

# 土質改良土の動的荷重下における性状について (第1報)

齋藤二郎  
平間邦興

## Behavior of Lime- or Cement-Stabilized Soil under Dynamic Loading (Part 1)

Jiro Saito  
Kunioki Hiramata

### Abstract

Effective methods of soil stabilization with lime or cement have been known from a long time ago and in particular, road construction works have been frequently carried out by these methods. However, only the static properties are known regarding the stabilization effects, and the behaviors under dynamic loading have not yet been clarified in many respects. In recent years, the investigation of the dynamic properties have come to be all the more required.

Therefore, dynamic triaxial compression tests were carried out on non-stabilized and stabilized soils to clarify the properties under dynamic loading. Outlines of testing methods, test results and a number of interesting tendencies are given in this report.

### 概 要

石灰やセメントの添加によって土質性状の改良を図る方法は、古くから用いられてきて効果的であることが知られており、特に道路工事などにおいて数多く実施されてきている。しかし、その改良効果は静的性状について把握されているのみで、動的荷重下における挙動については、いまだ明らかにされていない点が多いが、最近改めてこれら改良土の動的性状の究明が要求されてきている。

この報告は上記の趣旨に沿って、無処理土および改良土について動的三軸試験を実施し、土質改良土の動的荷重下における性状の解明を試みたもので、いくつかの興味ある傾向が認められている。

### 1. まえがき

石灰やセメントの添加によって土質性状の改良を図る方法は、古くから用いられてきて効果的であることが知られている。その効果は土の3つの力学的性質、すなわち、土の圧縮性、強度特性および透水性の改善を図ることにより、適用範囲は、(1)道路、飛行場などの路盤材料の改良、(2)高含水比の盛土材料の改良、(3)トラフィカビリティの確保、(4)凍上防止のためのしゃ断層、(5)切土および盛土法面の表層処理、(6)開削後の埋戻し地盤の安定化、(7)アースダム・コアの侵蝕防止、(8)貯水池のライニングなど、きわめて広範である。これらのうち、実際には(1)の用途が最も多く、確実な効果をあげてきている。

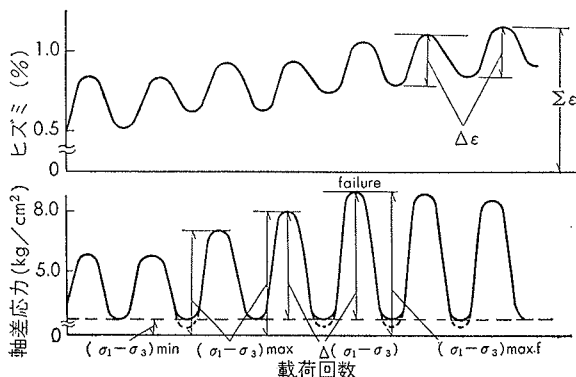
しかしながら、その改良効果は静的性状について把握されているのみで、動的荷重下における変形挙動などについては、いまだ明らかにされていない点が多い。最近、高速道路の普及にともなう車輛の重量化、高速化の傾向が著しくなるとともに、低盛土方式の採用など道路構造にも急速な変化の傾向が見受けられており、改めてこれら改良土の動的性状の究明が要求されている。

この研究は以上のような趣旨から、自然土試料および改良土試料について静的および動的三軸試験を実施し、動的性状についての改良効果の詳細を明らかにしようとするもので、今回の実験では、特に石灰とセメントによる改良機構の相違、およびこれらの添加率の影響について検討をおこなった。

