

河川築堤材料の強度特性に関する研究

友久 誠司* 澤 孝平** 内藤 永秀*** 黒田 真也**** 中川 裕之*****

Studies on the Strength Characteristics of River Embankment Materials

Seishi TOMOHISA, Kohei SAWA, Nagahide NAITO, Shinya KURODA, Hiroyuki NAKAGAWA

ABSTRACT

In Japan, many river disasters due to heavy rain or typhoons have occurred every year. As a result, the river embankments have been constructed to be stronger and more stable. The river embankment materials should have the properties necessary for the possibility of bulldozer construction and the protection from collapse by submerged water. The purpose of this study is to clearly identify the most suitable materials for river embankments. To this end, the strength tests of several kinds of materials are performed.

As a result, (1) when the specimens are formed with less than optimum moisture content (OMC), high strength is gained. But the strength is decreased further by submergence, and the specimens collapse owing to the slaking within a short submerged time. On the other hand, in the case of higher water content than OMC, the strength reduction with submergence is less and the specimens are stable. (2) When the embankment materials are mixed with 10% fluidized bed combustion coal fly ash and cured for two weeks, the strength and the resistance against collapse by submergence become remarkably increase. (3) The mixing effect as an additive is not found for the incinerated paper sillage ash nor the fine particles of crushed stone.

KEY WORDS: river embankment, unconfined compressive strength, soil hardness tester, additive

1. 緒 論

人々の生活は水との関わりが大変大きい。水は生活水のみならず、農業や各種の産業においても必要不可欠である。

古来より治水は主要な公共事業であり、住民生活の基盤を守る重要施策であった。それは今日でも同様で

ある。毎年、梅雨や台風などに起因する洪水災害が発生しており、近年では地球温暖化などの影響により、集中豪雨などの異常気象も頻発し、その被害は人的および物的に膨大なものとなり、大きな社会問題となっている。

洪水災害の防止は、河川においては堤防が大きな役割を担っている。越流や浸透水による破堤や、地震などによる崩壊を防止することが重要である。そのため、国土交通省を中心にスーパー堤防の構築や既存の堤防の補強対策を主とする堤防の安全性の向上が進め

* 都市システム工学科

** (協)関西地盤環境研究センター

*** 技術教育支援センター

**** 大林道路(株)

***** 専攻科建築・都市システム工学専攻

られている¹⁾。

河川堤防に要求される条件は、流水により洗掘されにくいこと、および堤体内への水の侵入を防ぎ、かつ、入ってしまった水をすみやかに排出することである。そのような堤防の構築は、難透水性の材料を一定の品質を確保するように締め固めて施工され、堤体材料に要求される主な条件は次のとおりである²⁾。

- (1) 透水係数が 1×10^{-4} cm/sec 以下である
- (2) 細粒分含有率が 20% 以上である
- (3) 転圧が可能な強度を有する

近年、省資源、省エネルギーで持続可能な発展のため、建設発生土の排出量を抑制し、再生体系の確立および再利用効率の向上が早急に求められている。国土交通省では具体的な方策として、建設汚泥の再生利用に関するガイドライン(平成 18 年 3 月)³⁾や建設発生土の利用基準(平成 18 年 8 月)⁴⁾をまとめている。しかし、各地の建設現場から発生する土砂はそのままでは、堤防の盛土材としての難透水性の確保や必要強度の達成が困難なものがみられる。これらの膨大な量の

建設発生土を改質して堤防用盛土材の基準を満足し、有効利用が可能となれば、大変有意義である⁵⁾。

本研究は、堤防用盛土材料の選定および設計・施工方法の基準策定の一助として、堤防盛土材料および添加材を混合した改良土の強度特性ならびに水浸に伴う強度および形状維持特性を追究するものである。盛土材料の評価は、一軸圧縮強度および山中式土壌硬度計で行う。具体的な目標値は、普通ブルドーザーでの施工が可能な一軸圧縮強度 80kN/m^2 (コーン指数 400kN/m^2) である⁶⁾。

2. 試料および試験方法

2.1 試料

実験に使用した試料は、特定非営利活動法人 建設副産物リサイクル促進機構から提供された、木津川堤防用盛土材料(以後、堤防材料と呼ぶ)である。これは 3ヶ所の建設現場(表 1)からの発生土を粒度基準(図 1)に適合するように混合したものである。その性質は表 2 に示すように、自然含水比が 11.8% と低く、約 80%

