

大型締固め機械の転圧による土の締固め特性の検証

藤田智弘・宮武裕昭

1. はじめに

近年、未曾有の豪雨・地震により、道路盛土等の崩壊が発生している。過去の被災調査結果や模型実験によれば、盛土内の排水不良とともに本来は品質管理により管理されているはずの締固めの不足が被災の要因となることがわかってきた¹⁾。道路盛土の締固めにおいて最も広く用いられている品質管理方法は、施工方法を想定し、設計上要求すべき強度、変形抵抗を満足するような締固め度を規定し、現場で規定値による管理を実施することにより、締固めた土の性質の恒久性と設計から要求される力学特性の両者（以下「要求性能」という。）を確保しているとみなすものである²⁾。これまで、道路土工—盛土工指針（旧：道路土工—施工指針³⁾）等では、過去の実績に基づき、要求性能を確保しているとみなすことのできる機械の選定方法、層厚0.3m毎に締め固めて所要の高さまで繰り返す施工方法や、層毎に表層0.1m程度の密度で品質管理するための規定値を示してきた。しかし、この指針の運用から30年余りが経過し、その間に現場で使用される締固め機械や盛土材料が多様化してきている。そのため、従前の品質管理方法のもとで構築された盛土の中には、層厚0.3mの各層の下層まで十分に締め固まっていない等、要求性能を確保しているとみなせる範囲から外れるものがでてきていることが懸念される。盛土の要求性能を確保する上で最も重要なことは、密実で均質な盛土を構築することである⁴⁾。現行の品質管理を基本として盛土の要求性能を確保するためには、現在使用されている締固め機械と盛土材料で構築した盛土の締固め特性を検証する必要性が生じている。

2. 既往の研究と本研究の目的

石井ら⁵⁾（1987）は、3種類の盛土材料について、各種締固め機械の種類、転圧回数、土の水分

量と土の締固め効果の関係を検討した。盛土材料は、粘土質砂、シルトまじり砂、シルト質礫を用い、締固め機械は、振動ローラとタイヤローラを用いて試験が行われた。試験の結果、振動ローラによる16回転圧後の粘土質砂の乾燥密度は、下層部が上層部に対して約85%となり、深さ方向に大きな密度勾配が生じることが示された。

益村ら^{6),7)}（2001, 2002）は、厚層締固めにより生じる密度勾配に着目して、高速道路の現場転圧試験の結果から現場で生じる密度勾配の実態とそれが原因で盛土に圧縮沈下が生じることを明らかにし、下層部における平均密度の管理を品質管理基準として提案した。

これら既往の研究は、当時の締固め機械と各種盛土材料との締固め特性を把握する試みで、現場における盛土の性能の信頼性向上に大きく貢献するものである。しかし、前述の通り現場で使用される締固め機械や盛土材料が多様化してきている。

本研究では現在使用されている締固め機械による各種細粒分含有率及び含水比の異なる盛土材料（以下「各種盛土材料」という。）の締固め特性を把握することを目的として転圧実験を行う。

3. 転圧実験の概要

3.1 実験方法

転圧実験は、幅5m×長さ44.8m×高さ4mのコンクリート製の実験ピット内に基礎地盤を造成後、基礎地盤上に各種盛土材料を敷均して大型の締固め機械を用いて転圧を行い（写真-1）、転圧回数毎に密度等の測定を行った。



写真-1 転圧状況

転圧実験で用いる盛土材料は、表-1に示す5種類の異なる物理特性を有するものを用いた。それぞれの盛土材料の粒経加積曲線、締固め曲線を図-1、図-2に示す。これらの盛土材料の含水比を最適含水比、最適含水比に対して乾燥側、または最適含水比に対して湿潤側に調整して敷均して転圧を行った。

転圧実験で用いる締固め機械として、盛土の造成に一般的に用いられている振動ローラ、タイヤローラ、及びブルドーザを対象とした(表-2、及び写真-2~4参照)。振動ローラBについては、ローラを振動させて転圧する「振動あり」とローラを振動させないで転圧する「振動なし」の2条件で使用した。また、ブルドーザについては本来は締固め機械ではないが、トラフィカビリティーが低い施工現場で使用されることがあるので比較の対象とした。

基礎地盤は、実験ピット底面の影響を極力少なくすることを目的として、高さ約3mの高さまで造成した。基礎地盤に使用した土質材料は、表-1に示す土質(3)を用い、含水比は最適含水比である16.0%になるように調整した。造成は、層厚0.3m毎に盛り立て、タイヤローラにて8回転圧を行い、締固め度が95%以上の基礎地盤を構築した。

