

安定処理土の含水比および密度の算定法に関する提案

NEW CALCULATION METHOD OF WATER CONTENT AND DENSITY FOR STABILIZED SOIL

下村幸男*

Sachio SHIMOMURA

Stabilized soil has not been treated as general soil material, and a large safety factor is included in the design and construction of structures. As the soil material, the mechanics of the stabilized soil is not fully recognized yet.

In this paper, some calculation methods for water content and density for compacted stabilized soil are proposed. The suitability of these methods has been verified by many tests, which were carried out in our laboratory for many projects on the embankment work of airports.

These proposed methods are proved to be useful for estimating the water content and density of the compacted stabilized soil using cement or lime.

Key Words: lime, cement, compaction, water content, density, volcanic ash, cohesive soil

1. 設計・施工の現状と問題点

盛土材料が、十分な転圧が出来ないような自然含水比の高い不良土の場合には、施工性を改善し盛土の品質を高めるため、セメントや生石灰を混合する安定処理工法を施す。安定処理工法の設計のためには、その土に適合する処理材の種類と、混合量を設定するための配合試験を行う必要がある。設計に必要な試験パラメータは表 - 1 のとおり多く、これらを全てパラメータとした試験を実施すると非常に煩雑なものになる。そのため通常は、工事規模や構造物の重要度を勘案した経験的判断により、いくつかのパラメータに絞って行っている。主に着目されるのは工事費に直接的に影響する処理材の種類と混合量であり、処理材として普通セメント、高炉セメント、または生石灰が用いられる。また、対象土としては代表試料の含水比（1種）に対して標準締固めエネルギー（1Ec）における一軸試験または設計CBR試験を行うのがほとんどである。

フィルダムや空港盛土など土構造物の設計においては、材料特性（粒度分布・含水比）の変動に伴う出来上がり品質（密度・強度）の変動を考慮した設計土質定数の設定、

表 - 1 安定処理配合試験のパラメータ

大区分	中区分	工学的要因・土質試験
対象土	土の種類	粒度分布、土粒子の品質・密度
	土の状態	初期含水比
処理材	種類	セメント系；普通ポルトランドセメント、高炉セメント、各種特殊セメント 石灰系；生石灰、消石灰など
	混合量(比)	乾燥重量比、単位(体積)添加量
締固め		締固めエネルギー、締固め特性・締固め度・締め固め試験
養生	養生方法	空气中養生、水中養生および両者の組み合わせ
	養生時間	材令7日、14日、28日など
効果確認方法	トラフィカビリティ	コーン貫入試験
	せん断強度	一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、一面せん断試験など
	圧縮性	静的圧密試験、繰り返し圧密試験など
	支持力	設計CBR試験

および設計品質が現場で確実に得ることができるような適切な管理基準値の設定に必要な一連の試験を行う。しかし、安定処理土の設計において同様の検討を行うことは希である。この原因は以下に要約される先入観が未だに強いことによると思われる。

現場に於いて処理材の混合を室内試験と同等に均一化することが難しい。

加えて対象土の特性にはばらつきがあるため均一化はさらに難しい。

* 総合技術センター

そのため、一般の土質材料と同じ試験を行っても現場に反映させることが難しい。

それよりも、これらを不明確要因として扱い、混合量を割増すなど安全率を高くして安全側の設計・施工をする方が現実的かつ安心出来る。

以上のように安全側設計を原則とする考えにより、処理土の強度としては粘着力(c)のみを評価し、摩擦成分()を設計上は無視した上に、さらに経験的に得られた(現場品質) 0.3×(室内品質)を用い、割増後の混合量を試験値の2~3倍としているのが実状である。このように安定処理工法には、値として現れない安全率も含めて、過大と思われる程の安全率を内包している。

しかし近年では強力で高性能なスタビライザーなど混合専用機を用いた入念な施工により、現場品質 室内品質にまで均一化出来た事例もあり¹⁾、適切な施工方法と品質管理により混合の不均一性を改善することが出来る状況にある。従って、安定処理土の品質を左右する含水比や締固め度などの変動を一般の土質材料と同等に扱うことにより、大きな工費縮減効果が期待出来る。

2. 処理土を土質材料と同等に扱うための必要事項

土質材料の設計・品質管理の基本は、含水比と締固めエネルギーにより密度が決まり、更に自重と載荷重による圧密作用により強度が一定の比率で増加するという土の性質を計画的に応用することにある。

