

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560597

研究課題名(和文)盛土材の強度・剛性の高締固めによる飛躍的向上とその設計・締固め管理への反映

研究課題名(英文) A drastic improvement of strength and stiffness of compacted soil by high compaction and its consideration in design and compaction control

研究代表者

龍岡 文夫 (TATSUOKA, Fumio)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：70111565

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,500,000円、(間接経費) 1,350,000円

研究成果の概要(和文)：研究成果の概要：道路・鉄道・宅地の盛土、河川堤防、ため池堤体等の設計・締固め管理体制を見直し、より良い締固めを奨励しその結果を設計に反映できる体系を確立するために、多様な砂・礫質土・セメント改良土の締固め特性と強度・変形特性を実験的に検討した。

その結果、締固め特性と締固め土の強度・剛性と透水係数は締固めエネルギーレベル(CEL)を変数として含まない乾燥密度 d と締固め時飽和度 S_r (含水比ではなく) の関数であることを見出した。その結果に基づき、 d と S_r を管理する新しい締固め管理法と設計法を提案した。

研究成果の概要(英文)：To revise the current design and compaction practice for the contraction of embankments of roads, railways and residential areas, river levees, earth fill dams etc by encouraging better compaction and taking into account its effects in design and compaction control, a series of laboratory compaction tests and stress-strain tests on a wide variety of sandy soils, gravelly soils and cement-mixed soils were performed.

It was found that the compaction properties and stress-strain properties of compacted soil is a function of compacted dry density and the degree of saturation during compaction S_r (not the water content w that is usually used in current practice) that does not include the compaction energy level as a variable. Based on the above, a new design and compaction control method controlling and measuring dry density and S_r (not w) is proposed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：盛土 変形・強度特性 透水係数 最大乾燥密度 最適含水比 最適飽和度 締固め特性

1. 研究開始当初の背景

(1) 土の締固めは地盤工学の最も古く基本的なものの一つであるが、今日新たな視点から重要となっている。即ち、道路・鉄道盛土、河川堤防、宅造盛土等の地震・豪雨災害は後を絶たないが、その主要因は低い標準的設計せん断強度に反映された盛土に対する低い要求性能と、それに対応した不十分な盛土の締固めと排水処理である。盛土は良く締固めれば安定することは認識されつつも、系統的な研究がなく、依然として50年以上前に経験的に設定された設計・締固め管理体系が現在も用いられている。この体系では、施工の良否を峻別せず悪平等となる傾向が強くなり、通常の近代的機械施工で達成できる高い締固め度を持つ盛土の安定性を過小評価し、例えばレベルII設計地震動に対する設計の課題を解決できない(本来はできるが!)。盛土の地震・豪雨等に対する耐災性の向上に対する社会的要求に応えるためには、より良い締固めを奨励しそれを設計に反映できるように、現状の設計せん断強度決定法と締固め管理法を全面的に見直す必要がある。

(2) しかし、大学等研究機関での従来の研究では、現場盛土材料を用いた締固め管理値(締固め度 D_c の全測定値に対する許容下限値)よりも高い D_c での系統的なせん断実験は非常に少ない。また、フィルダムを除く通常の盛土建設では、許容下限値である低い D_c の値に対応した残留せん断強度程度の低い標準値を設計値として採用し、許容下限値よりも高い実際の D_c の値に対応したせん断強度をせん断試験で測定してそれを設計値として採用する例は非常に少ない。また、従来は、締固めた土の変形・強度特性と透水係数を乾燥密度と締固め時含水比の関数として表現してきた。しかし、締固めエネルギーレベル(CEL)の増加とともに最大乾燥密度は増加しその時の含水比(最適含水比)は減少する一方、個々の箇所でのCELは一定でなく予測できないため、ある固定されたCELで得られた最大乾燥密度と最適含水比に基づく従来の現場締固め管理法には本質的な問題がある。特に、湿潤時のコラス沈下を防ぐため空気間隙率を小さくすることを目標にして、現場よりも低いCELでの湿潤側で施工される傾向にある。しかし、良く締固めればやや現場よりも低いCELでは乾燥側であっても現場でのCELでは最適含水比状態になればコラス沈下は殆ど生ぜず安定性と剛性が高い盛土が実現できる可能性が高い。しかし、この点に関する系統的な実験は非常に少ない。