基礎地盤造成後に、含水比を調整した各種盛土材料を所定の巻きだし厚で盛り立てた。巻きだし厚は、事前に実施した試験施工により転圧後の仕上がり厚が0.3mとなるように各種締固め機械毎に設定した。

3.2 計測項目

転圧実験では、下層まで十分に転圧が行われているかどうかを確認するために、以下の方法で密度の計測を実施した。計測方法は、コアカッターによるサンプリング等により実施した。コアカッターによるサンプリングは、内径0.1m、高さ0.1mのコアカッターを用いて、深さ0~0.1m、

表-1 盛土材料の物理特性

	土質(1)	土質(2)	土質(3)	土質(4)	土質(5)
	砂質土(S)	砂質土(S)	砂質土(S)	砂質土(SF)	粘性土
ρ_s (g/cm ³)	2.647	2.666	2.675	2.681	2.665
D_{max} (mm)	9.5	9.5	9.5	19.0	4.75
F_c (%)	4.3	14.8	15.3	33.4	57.1
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.571	1.625	1.674	1.666	1.531
w_{opt} (%)	18.2	17.8	16.0	18.8	24.9

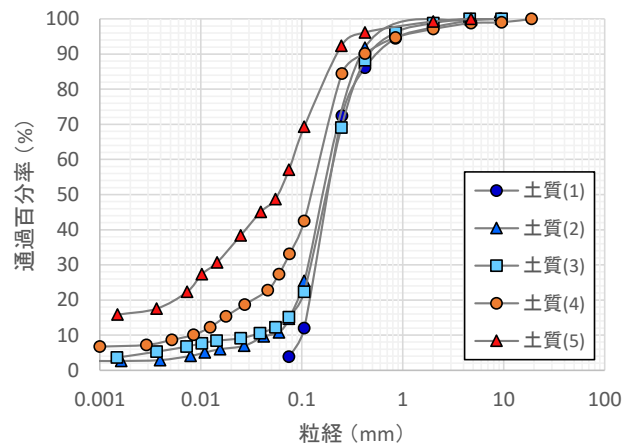


図-1 粒経加積曲線

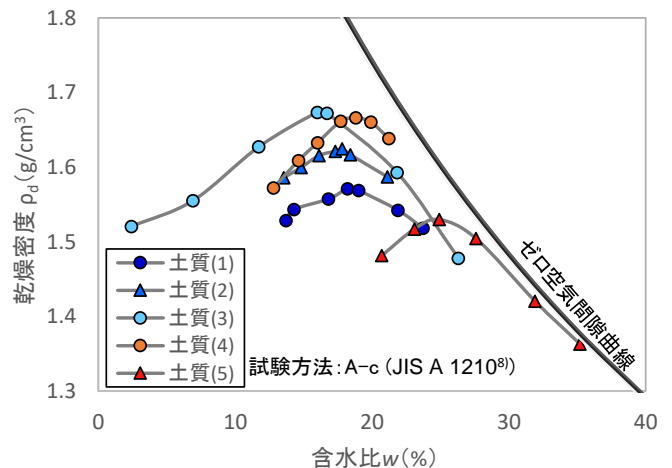


図-2 締固め曲線

表-2 締固め機械

機種	重量(ton)	起振力(kN)	線圧/接地圧 (kN/cm)/(kN/m ²)
振動ローラA	8.7	144	1.257(動線圧)
振動ローラB「振動あり」	11.05	226	1.323(動線圧)
振動ローラB「振動なし」	11.05	-	0.262(静線圧)
タイヤローラ	11.0	-	390(接地圧)
ブルドーザ10t	10.3	-	28(接地圧)
ブルドーザ8t	7.75	-	29(接地圧)



写真-2 使用した振動ローラの例
(振動ローラA)



写真-3 使用したタイヤローラの例



写真-4 使用したブルドーザの例
(10t)

0.1~0.2m、0.2~0.3mの3つの深度において、転圧後の盛土をサンプリングした。サンプリング試料は、JGS1613-2003「コアカッターによる土の密度試験方法」⁸⁾に基づき密度の計測を実施した。密度計測のためのサンプリングは、0、2、4、6、8、12、16回の転圧後に実施した。