表 1 堤防材料の配合

混合用土の発生工事名称	配合割合 (%)
国道423号改良工事(白島工区)	50
桂川右岸下水道幹線管渠工事	15
木津川下水道洛南浄化センター建設工事	35

表 2 堤防材料の性質

項目	特性値
土粒子の密度 g/cm^3	2.67
自然含水比 %	11.8
最適含水比 %	10.3
最大粒径 mm	37.5
透水係数 cm/s	6.86×10^{-5}
粒度分布 (%)	
礫分(2mm ~ 75mm)	27.8
砂分(75 μm ~ 2mm)	49.7
シルト分(5 μm ~ 75 μm)	12.2
粘土分(5 μm 以下)	10.3

表 3 添加材の化学成分

化学成分	流動床灰	碎石粉	製紙焼却灰
SiO ₂	28.1	74.5	45.6
Al ₂ O ₃	14.3	19.7	26.8
Fe ₂ O ₃	3.6	1.8	1.4
CaO	11.4	0.0	23.8
Na ₂ O ₃	0.3	—	0.1
SO ₃	5.4	0.3	0.3
K ₂ O	0.5	—	0.1
未燃成分	24.2	—	1.0

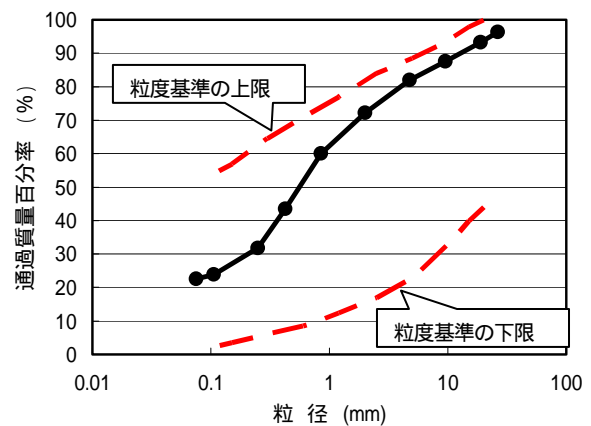


図 1 堤防材料の粒径加積曲線

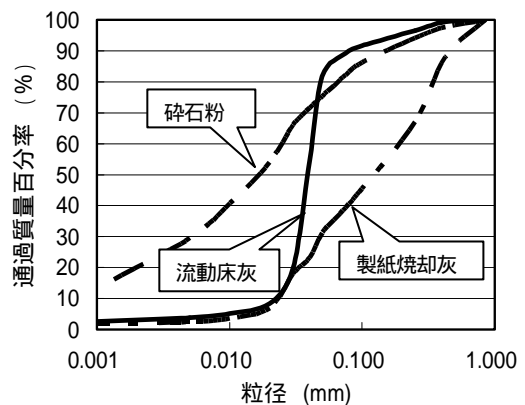


図 2 添加材の粒径加積曲線

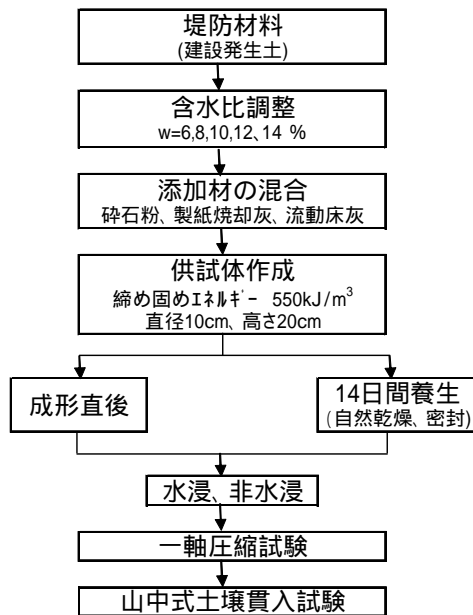


図 3 実験のフローチャート

が粗粒分であるが、JIS A 1218 による透水係数は約 $7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ と小さく、堤防用盛土材として基準を満足するものである。

堤防材料は天日乾燥させ、最適含水比 (10.3%) と $10.3\% \pm 2\%$ および $10.3\% \pm 4\%$ の 5 段階に含水比調整を行う (以後、調整後の試料の含水比は整数位で表す)。

堤防材料の改質に用いる添加材は粒子密度 2.20g/cm^3 の流動床灰、 2.65g/cm^3 の碎石粉および 2.40g/cm^3 の製紙焼却灰の 3 種類である。図 2、表 3 はそれらの粒径加積曲線と化学成分である。流動床灰は中央粒径 0.03mm のほぼ単一粒度であり、CaO と SO_3 の含有量が多い特徴をもっている。碎石粉は添加材のうち最も細粒で、約 75% が SiO_2 の化学的に安定したものである。また、製紙焼却灰は最も粗粒で、 Al_2O_3 と CaO が多いものである。