2. 研究の目的

(1) 盛土の現状の設計と締固め管理の体系を見直し、より良い締固めを奨励しその結果を設計に反映できる体系にするために、多様な砂・礫質土を対象として、盛土材の強度・剛性(クリープ変形性も含む)・透水係数と締固め度の関係(特に高い締固め度での関係)を明かにする。この結果に基づき、以下を示す。

(2) 盛土の地震時・豪雨時安定性と長期残留変形特性に関する要求性能の実現に必要な乾燥密度および最適飽和度を締固め管理目標とすべきことを示す。

(3) 所定の土質に対して、締固め時不飽和状態と飽和化後の変形・強度特性は乾燥密度と締固め時の飽和度の関数であり、その関数はCELを変数として含まないこと、従って、個々の場所のCELが不明でも乾燥密度と飽和度から変形・強度特性を推定できることを示す。また、一定のCELでの乾燥密度~飽和度関係と最大乾燥密度が得られる飽和度(最適飽和度)はCELに独立であることを示す。

(4) 飽和化した土の透水係数は、乾燥密度と締固め時飽和度の関数の積であり、これら関数にはCELを変数として含まれないこと、また一定のCELでは最適締固め度よりもやや高い飽和度で透水係数は最小値を示すがより良く締固めれば最適飽和度を締固め目標とすることによって十分に低い透水係数が得られることを示す。

3. 研究の方法

1) 系統的な室内締固め試験を行い、その結果と既存の実大締固め試験の結果を解析する。

2) 系統的な室内三軸圧縮試験と平面ひずみ圧縮試験を行い、その結果と既存の透水試験の結果を解析する。

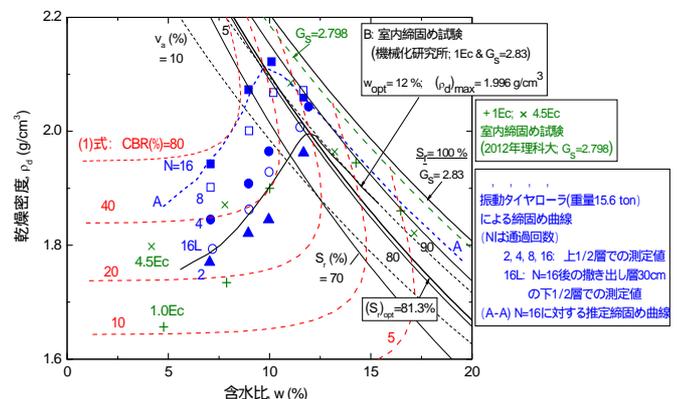


図1 実大締固め試験例と室内締固め試験による締固め曲線

3) 上記の結果に基づき、新しい設計せん断強度の決定法と締固め管理法を提案する。

4. 研究成果

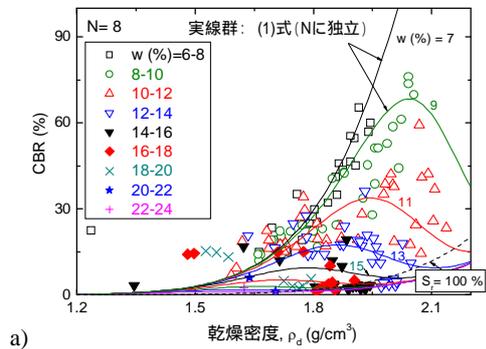
(1) 建設機械化研究所で砂質ロームを用いて行われた実大締固め試験（1965～1990年）の結果を解析した。図1に、代表的結果を示す。実大試験の締固め曲線は機械の通過回数 N が増加すると左上方に移動し、 $N > 4$ での上層での CEL は $1Ec$ 以上である。従来 $1Ec$ での $(\rho_d)_{max}$ に対する $D_c=90\%$ を管理値とする場合が多いが、 $D_c=90\%$ は $\rho_d=1.8g/cm^3$ であり殆ど締固まっていない。すなわち、 D_c の管理値とは、ばらつきを示す全測定値の許容下限値であり、平均値はそれより 5% 程度以上になることを前提としている。

