

河川堤防法面の小規模すべり損傷事例にみる土質特性の影響

上原り香¹・森井俊広^{2*}

(平成20年7月20日受付)

要約

堤防法面が損傷すると、機能を維持することが難しくなるだけでなく、崩壊やそれに伴う地域への浸水といった被害をもたらすことになる。2007年の梅雨期の降雨によって発生した河川堤防法面の表層すべり箇所において土質調査を行い、堤防法面の損傷の発生原因を、土質工学の視点から検証した。原位置で法面地盤の密度と含水比を測定したのち、損傷箇所より土を採取し、室内で土粒子の密度試験、土の粒度試験、土の液性限界・塑性限界試験、ならびに突固めによる土の締固め試験を実施した。いずれの土質試験もJISに準拠して実施した。一連の土質調査から、堤防法面の損傷には土質特性が大きく影響しており、逆にいえば、土質特性あるいは土質状態をうまく管理することにより、斜面損傷を防ぐことができることを示した。植生の被覆効果を十分発揮させるためには、その植生を支える地盤が安定している必要がある。そのためにも、植生が定着するまでの管理に加え、施工時の土質や施工方法への配慮が求められる。

新大農研報, 61(1):111-117, 2008

キーワード：河川堤防、法面損傷、土質試験、土の締固め度、植生被覆

河川堤防は、主に洪水時の氾濫を防ぐ目的で設けられる構造物である。堤防法面が損傷すると、機能を維持することが難しくなるだけでなく、崩壊やそれに伴う地域への浸水といった被害をもたらす恐れがある。2007年の梅雨期の降雨によって発生した河川堤防法面の表層すべり箇所において土質調査を行い、堤防法面の損傷の発生原因を、土質工学の視点から検証した。調査は、表層すべり・崩落が生じた河川兩岸の2地点、No. 1地点およびNo. 2地点で実施した。

図1に、No. 1地点で生じた堤防法面の損傷状況を示す。損傷は表層すべりと土塊崩落によるものである。損傷が生じた日の総雨量は60.5mm、最大降雨強度は12.5mm/hrであった。当該地点の覆土は竣工して間もなくのものであり、植生被覆に利用されているノシバ(野芝)の根付きも十分でない状況であった。損傷時は、植生の養生中であり、法面は養生用のビニールシートで覆われた状態であった。ビニールシートは重ね合わされているところが少なく、継ぎ目からの降雨の浸潤にともない、覆土が軟質化し強度が低下して、斜面損傷が生じたものと考えられる。図2は、No. 1地点における損傷斜面を掘削した調査断面である。最下層の堤体土は、堤防の基礎をなしている部分であり、調査地点においては黒く、砂や礫を多く含む粘性土であった。また、十分締固められており、これにより堤体内への浸潤を防いでいる。その上部に分布するところも土は、粘性土であり、堤体土を覆うように敷設されている。No. 1地点では、この部分ですべり、堤防損傷が生じた。もっとも表面に近い位置にある表土は、植生の根つきのために敷設されものである。表土は、No. 1地点にのみ施工されており、No. 2地点では確認されなかった。

土質調査の方法

まず、堤防法面の損傷箇所を掘削し、100cc定容積採土器に

より原位置で土の密度を測定した。測定は、掘削した鉛直断面に沿って、表土やころも土の代表的な深さを対象にして行った。採取した土試料は、100cc容器をビニールテープで封印して室内に持ち帰り、質量を量ったのち、炉乾燥して含水比と乾燥密度を求めた。次いで、別途に、損傷箇所より土を採取し、室内で土粒子の密度試験、土の粒度試験、土の液性限界・塑性限界試験、ならびに突固めによる土の締固め試験を実施した。いずれの土質試験もJISに準拠して進めた(社団法人地盤工学会, 2001)。室内での土質試験には、No. 1地点の堤体土、ころも土および表土、ならびにNo. 2地点の堤体土およびころも土を供した。ただし、突固めによる土の締固め試験では、No. 1地点とNo. 2地点のころも土のみを用いた。

土質調査の結果と考察

1. 原位置密度試験

調査地点の原位置密度を測定し、法面地盤の締固めの状況を調べた。図3に、No. 1地点およびNo. 2地点における深さ方向の乾燥密度の分布を示す。No. 1地点、No. 2地点のそれぞれ2箇所(図3ではサイトAおよびBとする)で、原位置密度を測定した。