そのためには 土質定数により含水比、密度を表現できること 含水比、密度、および付随するパラメータと改良目標とする力学特性値の相関が明瞭に得られることが前提となる。しかし安定処理土の現状の実務的な扱いにおいては、含水比を概算推定するに留まり、密度を土質定数により表現する方法はない。そのため初期含水比や混合率毎に試験を行って求めるしか方法がない。

以上の問題提起に対して、ここでは先ず に関して、処理土の含水比および密度を、無処理土に対する締固め特性に基づいて上記二つのパラメータを算定する式を提案するものである。

3. 考え方と提案式

紙面の都合により詳細な式の誘導過程については割愛させて頂くとして、考え方を以下に記した。算定式は、セメントおよび消石灰で代表される発熱を無視する場合と、生石灰で代表される水和反応熱を伴う場合の2系統に分け、以下の仮定条件の元で組立てた。

転圧による締め固めのメカニズムは無処理土と同じとする。この理由は安定処理工法の混合率(土と処理材の乾燥重量比)が一般的には最大でも20%程度であり、微粉体のセメントまたは消石灰が混入されても締め固めのメカニズムは無処理の状態にほぼ同じと考えられることによる。

安定処理土の構成物質は土粒子、セメントまたは消石灰、水、および空気とする。

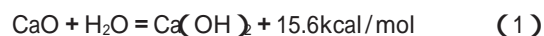
混入した処理材の一部は、無処理土の締固め状態を原点として、土粒子と処理材の粒子が入れ替わり、残りは土粒子間に入り込むものとする。従って、体積は無処理土と同じであるが、土粒子と入れ替わった処理材との比重差の分および土粒子間に入った処理材粒子の分だけ重量が変化し、単位体積重量が変化するものとする。

処理材と土(土粒子、水)の化学的な反応による粒子重量の変化は無視できるとする。

(2) 生石灰処理の場合

セメントまたは消石灰混合の場合の仮定条件 、 、 はそのまま同じとする。従って密度および含水比の算定式はそのまま応用できる。しかし生石灰の場合には水和反応を考慮する必要があり仮定 は成立せず、生石灰が水と反応した後の状態がセメントの場合と同じとすることが出来る。生石灰と水の反応は式(1)のとおりである。

そのため、先ず生石灰が消石灰に変化する水和反応後の状態を算定した上で、セメント・消石灰の場合の式が適用できるとする(生石灰の混入によりコンシステンシーなど土性の変化があるため、処理土と未処理土の締め固めのメカニズムとは厳密には同じでないが、推定精度を左右する程の違いはないと考えている)。具体的に言うと、混合後の土のみの締め固め密度を想定するに際して、反応熱が少ないセメントや消石灰では処理前の土の含水比を w_0 としてその時の締め固め試験による密度を ρ_0 とするが、生石灰の場合には締め固め前に水和反応と反応熱による水分減少を考慮する。そのため、処理土の密度の算定に用いる土のみの密度(ρ_{s0})は、反応後の土のみの含水比(w_0')に対応した未処理土の密度を当てはめるものとして、未処理土の締め固め曲線により設定する。



