強度特性が大きく改善された。

図-4 および図-5 は、養生期間 7 日の供試体を用いて実施した一軸圧縮試験における応力ひずみ曲線の計測データである。これらによれば、にがりの添加量に応じて破壊時のひずみ量が增大しており、にがり添加によってたたき土の変形能が増加していると思われる。

3.2 締固め特性

消石灰とにがりの添加割合が粘土母材の締固め特性に及ぼす影響を調べた。突き固めによる締固め試験は表-2 において、にがりの添加量が 3%であるケースを除いた 7 種類の配合に対して、セメント系固化材による安定処理土の試験方法 (セメント協会標準試験方法 JCAS L-01-1990) ⁶⁾に基づき、乾燥法、非繰返し法によって実

施した。得られた締固め曲線を図-6 および図-7 に示す。これらの図によれば、消石灰の添加量に依存して、締固め曲線の最大乾燥密度はやや低下し、最適含水比はやや増加する傾向が認められるが、たたき土の施工に際して、有為な締固め特性の差異であるとは言いがたい。また、消石灰とにがりを同時に添加した場合、締固め曲線の形状には消石灰とにがりの添加割合による差異は認められず、粘土母材によるたたき土においては、消石灰とにがりの添加割合が粘土母材の締固め特性に及ぼす影響は小さい。

以上のことから、たたき土における強度発現は消石灰とにがりの添加による母材料の密度増加によるものではなく、添加した消石灰とにがりによる固化作用によるものであると理解できる。古来、たたき土は硬く練り混ぜた土ではなく、軟らかく練り混ぜた土が用いられていたことから、叩き固めるという施工法は余剰な水分量を発散させることが主目的であったと推測される。

3.3 保水性

3.1 で述べた一軸圧縮試験後の供試体を用いて含水比の測定を行った結果を図-8 および図-9 に示す。ここで、

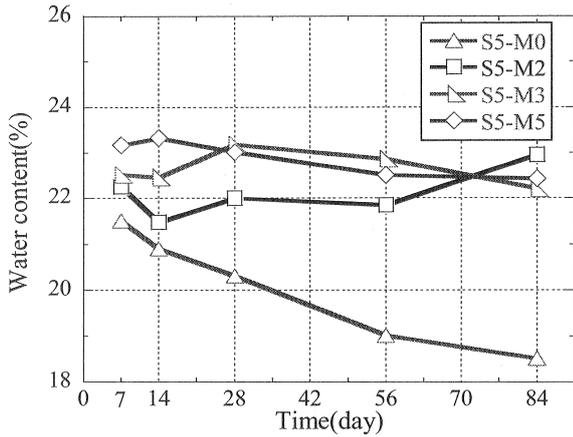


図-8 含水比の経時変化(消石灰 5%添加)

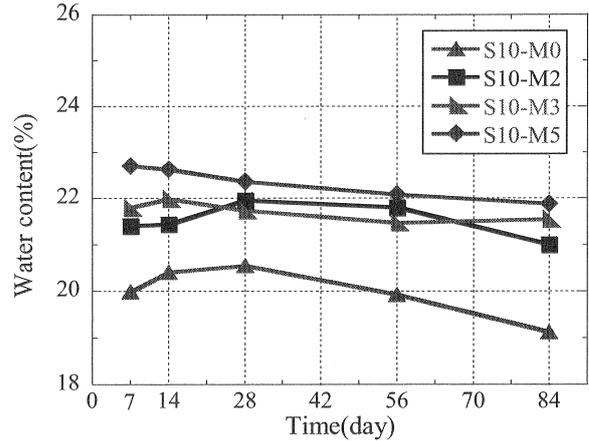


図-9 含水比の経時変化(消石灰 10%添加)