図3(a)より、No. 1地点では、表土層で乾燥密度が小さく、深部の堤体土において大きい値となっており、深くなるほど密度が増える傾向にある。しかし、ころも土層において、深さにとまう密度増加はあまり認められない。図3(b)に示すNo. 2地点のころも土においても同様の傾向がみられることから、図3(a)の深さ方向における密度の変化は、土質の違いを反映したものであると考えられる。

2. 土粒子の密度試験

土粒子の密度試験の結果を表1に示す。試験は、材料ごとに

¹新潟市土木部(前新潟大学農学部生産環境科学科)

²新潟大学自然科学系(農学部)

*代表著者: morii@agr.niigata-u.ac.jp



図1 No. 1地点における堤防法面の損傷状況

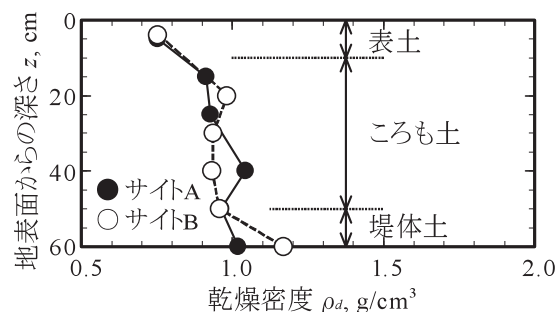


図2 No. 1地点における表土、ころも土および堤体土の地層構造

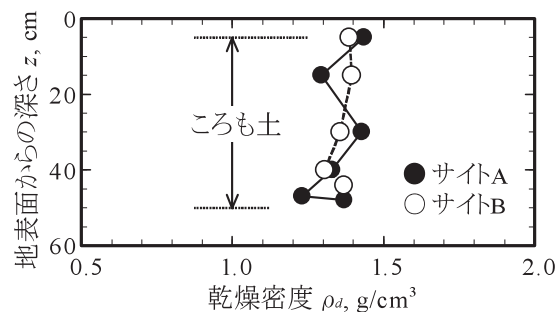
3回実施し、その平均値を表1にまとめている。たいていの土の土粒子は無機質の鉱物で構成されており、一般的な無機質の鉱物の密度が $2.5 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ であることから、土粒子の密度も同程度の値の範囲内であることが多い。表1から分かるように、損傷を受けた河川堤防の土は、表土や堤体土のいずれにおいても、ごく一般的な土材料であることが確認できる。

3. 土の粒度試験

図4に、ふるい分析と沈降分析によって得られた粒径加積曲線を示す。また、これより判読した代表的な粒度特性値をまとめると、表2ようになる。ここで、同表の均等係数 U_c と曲率係数 U_c は、土の粒度の広がりや粒径加積曲線の形状を数値化したものである。 U_c は粒径加積曲線の傾きを表すもので、大きくなるほど粒径の幅が広いことを表す。細粒分が5%未満の粗粒土に対し、 $U_c \geq 10$ である場合には粒径幅の広い土、 $U_c < 10$ に対しては分級された土と呼ぶ。一方、 U_c は粒径加積曲線のなだらかさを表すもので、 $U_c = 1 \sim 3$ である土に対



(a) No.1地点



(b) No.2地点

図3 調査地点における堤防法面の原位置密度分布

表1 堤防法面の損傷箇所から採取した土の土粒子密度

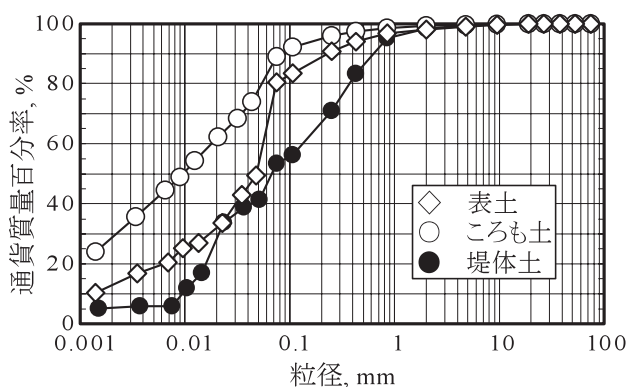
調査地点	土試料名	土粒子の密度 $\rho_s, \text{ g/cm}^3$
No.1	堤体土	2.591
	ころも土	2.690
	表土	2.749
No.2	堤体土	2.547
	ころも土	2.641

