

論文 土を混和したセメントモルタルの強度発現性に関する研究

井上 真澄^{*1}・平尾 和洋^{*2}・高木 宣章^{*3}・児島 孝之^{*4}

要旨：本研究は、意匠性(視覚的テクスチャー)と強度を有する壁材料として現場発生土を混和したコンクリートの適用性を検討するものである。土をコンクリートに混和した場合の配合設計手法を確立するための基礎データを得ることを目的として、土の粒度組成および配合要因がセメントモルタルの強度に及ぼす影響について実験的に検討を行った。土の細粒分含有率の変化により圧縮強度は異なり、高い相関が得られた。特に、細粒分含有率が 0~80% の範囲では、細粒分含有率の増加に伴い圧縮強度は増加した。

キーワード：意匠壁材料, 土, 細粒分含有率, 配合, 圧縮強度

1. はじめに

京都のような歴史都市において将来的な地域防災を考える場合、既存の都市的コンテクストを維持したまま文化財周辺の防災力を向上させることが必要である。この際、水幕防火装置や交通情報誘導システム・消防設備の設置に際しては、1)既存の町並みに調和した伝統的意匠と2)大規模災害に耐えうる耐久性能(防火力・耐震力)の両者を両立した構造物として実現することが求められる。

防火性能をベースに耐火力ある意匠壁材料を開発し、さらに建築物規模の耐震基準を満足する性能を有するための技術的方策を探るためには、まず意匠壁体のベースになる材料の選定が重要となる。そのベースとしては、一つにコンクリートが挙げられる。コンクリートは強度特性と耐久性能に優れており、防火壁体としては最適な材料であるが、その仕上げ面は冷たく無機質な印象を与えやすい。そこで、コンクリートの混和材料として現場で採取できるような土の適用性に着目した。土が本来有している色や土に含まれる骨材の色といった土の素材感をコンクリートに混和した場合においても表現でき

れば意匠性が期待できる。また、そのほとんどが廃棄される現場採取土をコンクリート用骨材として適用できれば、資源の有効利用の観点から有意義であると考えられる。

一方、强度的な面から考えた場合、土を用いたコンクリートは、土に含まれる粘土、シルトといった微粒分や有機物の影響により強度が著しく低下することが報告されている^{1),2)}。また、その適用例は地盤改良分野での利用に限られており、構造体への適用が困難であるのが現状である。土の物性がコンクリートの力学的特性に及ぼす影響については、数多くの報告^{3),4),5),6)}があるもののそのほとんどは地盤改良目的であるため、強度レベルは2~3N/mm²程度と低く、構造体を想定した強度レベル(10N/mm²以上)での検討例は非常に少ない。

本研究では、土を混和したコンクリートの意匠壁材料への適用を念頭に置き、土をコンクリートに混和した場合の配合設計手法を確立するための基礎データを得ることを目的としている。強度に影響を与えると考えられる要因の中で土の粒度組成および配合要因に着目し、セメントモルタルの強度に及ぼす影響について実験的に

*1 立命館大学 COE 推進機構ポスドクトラルフェロー 工博 (正会員)

*2 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科助教授 工博

*3 立命館大学 理工学部環境システム工学科教授 工博 (正会員)

*4 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科教授 工博 (正会員)

検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験要因

珪砂，珪石粉，粘土を原材料として人工的に粒度を調整した土(以下，模擬土と称す)を作製し，同一配合および同一フレッシュ性状のもと供試体を作製し，圧縮強度試験を行った。また，同一粒度を有する模擬土に対して水セメント比，セメント土比を変化させた供試体も作製し，配合要因が強度に及ぼす影響の検討も行った。

表-1 に実験要因を示す。模擬土には粒度組成の異なる計 12 種類の土を作製した。水セメント比(W/C)は，75，100，125%の3水準，セメント土比(C:S₀)は水セメント比75%の場合 1:2，1:2.5，1:3，水セメント比 100%の場合 1:3，1:3.5，1:4 の各々3水準変化させた。水セメント比 125%は 1:3のみとした。練り混ぜ後のフレッシュ特性は，フロー値と空気量で管理した。目標フロー値は，W/C=75%で 180±20mm，W/C=100，125%では