分子量	56	18	74
密度	3.3	1	2.2
重量比	1	0.321	1.321

(1) セメントまたは消石灰処理の場合

表 - 2 安定処理土の含水比・密度の算定式一覧表

処理特性 処理材の例	水和反応を伴わない				水和反応を伴う				
	セメント、消石灰		生石灰		セメント、消石灰		生石灰		
	縮固め前 (混合土)	縮固め後 (混合土)	縮固め前 (反応後土のみ)	縮固め前 (混合土)	縮固め後 (混合土)	縮固め前 (混合土)	縮固め後 (混合土)		
算定条件 蒸発率 (m) 注1	含水比 (ω _{mix}) ^{注4}	含水比 (ω _i) ^{注5}	含水比 (ω ₀) ^{注6}	含水比 (ω ₀) ^{注7}	含水比 (ω ₀) ^{注7}	含水比 (ω _{mix})	含水比 (ω _i)	乾燥密度 (ρ _{di})	
考慮なし m=0 注2	$\frac{\omega_0}{1+P_i}$ n, Qに關係なし	$\frac{\omega_0(1+R^*P_i^*n)}{1+P_i}$	$\frac{\rho_{d0}(1+P_i)}{1+R^*P_i^*n}$ Qに關係なし	$\omega_0 - \beta \cdot P_i$ n, Qに關係なし	$\frac{\omega_0 - \beta \cdot P_i}{1 + \alpha \cdot P_i}$ n, Qに關係なし	$\frac{\omega_0 - \beta \cdot P_i}{1 + \alpha \cdot P_i}$	$\frac{(\omega_0 - \beta \cdot P_i)(1 + R^* \alpha \cdot P_i^* n)}{1 + \alpha \cdot P_i}$	$\frac{\rho_{d0}(1 + \alpha \cdot P_i)}{1 + R^* \alpha \cdot P_i^* n}$ m, Qに關係なし	
考慮あり m≠0 注3	同上	$\frac{\omega_0(1+R^*P_i^*n)}{1+P_i}$	同上	同上	同上	同上	$\frac{(\omega_0 - \beta \cdot P_i)(1 + R^* \alpha \cdot P_i^* n)}{1 + \alpha \cdot P_i}$	同上	
同上	同上	$\frac{\omega_0}{1+P_i}$ (=ω _{mix}) n, Qに關係なし	同上	同上	同上	同上	$\frac{\omega_0 - \beta \cdot P_i}{1 + \alpha \cdot P_i}$ (=ω _{mix})	同上	
同上	同上	同上	ρ _{d0} (1+P _i) Qに關係なし	同上	$\frac{\omega_0 - (\beta + \gamma \cdot m) \cdot P_i}{1 + \alpha \cdot P_i}$ n, Qに關係なし	同上	同上	$\frac{\rho_{d0}(1 + \alpha \cdot P_i)}{m, n, Qに關係なし}$	
備考	注1 m: 水和反応熱の上中水蒸発に費やされる割合 (m=0: 全く蒸発に寄与しない, m=1: 全て蒸発熱として作用する)	注2 n: 土粒子と入れ替わる処理材粒子の割合 (n=0: 処理材は全て土粒子の間隙に入り込む, n=1: 処理材は全て土粒子と入れ替わる)	注3 Q: 土粒子が内包している水分量 (土粒子の吸水率)	注4 ω _{mix} : 土と処理材 (P: 乾燥重量比) を合わせた状態 (混合土・縮固め前) での含水比	注5 ω _i : 混合土 (乾燥重量比 P, 時縮固め後) の含水比	注6 ω ₀ : 混合土 (乾燥重量比 P, 時縮固め後) の乾燥密度	注7 ω ₀ : 反応後混合土の処理材を含めない土の含水比 (仮想)	注8 (水和反応がないセメント・消石灰の場合では混合前の土の含水比に等しいが、水和反応を伴う生石灰では反応と反応熱による水分減少がある。そのため密度計算に用いる土のみの縮固め密度 (ρ _{d0}) はこのω ₀ に対して求める必要がある)	注9 R: 処理材と土粒子の密度の比 (R=ρ ₀ /ρ _s , ρ _s : 土粒子の密度, ρ ₀ : 処理材の密度)
その他のパラメータ	ω ₀ : 未処理土の含水比	P _i : 処理材の混合率 (乾燥重量比)	ρ _{d0} : 未処理土のω ₀ における乾燥密度 (未処理土の縮固め曲線により求める)	β: 水和反応時の生石灰と水の重量比 (18/56=0.321)	γ: 土のみ (処理材含まず) のω ₀ における乾燥密度 (未処理土の縮固め曲線により求める)	注10 注11 注12 注13 注14 注15 注16 注17 注18 注19 注20 注21 注22 注23 注24 注25 注26 注27 注28 注29 注30 注31 注32 注33 注34 注35 注36 注37 注38 注39 注40 注41 注42 注43 注44 注45 注46 注47 注48 注49 注50 注51 注52 注53 注54 注55 注56 注57 注58 注59 注60 注61 注62 注63 注64 注65 注66 注67 注68 注69 注70 注71 注72 注73 注74 注75 注76 注77 注78 注79 注80 注81 注82 注83 注84 注85 注86 注87 注88 注89 注90 注91 注92 注93 注94 注95 注96 注97 注98 注99 注100	注101 注102 注103 注104 注105 注106 注107 注108 注109 注110 注111 注112 注113 注114 注115 注116 注117 注118 注119 注120 注121 注122 注123 注124 注125 注126 注127 注128 注129 注130 注131 注132 注133 注134 注135 注136 注137 注138 注139 注140 注141 注142 注143 注144 注145 注146 注147 注148 注149 注150 注151 注152 注153 注154 注155 注156 注157 注158 注159 注160 注161 注162 注163 注164 注165 注166 注167 注168 注169 注170 注171 注172 注173 注174 注175 注176 注177 注178 注179 注180 注181 注182 注183 注184 注185 注186 注187 注188 注189 注190 注191 注192 注193 注194 注195 注196 注197 注198 注199 注200	注201 注202 注203 注204 注205 注206 注207 注208 注209 注210 注211 注212 注213 注214 注215 注216 注217 注218 注219 注220 注221 注222 注223 注224 注225 注226 注227 注228 注229 注230 注231 注232 注233 注234 注235 注236 注237 注238 注239 注240 注241 注242 注243 注244 注245 注246 注247 注248 注249 注250 注251 注252 注253 注254 注255 注256 注257 注258 注259 注260 注261 注262 注263 注264 注265 注266 注267 注268 注269 注270 注271 注272 注273 注274 注275 注276 注277 注278 注279 注280 注281 注282 注283 注284 注285 注286 注287 注288 注289 注290 注291 注292 注293 注294 注295 注296 注297 注298 注299 注300	