して、粒径幅が広いと表現する。

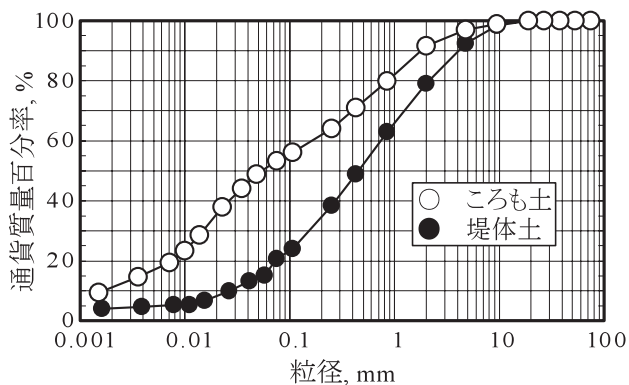
表2より、次のことがいえる。つまり、

- ア) No. 1 地点および No. 2 地点において、堤体土では砂分が多く、ころも土においては細粒分が多い。
- イ) 全ての試料で細粒分が5%以上であるため、均等係数による粒径幅の検討はできない。そこで、各試料の曲率係数をみると、No. 2 地点の堤体土ところも土において1~3となり、これらの土は粒径幅が広いということになる。
- ウ) No. 1 地点に比べ、No. 2 地点の方で、礫分と砂分が多く、逆に細粒分が少なくなっている。

さらに、図4に示した粒径加積曲線を、一般的に堤防に用いられる土の粒度分布 (中島, 2003) と比較すると、次のことがいえる。つまり、No. 1 地点の堤体土は法すべりを生じやすい土、表土はクラックの危険性がありかつ法すべりを生じやすい土であり、さらに No. 2 地点のころも土も法すべりを生じやすい土に位置づけられる。



(a) No.1地点



(b) No.2地点

図4 堤防法面の損傷箇所から採取した土の粒径加積曲線

4. 土の液性限界・塑性限界試験

土質試験からえられた土の液性限界 w_L 、塑性限界 w_p および塑性指数 I_p を表3にまとめる。これらの結果に基づき、原位置密度試験の際に測定した自然含水比（本章第1節で説明した、100cc 容器で採取した土の含水比）を用いて、液性指数およびコンシステンシー指数を求めると表4のようになる。ここで、液性指数 I_L とは、自然状態にある土の含水比（自然含水比） w_n が w_L や w_p に対して相対的にどの位の所にあるかを示したもので、相対含水比とも呼ばれる。これにより、自然状態における土の相対的な硬さあるいは軟らかさを表すことができる。つまり、 w_n が w_L に近いと I_L は1に近くなり、変形抵抗の小さい軟らかな状態を表す。逆に w_p に近く I_L が0に近づくと、硬くて圧縮強度が大きい土の状態を表すことになる。また、コンシステンシー指数 I_C は、粘性土の相対的な硬さや安全度を表す指数であり、 w_n が w_p に近ければ I_C は1に近く、硬くて圧縮強度も大きい。一方、 w_n が w_L に近ければ、 I_C は0に近く、液状の軟らかい不安定な状態を表す。

表3および表4より、No. 1 地点および No. 2 地点の堤防材料土のコンシステンシーをいくつか知ることができる。これをまとめると表5のようになる。

5. 突固めによる土の締固め試験

突固めによる土の締固め試験の結果を図5に示す。図中の打点は、試験よりえられた土の含水比 w と乾燥密度 ρ_d との関係を表す。これらの5個ないし6個の打点の分布形状を最も適切に表す山型の曲線をフリーハンドで描けば、その山型の曲線のピークの値から、最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} を求めることができる。図5より、No. 1 地点のころも土では $w_{opt}=33.8\%$ 、 $\rho_{dmax}=1.34g/cm^3$ 、ならびに No. 2 地点のころも土で $w_{opt}=23.4\%$ 、 $\rho_{dmax}=1.57g/cm^3$ となる。なお、図5に示した実曲線はゼロ空気間隙曲線（ZAVC）であり、土中の間隙

