

粘性土の流動特性と土性値の関係

Relations between Rheological Characteristics
of Cohesive Soils and Consistency Limits

熊本 直樹* (Naoki Kumamoto)

粘性土の流動特性は、Bingham体でほぼ近似できる。塑性指数が1.8から22.5まで広範囲に広がる13種類の粘性土の粘度試験結果を用いて、Bingham体の流動特性を規定する降伏値及び塑性粘度と土性値の関係を検討した。

その結果、土質が異なっても降伏値は液性指数で表現できること、また、液性指数が0.4, 1, 2, 6, 10のときの降伏値が、それぞれ約10, 1, 0.1, 0.001, 0.0001 kPaであることなどが判明した。塑性粘度も含水比と液性限界値の比で関係付けることができた。

キーワード：間隙比，含水量，降伏，コンシステンシー限界，粘性土，粘度 (IGC:D2/D6)

1. まえがき

深層混合処理などの軟弱地盤改良機械、いわゆるヘドロの管輸送、浚渫泥のハンドリングなど、粘性土からなる軟弱土を取り扱う場合、その流動特性を把握する必要がある。粘性土の流動特性は、レオロジーモデルの中のBingham体で概ね近似できることは古くから知られており、Brinkman¹⁾、森・乙竹²⁾、大同³⁾、大垣・松尾⁴⁾、三村・松尾⁵⁾などの研究がある。Bingham体の流動特性を定める物性値は、降伏値 τ_y と塑性粘度 η_{pl} である。既往の研究の中には、上記物性値を推定する方法に言及したものもあるが、第3章で述べるように、粘性土あるいは粘性土の高濃度スラリーについては著しく適用性を欠いている。

一方実用的な立場では、Skemptonら⁶⁾、三笠⁷⁾などの研究に見られるように、よく練り返した粘性土の非排水粘着力 c_{ur} は液性指数 $I_L (= (w-w_p)/I_p)$ の関数と見なすことが出来る。さらに三笠は、 $I_L=1.0, 0.4, 0.0$ でそれぞれ $c_{ur}=0.1, 1.0, 10.0tf/m^2 (=0.98, 9.8, 98$

kPa)となる練り返し強さ基準線を提案している。

2. で述べるように、Bingham体で近似したときの降伏値 τ_y とよく練り返した粘性土の非排水粘着力 c_{ur} は同一の性質を持つ物理量である。したがって、Skempton⁶⁾らや三笠⁷⁾の研究を拡張すれば、液性指数が1をはるかに越える粘性土スラリーの降伏値 τ_y もコンシステンシー限界値で表すことが可能であることが予測できる。著者ら⁸⁾は既にこの可能性のあることを発表しているが、この論文ではさらにデータ数を増して上記に一般性があることを示す。

粘性土のコンシステンシー限界試験は、最もよく行われている試験の一つであり、それから求まる土性値の蓄積も多い。降伏値 τ_y や塑性粘度 η_{pl} と土性値の関係が判明していれば、粘度試験を行えない場合でも、土性値から τ_y や η_{pl} を推定でき、実務上は大いに有用である。そこで本論文では τ_y のみでなく、塑性粘度 η_{pl} と土性値の関係についても考察する。なお、本論文では、含水比 w は全てパーセント表示とする。

* 三菱重工業㈱ 広島研究所 鉄構・土木研究室 主務

2. 粘性土の流動特性

以下では、十分練り返した粘性土の非排水粘着力を c_{ur} と表す。粘性土の非排水粘着力 c_{ur} は、現実的には極めて小さな歪速度のもとで計測される。そして通常はせん断応力が c_{ur} を越えると粘性土は破壊する、と見なしている。

$$\tau_f = c_{ur} \quad (\tau_f: \text{破壊時のせん断応力}) \quad (1)$$

一方、Bingham 体は図1に示す理想的なレオロジーモデルで、その流動特性は式(2)で表される。

$$\tau = \tau_y + \eta_{pl} \dot{\gamma} \quad (\dot{\gamma}: \text{せん断歪速度}) \quad (2)$$

式(2)の τ は流動時のせん断応力であるので、土質力学で言う破壊時のせん断応力 τ_f と同一の性質の量である。式(1)と式(2)を比較すると、ほぼ $\dot{\gamma} = 0$ という条件で計測された攪乱粘土の c_{ur} は降伏値 τ_y と同じ性質の量であることが分かる。