(3) 算定式

含水比と密度に関する諸式を表 - 2 に一覧表として示した。

4. 算定式の検証

以下では、当研究室でこれまでに蓄積した空港盛土の設計に際して行った配合試験結果を用いて、提案式による計算値と試験値の適合性を検証した。対象土は高含水比の火山灰質粘性土、沖積粘土、高含水比の礫質土、軟岩など幅広く土の種類を選んだ。それぞれの土質特性と処理材は表 - 3 に示すとおりである。

(1) 蒸発効率(m)および置換率(n)の設定

まず、反応熱による蒸発効率(m)について検討する。m値は0~1の値を持ち、生石灰の水和反応のみに関わるため、締固めに関わるn値とは関係なく検証できる。表 - 2 に示した計算式を用いて試験値からm値を逆算して求め、図 - 1、2 に示すように、未処理土の含水比および混合比とm値の関係を求めた。

含水比が高い土ほどm値が下がる傾向が見受けられる

表 - 3 対象土の土質特性と処理材

土質名	採取場所	粒度分布			土粒子の密度 ρ_s	含水比 Wn(%)	用いた処理材	データの出典
		細粒分 Fe(%)	砂分 Sc(%)	礫分 Cc(%)				
火山灰質粘性土1A	青森(青森)	96	4	0	2.69	63	生石灰	3)
火山灰質粘性土1B	青森(青森)	88	10	2	2.73	103	生石灰	3)
火山灰質粘性土2	鷹巣(秋田)	82	18	1	2.74	56	セメント 生石灰	4)
沖積粘土	鷹巣(秋田)	69	28	3	2.59	81	セメント 生石灰	4)
流下火山灰質砂	青森(青森)	26	63	11	2.73	32	セメント 生石灰	3)
降下火山灰質砂(風化軽石)	青森(青森)	42	56	2	2.72	83	生石灰	3)
クサリ礫	益田(鳥根)	63	30	6	2.7	29	セメント 生石灰	5)
粘土混じり礫質土	鷹巣(秋田)	47	45	8	2.69	33	セメント 生石灰	4)
シルト質軟岩	白浜(和歌山)	25	18	57	2.7	9	セメント	6)

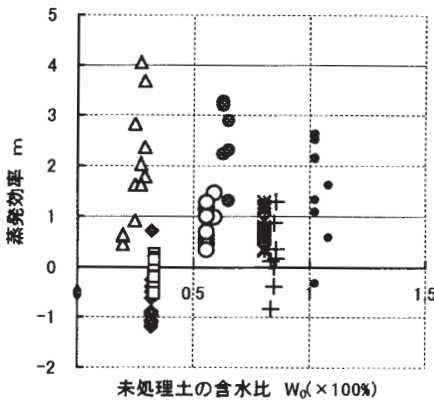


図 - 1 未処理土の含水比とm値の関係 (生石灰)

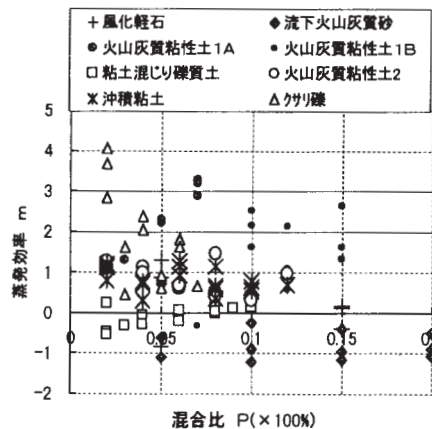


図 - 2 混合比とm値の関係 (生石灰)