## 2. 石灰あるいはセメント添加による土質性状の改良効果の原理

石灰あるいはセメントによる効果は、単一の効果原理に依存するものではなく、次に示すような種々の現象が相乗的に作用して大きな効果をもたらす。

- (i) **イオン交換**  $\text{Ca}^{++}$  などの交換能の強いアルカリ金属、アルカリ土金属が、土粒子表面に吸着している交換能の弱いカチオンと交換して吸着し、土粒子表面の帯電状態が変わり、粒子は凝集して団粒化する。
  - (ii) **ポゾラン反応** 粘土分中のポゾランと石灰あるいはセメントとが反応して、ドーバモライトなどのケイ酸カルシウム水和物や、 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$  などのアルミン酸カルシウム水和物および  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  などの加水ゲーレンイトと呼ばれる結合物質を生成する。これらの反応生成物は長期にわたって生成され、これらが結合材となって土は固化し、強度、耐久性が発揮される。
  - (iii) **炭酸化作用** 石灰が空気中の炭酸ガスと反応して  $\text{CaCO}_3$  の炭酸カルシウムの形となり、この炭酸カルシウムとアルミン酸カルシウムが反応して土を固結させる。
  - (iv) **水和作用** 無水のセメント化合物が水に溶解し、結合水をもった難溶性の水和化合物が過飽和溶液から析出する。この水和化合物が接着力をもつ。
- その他、生石灰を使用する場合には、これが消石灰に変わる際の吸水、発熱、膨脹をともなう水和の特別な現象(消化)の利用を目的とすることも多い。
- したがって、石灰の添加による効果は(i), (ii), (iii)であり、セメントについては(iv)が主たる効果となるが、セメントの水和の際に生じる  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の遊離石灰によって(i), (ii)の効果があることも認められている。



図一1 ヒズミ・応力の測定例と表示

以上のように、石灰による改良は土を化学反応の相手として利用し、土中の粘土分を質的に変化させるところに主効果があり、この点がセメントと改良機構の異なるところである。したがって、石灰による改良の適応土質は粘性土(特に火山灰質)であり、セメントによる改良の適応土質は砂質および粘着性の少ない土とされている。

## 3. 実験方法

### 3.1. 実験装置

実験装置は既報のもの<sup>1)</sup>と同じ仕様の動的三軸試験機であり、今回もヒズミ制御法によって実験をおこなった。この方法は試料に加わる任意の下限応力(静的設定応力)のみを記憶させ、その上で一定の振幅ヒズミを試料に与える。それ故、試料に生じる残留ヒズミに常時追隨していくことが可能となり、振幅応力は測定結果として得られることになる。

軸方向載荷装置は油圧ユニットとサーボ弁シリンダーから成り、ヒズミおよび応力はピストンを介して油圧で与える。

### 3.2. 実験方法

実験に使用した試料は神奈川県南葉山で採取したモンモリロナイトを主要粘土鉱物とする自然試料である。試料調整にあたっては、該当する現場状態に近似した試験試料の作成を目的とした。まず含水比を自然含水比の49%まで加水して十分に練り返し、密封して2カ月間養生をおこなった後、

土の組成	砂 (%)	6.8
	シルト (%)	20.7
	粘土 (%)	72.5
含水比 (%)		49
比重		2.685
湿潤密度 (g/cm³)		1.68
コンテシンス	液性限界 (%)	90.0
	塑性限界 (%)	24.9
	塑性指数	65.1
突固め試験	最適含水比 (%)	30.0
	最大乾燥密度(g/cm³)	1.34

表一1 試料の物理的性質

石灰あるいはセメントを添加して十分に混合し、径50mm、高さ125mmのモールドと特製ランマー(重さ1kg、落下高30cm)を使用して3層25回の突固めをおこなった。ただし、この突固めは試料の含水状態からも推定できるように、いわゆる締固め効果を図ったものではなく、気泡の除去と試料の均一化を目的としたものである。その後、パラフィンで密封し、湿度90%、温度28°の下で14日間養生をおこなった。

使用した添加材は消石灰および早強ポルトランドセメント、添加率は乾燥土重量百分比で0, 1, 3, 5, 8%である。

試験は非圧密非排水条件でおこない、側圧はすべて

2.0 kg/cm<sup>2</sup> とし、あらかじめ対応する添加材および添加率について静的三軸試験をおこなった後、動的試験を実施した。動的三軸試験は、まず静的せん断強さの10%の静的設定応力(振幅応力の下限值)を載荷し、0.5%の振幅ヒズミで破壊に至るまで加振した。使用した振動周波数は1Hz、振動波形は正弦波であり、供試体寸法は50φ×125mmである。