2・2 試験方法

試料は堤防材料をそのまま用いるものと、堤防材料の湿潤質量に対して 10% の添加材を混合した改良土を用いる 2 種類である。

供試体の成形は直径 10cm、高さ 20cm の二割モデルを用い、2.5kg ランマー・5 層 24 回 (締め固めエネルギー 550kJ/m^3) で作成し、成形直後と 14 日間自然乾燥あるいは樹脂フィルムで密封養生を行う。

供試体の評価は一軸圧縮強度試験 (JIS A1216) と山中式土壌貫入試験 (A 型硬度計) で行う。一軸圧縮強度試験は所定時間の水浸試験を行った供試体と水浸しない供試体を用いて行う。その後、山中式土壌硬度計

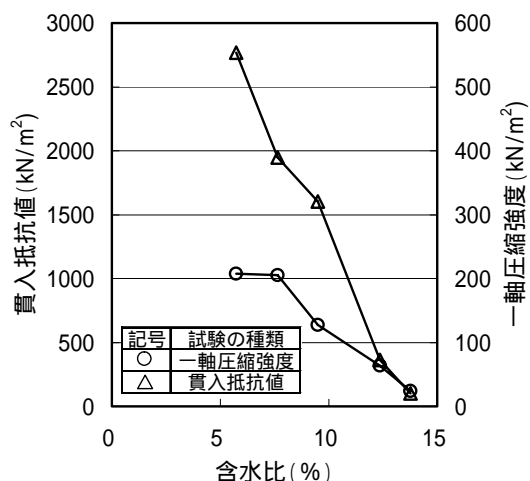


図 4 含水比と強度の関係 (成形直後、非水浸供試体)

A 型を用いて供試体側面での貫入試験を実施する。図 3 は実験方法のフローチャートである。

3 . 結果と考察

3・1 堤体材料だけの供試体

3・1・1 非水浸供試体の含水比と強度の関係

図 4 は、非水浸供試体の成形直後の含水比と一軸圧縮強度 (以後、強度と呼ぶ) および山中式土壌硬度計による貫入抵抗値 (以後、貫入抵抗値と呼ぶ) の関係である。強度は供試体の含水比が 6% から 14% まで増加するに従い 210kN/m^2 から 30kN/m^2 まで直線的に減少し、12% と 14% の含水比では目標強度の 80kN/m^2 に達していない。一方、貫入抵抗値も強度と同様の傾向であり、供試体の含水比の増加とともに直線的に減少する。

3・1・2 水浸した供試体の形状変化

写真 1 は、含水比 10% の供試体で成形直後に水浸する場合の水浸時間に伴う供試体の形状変化である。供試体は水浸部分の周囲から気泡を出し、表面の土粒子の崩落がみられ、60 分後には完全に崩壊する。これはスレーキング現象であり、供試体への水分の浸入が供試体中の空気を圧縮し土塊中に引張力を生ずることと、土粒子の水分吸収により粒子間隔が広がり、粒子間結合力が低下するために生じるものである。

写真 2 は、含水比 12% の供試体である。水浸 40 分後までは小さな気泡を出し、表面粒子の剥離が少し生じるが大きな変化はみられない。そして、水浸時間 60 分では剥離量は増加するものの供試体は崩壊までには至らない。

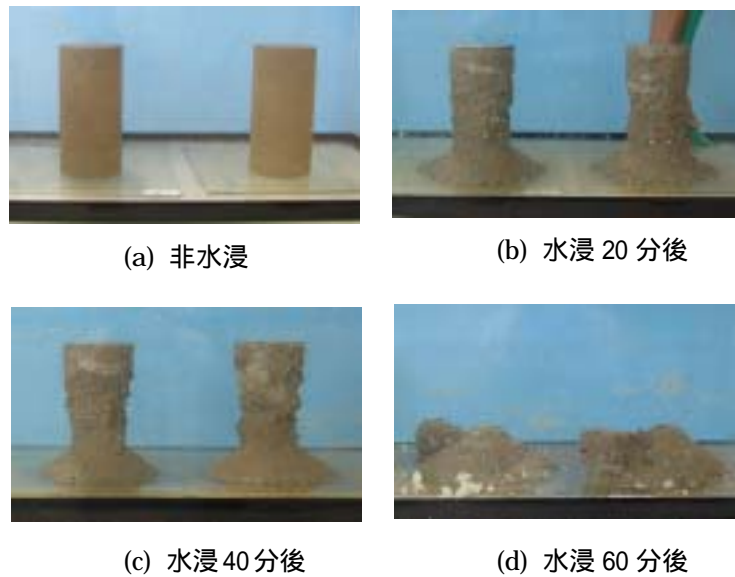


写真 1 水浸時間と供試体の形状
(含水比 10%、成形直後)