表2 土の粒度試験よりえられた代表的な粒度特性値

土の粒度特性値	No. 1 地点			No. 2 地点	
	堤体土	ころも土	表土	堤体土	ころも土
粗礫分, %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
中礫分, %	0.9	0.4	1.0	7.5	3.0
細礫分, %	0.8	0.3	0.8	13.5	5.4
粗砂分, %	3.0	0.7	1.2	16.0	11.7
中砂分, %	24.5	2.7	6.1	24.5	16.0
細砂分, %	17.4	6.9	10.3	17.9	10.6
シルト分, %	47.5	48.1	61.5	15.6	36.3
粘土分, %	5.9	41.0	19.0	5.0	17.0
2 mm ふるい通過質量百分率, %	98.4	99.3	98.1	78.9	91.6
425 μ m ふるい通過質量百分率, %	83.3	97.4	94.0	48.8	71.0
75 μ m ふるい通過質量百分率, %	53.4	89.1	80.5	20.6	53.3
最大粒径, mm	19	19	19	19	19
60% 粒径 D_{60} , mm	0.130	0.0180	0.0550	0.7500	0.1500
50% 粒径 D_{50} , mm	0.070	0.0095	0.0480	0.4600	0.0600
30% 粒径 D_{30} , mm	0.023	0.0021	0.0160	0.1400	0.0170
10% 粒径 D_{10} , mm	0.010	0.0004	0.0013	0.0260	0.0018
均等係数 U_c	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
曲率係数 U'_c	0.9	0.4	1.0	7.5	3.0

表 3 堤防法面の損傷箇所から採取した土の液性限界、塑性限界および塑性指数

調査地点	堤防材料土	液性限界 w_L , %	塑性限界 w_P , %	塑性指数 I_P
No. 1	堤体土	50.5	28.4	22.2
	ころも土	87.4	37.4	50.0
	表土	80.1	52.5	27.7
No. 2	堤体土	29.1	25.2	2.9
	ころも土	60.1	27.6	32.5

表 4 堤防材料土の液性指数とコンシステンシー指数

調査地点	サイト	堤防材料土	採取深さ z , cm	自然含水比* w_n , %	液性指数 I_L	コンシステンシー指数 I_c
No.1	A	表土	5	74.0	0.779	0.221
		ころも土	15	67.9	0.610	0.390
			25	70.5	0.662	0.338
			40	58.1	0.414	0.586
			50	64.2	0.536	0.464
	堤体土	60	50.6	1.005	-0.005	
	B	表土	4	72.7	0.731	0.269
		ころも土	20	65.4	0.560	0.440
			30	68.3	0.619	0.381
			40	68.4	0.621	0.379
50			65.8	0.567	0.433	
堤体土	60	37.9	0.430	0.570		
No.2	A	ころも土	5	29.7	0.066	0.934
			15	37.5	0.304	0.696
			30	32.7	0.157	0.843
			40	31.2	0.111	0.889
			47	37.4	0.303	0.697
			48	32.6	0.156	0.844
	B	ころも土	5	29.4	0.058	0.942
			15	32.7	0.159	0.841
			30	34.4	0.209	0.791
			40	38.0	0.321	0.679
		44	32.7	0.159	0.841	

* 原位置密度試験の際に 100cc 容器で採取した土の含水比を自然含水比とする。

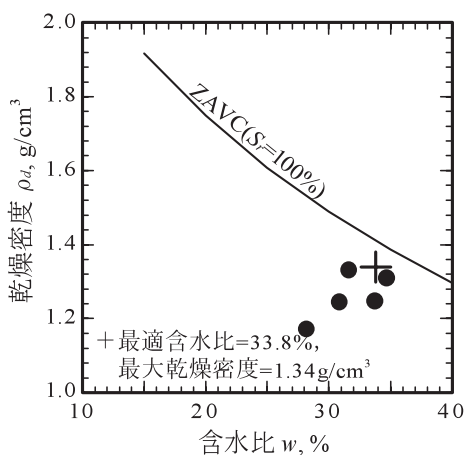
に空気が全く無い場合、すなわち飽和度 $S_r=100\%$ 、空気間隙率 0% のときの ρ_{dsat} と w の関係を表す。