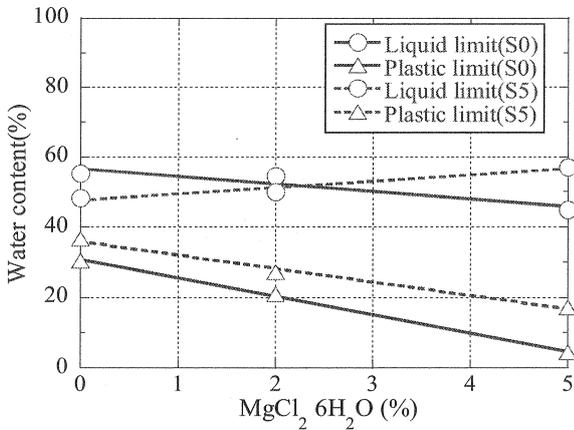


図-10 にがりの添加による液性限界および塑性限界の変化

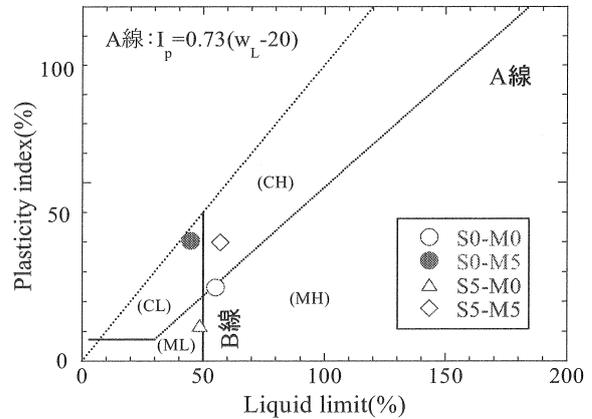


図-11 塑性図

塩化マグネシウム6水和物は 1molあたり約半分以上が水和物 ($\text{MgCl}_2 \cdot 95.21\text{g/mol}$, $6\text{H}_2\text{O} : 108.096\text{g/mol}$) であるため、水に溶解させた場合にはその水和物はイオン化し、水として存在すると考えられる。そのため、にがりの添加量に応じて、初期の土中水分量は増加すると思われる。また、これらの図によれば、にがりを添加した場合、含水比の経時変化は小さくなる傾向が見られる。したがって、にがりの有する潮解性により、たたき土の保水性は向上し、消石灰による中・長期的な土質安定処理効果であるポズラン硬化反応や炭酸化反応を促進させるための反応水として作用し、たたき土の中・長期的な強度発現に有用であることが期待される。

3.4 液性限界・塑性限界

液性限界および塑性限界試験 (JIS A 1205) を行って、消石灰の添加量が 0% (記号S0 と表記) および 5% (記号S5 と表記) の試料を用いて、にがりの添加による液性限界および塑性限界の変化を調べた。図-10 に液性限界および塑性限界の変化を、また、塑性図を図-11 に示した。一般に塑性指数の高い粘性土に石灰を添加すると液性限界を低下させ、塑性限界を増加させるため、塑性

指数が低下することが知られている⁸⁾が、これらの図によれば、液性限界には有意な変化は認められない。また、塑性限界はにがりの添加量に依存して、低下する傾向にあるため、塑性指数が大きくなっている。このことから、にがりを添加することにより、たたき土は高塑性な土になり、圧縮性や粘りが増加する効果が得られると思われる。これらはにがりのもつ凝固作用の影響によるものと推測される。

3.5 乾湿繰り返し試験による耐久性の検討

たたき土を舗装体として使用した場合を想定し、その耐久性について調べるために、表-2 に示した配合のうち、消石灰とにがりを添加した 6 種類の供試体について、乾湿繰り返し試験⁹⁾を行った。乾湿繰り返し試験方法は、養生 7 日後の供試体を常温の水道水に 5 時間浸し、その後 71°C の乾燥炉に 43 時間放置する計 48 時間を 1 サイクルとして 12 サイクルまで行い、その後、一軸圧縮試験を実施する。これらの試験より、一軸圧縮強さおよび供試体の体積減少率を評価した。