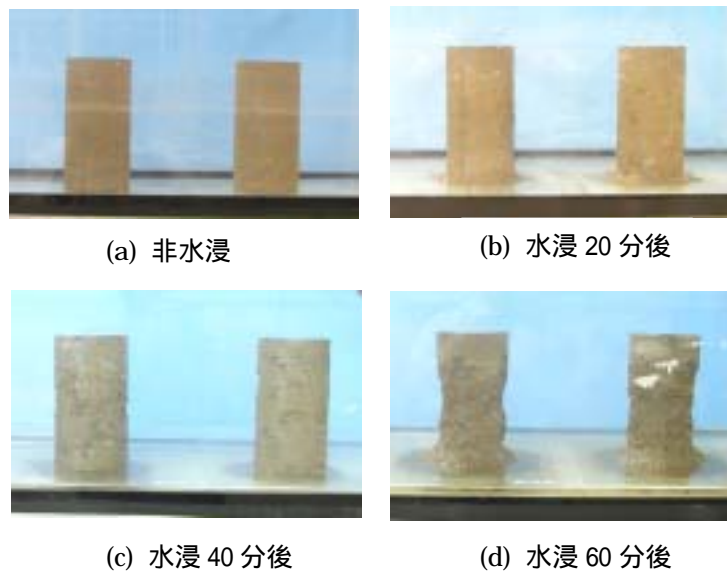


写真 2 水浸時間と供試体の形状
(含水比 12%、成形直後)

3・1・3 供試体の水浸時間と強度の関係

図 5 は、成形直後の供試体を一定時間水浸した後の水浸時間と強度の関係を示している。含水比 8%の供試体は、水槽への注水直後より激しく気泡を出して崩れ始め、水没直後に崩壊する。

一方、含水比 10%、12%の供試体は、水浸時間が長くなるにつれて強度は徐々に低下する傾向にあるが、水浸 40 分後までの崩壊は見られない。そして、含水比 12%の供試体は水浸 60 分後までの強度低下は約 20kN/m^2 であるが、含水比 10%のものは水浸 40 分間で強度は約 $1/2$ の 50kN/m^2 となり、水浸時間 60 分で崩壊

する。

図 6 は、成形直後、および 14 日間自然乾燥した含水比 10%供試体の水浸時間に伴う強度である。供試体は、14 日間自然乾燥すると含水比は 1.5%に減少し成形直後の約 20 倍の極めて高い強度 (2000kN/m^2) となる。しかし、水浸すると急激な強度低下が生じ、約 15 分後に崩壊する。以上の結果、低含水比の供試体ほど水浸に伴う強度低下の大きいことが明らかとなった。

3・1・4 供試体の水浸時間と貫入抵抗値の関係

図 7 は、成形直後に水浸した含水比 10%、12%供試体の水浸時間に伴う貫入抵抗値の関係である。含水比

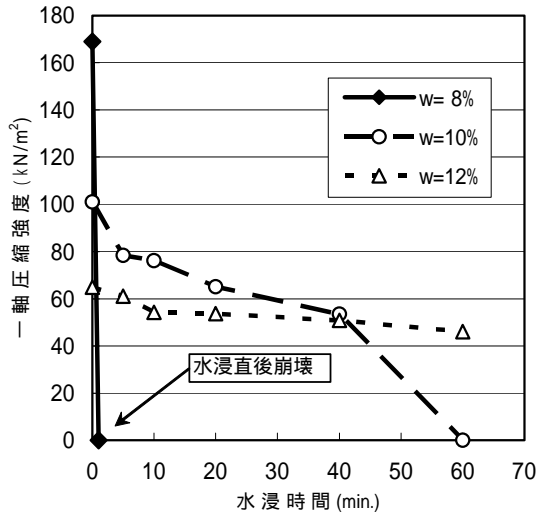


図 5 水浸時間と強度の関係 (成形直後)

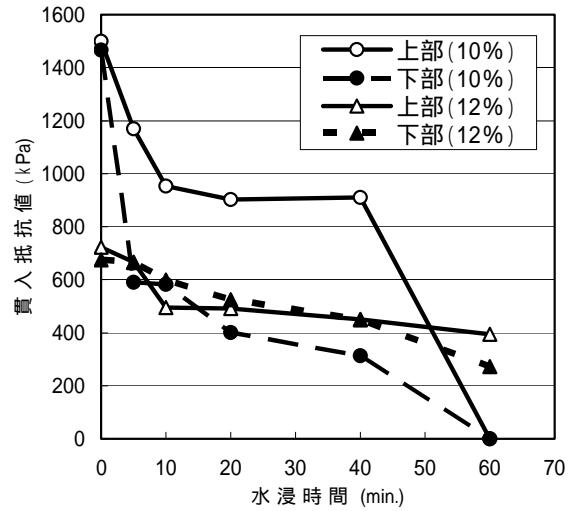


図 7 水浸時間と貫入抵抗値の関係 (成形直後)