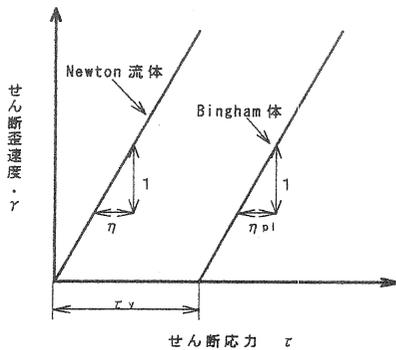


図1 Bingham 体のレオロジーモデル

2重円筒型回転粘度計を用いて上記の理想的な Bingham 体の流動試験を行うと、そのコンシステンシー曲線はせん断歪速度が0近傍では直線にならない⁹⁾。これは、回転粘度計においては内円筒から外円筒へ向かってせん断応力の勾配があるので、内円筒近傍の試料が先に降伏するためである。すなわち、円筒を回転させるトルクを T 、2重円筒内の試料高さを h 、内円筒及び外円筒の半径をそれぞれ R_i 、 R_o とすると、試料に生じる最大及び最小せん断応力は

$$\tau_{max} = T / (2\pi h R_i^2) \quad (3)$$

$$\tau_{min} = T / (2\pi h R_o^2) \quad (4)$$

となる。したがって、トルク T が

$$T = 2\pi h R_i^2 \tau_y = T_0 \quad (5)$$

に達すると内円筒壁から試料は流れはじめ、 T が

$$T = 2\pi h R_o^2 \tau_y = T_1 \quad (6)$$

になると試料全体が流動する。このため回転粘度計のコンシステンシー曲線は、トルク T が $T_0 < T < T_1$ では曲線となり、 $T \geq T_1$ では直線となる。

2重円筒型回転粘度計を用いて粘性土の粘度試験を行うと、一般に図2に示すコンシステンシー曲線が得られる。回転粘度計には内円筒回転型と外円筒回転型があり、図2は内円筒回転型を用いた $I_L=1.95$ の粘性土の粘度試験から得られたものである。図2のコンシステンシー曲線は明らかに降伏値を持ち、さらにトルクがある値以上になると直線になっており、従来から言われているように、粘性土の流動特性を Bingham 体で近似できることが分かる。

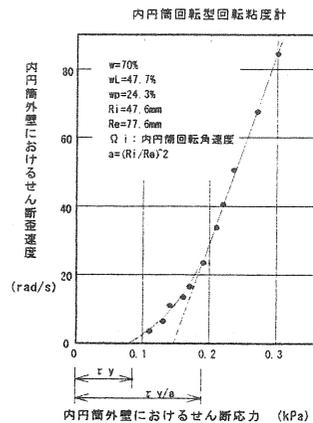


図2 回転粘度計による粘性土の試験例

3. 懸濁液の流動特性に関する既往の研究

一般に、固体粒子を分散した液体の流動特性は、固体の体積濃度 c_v (懸濁液中に占める固体体積割合) を主要因子として論じ、懸濁液の粘度表現式では相対粘度 η_r が用いられている。相対粘度 η_r とは、粘度 η_0 をもった Newton 流体の溶媒に固体粒子を分散させた

懸濁液の粘度を η とするとき、 η を η_0 で割った無次元量のことである。

Einstein¹²⁾は相対粘度 η_r を体積濃度 c_v の一次関数で表現したが、その適用範囲は体積濃度が2%程度までで、希薄な濃度域に限定される。Brinkman¹⁾はEinsteinの式を基本として、より高濃度の懸濁液の粘度式

$$\eta_r = (1 - c_v)^{-2.5} \quad (7)$$

を理論的に誘導した。

EinsteinやBrinkmanの粘度式は体積濃度 c_v のみで表現されているが、森・乙竹²⁾は粒子表面間距離という概念を用い、体積濃度の他に連続的かつ安定なせん断変形を与える程度の最高体積濃度 c_{vc} も使用して粘度式を提案している。