土構造物を造成する場合には、土の強度や支持力、遮水性などの改善を目的として、土の締め固めが行われるのが一般である。その際、同じ土を同じ方法で締め固めても、締め固めの程度は土の含水比により異なってくる。現場において土を締め固める際には、最も効率的に締め固め得る含水比で施工することが必要となる。土の締め固めの程度は、通常、締め固め度 D_c により判定される。 D_c は、突固めによる土の締め固め試験からえられる

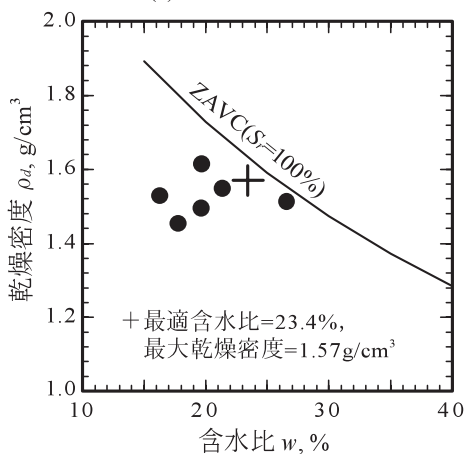
ρ_{dmax} に対する現場の締め固め密度 ρ_d の割合を百分率で表示したものである。本章第 1 節の原位置密度試験で測定した ρ_d と締め固め試験で求めた ρ_{dmax} から、堤防法面の深さ方向の締め固め度を推定すると、図 6 のようになる。同図より、特に、No. 1 地点において、 D_c が 65 ~ 75% と低い値になっていることが分かる。ため池堤防やフィルダムの遮水ゾーンにおける締め固めが $D_c=90 \sim 95\%$ で管理されることを考えると、図 6 の値がいかにか低いものであるのかを確認できる。一般に、堤体土の締め固め度合いが 1 割低くなると、透水係数は約 10 倍大きくなるとさ

表5 堤防法面の損傷箇所から採取した土のコンシステンシー特性

調査地点	堤体材料土	指数	コンシステンシー特性
No.1	表土	液性指数 IL	1 に近く、変形抵抗の小さい軟弱な粘土。
		コンシステンシー指数 IC	0 に近く、軟らかい不安定な状態。
	ころも土	液性指数 IL	0.4 ~ 0.6 付近であり、圧縮強度が大きいとはいえない。
		コンシステンシー指数 IC	0.3 ~ 0.5 付近であり、圧縮強度が大きいとはいえない。
	堤体土	液性指数 IL	A、B サイトでの差が大きく、一様な特徴をつかめないが、両サイトにおいて圧縮強度は大きいとはいえない。
		コンシステンシー指数 IC	
No. 2	ころも土	液性指数 IL	0 に近く、圧縮強度の大きな過圧密状の粘土といえる。
		コンシステンシー指数 IC	全体的に 1 に近く、硬くて圧縮強度も大きい。

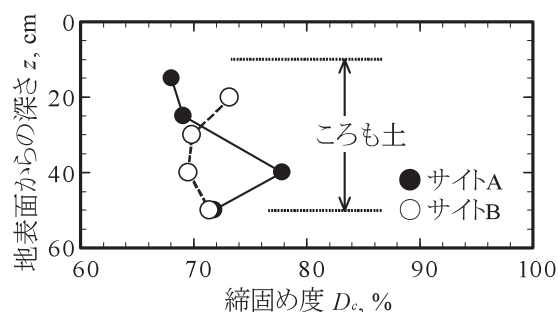


(a) No.1地点のころも土

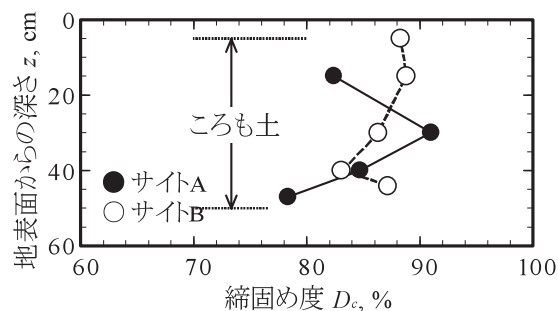


(b) No.2地点のころも土

図5 堤防法面の損傷箇所から採取したころも土の締固め試験結果



(a) No.1地点



(b) No.2地点

図6 堤防法面の損傷箇所から採取したころも土の締固め度の分布

れている。その結果、水が浸透しやすくなり、堤体内に浸潤した多量の水分により土がゆるみ、崩壊をもたらす要因となる。したがって、堤体の安定性を重視すると、最適含水比および最大乾燥密度において締固め施工を進めることが重要となってくる。しかしながら、河川は、その路線長が長いので、全ての地点において最適な締固めを達成するのは、経済性あるいは時間の制約から難しいのが実情である。また、一方、堤防の損傷が多く箇所で頻繁に生じているのも現実である。長期にわたる