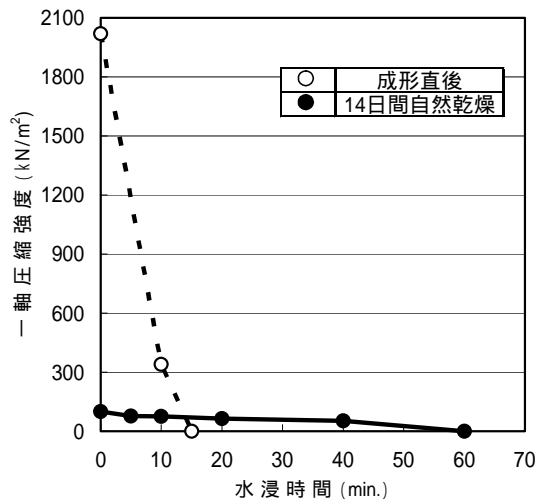


図 6 水浸時間と強度の関係 (含水比 10%、成形直後と 14 日間自然乾燥)

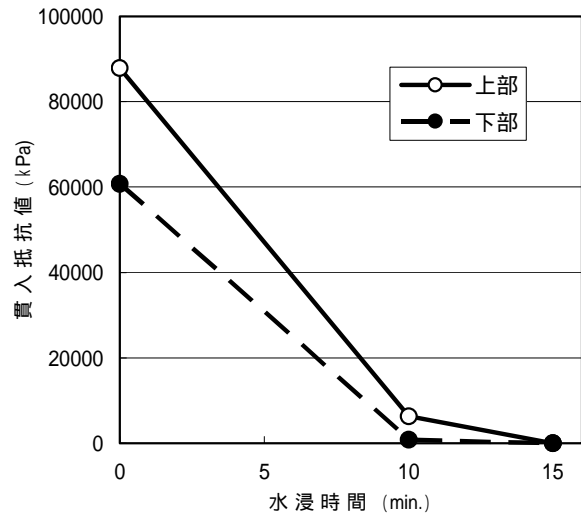


図 8 水浸時間と貫入抵抗値の関係 (含水比 10%、14 日間自然乾燥)

10%の供試体では短時間の水浸で上部と下部の貫入抵抗値に差がみられ、これは含水比 12%供試体ではみられない現象である。水浸試験は、水槽への注水を約 5 分間、排水を約 3 分間で行う。水浸時、供試体は下部より水につき、排水の場合は上部より水位が下がるため、供試体の上下部で水浸時間が異なり、吸水量および貫入抵抗値に差が生じたものである。

図 8 は、含水比 10%供試体の自然乾燥後の水浸時間に伴う貫入抵抗値である。水浸時間の経過に伴い貫入抵抗値は急激に低下している。また、供試体の上部と下部の相対的な貫入抵抗値の差は小さく、この結果は含水比 12%の供試体もほぼ同様である。その原因は養生に伴う供試体の乾燥により、いずれも水浸により供

試体の深部まで急速に水が浸入したためと考えられる。

3・2 添加材を混合した供試体

図 9 は、堤防材料と 3 種類の添加材を 10%混合した改良土の締固め曲線である。添加材を混合していない堤防材料の締固め特性 (最適含水比 10.3%) に比べ、碎石粉を混合した改良土はほぼ同様の結果になっている。しかし、当然ながら粒子密度が低い流動床灰と製紙焼却灰は乾燥密度が低く、最適含水比も添加材混合率から約 10%と考えられるが明確なピークは見られない。

図 10 は、添加材を混合していない堤防材料だけで成形した水浸前後の供試体の含水比と強度の関係である。ここで、含水比が最大(14%)と最小(6%)の 2 つの供試

体の値の変化を矢線で示している（以後の図も同じ）。最大強度を与える供試体は含水比が約 8%であり、最適含水比よりやや小さい含水比で生じている。目標強度である 80kN/m² は約 10%以下の含水比で達成できる。

この供試体を水浸すると、低含水比側の 6%と 8%供試体は含水比が 20%を超え、崩壊する。そして、含水比 12%と 14%の供試体は含水比がやや増加するものの、強度低下はほとんどみられない。

図 11 は、添加材として砕石粉を 10%混合した成形直後の供試体の水浸前後の含水比と強度の関係（印、印）である。堤防材料だけの供試体（印、印）と比べて改良土の強度増加は見られない。そして、この供試体を水浸した結果もほとんど堤防材料だけの供