ところが粘土懸濁液の場合、液中の粘土鉱物粒子は単体としては存在せず、水を媒介として電気化学的作用で結合し、団粒（フロック）となっている。そこで大同³⁾は粒子の体積濃度の代わりに、団粒の体積濃度（フロッキュレート濃度） c_f と団粒の最高体積濃度 c_{fc} を導入して森・乙竹²⁾の粘度式に適用し、ある程度の成功を得ている。具体的には、粘土懸濁液の沈降試験を行い、その最終沈降体積率（最終沈降高さ/初期高さ）に団粒の最高体積濃度 c_{fc} を乗じたものを団粒の体積濃度 c_f とする。団粒の最高体積濃度 c_{fc} は等径粒子最疎充填を仮定し、0.52としている。すなわち、大同の粘度式は式(8)に示すとおりである。

$$\eta_r = 1 + 3 / (1 / c_f - 1 / 0.52) \quad (8)$$

この団粒の体積濃度 c_f を用いる方法は松尾ら^{4), 5)}も採用し、真の体積濃度 c_v の代わりに団粒の体積濃度 c_f を森・乙竹²⁾の粘度式に適用（すなわち大同³⁾の方法）、あるいはBrinkman¹⁾の式に適用して、相対粘度 η_r については良好な結果を得ている。

以上は粘度に関する既往の研究である。降伏値 τ_y に関する研究は少ないが、大同³⁾は団粒の体積濃度 c_f を用いて降伏値 τ_y を表現した。しかし、松尾⁴⁾の研

究では団粒の体積濃度 c_f と降伏値 τ_y の関係は異種粘性土間で異なり、大同³⁾の方法は適用できていない。

4. 粘度試験及びベーンせん断試験の供試土

表1に示す13種類の粘性土について、含水比を変化させながら、粘度試験又はベーンせん断試験を実施した。これらの試験に供した試料は、十分練り返したものである。供試土の液性限界 w_L は44.1%から259%まで、塑性指数 I_p は17.8から225まで広がっており、現実に遭遇する土質をほぼカバーしている。これらの試験では、攪乱状態の非排水粘着力 c_{ur} 、降伏値 τ_y 、塑性粘度 η_{pl} を計測するとともに、試験時の試料温度も記録した。

表1 供試土の土性値

試料	w_L (%)	w_p (%)	I_p	試験方法
広島湾土Ⅰ	57.8	28.4	29.4	ベーンせん断試験器
広島湾土Ⅱ	66.8	29.5	37.3	回転粘度計(内円筒回転)
広島湾土Ⅲ	85.3	37.1	48.2	回転粘度計(外円筒回転)
広島湾土Ⅳ	89.6	37.3	52.3	ベーンせん断試験器
琵琶湖(長浜)	116.2	55.5	60.7	回転粘度計(外円筒回転)
琵琶湖(彦根)	96.1	47.5	48.6	回転粘度計(外円筒回転)
大黒埠頭	90.5	38.5	52.0	回転粘度計(外円筒回転)
羽田沖	64.5	30.0	34.5	回転粘度計(外円筒回転)
霞ヶ浦	126.3	44.7	81.6	回転粘度計(内円筒回転)
ワイヤッシュベントナイト	107.1	33.1	74.0	回転粘度計(内円筒回転)
ベントナイトⅠ	120.4	43.8	76.6	回転粘度計(内円筒回転)
ベントナイトⅡ	258.6	33.8	224.8	回転粘度計(内円筒回転)
広島湾土+カリソ	44.1	26.3	17.8	回転粘度計(内円筒回転)

5. 降伏値 τ_y

液性限界試験は、衝撃を与えて溝が閉じる難易度を計測するので、土の強度に関連しているであろうことが予測される。一方、塑性限界試験はコンクリートの圧裂試験に似ており、引張り強さに関連する試験とも考えられる。すなわち、液性限界試験及び塑性限界試験は、ある特定の強度になる含水比を求める試験と考

えることもできる。

土性値と強度との間に密接な関係があることは以下からも推測できる¹⁰⁾。粘性土の飽和度を100%と仮定すると、

$$100e = G_s w \quad (e: \text{間隙比}, G_s: \text{土粒子真比重}) \quad (9)$$

一方、 $e \sim \log p$ (p : 平均主応力) 関係の直線性を仮定すると、液性指数 I_L の定義より

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{e - e_p}{e_L - e_p} = \frac{\log p_p - \log p_L}{\log p_p - \log p_L} \quad (10)$$