視点に立つと、初期投資は大きくとも、施工の段階で最も効率的な締固めを行うことで、堤防の安定性を保証するとともに経済的な有効性を確保していくことが必要になってくるのではないかと考えられる。

まとめ

河川堤防法面における土質調査の結果、法面における亀裂の発生や損傷には、土質条件が深く関係することが分かった。今回の調査地における法面損傷は、植生による被覆効果が十分発揮されなかったために生じたと考えられ、植生が定着するまでの養生期間中の管理の重要性が確認できた。

調査を実施した 2 地点の土質特性を比較し、No. 1 地点の方が No. 2 地点に比べ、液性指数やコンシステンシー指数の結果から、軟弱で不安定な地盤状態であることを明らかにした。締固め試験に基づいて求めた締固め度の結果から、No. 1 地点の締固めの程度が低く、相対的に軟弱でゆるい状態にあったと推察された。

一連の土質調査から、堤防法面の損傷には土質特性が大きく影響しており、逆にいえば、土質特性あるいは土質状態をうま

く管理することにより、法面の損傷を防ぐことができると考えられる。植生の被覆効果を十分発揮させるためには、その植生を支える地盤が安定している必要がある。そのためにも、植生が定着するまでの管理に加え、施工時の土質や施工方法への配慮が求められる。今後、法面の亀裂や損傷を引き起こす土質要因を明確にしていくことで、斜面の減災技術に適用できる土質条件を明らかにすることができるのではないかと期待する。

本稿は、第 1 著者による 2007 年度の卒業論文「降雨時における斜面の土中水分動態と植生被覆の効果」のうち、第 4 章の事例調査をまとめたものである。土質試験を実施するにあたり、施設機能工学研究室の 2007 年度卒論生、親松康義さん、神田美沙さん、坂上公男さんならびに西野信之さんより多大のご支援とご協力をいただいた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 社団法人地盤工学会. 2001. 土質試験 基本と手引き, 第 1 回改訂版.
中島秀雄. 2003. 図説 河川堤防. 技報堂出版.

Case Study on Effect of Soil Physical Properties on Slope Slide Damages of River Embankment

Rurika UEHARA¹ and Toshihiro MORII^{2*}

(Received on 20 July, 2008)

Summary

Any damage caused by slope slide deteriorates a mechanical safety and function of river embankment, and may cause a terrible disaster due to structural failure of the embankment and flood flow. A series of in-situ soil investigation and laboratory soil tests were conducted to study effects of soil physical properties on the small-scale slope failure of the river embankment which occurred during heavy rain in June, 2007. Soil density and water content along soil profile excavated into the embankment slope were measured by using soil sampler rod, and then a mass of soil was sampled from the damaged slope of the embankment to use in the laboratory soil tests. Physical properties of the soil such as density of soil particle, grain size distribution, and liquid and plastic limits were measured by the laboratory soil tests. Optimum water content and maximum dry density of soil were also measured by a compaction test to determine a degree of compaction along the soil profile in the embankment slope. It was confirmed that the slope slide was, as well known, strongly affected by the physical properties of soil employed in the construction of the river embankment. This means a good evaluation and selection of soil in the embankment construction will lead a good mitigation of its possible hazard due to slope failure of the embankment. It was also referred that a plant cover on soil surface may effectively reduce a amount of infiltration of rainwater into soil and possibility of slope failure or slide of the embankment.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 61(1):111-117, 2008

Key words : River embankment, Surface slide of soil slope, Soil investigation and test, Degree of soil compaction, Plant cover on soil

¹ Niigata Government City, Niigata (Formerly, Faculty of Agriculture, Niigata University, Niigata)

² Institute of Science and Technology (Faculty of Agriculture) , Niigata University, Niigata

* Corresponding author: morii@agr.niigata-u.ac.jp