乾湿繰り返し試験終了後の体積減少率を図-12 に示す。文献 9) によれば、安定処理路盤の乾湿繰り返しによる耐

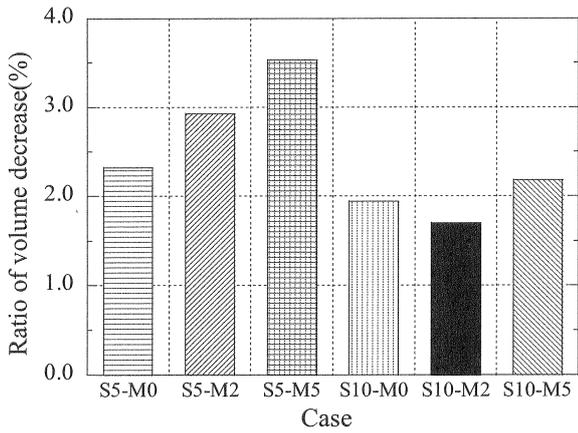


図-12 乾湿繰り返し試験における体積減少率 (12サイクル後)

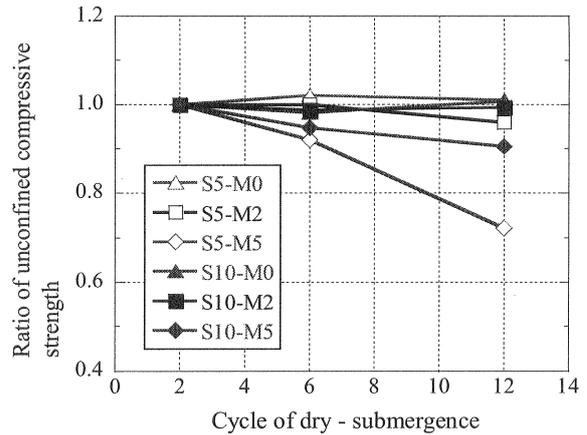


図-13 乾湿繰り返し試験における一軸圧縮強さの比較

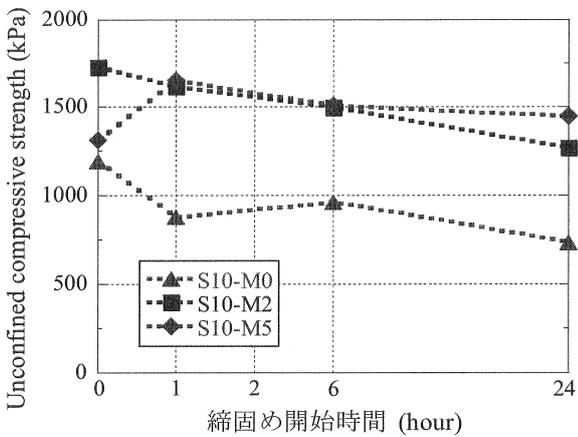


図-14 一軸圧縮強さ (28日養生)

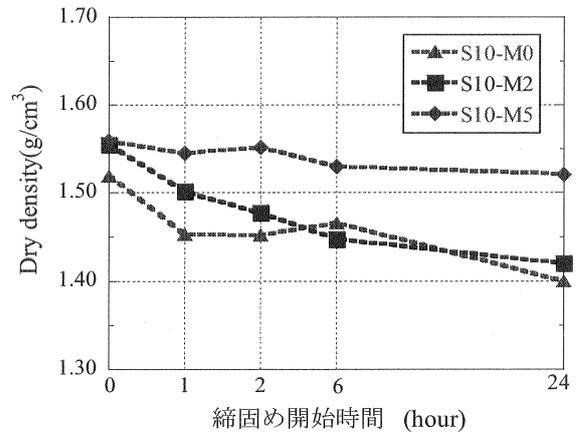


図-15 供試体作成時の乾燥密度

久性を評価する指標として、体積減少率が用いられており、その許容値として2%が提案されている。図-12によれば、体積減少率の最も小さい供試体は、消石灰10%とにがり2%を添加したものである。次に、乾湿繰り返しによる強度低下を評価するために、各乾湿サイクル終了後の一軸圧縮強さを乾湿2サイクル終了時の一軸圧縮強さに対する比で表した結果を図-13に示す。にがりを5%添加した供試体では乾湿繰り返しによる強度低下が認められる。

以上の結果より、たたき土の乾湿繰り返しによる耐久性を得るためには、消石灰の添加量の増加とにがりの適量添加が必要であると思われる。

3.6 締固め開始時間の影響

母材料に消石灰とにがりを添加して練り混ぜた後、叩き固めを開始するまでの時間（以後、締固め開始時間と記す）が強度に及ぼす影響を確認するため、締固め開始時間の異なるたたき土供試体を作成し、28日養生後、一軸圧縮試験を行った。試料の配合は、消石灰添加量10%に対して、にがりの添加量を0, 2, 5%に変化させた3ケースである。また、締固め開始時間は1, 2, 6, 24時