強度や変形抵抗に関わる指標としては、地盤反力係数、加速度応答の計測を実施した。地盤反力係数は動的平板載荷試験機等を用いて計測した。動的平板載荷試験機を用いた地盤反力係数の計測では、転圧後の盛土上に重錐を落下させて、その重錐の衝突速度、衝突時の反力を計測した。衝突速度、衝突時の反力及び重錐の質量から地盤のバネ係数を算出したうえで、平板載荷試験による地盤反力係数 (K_{30}) との換算係数を乗じることで地盤反力係数を算出した。動的平板載荷試験機を用いた計測は、0、2、4、6、8、12、16回の転圧後に実施した。また、加速度応答は、CCVシステム⁹⁾等を用いて計測した。CCVシステムシステムを用いた加速度計測では、振動ローラA及び振動ローラB「振動あり」に搭載して転圧走行中、随時、ローラーの加速度応答値 (CCV値) を計測し表示値を記録した。

4. 実験結果

ここでは、紙面の都合上、土質(4)を概ね最適含水比(18.0%)の状態、振動ローラA、振動ローラB「振動あり」、振動ローラB「振動なし」を用いて転圧した実験結果について紹介する。

4.1 転圧回数と締固め度の関係

図-3に、振動ローラA、振動ローラB「振動あり」、振動ローラB「振動なし」を用いて転圧実験を実施した際の転圧回数と締固め度の関係を示

す。締固め度は、コアカッターによる密度計測の結果と表-1の最大乾燥密度から換算した。図中には、「道路土工-盛土工指針」における路体または路床部の日常管理値の目安値の締固め度90%、95%のラインを示した。

振動ローラAの締固め度については、転圧回数が2回または4回の時点で上~中層(深さ0~0.2m)で90%を上回るが、下層(深さ0.2~0.3m)では90%を下回っている。転圧回数が6回の時点の締固め度は、下層(深さ0.2~0.3m)も含めて90%を上回る結果となった。また、転圧回数8回以上では、全層において締固め度は緩やかな増加傾向を示すが、転圧回数16回の時点においても下層(深さ0.2~0.3m)は95%を上回ることにはなかった。

振動ローラBの締固め度については、上層(深さ0~0.1m)は振動の有無に関わらず、転圧回数4回で95%を上回る結果となった。一方で、下層(深さ0.2~0.3m)の締固め度に注目すると、「振動あり」の場合が転圧回数4回の時点で90%を上回り、転圧回数12回の時点で95%を上回ったのに対して、「振動なし」の場合では転圧回数4回以降は平衡状態となっており、90%を上回ることにはなかった。下層まで十分に締め固めるには、振動によってエネルギーを下層まで効果的に伝達させることが有効であることが確認できた。

4.2 転圧回数と地盤反力係数の関係

図-4に振動ローラ(振動ローラA、振動ローラB「振動あり」、振動ローラB「振動なし」)を用いて転圧実験を実施した際の転圧回数と地盤反力係数の関係を示す。地盤反力係数は、前述の動的平板載荷試験機を用いた計測の結果から換算した。全ての締固め機械において、転圧回数6回までは転圧回数の増加に対して地盤反力も増加する傾向

が見られる。一方で、転圧回数が8回以降になると、振動ローラAと振動ローラB「振動あり」のいずれもローラを振動させた実験ケースにおいては、転圧回数の増加に対して地盤反力係数は平衡状態または減少傾向となった。これは、過転圧となり地表面が一部乱された影響の可能性等が考えられる。

4.3 地盤反力係数と締固め度の関係

図-5に地盤反力係数と締固め度の関係を示す。地盤反力係数と締固め度は、0、2、4、6、8、12、16回の転圧後に計測した値で、締固め度は、全層の平均値で比較した。振動ローラB「振動なし」で、相対的に最も地盤反力係数と締固め度の相関が高く（相関係数0.87）、次いで振動ローラA（相関係数0.80）、振動ローラB「振動あり」（相関係数0.31）の順に地盤反力係数と締固め度の相関が低くなっていくことが確認できた。

4.4 加速度応答と締固め度の関係

図-6に振動ローラB「振動あり」で計測した加速度応答と締固め度の関係を示す。加速度応答は、CCV値を示す。加速度応答と締固め度は、0、4、6、8、12、16回の転圧後に計測した値で比較した。転圧実験では、加速度応答と締固め度の相関係数は、0.94という結果を得た。今回使用した地盤材料及び実験条件の下においては、加速度応答と締固め度は高い相関性を示すことが確認できた。また、前述した地盤反力係数は、基本的には加速度応答のCCV値と同様の物理量を計測しているが、前者は荷重の大きさが後者よりも小さく、地表面の状況を反映するため、両者の結果に違いが生じたと考える。