表-1 実験要因

要 因		仕 様
模擬土の種類		12 種類
現場土の種類		4 種類
配合 要因	水セメント比 [W/C]	75, 100, 125%
	セメント土比 [C:S ₀]	W/C=75%; 1:2, 1:2.5, 1:3 W/C=100%; 1:3, 1:3.5, 1:4 W/C=125%; 1:3

200±20mm，目標空気量は全配合で 4±1%とした。圧縮強度試験は，材齢 28 日で実施した。

また，模擬土以外に現場より直接採取した土(以下，現場土と称す)を 4 種類用意し，模擬土と同様の方法により供試体の作製と圧縮強度試験を実施し，模擬土との比較検討も行った。

2.2 使用材料

表-2 に使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを，模擬土は宇部産の珪砂と珪石粉そしてカオリン粘土を使用した。

表-3 に模擬土の粒度構成を，表-4 に現場で採取した土の物理・化学的性質を示す。本実験では，モルタルを対象としたため，各現場土は 5mm ふるいを通過するもののみ使用し，各種物

表-3 模擬土の粒度構成

種類	粒度組成			細粒分含 有率 S _{fg} (%)	曲率係数 U _c '
	粘土	シルト	砂		
1	0	3	97	3	1.03
2	3	15	82	18	1.81
3	7	26	67	33	1.60
4	10	38	52	48	1.65
5	15	45	40	60	0.83
6	13	50	37	63	1.96
7	17	61	22	78	1.94
8	20	63	17	83	1.31
9	22	65	13	87	1.10
10	24	67	9	91	1.08
11	27	68	5	95	1.19
12	30	70	0	100	1.30

注) S_{fg} : 土中の粘土とシルトの含有率

U_c' : (D₃₀)²/(D₁₀×D₆₀)

表-2 使用材料

材 料		主な性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 3260cm ² /g)
模 擬 土	珪砂	S ₀₁ 山口県宇部産 (密度 2.60g/cm ³ ，SiO ₂ : 95%以上，新特 5 号 A : 0.2~1.7mm，6 号 : 0.07~0.6mm，6 号 A : 0.4mm 以下，7 号 : 0.2mm 以下)
	珪石粉	S ₀₂ 山口県宇部産 (密度 2.60g/cm ³ ，SiO ₂ : 94%以上，比表面積 3900±300cm ² /g)
	粘土	S ₀₃ カオリン粘土 (密度 2.61g/cm ³)
混 和 剤	A _{d1}	高性能 AE 減水剤 (主成分 : ポリカルボン酸系特殊高分子界面活性剤)
	A _{d2}	AE 助剤 (主成分 : ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸ナトリウム塩)
	A _{d3}	消泡剤 (主成分 : 非イオン界面活性剤)

表-4 現場土の粒度構成および物理・化学的性質

種類	土粒子密度 (g/cm ³)	塑性指数 I _p	粒度組成 (%)			細粒分含有率 S _g (%)	曲率係数 U _c '	pH	強熱減量 i _g .loss(%)	有機物 含有量(%)
			砂	シルト	粘土					
A	2.64	NP	8.4	10.1	81.5	18.5	9.70	6.5	4.36	0.02
B	2.63	NP	4.3	9.1	86.6	13.4	2.73	6.7	1.54	0.02
C	2.57	26.7	17.6	27.3	55.1	44.9	2.45	5.6	2.22	0.1
D	2.54	NP	1.0	11.5	87.5	12.5	2.25	8.4	1.88	0.03

性試験を実施した。図-1 に全試料の粒度曲線を示す。

2.3 供試体の作製方法および試験方法

供試体作製方法と試験方法を以下に示す。

(1) 土の準備

炉乾燥機(105±5°C)内で 24 時間、一定質量になるまで乾燥させた。配合計算に際しては、粘土、シルトを含む骨材の表乾状態の把握が困難であるため、骨材は絶乾状態で計算した。土の含水量は、配合上の単位水量 W に含まれるとした。

(2) 練混ぜと打込み

常温まで放冷した炉乾燥試料を用いて、所定の配合をもとに計量を行い、セメントとともにバッチに投入して 30 秒間の空練り後、水と混和剤を投入し 3 分間練混ぜを行った。練混ぜ後、φ50×100mm の鋼製型枠を用い、モルタルを 2 層に分けて型枠に詰め、その各層を突き棒で 25 回突いた。なお、突き棒によってできた穴が残る場合は、突き終わった後、型枠を床に当てて上下振動を与えた。