図2aに、含水比 w をパラメータとした $N=8$ での $CBR \sim \rho_d$ 関係を示す。 ρ_d の増加と w の減少によって CBR が増加するが、 w が 9% を超えると、 w 一定で ρ_d がある値以上に増加すると CBR は却って減少する。これは、 w 一定で ρ_d が増加すると S_r が増加して、その負の影響が ρ_d の増加による正の影響を凌駕するためである。一方、図2bに S_r をパラメータとした $CBR \sim \rho_d$ 関係を示す。異なる S_r での $CBR \sim \rho_d$ 関係の形は相似であり、 S_r 一定で ρ_d が増加すると CBR は常に増加し、 ρ_d 一定で S_r が増加すると CBR は常に減少し S_r が 40% を超えると急激に減少する。また、締固め機械の重量が増加し N が増加すると ρ_d は増加して CBR は増加するが、図4に示すように、これらの要因がそれぞれの S_r での $CBR \sim \rho_d$ 関係に与える影響は小さい。これらの結果は、締固め土の変形・強度特性に対する ρ_d 以外の主要影響パラメータは w ではなく S_r であることを示している。以上から、変数の ρ_d と S_r が分離されていて CEL に独立である(1)式が成り立つ (ρ_w は水の密度)

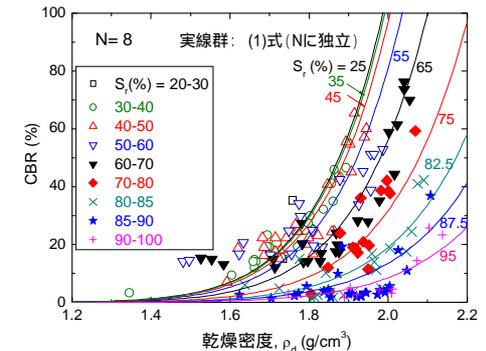
$$CBR = f_{CBR}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - b)^c \quad (1)$$

ここで、 b と c は正の定数で土質により異なる。 $f_{CBR}(S_r)$ は S_r の単調減少関数(単位は CBR と同じ(%): 図4)である。図2, 3に(1)式を実線群で示す。図1に(1)式から求めた異なる CBR に対する $\rho_d \sim w$ 関係群を示すが、複雑な形である。

図1に示す $\rho_d \sim w$ 関係(A)は、 $1Ec$ での室内締固め曲線(B)を参照して実大試験 $N=16$ のデータにフィットさせたものである。曲線 A, B に(1)式を適用して求めた「一定の CEL に対する $CBR \sim w$ 関係」を図5に示す。また、水浸前・後で一連の室内 CBR 試験を行い水浸による CBR の低下率を求め、その結果を用いて現場締固め試験後に水浸した場合の CBR と w の関係を推定した。それぞれ



a)



b)

図2 w と S_r をパラメータとした $CBR - \rho_d$ 関係

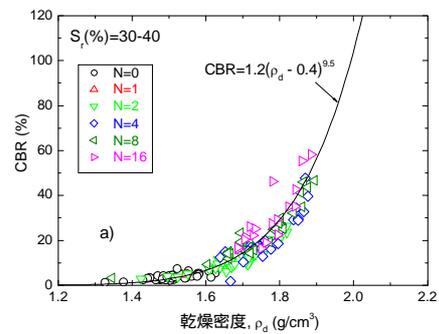


図3 一定の S_r での $CBR - \rho_d$ 関係

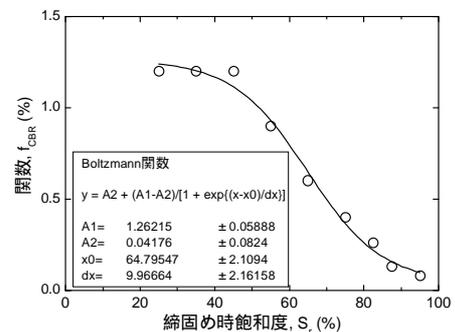


図4 (1)式での S_r の関数 f_{CBR}

の CELN での $w=w_{opt}$ 状態（すなわち $S_r=(S_r)_{opt}$ 状態）では水浸前の CBR は十分大きく施工性が良く、その状態では水浸による強度低下は小さく水浸後の CBR も十分大きい。また、コラップスも殆どない。一方、水浸前後の CBR は w が w_{opt} を超えると急速に低下し、CELが増加しても CBR は低下する。これは、CEL を増大しても d の増加が小さい一方、 S_r が 100% に向かって増加するからである。これは、現場では過転圧の危険を意味する。