が、ばらつきのため明瞭な相関性はない。しかし混合比とm値の関係によると、比較的粘性土分が少ない流下火山灰質砂と粘土混じり礫質土では混合比に関係なくm=0と設定出来そうである。その他の土では混合比が高い程m値が上がる傾向がみられる(シルト質軟岩については生石灰処理のデータがないため現在の所不明)。これは砂以上の粒子が多い場合には土粒子が奪う熱量が多くなり、水を蒸発させる熱量がその分だけ少なくなるためと考えられる。m値を0または1として固定した場合の混合後(締固め前)の含水比における計算値と試験値を比較したものが図 - 3 である。図 - 1、2 のとおり、試験値から逆算により求めたm値には-1~+4の幅があり、バラツキにしては大きいと思われる。しかし、仮定したm値により計算される含水比は図 - 3 のとおり、土の種類を網羅した全体として評価すると、適合性は良いとすることができる。逆算m値のバラツキの原因は、混合後の置置時間(2時間~12時間)の差や外気温の差による試験のバラツキと考えられ、逆算によると試験誤差が値として敏感に現れるようである。さらに詳しく見ると、含水比を支配している細粒

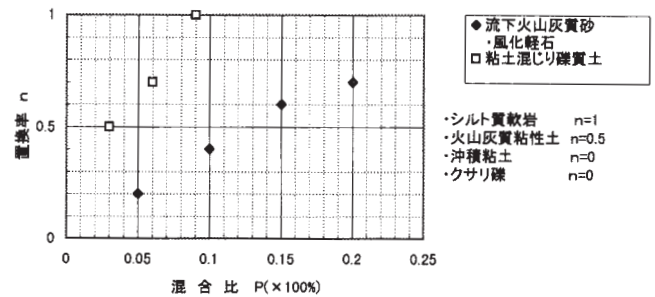


図 - 4 未処理土の混合比とn値の相関

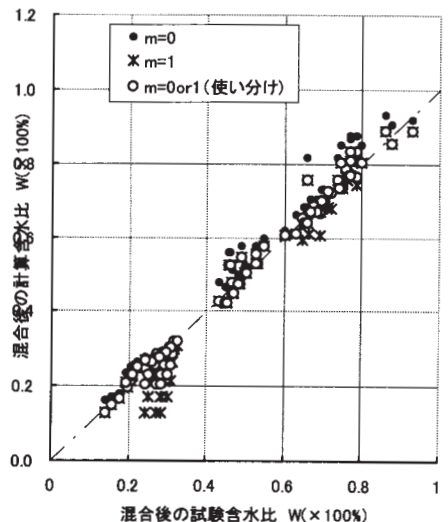


図 - 3 m値の影響 (生石灰)

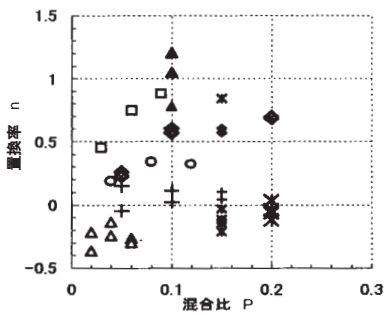


図 - 5 混合比とn値の関係 (セメント)

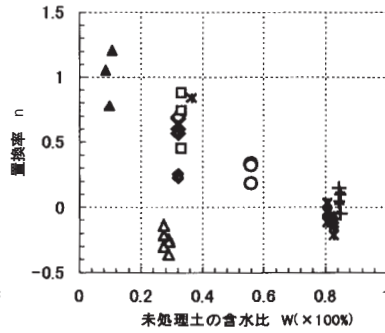


図 - 6 未処理土の含水比とn値の関係 (セメント)

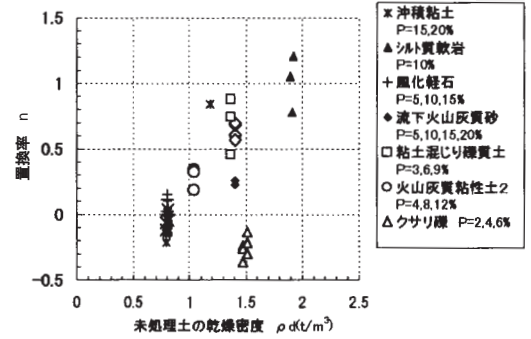


図 - 7 未処理土の締固め後密度とn値の関係 (セメント)