フロー値と空気量は、混和剤を用いて調整した。W/C=125%, C:S₀=1:3 の模擬土 1~6 は材料分離を示し、現場土 C は W/C=75%, C:S₀=1:3 および W/C=100%, C:S₀=1:4 の配合で練混ぜが困難であり作製不可能であった。また、W/C=75%, C:S₀=1:3 の模擬土 9~12 はフロー値が 150 未満を示したが、それ以外のモルタルでは目標フロー値と空気量を満たした。

(3) 養生方法

打設後、型枠上面をガラス板で覆い、2 日間恒温恒湿室(20±1°C, RH90±5%)中に静置し、その

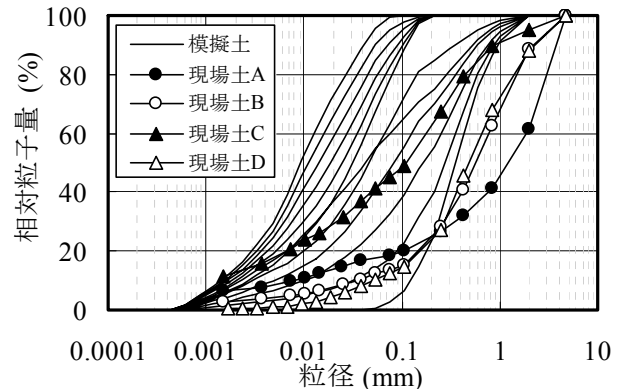


図-1 模擬土および現場土の粒度曲線

後脱型し強度試験材齢まで水中(20±1°C)で養生した。

(4) 圧縮強度試験方法

JSCE-G 506 1999 「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法」に準じて材齢 28 日で圧縮強度試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 土の粒度組成の影響

(1) 細粒分含有率と圧縮強度

図-2 に模擬土中の細粒分含有率と材齢 28 日圧縮強度の関係を示す。なお、細粒分とは、土の分類上粒径で 75 μm 以下(粘土分とシルト分)のものである。水セメント比 75%と 100%の場合、各材齢において圧縮強度は細粒分含有率との相関関係が確認できる。細粒分含有率が 0~80%の範囲では、細粒分含有率の増加に伴い圧縮強度もほぼ線形的に増加し、80%付近で最大値を示した。しかし、80%以上になると圧縮強度は逆に低下する傾向にある。圧縮強度が最大値を示す細粒分含有率は、セメント土比に関わらず、約 80%