試体と変わらない。以上の結果、砕石粉は添加材としての混合効果は見られないことがわかる。

図 12 は、添加材として製紙焼却灰を 10%混合した成形直後の供試体の水浸前後の含水比と強度の関係（印と印）である。添加材無混合の改良土に比べ、最適含水比の強度は約 240kN/m²、含水比が 10%以上の高含水比の改良土の強度は 40～140kN/m² 大きくなっている。この供試体を水浸すると、含水比は添加材無混合の供試体より全ての場合で大きくなる。そして、含水比 8%以下の供試体は堤防材料のみと同様、崩壊するが、含水比 12%以上の供試体の強度はわずかではあるが添加材無混合の供試体より大きくなる。

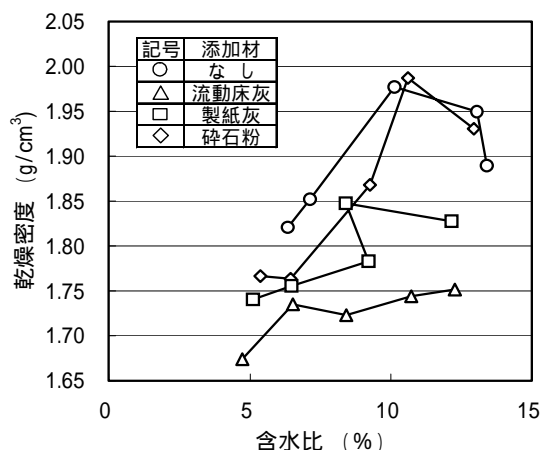


図 9 改良土の締固め曲線

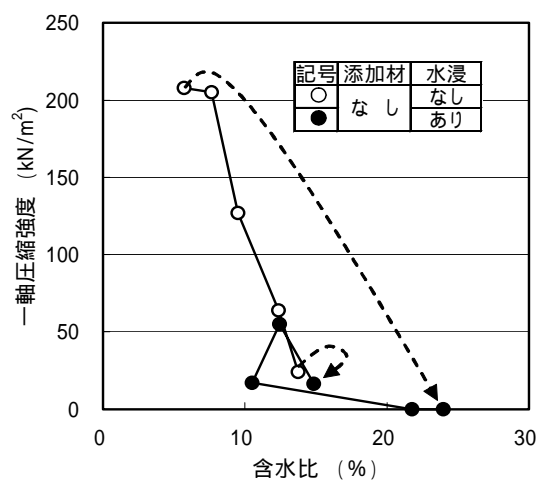


図 10 含水比と強度の関係（堤防材料）

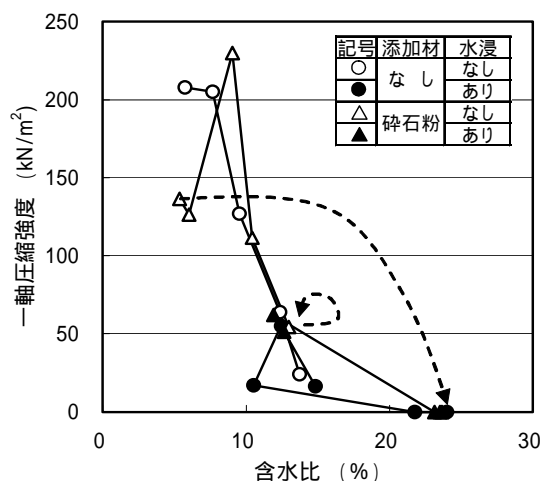


図 11 含水比と強度の関係
（砕石粉、成形直後）

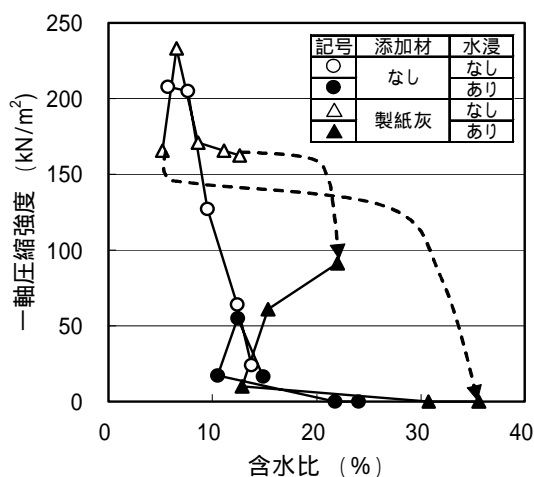


図 12 含水比と強度の関係
（製紙焼却灰、成形直後）

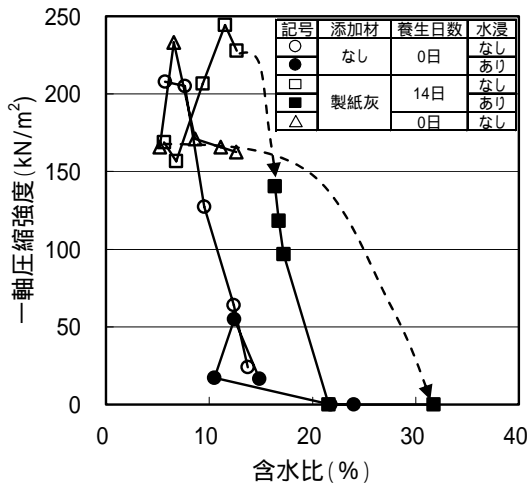


図 13 含水比と強度の関係
(製紙焼却灰、14日間養生)