となる。ここで添字 p, L はそれぞれ塑性限界、液性限界のときの量であることを示す。一方、流動状態にある粘性土は、いわゆる限界状態 (critical state) にある。このとき偏差応力 q と平均主応力 p は、限界状態線の傾きを M とするとき

$$q = Mp \quad (11)$$

という関係にある。したがって式(10)は

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{\log q_p - \log q_L}{\log q_p - \log q_L} \quad (12)$$

となる。前述のように、液性限界及び塑性限界時の強度 q_L 及び q_p はほぼ定数とみなせるので、よく練り返した粘土の強度 q は液性指数 I_L の関数となることが式(12)から予想される。

第2章で述べたように、よく練り返した粘性土の非排水粘着力 c_{ur} と降伏値 τ_y は同じ量であるので、液性指数 I_L と τ_y も密接な関係にあることが予想される。

但し、以上は通常の土質試験で観察されている現象を組み合わせただけのものであるので、いわゆる土とみなせる範疇の粘性土、すなわち液性指数が1をわずかに越える程度までの水分量の粘性土に対する考察である。この論文では液性指数が1を大きく越える液体状の粘性土も対象としており、以上の考察をどこまで拡張できるかどうか、実験データで確認する。

図3及び図4は表1に示す粘性土の降伏値 τ_y 又はよく練り返した粘性土の非排水粘着力 c_{ur} と含水比 w 及び液性指数 I_L との関係を示したものである。

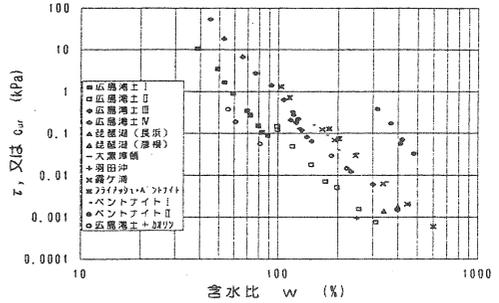


図3 τ_y 又は c_{ur} と含水比 w の関係

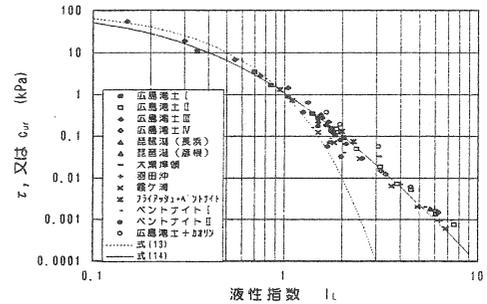


図4 τ_y 又は c_{ur} と液性指数 I_L の関係

含水比と降伏値 τ_y 又はよく練り返した粘性土の非排水粘着力 c_{ur} との関係は、ばらつきが大きく、対応がよくない。例えば含水比300%程度の降伏値は3桁程度異なっており、最小のグループを基準にすると1000倍の開きがある。これは、粘性土に含まれる粘土鉱物の違いにより、水を媒介とした粘土粒子間の電気化学的作用が異なるために、同一水分量でもコンシステンシーが異なるためである。

これに対して、液性指数と τ_y 又は c_{ur} との関係は極めて良好で、供試土の塑性指数 I_p が18から225まで広範囲であるにも関わらず、統一的に表現できている。これは式(12)で説明したように、液性限界及び塑性限界時の強度 q_L 及び q_p はほぼ定数とみなすことができるためである。図4から分かるように、このような考え方は液性指数が8程度までは成立している。

以上から分かるように、粘性土に関しては、水分量(含水比)のみでは流動性は表現できない。また、体

積濃度、重量濃度も含水比と表裏一体の関係にあるので、これらのみで粘性土の流動性を表現することも無理がある。

なお図4で、液性指数が1に対応する降伏値は約1kPaであり、Skempton⁹⁾や三笠⁷⁾のデータと一致する。図4からは、液性指数が0.4, 1, 2, 6, 10のときの降伏値が、それぞれ10, 1, 0.1, 0.001, 0.0001kPa程度であることも分かる。

また、液性指数が0及び1のとき c_{ur} が100kPa及び1kPaとすると、式(12)から式(13)が得られる。図4の破線は式(13)を示したものである。液性指数が1を越えると、式(13)は実験データからずれていく。これは式(12)を導出した過程、特に $e \sim \log p$ 関係の直線性が、液体状の粘性土スラリーになると崩れるためと思われる。一方、図4の実線は実験データの近似線で、式(14)で与えられる。

$$c_{ur} = \tau_y = 10^{2-2I_L} \quad (\text{kPa}) \quad (13)$$

$$c_{ur} = \tau_y = 100 \left(\frac{I_L + 0.7}{0.7} \right)^{-5.1} \quad (\text{kPa}) \quad (14)$$