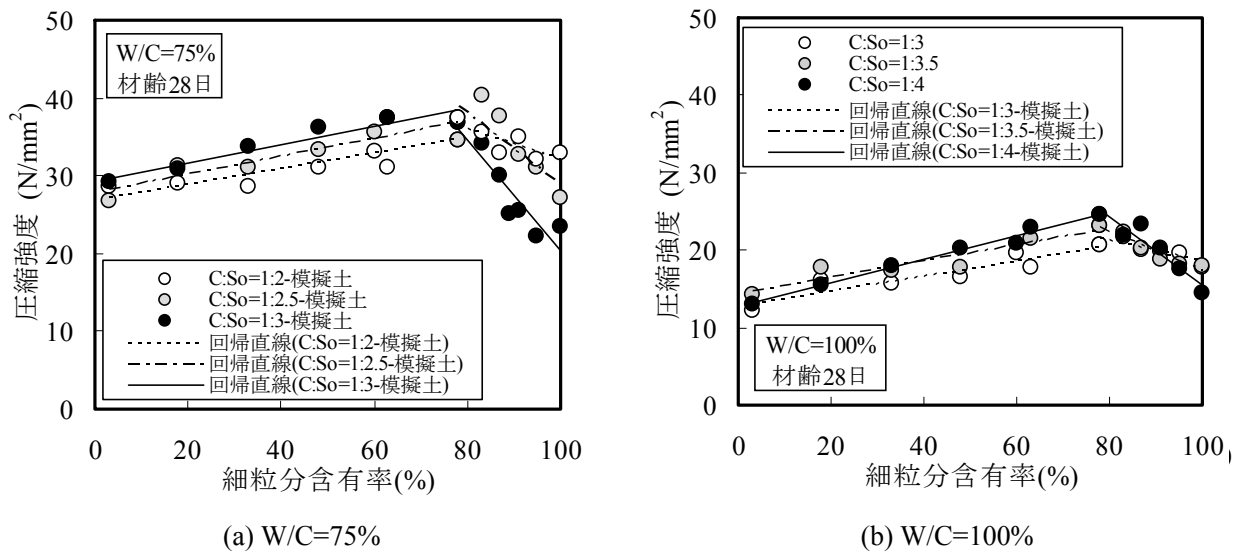


図-2 細粒分含有率と圧縮強度の関係

表-5 細粒分含有率(S_{fg})と圧縮強度(f'_c)に関する回帰結果

W/C (%)	C : S_o	S_{fg} の範囲 : 0~80%			S_{fg} の範囲 : 80~100%		
		α	β	相関係数	α	β	相関係数
75	1 : 2	0.101	26.9	0.72	-0.200	52.1	0.65
	1 : 2.5	0.117	27.8	0.78	-0.454	74.3	0.60
	1 : 3	0.116	29.3	0.90	-0.711	91.5	0.86
100	1 : 3	0.096	12.8	0.86	-0.131	31.7	0.73
	1 : 3.5	0.107	14.3	0.88	-0.259	43.1	0.93
	1 : 4	0.151	12.8	0.98	-0.443	59.8	0.89

注) $f'_c = \alpha S_{fg} + \beta$, f'_c : 圧縮強度(N/mm²), S_{fg} : 模擬土の細粒分含有率(%)

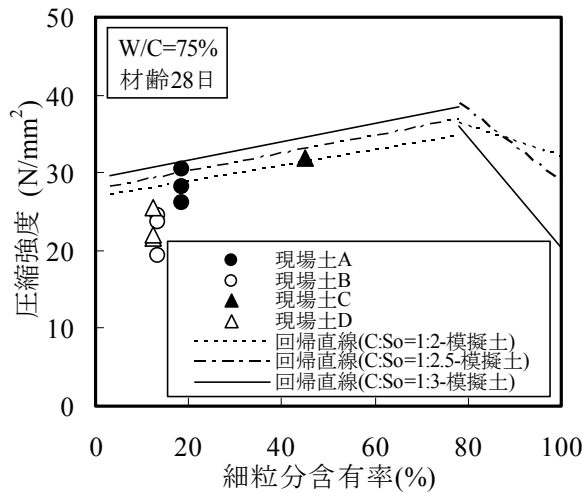
付近であった。一般に、セメント土比が一定の場合、細粒分が多くなると混和剤で調整しない場合には所定の流動性を得るための水セメント比が大きくなり、強度低下を招くと考えられる。本実験では、水セメント比、セメント土比といった配合条件は一定のもとで、土の粒度のみを変化させ、混和剤の使用によりフレッシュ性状を管理した。配合条件とフレッシュ性状が一定であれば、ある程度までの細粒分はモルタル組織を緻密にする方向に働き、強度増加をもたらすものと考えられる。

一方、W/C=125%の場合は、細粒分含有率が80%以下の模擬土で目標フロー値を満足せず、材料分離が生じたため、6種類の模擬土のみの検討となった。この範囲では細粒分含有率に関わらず、

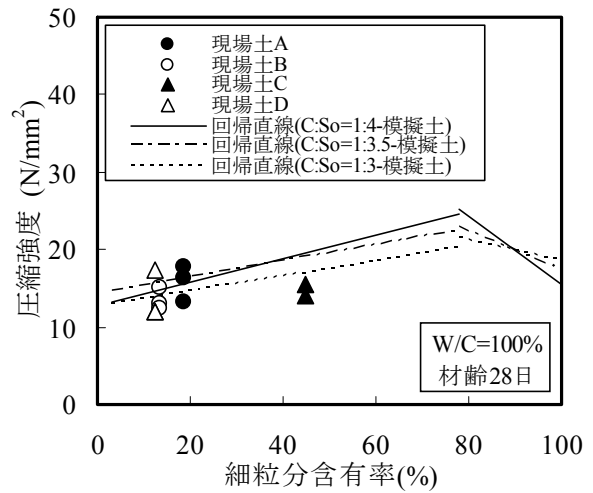
圧縮強度は 10.4~11.4N/mm² とほぼ一定値を示しており、水セメント比が大きくなると細粒分含有率の影響は小さくなった。