一方、図 13 はこの供試体を 14 日間養生したものである。水浸しない供試体の強度は成形直後のものとほとんど変わらない。しかし、水浸後では含水比 10%以上の供試体が 100kN/m²以上の強度になっている。この原因は製紙焼却灰の混合により改良土の密度が増加したこと、および養生の経過に伴い改良土に強度発現が生じたことが考えられる。製紙焼却灰は Al₂O₃ の多いのが特徴であり、CaO 含有量も 23.8%あることから C A H系の硬化反応が生じたと思われる。しかし、含水比は、全ての供試体で添加材無混合の供試体より大きいことから製紙焼却灰の吸水能の高いことがわかり、これは改良土の性質としては好ましくない。

図 14 は、添加材として流動床灰を 10%混合した成形直後の供試体の水浸前後の含水比と強度の関係 (印と 印) である。製紙焼却灰の場合と同様、最適含水比の強度は約 240kN/m²で添加材無混合とほぼ同じであるが、含水比が 10%以上の高含水比の供試体の強度が大きくなっている。しかし、この供試体を水浸すると、全ての供試体で含水比が大きく増加し、崩壊する。

図 15 は、この供試体を 14 日間養生したものである。養生により供試体の強度は約 2~3.5 倍に大きく増加する。そして、水浸後の強度も含水比が 8%以上の供試体で 170 kN/m²以上となり、水浸に対する抵抗性が飛躍的に改善される。この原因は養生中に流動床灰の水硬性が発揮された結果である。流動床灰が含有する SiO₂、Al₂O₃ や CaO によるポゾラン反応により C S H系や C A H系の硬化反応物が生成されたためと考えられる。水浸後の供試体の含水比が 18%の一定の値になっ

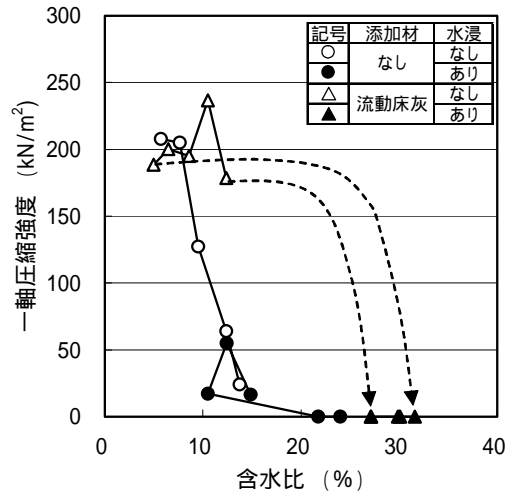


図 14 含水比と強度の関係
(流動床灰、成形直後)

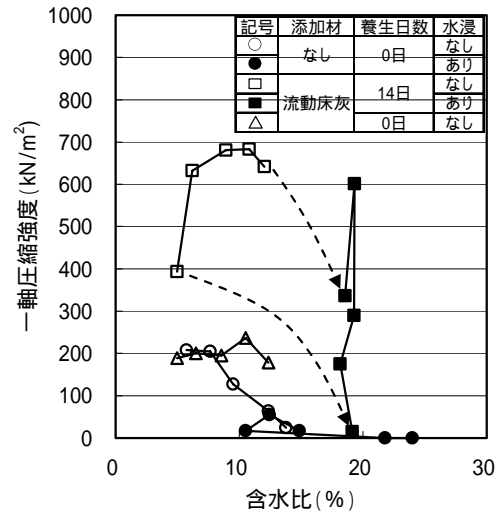


図 15 含水比と強度の関係
(流動床灰、14日間養生)