5. 盛土の締固め特性

図-7に本研究で実施した全ての盛土材料について、概ね最適含水比（土質(5)のみ最適含水比に対して湿潤側）で転圧実験した際の上層（深さ0~0.1m）と下層（深さ0.2~0.3m）の締固め度の関係を示す。本図の締固め度は、転圧回数2回以降の全ての計測結果を示す。また、図中には締固め度90%、95%のラインと、上層と下層の締固め度の比1:1、1:0.95、1:0.9のラインを示す。本図及び「4.1 転圧回数と締固め度の関係」より、冒頭で述べた下層まで十分に転圧が行われているかについては、以下の結果が得られた。

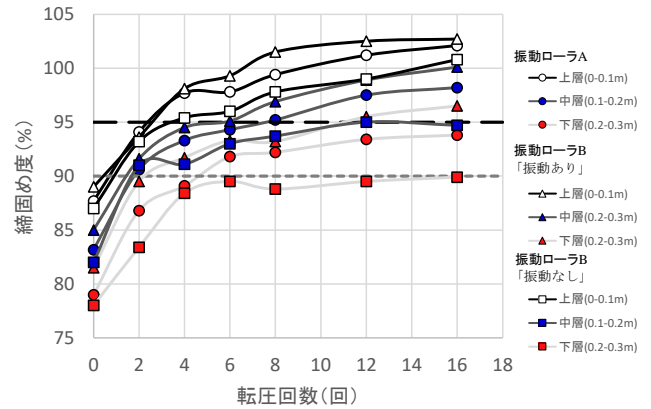


図-3 転圧回数と締固め度の関係

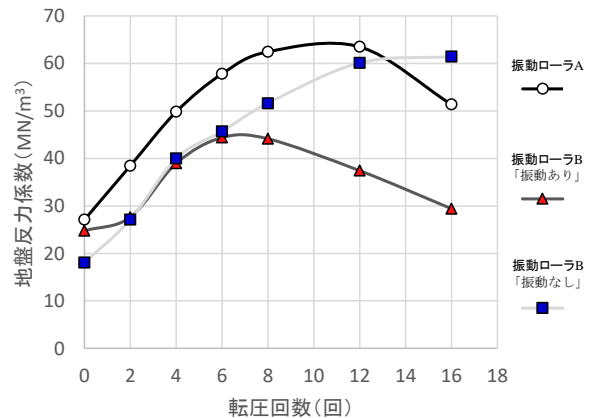


図-4 転圧回数と地盤反力係数の関係

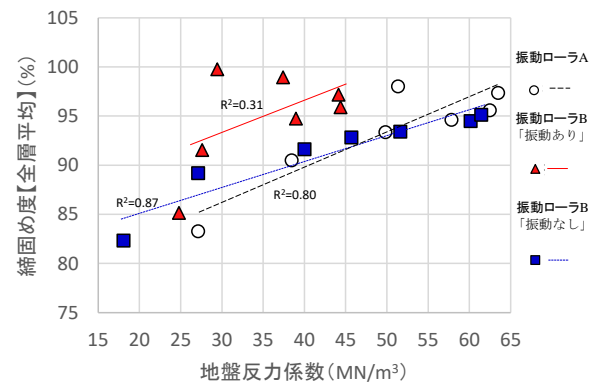


図-5 地盤反力係数と締固め度の関係

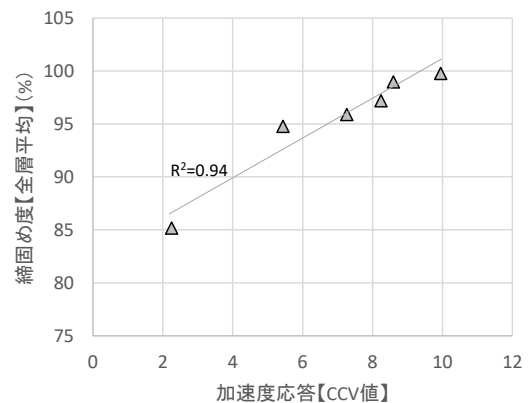


図-6 加速度応答と締固め度の関係

- ・下層の締固め度と深さ方向の締固め度の勾配は、盛土材料の細粒分に大きく左右される。
- ・比較的細粒分が少ない盛土材料（土質(1)～(3)）については、ブルドーザ以外の締固め機械を用いることで、転圧初期段階から下層でも概ね締固め度95%を上回ることができる。また、深さ方向の締固め度の勾配については、6回以上転圧した後の下層の締固め度が、上層に対して0～5%程度低下した値に収まる。
- ・比較的細粒分が多い盛土材料（土質(4)～(5)）については、振動ローラ〈振動あり〉で転圧することで、概ね締固め度90%を上回るが、下層も含めて95%まで締固めるのは困難である。