(2) 直線回帰式

モルタルの強度発現が模擬土の細粒分含有率で80%を境に傾向が変化する点に着目し、図-2中には各配合の試験結果を直線近似したものも示す。表-5にその回帰式と相関係数を一覧として示す。水セメント比75%で細粒分含有率(S_{fg})が80~100%の範囲では相関性が悪い回帰式があるものの、それ以外の回帰式では0.72~0.98と比較的相関性が良いと判断される。細粒分含有率(S_{fg})が0~80%の範囲では幾分の変動はあるが、 α は配合条件に関わらずほぼ同程度の値を示した。

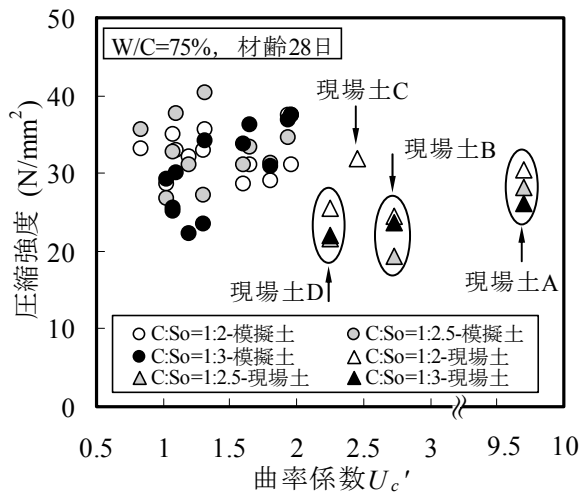


(a) W/C=75%

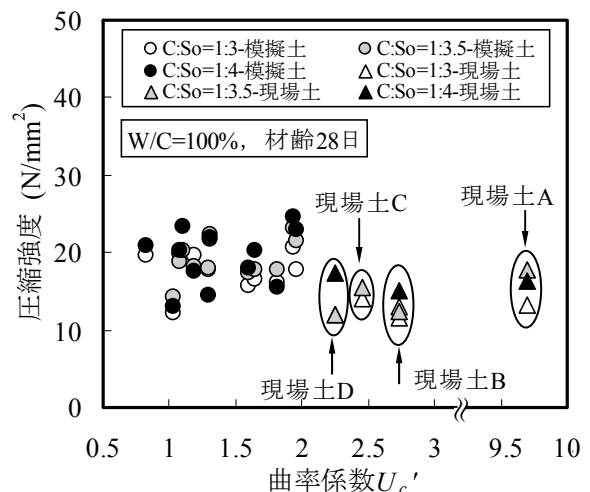


(b) W/C=100%

図-3 模擬土と現場土の圧縮強度の比較



(a) W/C=75%



(b) W/C=100%

図-4 曲率係数 U_c' と圧縮強度の関係

(3) 模擬土と現場土の比較

図-3に表-5の模擬土より得られた回帰直線と現場土を用いた供試体の圧縮強度試験結果をプロットした。一般に、現場土ではセメントの水和反応に支障を来たす有機物の含有により強度低下が懸念される。しかし、本実験で使用した現場土は、有機物含有量がともに小さな値であり、水和反応に支障を来たすような化学的特性などはもたないことから、有機物含有量の影響は考慮せず以下考察を行う。

W/C=75%の現場土BとDを除き、現場土を用いた供試体の圧縮強度は、幾分の変動はあるも

の回帰直線より推定される強度とほぼ一致した。W/C=75%の現場土BとDは、回帰直線より幾分小さな値を示した。

図-4には土の曲率係数 U_c' と圧縮強度の関係を示す。曲率係数 U_c' は、粒度曲線の形状を示すものであり、 U_c' が大きいと粒度曲線は下にふくらんだ形になり、 U_c' が小さいと上にふくらんだ形になる。図-1に示した粒度曲線からもわかるように、現場土は模擬土に比べ比較的粒径の大きい砂の割合が多く、曲率係数が大きい。粒径の大きい粗い砂が多くなると骨材の総表面積が減少し、骨材とペーストとの界面における応力