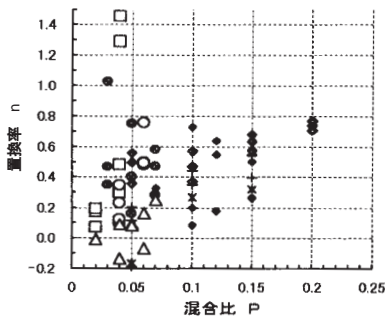


図 - 8 混合比とn値の関係 (生石灰)

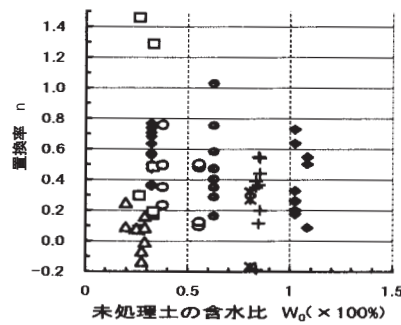


図 - 9 未処理土の含水比とn値の関係 (生石灰)

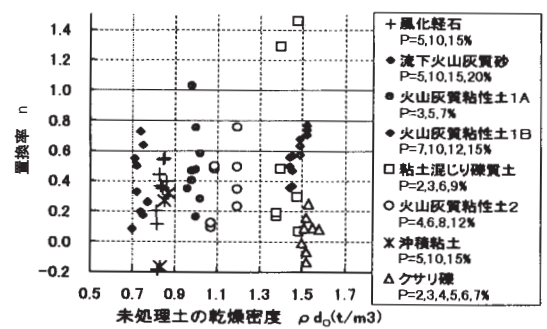


図 - 10 未処理土の乾燥密度とn値の関係 (生石灰)

分含有率 (F_c) によって、 m 値を 0 または 1 として使い分けることができそうである。

図 - 3 には F_c 60% では $m = 1$ 、 $F_c < 60\%$ では $m = 0$ として求めた結果 (印) を併記しているが、 m 値を細かく設定しなくても適合性は十分であり、特に $F_c < 30\%$ または $F_c > 80\%$ のように砂質土あるいは粘性土の区別が明確な領域では、 m 値を 0 または 1 と使い分ける意義が大きいと思われる。

次に、締固め後における処理材と土粒子の置換率 (n : 0 ~ 1) について検討する。 m 値と同様に提案式を用いて逆算により n 値を求めた。混合比、処理前の含水比、および乾燥密度との関係をセメントと生石灰の場合それぞれ図 - 5 ~ 7、図 - 8 ~ 10 に示す。

n 値は混合比、含水比、および密度それぞれの影響を受ける様子が見られる。生石灰におけるばらつきが大きい、定性的にはセメント・生石灰ともに同様の傾向である。混合比が大きい程、含水比が低い程、および密度が高い程置換率は大きくなる。但し、土粒子に内包した空隙が多い風化軽石、クサリ礫、および細粒土である沖積粘土では混合比によらず置換率は低く、処理材のほとんどは土粒子間の空隙に入り込む形態になるようである。

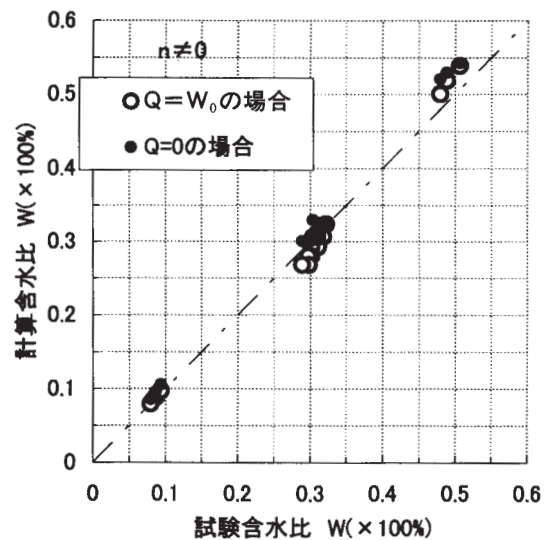


図 - 11 計算値含水比と試験含水比の適合性 (セメント; Qの影響検証)

ここでは n 値の設定として比較的ばらつきが少ないセメントの場合を参考に、粘土混じり礫質土、火山灰質砂、および風化軽石では図 - 4 を目安として混合比毎に n 値を選定することとした。また、シルト質軟岩では $n = 1$ 、火山灰質粘性土では $n = 0.5$ 、沖積粘土およびクサリ礫では $n = 0$ とした。