6. 塑性粘度 η_{pl}

第3章で紹介したように、懸濁液の粘度に関しては、Einstein¹²⁾以来多くの研究がなされてきたが、粘性土の懸濁液に関しては適用性が乏しい。この中で、大同が導入した団粒(ブロック)を基準とした体積濃度(ブロックキュレート濃度)を用いる方法は、他の方法に比べて適用性がある。これは、ブロックや最終沈降高さの中に粘土鉱物の影響が含まれるため、水分量だけでなく土質の影響が考慮されているためと思われる。但しこの方法には、最終沈降高さがシリンダー高さ、すなわち自重圧密高さの影響を受けるなどの、沈降試験方法に関する曖昧さが存在する。

これまでの考察で明らかのように、土性値にも粘土鉱物の影響が含まれているので、塑性粘度 η_{pl} も土性値で表現可能であることが予想される。これは、著者が実施した2000g (g:重力加速度)の遠心力場での

粘性土スラリーの沈降試験結果¹¹⁾からも推測できる。すなわち、この実験には液性限界値 w_L が50%から150%までの粘性土を用いたが、上記遠心力場での沈降泥の含水比は液性限界値にほぼ等しかった。

重力場での沈降泥の含水比は液性限界値までは下がらないと思われるが、ここでは文字どおり液性限界が液体状態の限界と仮定する。すなわち、沈降泥の含水比を液性限界値と等しいものと仮定し、さらに飽和度を100%と仮定すると、初期の体積に対する沈降泥の体積濃度 c_{vs} は式(15)のようになる。

$$c_{vs} = (1 + G_s w_L / 100) / (1 + G_s w / 100) \quad (15)$$

この沈降泥が等径の球形ブロックの集合体と仮定し、球が最疎充填構造(充填率0.524)とすると、沈降泥の体積濃度 c_{vs} に0.524を乗じたものが球形ブロックの体積濃度 c_{va} となる。すなわち

$$c_{va} = 0.524(1 + G_s w_L / 100) / (1 + G_s w / 100) \quad (16)$$

となる。以下では式(16)を見掛けの体積濃度と呼ぶ。

塑性粘度 η_{pl} を試験時の温度の水の粘度で割った相対粘度 η_r と含水比 w 及び見掛けの体積濃度 c_{va} の関係は、図5及び図6のようになる。

予想したように、相対粘度と含水比の関係はばらつきが大きく、水分量のみで粘性土の粘度は表現できない。これに対し、見掛けの体積濃度を用いると、含水比のみで整理する場合よりもばらつきは小さくなる。しかしそれでもばらつきが残っているのは、実験誤差の他に、厳密な意味では液性限界状態の土の体積が、沈降泥の体積(ブロック集合体の体積)となっていないことに起因しているものと考えられる。

さて、粘性土スラリーの水分量を液性状態まで減じると流動性がなくなって相対粘度が無限大になるものと仮定する。すると $c_{va}=0.524$ で相対粘度は無限大になり、濃度が0のときは相対粘度が1になる。これを満足するようにBrinkman¹⁾の式をベースに式を作ると、式(17)のようになる。図6の実線は式(17)を示したものである。