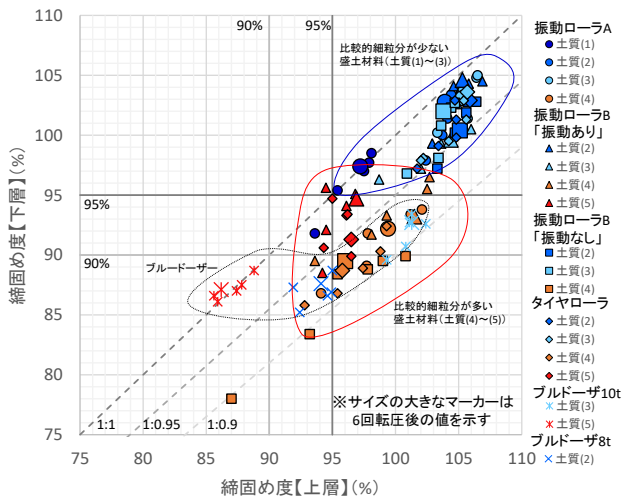


図-7 上層と下層の締固め度の関係

また、振動ローラ〈振動なし〉やタイヤローラを用いる場合は、特に入念な締固めが必要である（実験では、12～16回の転圧により概ね下層も含めて締固め度90%を達成）。また、深さ方向の締固め度の勾配については、6回以上転圧した後の下層の締固め度が、上層に対して10%程度低い値となるケースがあり、細粒分が少ない盛土材料と比較して勾配が大きくなる傾向がある。

・ブルドーザは、いずれの盛土材料に対しても、下層だけでなく上層も締固め度95%を上回るのは困難である。ブルドーザ10tと土質(3)を用いたケースでは、転圧回数4回以上で上層及び下層ともに90%を上回ったが、深さ方向の締固め度の勾配については、6回以上転圧した後の下層の締固め度が、上層に対して8%程度低い値となる。

表-3に、以上の結果を整理した表を示す。

盛土の強度・変形抵抗については、「4.2 転圧回数と地盤反力係数の関係」、「4.3 地盤反力係数と締固め度の関係」、「4.4 加速度応答と締固め度の関係」より以下の結果が得られた。

・条件（転圧実験では、土質(4)を最適含水比で振動ローラAや振動ローラB「振動なし」により転圧した条件）によって、締固め度と地盤反力係数は高い相関関係を示す。

表-3 締固め特性

	振動ローラA	振動ローラB 「振動あり」	振動ローラB 「振動なし」	タイヤローラ	ブルドーザ 10t	ブルドーザ 8t
土質(1) 【 $F_c=4.3\%$, $w_{opt}=18.2\%$ 】	1.00 【 $w_{test}=16.3\%$ 】	-	-	-	-	-
土質(2) 【 $F_c=14.8\%$, $w_{opt}=17.8\%$ 】	0.98 【 $w_{test}=17.3\%$ 】	0.98 【 $w_{test}=17.0\%$ 】	0.97 【 $w_{test}=17.2\%$ 】	0.97 【 $w_{test}=17.3\%$ 】	-	0.93 【 $w_{test}=17.2\%$ 】
土質(3) 【 $F_c=15.3\%$, $w_{opt}=16.0\%$ 】	0.99 【 $w_{test}=15.8\%$ 】	0.95 【 $w_{test}=15.9\%$ 】	0.98 【 $w_{test}=16.4\%$ 】	0.98 【 $w_{test}=16.1\%$ 】	0.92 【 $w_{test}=17.1\%$ 】	-
土質(4) 【 $F_c=33.4\%$, $w_{opt}=18.8\%$ 】	0.92 【 $w_{test}=18.2\%$ 】	0.94 【 $w_{test}=18.3\%$ 】	0.89 【 $w_{test}=18.0\%$ 】	0.93 【 $w_{test}=17.6\%$ 】	-	-
土質(5) 【 $F_c=57.1\%$, $w_{opt}=24.9\%$ 】	-	0.98 【 $w_{test}=28.2\%$ 】	-	0.99 【 $w_{test}=28.3\%$ 】	1.00 【 $w_{test}=35.5\%$ 】	-