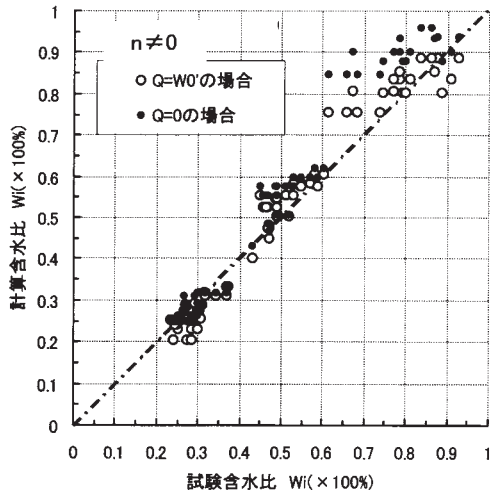


図 - 12 計算含水比と試験含水比の適合性 (生石灰：Qの影響検証)

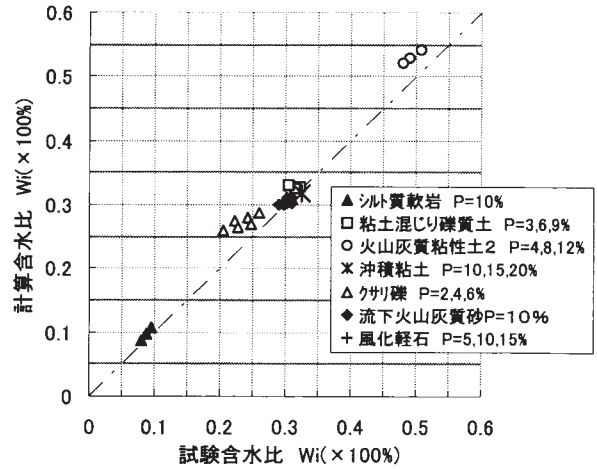


図 - 13 計算含水比と試験含水比の適合性 (セメント、全データ)

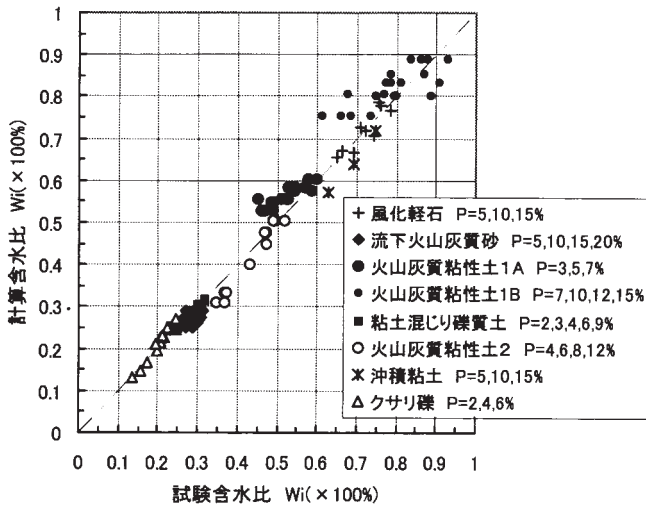


図 - 14 試験含水比と計算含水比の適合性 (生石灰、全データ)

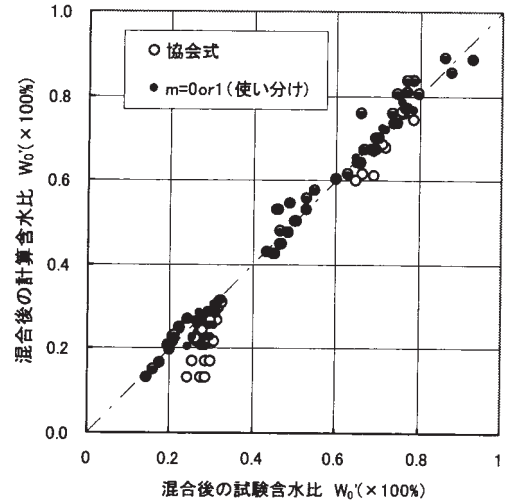


図 - 15 提案式と協会式の適合性 (生石灰、全データ)

(2) 締固め前および締固め後の含水比における適合性

置換率 $n = 0$ の場合、含水比の算定式には処理材と置き換わる土粒子が拘束している水分量（吸水量： Q ）が要因となる。ここで、便宜上 $Q = w_0$ （未処理土の含水比、ただし生石灰では混合後締固め前）、または $Q = 0$ としたときの計算値と試験値を対比して図 - 11、12に示す。これによると、生石灰における違いが大きくみられ、 $w_0 < 50\%$ では $Q = 0$ 、 $w_0 > 50\%$ では $Q = w_0$ の適合性が良い。