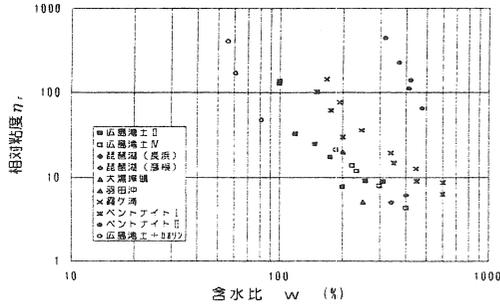


図5 含水比wと相対粘度η_rの関係

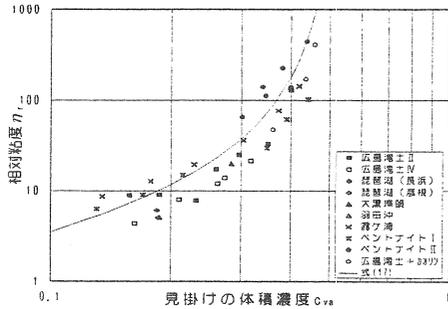


図6 見掛けの体積濃度c_{va}と相対粘度η_rの関係

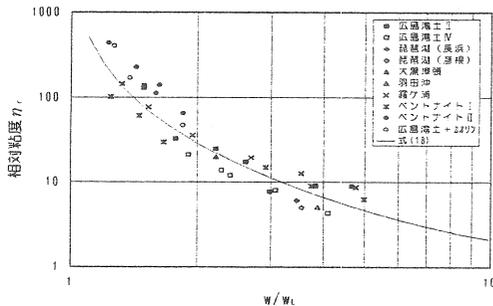


図7 含水比と液性限界の比と相対粘度の関係

$$\eta_r = (0.524 - c_{va})^{-2.5} - 5.03 \quad (17)$$

なお、式(16)及び式(17)で相対粘度をある程度表現できるということは、土粒子真比重G_sはほぼ定数とみなせるので、相対粘度η_rは含水比wと液性限界w_Lで表現できるということである。そこで含水比wと液性限界w_Lの比と相対粘度η_rの関係を図示すると、図7のようになる。式(16)及び式(17)の手順を踏まなくても、単純に含水比と液性限界の比(w/w_L)を求めれば、図7から相対粘度を推定することができる。なお、図

7の実線は、式(18)に示す実験データの近似線である。

$$\eta_r = 30(w/w_L - 0.95)^{-1.5} + 1 \quad (18)$$

7. 結論

土質が大きく異なる粘性土の粘度試験結果を用いて、降伏値τ_y及び塑性粘度η_{pl}と土性値の関係を調査し、以下の結論を得た。

- (1) 液性指数I_Lが8程度までは、土質が大きく異なっても、降伏値τ_yは液性指数I_Lで表現できる。
- (2) 塑性粘度η_{pl}を水の粘度で割った無次元値(相対粘度η_r)は、土質が大きく異なっても、含水比と液性限界の比(w/w_L)で表現できる。
- (3) 降伏値τ_yと液性指数I_Lの関係、及び、相対粘度η_rと(w/w_L)の関係の近似式を求めた。

このように降伏値τ_y及び塑性粘度η_{pl}を土性値で整理できるのは、粘性土粒子間に働く電気化学的な作用の影響を、土性値は含んでいるためと考えられる。

参考文献

- 1) Brinkman, H. C. (1952) : The viscosity of concentrated Suspensions and solutions, The Journal of Chemical Physics, Vol. 20, No. 4, p. 571
- 2) 森芳郎, 乙竹直(1956) : 懸濁液の粘度について, 化学工学, 第20巻, 第9号, pp. 16-22
- 3) 大同淳之(1971) : 粘土を多量に含む流体の粘土と降伏値, 第15回水理講演会講演集, pp. 1-6
- 4) 大垣真一郎, 松尾友矩(1973) : 高濃度懸濁液の流動特性について, 土木学会論文報告集, 第210号, pp. 21-32
- 5) 三村信男, 松尾友矩(1979) : 中立粒子浮遊流とカオリンフロク, カオリン浮遊流の乱流特性, 土木学会論文報告集, 第284号, pp. 49-58
- 6) Skempton, A. W. and Northey, R. D. (1952) : The sensitivity of clays, Geotechnique Vol. III
- 7) 三笠正人(1967) : 粘性土の状態図について, 土木学会, 第22回年次学術講演会, pp. 60-1~4
- 8) 野口直樹, 宇都宮司(1978) : 粘性土の流動試験結果, 第15回土質工学研究発表会講演集, pp. 445-448
- 9) Reiner, M. (1960) : Deformation, strain, and flow, Lewis London (山田, 柳澤訳(1962) : レオロジーの基礎理論, コロナ)
- 10) Scofield, A. N. and Wroth, C. P. (1968) : Critical State Soil Mechanics, McGraw Hill, London
- 11) 熊本直樹, 尾川正行(1991) : 遠心脱水装置による細粒土の脱水効果, 地盤と建設, Vol. 9, No. 1, pp. 169-174
- 12) Einstein, A. (1906) : Eine neue Bestimmung der Molekeldimensenen, Ann. Phys. 19, p. 289