間の4パターンである。なお、締固め開始までに試料の含水比が変化しないように密封状態で保管した。

図-14に一軸圧縮強さを比較した結果を示す。にがりを5%添加した場合は、締固め開始時間による一軸圧縮強さに有意な差異は見られない。一方、にがりを0%および2%添加した場合には、締固め開始時間を24時間とした場合には、いずれも一軸圧縮強さが40%程度低下する結果が得られた。

図-15は作成した供試体の乾燥密度を比較した結果である。にがりを0%および2%添加した場合には、締固め開始時間に依存して乾燥密度が低下する傾向が認められる。これは、消石灰添加により、土粒子が団粒化したためではないかと考えられる。よって、にがりを添加する効果として、母材料に消石灰とにがりを添加して練り混ぜた後、叩き固めを開始するまでの時間の増加による施工品質の低下を防ぎ、施工むらを低減することが期待される。このことは、旧来、たたき施工が人力によって板や木槌などで叩き固められていたため、練り混ぜた後の施工時間が必要であったことから理解できる。

4. まとめ

本文では、母材に粘土を用いた、たたき土の強度特性に対して、消石灰とにがりの添加割合が及ぼす影響を把握することを目的として、消石灰の添加量を2パターン、にがりの添加量を4パターンに変化させてたたき土の供試体を作成し、各種の室内土質試験を実施した。本研究で得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 粘土母材によるたたき土では、消石灰の配合量を増加させると強度特性や乾湿繰り返しによる耐久性が改善され、にがりの適度な添加によって、その改善効果が大きくなると思われる。本実験によれば消石灰を10%添加した場合には、にがりの添加量を2%程度にすることで、母材の強度特性が大きく改善された。
- 2) 消石灰とにがりの添加割合が粘土母材の締め特性に及ぼす影響は小さいことから、たたき土の強度発現は母材料の密度増加によるものではなく、消石灰とにがりによる固化作用によるものであると思われる。
- 3) にがりを添加することは、たたき土の初期の土中水分量を増加させ、また、たたき土の保水性を向上させるため、消石灰による中・長期的な土質安定処理効果であるポズラン硬化反応や炭酸化反応を促進させるための反応水として作用し、たたき土の中・長期的な強度発現に有用であることが期待される。そして、にがりのもつ凝固作用の影響のために、たたき土は高塑性な土になり、圧縮性が増加する効果が得られる。これらのにがりを添加する効果は、母材料に消石灰とにがりを添加して練り混ぜた後、叩き固めを開始するまでの時間の増加による施工品質の低下を防ぎ、施工むらの低減に寄与すると思われる。

謝辞

本研究の実施に際しては、岡山県共同石灰(株) 石井正師氏、成田豊氏、伴藤勇氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹下祐二・谷本康太・大山孝政・田村二郎：たたき土の地盤工学的性質に関する考察、地盤と建設、地盤工学会中国支部論文報告集, Vol.24, No.1, pp.101-106, 2006.
- 2) 大橋公雄：人造石(たたき)工法とその遺構、服部長七の業績と人造石の歴史的価値、産業遺産研究、第5号、論文・調査報告, pp.44-62, 1998.
- 3) 飯塚一雄：日本の産業遺産-産業考古学研究、玉川大学出版部, pp.130-154, 1986.
- 4) 藤田洋三：石灰の残した文化遺産 漆喰と石灰、LIME・石灰、日本石灰協会, pp.33-38, 2005.
- 5) 化学工業日報社,13700の化学商品,第3類無機薬品, pp.166, 2003.
- 6) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第二版)、セメント協会, pp.381-395, 1999.
- 7) (社)日本石灰協会：石灰安定処理工法 設計・施工の手引き, pp.19-21, 2007.
- 8) 前掲7) pp.8.
- 9) (社)日本道路協会：舗装試験法便覧, pp.192-211, 1988.

(2008年7月2日 受付)