図 - 13にはセメント処理、図 - 14には生石灰処理の場合の全データについて計算値と試験値の適合性を検証した。若干のばらつきがあるものの、土の種類によらず概ね適合性は良い。尚、生石灰処理の含水比を予測する式として利用されてきた協会式は、土の種類によらず提案式における蒸発効率として $m = 0.45$ とした時の混合後（締固め前）

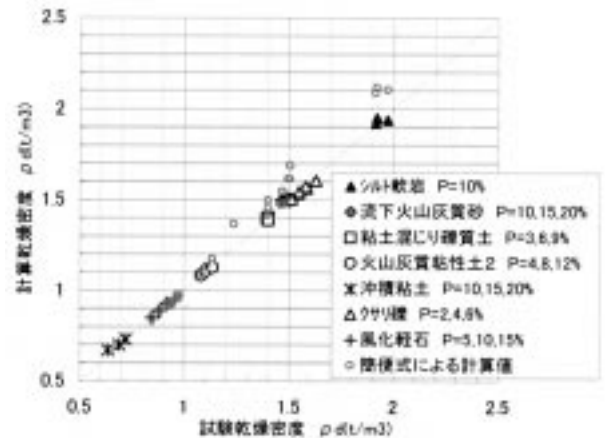


図 - 16 提案式および簡便式による計算乾燥密度と試験乾燥密度の適合性 (セメント、全データ)

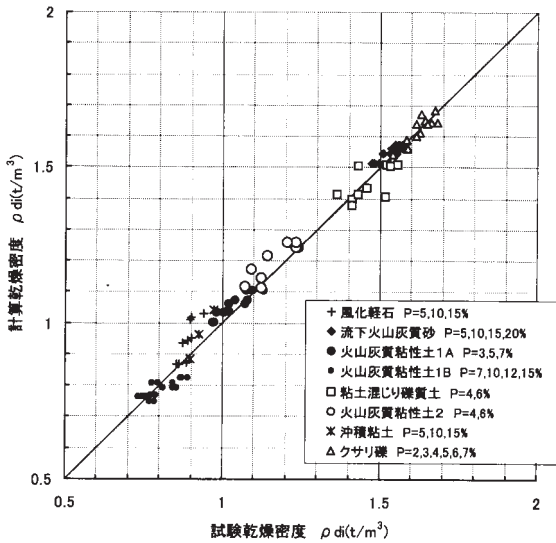


図 - 17 計算乾燥密度と試験乾燥密度の適合性 (生石灰、全データ)

の含水比を表している。そのため協会式は含水比低下量を土によっては過大評価する事となり、図 - 15に示すように最大10~20%の違いがあり注意を要する。

(3) 乾燥密度における適合性

蒸発効率(m)および置換率(n)の設定値は含水比の計算条件と同じとする。図 - 16にはセメント処理、図 - 17には生石灰処理の場合の全データについて計算値と試験値を比較した。これによるとセメント・生石灰ともに含水比における以上に良い適合性が得られている。また、図 - 16

(セメント処理)には簡便法として置換率を無視した場合(混合した処理材は全て土粒子間に入り込む: $n = 0$)の計算値も併記したが、密度が $\rho_d = 1.5t/m^3$ 以上の場合に密度を高く見込む傾向があり、最大約 $0.2t/m^3$ の過大評価をすることになる。

5. あとがき

これまでの設計・施工において、安定処理土は土質材料と区別して特別扱いされてきた。今後、土として扱うことにより合理的な設計が出来るように、今回提案した含水比、密度、および付随する要因と力学特性との相関を明らかにする検討を進めてみたいと考えている。安定処理工法は、土捨て場がなくなってきた近年、施工例が増加する状況にある。今回の提案式だけでも役に立てて頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) 和歌山県、日本工営株式会社：南紀白浜空港本体工事ソイルセメント試験施工報告書、平成11年9月
- 2) 日本石灰協会：石灰安定処理工法、設計・施工の手引き、平成8年
- 3) 青森県、新青森空港調査共同企業体：安定処理配合試験、新青森空港転圧試験報告書、昭和57年3月
- 4) 秋田県、日本工営株式会社：大館能代空港整備事業・地盤改良工法検討業務報告書、平成6年3月
- 5) 島根県、日本工営株式会社：安定処理配合試験、石見空港整備事業・試験盛土・本体盛土動態緩速調査報告書、平成2年3月
- 6) 和歌山県、日本工営株式会社：南紀白浜空港建設ソイルセメント試験調査報告書、平成10年3月