が増大するため、強度低下を示したものと推察される。従って、強度を予測する上では、細粒分含有率とともに土の粒度曲線の形状も考慮する必要があると考えられる。

3.2 配合要因の影響

(1) 水セメント比(W/C)と圧縮強度

図-5 にセメント土比 $C:S_0=1:3$ における水セメント比と圧縮強度の関係を示す。全体の傾向として、一般のモルタルと同様、水セメント比の低下に伴い、圧縮強度は小さくなった。細粒分含有率 80%で模擬土を区分した場合、細粒分含有率が 80%以上になると水セメント比の低下による強度増加が若干鈍る傾向にあった。

(2) セメント土比($C:S_0$)と圧縮強度

図-2 の実験値のプロット点と回帰直線に着目する。細粒分含有率が 80%以下の範囲では、セメントに対する土の質量比が増加するに伴い圧縮強度は増加する傾向にあり、 $W/C=100\%$ では勾配の変動も見られる。しかし、その差異は小さいものであり、セメント土比が圧縮強度に及ぼす影響は比較的小さいものと考えられる。細粒分含有率が 80%以上では、ばらつきが大きく明確な傾向は得られなかった。

4. 結論

本研究では、土をコンクリートに混和した場合の配合設計手法を確立するための基礎データを得ることを目的として、土の粒度組成および配合要因がセメントモルタルの強度に及ぼす影響について実験的に検討を行った。本研究より明らかになった点を以下にまとめる。

- (1) 水セメント比が 75~100%では、土の細粒分含有率の変化により圧縮強度は異なり、材齢に関わらず高い相関が得られた。
- (2) 配合要因とフレッシュ性状が一定の場合、細粒分含有率が 0~80%の範囲では、細粒分含有率の増加に伴い圧縮強度は増加した。
- (3) 模擬土より得られた強度回帰式から現場土を用いた場合の強度を推定するには、細粒分含有率とともに土の粒度曲線の形状といっ

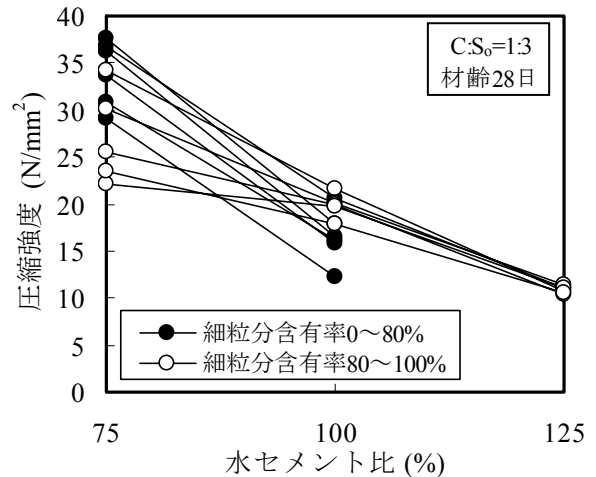


図-5 水セメント比と圧縮強度の関係

た要素との相関について検討が必要である。

参考文献

- 1) (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3版), pp.27-40, 2003.9
- 2) (社)日本材料学会:ソイルミキシングウォール(SMW)設計施工指針(改訂版), pp.4-10, 2002.3
- 3) 桜井 宏, 田中 満, 鈴木明人:砂中の細粒分含有率の変化と貧配合モルタルの強度特性及び配合設計に関する研究, セメント技術年報, No.40, pp.154-157, 1986
- 4) 藤井 衛, 甚野慶右, 伊集院 博:普通ポルトランドセメントを用いたソイルセメントの一軸圧縮強さについて, 日本建築学会構造系論文報告集, No.441, pp.9-16, 1992.11
- 5) 川村政史, 笠井芳夫:粘性土および砂の見掛けの表乾状態に基づき配(調)合したソイルセメントコンクリートの強度, 密度に関する実験研究, コンクリート工学論文集, Vol.8, No.1, pp.215-224, 1997.1
- 6) 三井 隆, 吉川 正, 池田昭彦, 青山 要, 中川浩二:細粒分含有率が異なる改良土の室内配合試験による基礎的研究, 土木学会論文集, No.693/VI-53, pp.117-129, 2001.12