それぞれの CEL で $(d)_{max}$ が得られる S_r を最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ と定義すると、 $(S_r)_{opt}$ は 80% 程度である。図 6 に、図 1 のデータの $d \sim S_r$ 関係を示す。また、 $d \sim S_r$ 関係の形は、CEL に依存していない。この傾向は、類似の実大試験と多様な砂礫でも確認された。また、(1)式による CBR 一定での $d \sim S_r$ 関係の形も簡明である。さらに飽和化した砂礫でも、その剛性とクリープ量も(1)式のように d と締固め時の S_r の変数分離関数であり $(S_r)_{opt}$ よりやや小さな S_r で締固めると剛性は極大にクリープ量は極小になる。丸い粒子の良配合の礫質土では、ピーク強度でも同様である。

(2) 御母衣ダムのコア部の設計に関連して、一連の締固め試験と飽和透水試験が行われている。図 7a での 1Ec による締固め曲線 d の湿潤側の点 A において、 k は極小になる(図 7b)。この特性のため、遮水盛土ではやや湿潤側での締固めが合理的と言われてきた。しかし、CEL が増加すると w_{opt} は減少する一方、近代的機械化施工では CEL は容易に 1Ec を超える。上述のように点 A の含水比での施工で CEL を増加しても、 ρ_d の増加は小さく強度が低下して過転圧の虞があるばかりでなく、 k の減少量も小さい。一方、仮に 4Ec で施工して w_{opt} 状態の点 B に到達すれば k は点 A の値よりも小さく、やや湿潤側の点 C に到達すれば 4Ec での極小値で更に小さい値が得られる。また、点 B、C での ρ_d は十分大きい。従って、近代的機械化施工により十分安定で遮水性がある盛土を建設する場合は、点 B、C のような状態を施工目標とすべきである。

しかし、通常現場の CEL は不明であるため、 $k \sim w$ 関係は不明であり目標の k を実現するための施工含水比 w を決定できない。一方、図 5 のデータを分析すると、 S_r 一定の時 $\log k$ は S_r に関らず $-5.02 \cdot \rho_d$ に比例する。そこで、 $\rho_d = [(\rho_d)_{max}]_{1Ec} = 1.872 \text{ g/cm}^3$ の時の k を $f_k(S_r)$ と定義して、図 7a と 7b のデータの (k, ρ_d) の値を(1)式に代入して $f_k(S_r)$ の値を求め、図 8 のように S_r に対してプロットした。