4. 実験結果と考察

4.1. 静的性状についての改良効果

消石灰およびセメントの添加率を変化させて静的三軸試験をおこなった結果を示したのが図-2, 3である。添加率の増加に対応して、いずれも著しい効果が認められる。また、添加率が5%を越えると、石灰改良土に比べてセメント改良土の改良効果は大きくなるが、一方、破壊後の応力降下も急激となり、異質な傾向が認められる。

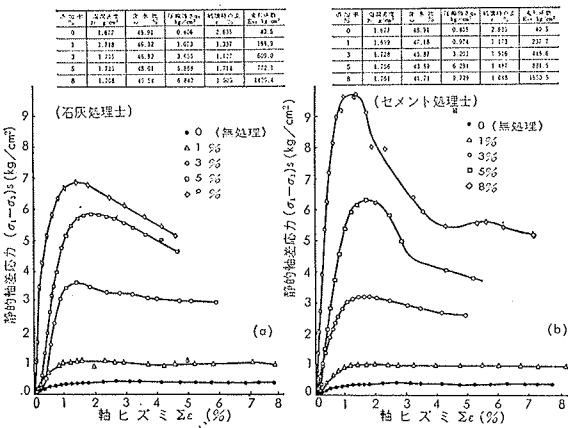


図-2 静的軸差応力～軸ヒズミ

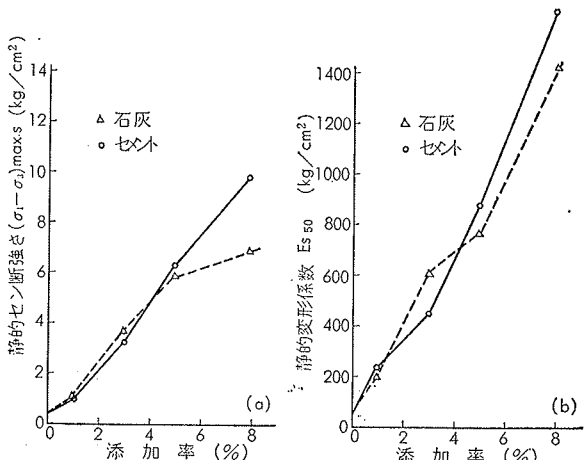


図-3 静的せん断強さ・変形係数の増加

4.2. 動的性状についての改良効果

4.2.1. 動的軸差応力について 図-1に示した各パルスの動的軸差応力の上限值(σ1-σ3)maxと軸ヒ

ズミの関係を示したのが図-4であり、この図から動的せん断強さ(σ1-σ3)max・f・dを消石灰、セメントの添加率に対応して示したのが図-5である。

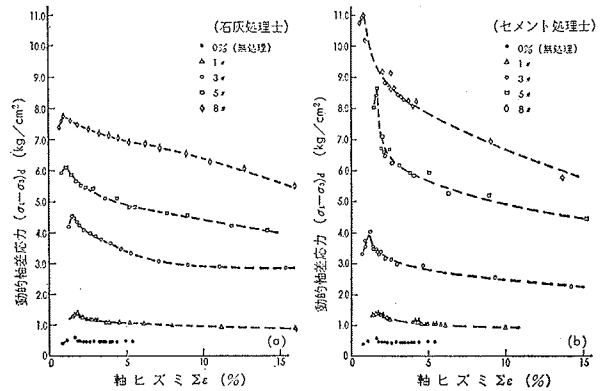


図-4 動的軸差応力～軸ヒズミ

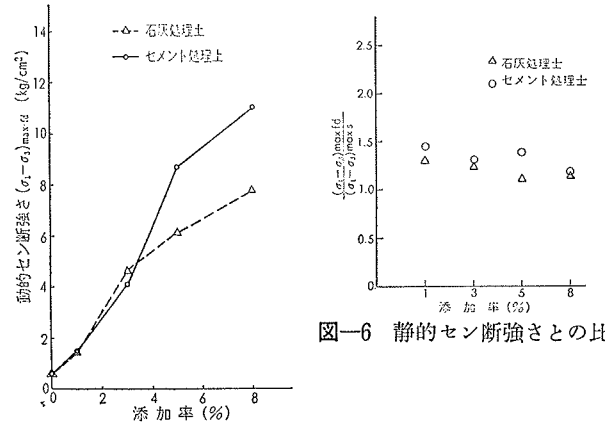


図-6 静的せん断強さとの比

図-5 動的せん断強さの増加

添加率	添加材	動的軸差応力低下率				
		(σ1-σ3)max・f・d (kg/cm <sup>2</sup> )	軸ヒズミ Σε (%)			
8%	石灰	1 (7.8)	0.99	0.98	0.89	0.72
	セメント	1 (11.2)	0.77	0.70	0.57	0.51
5%	石灰	1 (6.15)	0.86	0.81	0.72	0.66
	セメント	1 (8.75)	0.72	0.65	0.57	0.51
3%	石灰	1 (4.6)	0.86	0.75	0.63	0.62
	セメント	1 (4.08)	0.75	0.69	0.61	0.56
1%	石灰	1 (1.4)	0.81	0.76	0.68	0.62