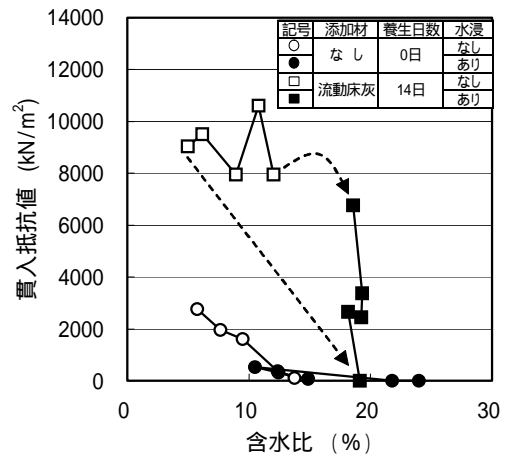


図 16 含水比と貫入抵抗値の関係
(流動床灰、成形直後と 14 日間養生)

ており、それ以上吸水の進まないことが注目される。

図 16 は、流動床灰を 10%混合し、14 日間密封養生した供試体の含水比と貫入抵抗値の関係である。ここで、流動床灰を 10%混合した供試体の成形直後の貫入抵抗値は、全ての供試体が硬度計の貫入により崩壊したため、測定は不能である。貫入抵抗値の結果は、一軸圧縮強度のものとはほぼ同様の傾向を示している。しかし、両者の間には相関は見られなかった。

表 4 は 1 時間水浸後の供試体の含水比と形状変化をまとめたものである。調整含水比 6%と 8%の成形直後の供試体は水浸により全てが崩壊する。そして、崩壊しない供試体をも含めて流動床灰と製紙焼却灰を混合した供試体の吸水量が多くなっているのがわかる。14 日間の養生により崩壊性に改善の見られるのは流動床灰を混合した場合である。

4. 結論

本研究では、3ヶ所の建設現場からの発生土を混合した堤防用盛土材料に対し、その材料単体と添加材を混合した改良土の強度と水浸に伴う形状維持特性を追究した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 単体で使用した堤防用盛土材料

成形直後の供試体を水浸すると、低含水比の供試体ほどスレーキングによる表面粒子の剥離が生じ、崩壊する。

供試体の水浸時間の増加に伴い、低含水比の供試体ほど吸水量が増加し、強度の低下量は大きくなる。含水比 8%の供試体では水浸直後に崩壊し、含水比 10%のものは 60 分後に崩壊する。

自然乾燥すると供試体の強度は大変高くなるが、水浸すると短時間で強度が低下し、崩壊する。

(2) 砕石粉を添加した堤防材料

改良土供試体の成形直後および水浸後の強度は、堤防材料単体の値とほぼ同じであり、砕石粉の添加材としての効果はみられない。

(3) 製紙焼却灰を添加した堤防材料

成形直後の強度は堤防材料単体と同じ強度を示す。

表 4 水浸後供試体の含水比と形状変化

単位: (%)

調整含水比 (%)	添加材					
	なし	石粉	流動床灰		製紙焼却灰	
			0日養生	14日養生	0日養生	14日養生
6	24*	23.6*	31.6*	19.1*	35.6*	31.7*
8	21.8*	23.5*	30.1*	18.1	30.8*	21.6*
10	10.5	23.1*	29.9*	19.3	12.8	17.2
12	12.4	11.9	27.2*	19.3	15.3	16.7
14	14.9	12.6	27.1*	18.6	22.0	16.4

注) *の供試体は水浸により崩壊

水浸すると含水比が高くなり、強度は小さくなる。14 日間養生しても強度増加はわずかであるが、水浸後では含水比 10%以上の供試体は 100kN/m²以上の強度になる。

(4) 流動床灰を添加した堤防材料

成形直後の強度は堤防材料単体と同じ強度を示すが、水浸すると崩壊する。しかし、14 日間養生すると硬化反応が進み、堤防材料単体の約 3.5 倍 (400 ~ 680kN/m²) の強度となり、水浸後も供試体は形状を維持し強度低下も小さい。

本報を作成するにあたり試料提供をいただきました特定非営利活動法人 建設副産物リサイクル促進機構に感謝いたします。

参考文献

- 1) (材)リバーフロント整備センター：高規格堤防整備事業の手引、ぎょうせい、pp.6~8, 1998.
- 2) 特定非営利活動法人 建設副産物リサイクル促進機構：堤防強化用盛土材改良検討(その2)業務混合計画書, pp.1~2, 2005.
- 3) 国土交通省: <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/fukusanbutsu/kensetsuodei/>, (平成 18 年 9 月取得)
- 4) 国土交通省: <http://www.mlit.go.jp/tec/kankyou/> (平成 18 年 9 月取得)
- 5) 澤 孝平, 友久誠司, 神田佳一: 河川堤体材料の水浸時の形状維持特性と耐浸食性に関する研究, 明石工業高等専門学校研究紀要, 第 48 号, p.37~44, 2005.
- 6) 特定非営利活動法人 建設副産物リサイクル促進機構：堤防強化用盛土材改良検討(その2)業務報告書, p.2-1, 2005.