$$\log k = \log f_k(S_r) + 5.02(1.872 - \rho_d / \rho_w) \quad (2)$$

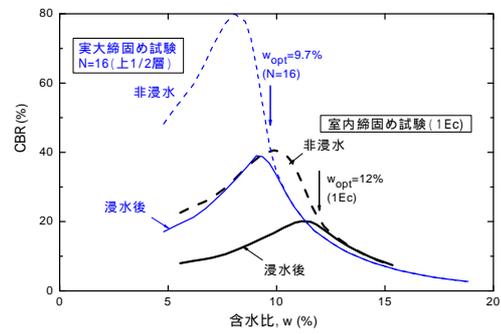


図 5 異なる CEL での水浸前後の CBR ~ w 関係

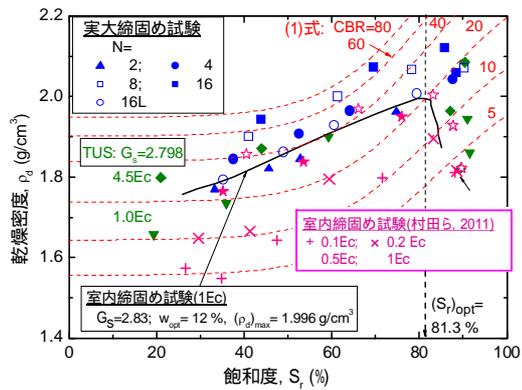


図 6 $d \sim w$ 関係から変換した $d \sim S_r$ 関係

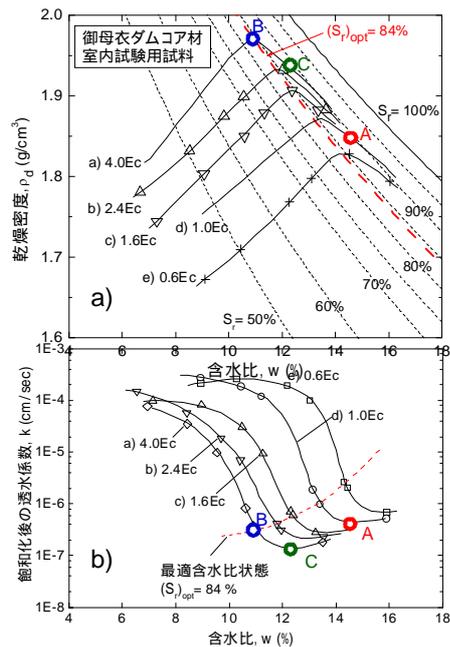


図 7 御母衣ダムコア試料の実験結果

図8を見ると、 $f_k(S_r)$ は ρ_d と CEL に独立で S_r だけの関数あり(2)式は妥当である。また、 $f_k(S_r)$ は $S_r < 60\%$ では一定であるが、 $S_r > 80\%$ では S_r の 10% の増加で k は 1/10 以下に急減する。図9に示す曲線群 ①~⑥は、図8に示す平均的 $f_k(S_r) \sim S_r$ 関係を(1)式に代入して得た k 一定の $\rho_d \sim w$ 関係である。 $S_r > 60\%$ では k 一定の関係は S_r 一定の関係に近いことから、 k の低い目標値の実現には、 S_r の管理が非常に重要であることが分かる。

それぞれの CEL で最大乾燥密度(ρ_d)_{max} が得られる (S_r)_{opt} の実現を、施工目標にできる。仮に、図9に示す $\rho_d = [(\rho_d)_{max}]_{4Ec}$; $S_r = (S_r)_{opt}$ である点 a を、 ρ_d が高く強度・剛性に関する要求性能を満たし k も低いことから施工目標に設定したとする。現場では CEL と土質が場所と時間でかなり変動するので、 $[D_c]_{4Ec}$ の管理値 = 95%; S_r の管理値 = $(S_r)_{opt} - 5\% \sim (S_r)_{opt} + 5\%$) のような施工許容範囲 b の設定が必要になる。一方従来の締固め管理では、例えば 1Ec の締固め試験に基づき $[D_c]_{1Ec}$ の管理値 = 90%; $w = (w_{opt})_{1Ec} + 0 \sim 4\%$) のような許容範囲 c を設定する。しかし、領域 b は領域 c と全く異なり、左下では ρ_d は低い上に $S_r \ll (S_r)_{opt}$ となり k は高くなり、盛土の高い性能を確保できない。この点で、従来の締固め管理法は不合理である。

御母衣ダムの設計では、8種類の土質試料を用いた 1Ec の締固め試験と飽和透水試験も行われている。これらの結果でも(2)式は粒子径の影響を考慮すれば成り立つ。

(3) 飽和化後の剛性・強度と透水係数が締固め時飽和度 S_r に影響される理由は、締固め時に形成される粒子構造が S_r によって異なるためと考えられる(図10)。すなわち、 $S_r < (S_r)_{opt}$ である低飽和状態では、サクシオンが大きく粒子間に作用する凝集力が大きい。このため、粒子骨格構造は粗粒子の接点に細粒子が密着している凝集型(coherent)になる。粒子骨格構造が安定しているため、ピーク強度発揮前の剛性が高くなり、ピーク強度も大きくなる。しかし、大きな空隙が形成されるため飽和化後の透水係数は大きくなる。一方、 $S_r > (S_r)_{opt}$ である高飽和状態ではサクシオンが小さく粒子間に作用する凝集力が小さい。このため、粒子骨格構造は粗粒子の間に細粒子が分散して存在している分散型(dispersive)になる。粒子骨格構造が不安定になるため、ピーク強度発揮前の剛性が小さくなり、ピーク強度も小さくなる。形成される空隙が小さくなるので飽和化後の透水係数は小さくなる。