表中の数字は、上段：上下層の締固め度の比率（=下層の締固め度/上層の締固め度） 下段：試験時含水比（ w_{test} ）

また、表中のセル色については、上～下層の締固め度の数値に応じて以下のとおり分類した。

- 上～下層にわたり締固め度が95%以上
- 下層で締固め度が90%以下の点が数点あるが、上～下層にわたり締固め度が概ね90%以上
- 上層では締固め度が概ね90%以上、下層では締固め度が90%以下が多数
- 上～下層にわたり締固め度が90%以下
- 未実施

- ・上記の条件では、設計上要求すべき強度・変形抵抗を満たしているかどうかは、従来の密度管理をすることで管理できる。
- ・条件（転圧実験では、土質(4)を最適含水比で振動ローラB「振動あり」により転圧した条件）によって、締固め度とローラの加速度応答は高い相関係数を示す。
- ・上記の条件では、ローラの加速度応答値を計測することで、本来盛土に求める強度・変形抵抗を直接的に計測できるほか、密度についても間接的に密度の面的分布を管理することができる。

6. 今後の課題

本研究では、大型の締固め機械を用いた転圧実験により、各種盛土材料の締固め特性の検証を行った。本研究により明らかになった課題は、以下の通りである。

- ・「5. 盛土の締固め特性」で示した通り、6回以上転圧した後の下層の締固め度が、上層に対して最大で10%程度低い値となった。これらの深さ方向の締固め度の勾配が盛土の性能に与える影響について検証する必要がある。
- ・「4.2 転圧回数と地盤反力係数の関係」で示したとおり、ある条件では転圧回数の増加に対して地盤反力係数が低下する傾向が見られた。また、「4.3 地盤反力係数と締固め度の関係」で示したとおり、ある条件では地盤反力係数と締固め度の相関が低くなることが確認できた。これらは、過転圧による表層の乱れ等による、盛土の不均質化が影響している可能性等が考えられる。今後、強度・変形抵抗を直接管理する、または密度管理により設計上要求すべき強度・変形抵抗を満足しているとみなすことのできる適用範囲を明らかにするためには、現象の解明と地盤反力係数と密度との相関性の変曲点を把握する必要がある。
- ・転圧実験の結果より、締固め度が100%を超える観測結果が複数得られている。締固め機械の性能の向上等により、現場と室内試験の締固めエネルギーの間に乖離が生じているためと考えられる。大型締固め機械の締固めエネルギー等を適切に反映した品質管理手法及び基準値を設定する必要がある。

- ・他現場で発生した不均質な材料により盛土を構築する事例も多い。不均質な材料を用いた場合でも一定の要求性能を確保出来るよう、不均質な材料など実験条件を多様化させて検証を行う必要がある。

謝 辞

本報文の作成にあたっては、「盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する研究」（平成23～25年度）の共同研究メンバーに多大なるご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松尾 修：道路盛土・河川堤防の設計と締固め土の締固めと管理、基礎工、7月号、2009
- 2) 道路土工-盛土工指針（平成22年度版）、社団法人日本道路協会、2010
- 3) 道路土工-施工指針、社団法人日本道路協会、1986
- 4) 土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」解説、土木学会土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会、2000
- 5) 石井垣久、三嶋信雄、高梨健一：締固め施工機械による土の締固め特性、第22回土質工学研究発表会概要集、pp.1683～1684、1987
- 6) 益村公人、三嶋信雄、三浦清一：厚層締め固めによって生じる道路盛土内の密度勾配と圧縮沈下挙動に及ぼす影響、土木学会論文集No.672/VI-50、pp.155～167、2001
- 7) 益村公人、三嶋信雄、三浦清一：密度勾配を考慮した道路盛土の安定評価と品質管理基準に関する研究、土木学会論文集No.714/VI-56、pp.141～154、2002
- 8) 地盤調査の方法と解説、公益社団法人地盤工学会、2013
- 9) 横田聖哉、吉田武男、藤井弘章、内山恵一：振動ローラの加速度を利用した締固め管理の検討-大規模土工における情報化施工に関する研究(3)-、第37回地盤工学研究発表会概要集、pp.1321～1322、2002

藤田智弘



土木研究所地質・地盤研究グループ施工技術チーム 研究員
Tomohiro FUJITA

宮武裕昭



土木研究所地質・地盤研究グループ施工技術チーム 上席研究員
Hiroaki MIYATAKE