	セメント	1 (1.4)	0.80	0.73	0.67	—

表-2 動的軸差応力の低下率

添加材	添加率	静的破壊ヒズミ	動的破壊ヒズミ	破壊波数
		Σεs (%)	Σεd (%)	
石灰	1	1.34	1.87	3
	3	1.13	1.49	4
	5	1.71	1.13	3
	8	1.45	0.99	9
セメント	1	1.17	1.76	3
	3	1.52	1.28	5
	5	1.49	1.67	4
	8	1.05	0.89	11

表-3 破壊ヒズミと波数

添加率とともに、いずれも著しい増加が認められる。またセメント改良土の破壊へ至る軌跡は石灰改良土に比べて、かなり鋭く上に凸となり、絶体値も添加率が5%を越えると大きく上廻るが、一方、応力降下もきわめて大きい。動的セン断強さを1とし、軸ヒズミに対応して、どの程度低減するかを一括して比で示したのが表-2であり、添加率の増大にもなってセメント改良土の低下率がきわめて大きくなっていく様子がわかる。

この傾向は、前述の石灰とセメントの改良原理の違いに基因すると考えられ、石灰が粘土分を質的に変化させるのに対し、セメントは水和作用による接着に主効果があるため、ヒズミおよびクラックの進行によって一度構造が破壊されると回復が困難になると考えられ、セメント改良土が動的荷重下での強度劣化の激しいことが理解できる。

動的セン断強さと静的セン断強さの比を示したのが図-6であり、添加率の増大にもなってやや減少し、セメント改良土の方が大きな値を示す傾向が認められるが、大略 1.1~1.5 の範囲に分布している。また、静的および動的試験における破壊時の軸ヒズミおよび破壊波数を示したのが表-3であり、添加率8%を除くと大略5波以内に破壊し、動的破壊時のヒズミと静的破壊時のヒズミには有意の差のないことがわかる。

4.2.2. 等価動弾性係数について 等価動弾性係数と軸ヒズミの関係を示したのが図-7であり、この図から破壊時の値を添加率に対応して示したのが図-8である。動的軸差応力と殆んど同様の傾向が見受けら