(4) 締固め後飽和化した土の変形・強度特性と透水係数 k は、乾燥密度 ρ_d と締固め時の飽

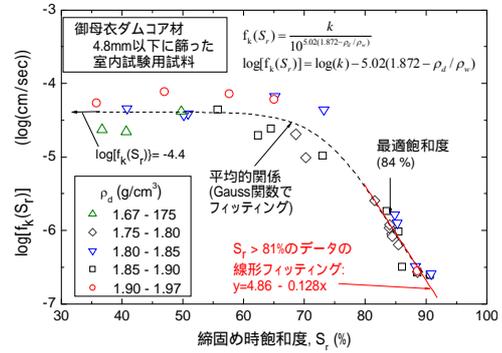


図8 図5のデータの $\log[f_k(S_r)] \sim S_r$ 関係

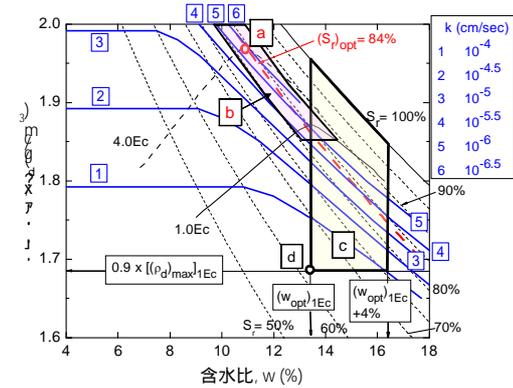
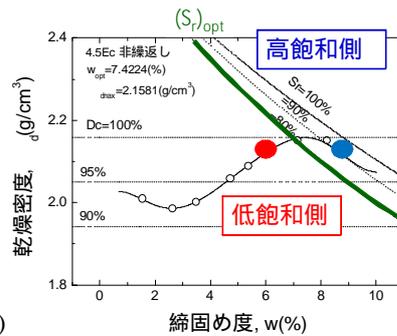


図9 締固め曲線と k 一定曲線の比較



a)



b)



図10 締固め時の S_r が飽和化後の物性に影響するメカニズム

和度 S_r の関数であり、その関数は CEL を変数として含まないので、現場での CEL が不明でもその関数により ρ_d と S_r の測定値から飽和化後の透水係数 k の値を推定できる。従って、 (ρ_d, S_r) に基づく現場締固め管理法が提案できる。すなわち、締固め度=“現場 ρ_d ”/所定の CEL での $(\rho_d)_{max}$ ”が所定の値以上であることを確認するとともに、「室内締固め試験で求めた $(S_r)_{opt}$ (CEL に独立)」を現場 S_r の目標値とする。また、 (ρ_d, S_r) の測定値から物性を推定して所定の値を満足しているかを確認する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- Yonezawa, T., Yamazaki, T., Tateyama, M. and [Tatsuoka, F.](#), Design and construction of geosynthetic-reinforced soil structures for Hokkaido high-speed train line, *Transportation Geotechnics*, 査読あり、1巻, 2014, 3-20
- [Tatsuoka, F.](#), Tateyama, M., Koseki, J. and Yonezawa, T., Geosynthetic-reinforced soil structures for railways: twenty five year experiences in Japan, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 査読あり、45巻, 2014, 1-15
- [Tatsuoka, F.](#), Tomita, Y., Iguchi, Y. and Hirakawa, D., Strength and stiffness of compacted crushed concrete aggregate, *Soils and Foundations*, 査読あり、53巻, 2013, 835-852

[学会発表] (計5件)

[龍岡文夫](#)・藤代健司・須藤雅人・建山和由・根本忠、乾燥密度と飽和度の関数としての締め固めた土の物性、第48回地盤工学研究発表会、2013年7月24日、富山国際会議場(富山市)

藤代健司・須藤雅人・[龍岡文夫](#)・[川辺翔平](#)・菊池喜昭、乾燥密度と飽和度に基づく締め固め管理について、第48回地盤工学研究発表会、2013年7月24日、富山国際会

議場(富山市)

須藤雅人・[川辺翔平](#)・菊池喜昭・[龍岡文夫](#)、飽和稲城砂の排水変形・強度特性に対する締め固め時飽和度の影響、第48回地盤工学研究発表会、2013年7月24日、富山国際会議場(富山市)

片岡哲貴・古澤翔太・[川辺翔平](#)・菊池喜昭・[龍岡文夫](#)、セメント改良礫質土の変形・強度特性与える締め固め時の影響、第48回地盤工学研究発表会、2013年7月24日、富山国際会議場(富山市)

古澤翔太・[龍岡文夫](#)・菊池喜昭・[川辺翔平](#)・渡辺健治・片岡哲貴・天野雄太・児玉智洋、セメント改良礫質土の変形・強度特性与える締め固め時と養生日数の影響、学会等名:第48回地盤工学研究発表会、2013年7月24日、富山国際会議場(富山市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

[龍岡 文夫](#)(TATSUOKA, Fumio)
東京理科大学 理工学部土木工学科・嘱託教授
研究者番号 70111565

(2)研究分担者

塚本 良道(TSUKAMOTO, Yoshimichi)
東京理科大学 理工学部土木工学科・教授
研究者番号 50253505

[川辺 翔平](#)(KAWABE, Shohei)
東京理科大学 理工学部土木工学科・助教
研究者番号 30609384