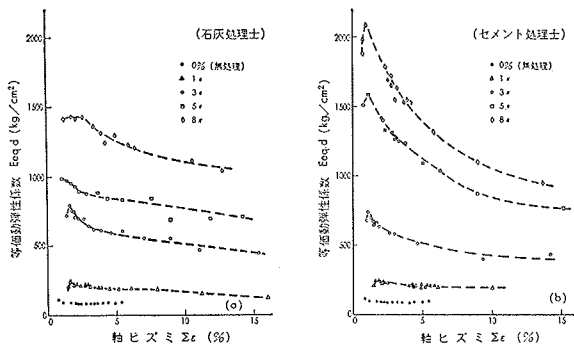


図-7 等価動弾性係数~軸ヒズミ

れ、特にセメント8%の添加によれば、0.5%の振幅ヒズミに対して 1900 kg/cm<sup>2</sup>ときわめて大きな効果を示す。ここでも、添加率5%で石灰とセメントとの改良効果が逆転しているが、これらの傾向から当該試料の石灰添加については5%程度の添加率が効果的であると判断することもできる。

等価動弾性係数の最大値を1とし、軸ヒズミに対応する経過を比で示したのが表-4であるが、やはりセメント改良土の降下がきわめて著しい。

また、等価動弾性係数と対応する静的変形係数の比の分布を添加率に対して示したのが図-9である。破壊時の値を採れば、石灰改良土で 1.1~

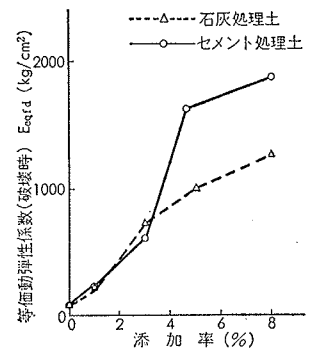


図-8 等価動弾性係数の増加

添加率	添加材	等価動弾性係数低下率				
		Eq.f.d (kg/cm <sup>2</sup> )	軸ヒズミ Σε (%)			
			3	5	10	15
8%	石灰	1 (1440)	0.98	0.88	0.77	0.72
	セメント	1 (2100)	0.78	0.66	0.50	0.44
5%	石灰	1 (995)	0.89	0.86	0.74	0.68
	セメント	1 (1595)	0.81	0.73	0.53	0.48
3%	石灰	1 (800)	0.83	0.76	0.62	0.55
	セメント	1 (740)	0.77	0.70	0.57	0.53
1%	石灰	1 (240)	0.87	0.79	0.67	—
	セメント	1 (245)	0.93	0.86	0.78	—

表-4 等価動弾性係数の降下

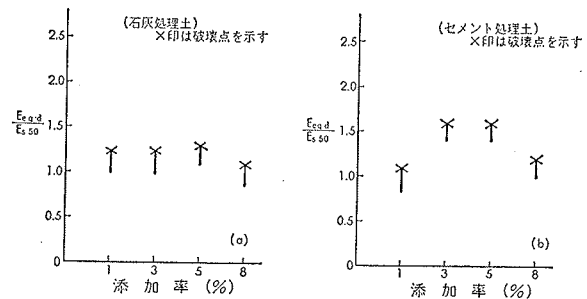
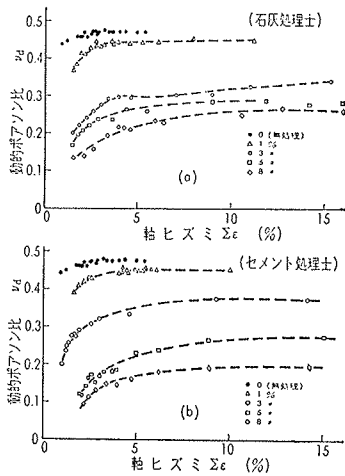


図-9 静的変形係数との比

1.3, セメント改良土で 1.1~1.6 の範囲に分布するようである。

4.2.3. 動的ポアソン比について 動的ポアソン比と軸ヒズミとの関係を示したのが図-10であり、一義的に軸ヒズミ5%までの分布幅を一括表示したのが表-5である。ここで動的ポアソン比は加振中の体積変化から算出した。

飽和土と考えられる無処理土試料では0.44~0.48に分布し、ほぼ満足される値と考えられる<sup>2)</sup>。石灰改良土、セメント改良土については、添加率の増加とともに動的ポアソン比が大きく減少し、8%の添加の場合、石灰改良土で平均0.18、セメント改良土で0.13、となるが、一般に動的荷重によって急激に増大し、破壊後も増加は継続して側方ヒズミの進行が理解できる。特



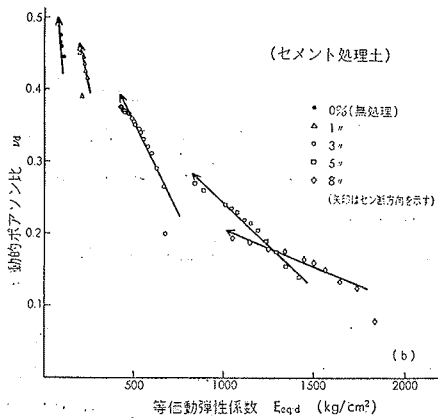
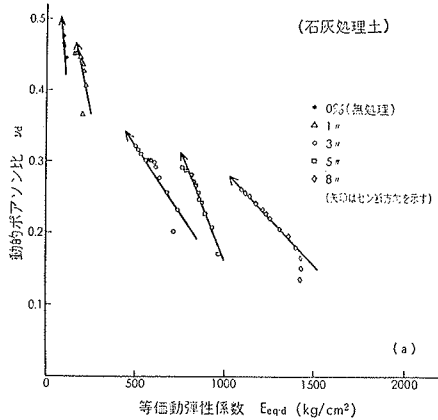
図一10 動的ポアソン比—軸ヒズミ

添加材	添加率(%)	動的ポアソン比 $\nu_d$
無	0	0.44~0.48
	1	0.37~0.45
	3	0.19~0.30
石	5	0.16~0.27
	8	0.13~0.22
灰	1	0.39~0.46
	3	0.23~0.34
	5	0.12~0.23
	8	0.09~0.16

表一5 動的ポアソン比 (軸ヒズミ5%まで)

に、その変化は軸ヒズミ5%までが激しい。

この傾向をさらに明らかにするため、動的载荷中の動的ポアソン比と等価動弾性係数の関係を示したのが図一11である。载荷の進行とともに動的ポアソン比は増加し、等価動弾性係数の減少していく状況が明確であり、添加率が大きいほど等価動弾性係数の減少は激しく、動的ポアソン比の増加が緩慢である。



図一11 動的ポアソン比～等価動弾性係数

### 5. まとめ

石灰およびセメントによる土質改良土の動的荷重下における性状を把握するために、モンモリロナイトを主要粘土鉱物とする粘土試料について、静的および動的三軸試験を実施した結果、大略次のような傾向が認められた。

- 1) 静的および動的な力学性状に著しい改良効果が認められた。
- 2) 石灰改良土に比べてセメント改良土は、一般に改良効果が大きい。反面、動的応力の負荷による軸差応力、等価動弾性係数の低下も激しく、これらの現象は両者の改良効果の違いに基因すると考えられる。
- 3) 動的試験結果と対応する静的試験結果について、せん断強さの比で示せば、大略1.1~1.5の範囲に分布し、等価動弾性係数については石灰改良土で1.1~1.3、セメント改良土で1.1~1.6の範囲に分布する。
- 4) 動的ポアソン比について、無処理土では0.44~0.48の値を示すが、石灰およびセメント添加率の増加によって著しく減少し、また動的载荷とともに増大する傾向を示す。

最後に、この研究の一部は法政大学工学部、山門明雄教授の御指導を受けていた久住博行、酒見正宏、両君に実施していただいた。

ここに記して、深甚なる謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 斎藤二郎，平間邦興，“粘性土の動的せん断特性について(第2報)，一ヒズミ制御法による動的三軸試験の試み一” 土木学会第28回年次学術講演会講演集，pp. 164~166 (1973)
- 2) 石原研而，“飽和土のポアソン比” 土木学会第26回年次学術講演会講演集，pp. 147~150 (1971)