

다변수모델에 의한 압축지수 C_c 및 압축비 C_r 의 통계적 해석

A Multivariate Regression Analysis for Compression Index and Compressibility Ratio

홍 병 만*
Hong, Byung-man

Abstract

A multivariate regression analysis for compression index and compressibility ratio of clayey soils in regard to some soil indices, i.e natural water content, Atterberg limits, and in-situ void ratio, was presented to estimate the primary consolidation settlement of weak soils.

The multiple parameter analysis can be adopted to get reliable values for the compression index and the compressibility ratio in terms of natural water content and in-situ void ratio. In order to determine the primary consolidation settlement of highly organic clays, it is useful to use the liquid limit and the natural water content as independent variables. Since the present multiple linear regression, however, shows essentially the scatterness in the soil properties according to the sampling and testing processes, it must be noted that compression indices and compressibility ratios obtained by the liner regression may not be the absolute solutions. A future study will be necessary to approach more theoretically with considering various factors affecting soil compressibility.

I. 서론

점성토 지반의 침하거동은 흙의 입도분포, 광물성분, 시료의 교란정도 및 응력이력에 따라서 변화하며^{1,2)}, 정규압밀점토의 지반의 일차 압밀침하량 S 는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$S = \frac{C_c}{1 + e_o} \cdot H \cdot \log_{10} \left(\frac{p_o + \Delta p}{p_o} \right) \quad (1)$$

여기서, C_c 는 흙의 압축지수, e_o 는 압밀층 중간부의 초기 간극비, H 는 압밀층의 두께, p_o 는 압축곡선에서 e_o 에 대응한 초기

* 농어촌진흥공사 농어촌연구원

키워드 : 압축지수, 압축비, 매개변수, 압밀침하

연직유효응력, 그리고 Δp 는 압축응력의 증분이다. 식 (1)에서 압축지수 C_c 는 불교란 시료에 대한 표준 압밀시험(KS F 2316)을 통해 얻을 수 있다.

그러나 압밀시험은 다른 토질시험에 비해 많은 시간과 경비가 소요되므로 Skempton^{17,18)} 및 Terzaghi & Peck 등²¹⁾은 비교적 간편하면서도 신뢰성이 있는 토질정수와 압밀시험 결과치에 대한 회귀분석으로 압축지수를 추정하였다.

한편, 유기물이 많아서 현장의 초기 간극비를 산정하기 어려운 경우에 대하여 Ra등⁵⁾은 토질시험을 통해 얻은 토질정수와와의 관계로부터 압축비 $C_r (= C_c / 1 + e_o)$ 를 이용한 침하량 산정식을 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$S = H \cdot C_r \cdot \log_{10} \left(\frac{p_o + \Delta p}{p_o} \right) \quad (2)$$

Skempton과 Terzaghi & Peck의 이후에도 많은 연구자들에 의해 자연함수비 w_N , 초기간극비 e_o , 액성한계 w_L 또는 소성지수 I_p 등과 C_c 또는 C_r 의 관계식이 제안되어 왔으며, 지금까지 제안된 식들을 정리하면 <Table 1>과 같고, 이들의 회귀방정식은 간단하게 식 (3) 및 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_c = f(e_o, w_N, w_L, I_p) \quad (3)$$

$$C_r = f(e_o, w_N, w_L) \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서 보는 바와 같이 점성토의 압축지수는 여러 토질정수들에 의해 영향을 받음을 알 수 있다. Al-Khafaji 등²⁾

과 Azzouz 등⁶⁾에 의하면 C_c 에 관한 식을 만들 때는 독립변수가 하나 이상 포함될 때 더욱 높은 상관성과 낮은 표준편차를 나타내며, 일반적으로 실용적인 목적을 위해서는 시험이 간단하면서도 신뢰성이 높은 토질정수를 독립변수로 선정하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 Herrero¹²⁾ 등의 실험 결과치를 이용하여 C_c 및 C_r 을 다변수모델(Multiple parameter model)로 표현하고, 토질정수들이 C_c 및 C_r 에 미치는 영향을 분석하였다.

II. 흙의 압축성과 토질정수의 관계

하중이 재하된 점성토지반은 (1)토립자 자체의 변형 및 배열상태의 변화, (2)공극속에 있는 공기 및 물의 압축, (3)압축에 의한 과잉 간극수압의 소산 등의 이유로 압축이 진행된다. 여기서 토립자의 압축량은 매우 작으므로 무시할 수 있고, 물은 비압축성으로 간주되어 물자체의 압축량을 무시할 수 있으므로 점성토지반의 압축은 간극수 및 공기의 유출과 이로 인한 입자배열의 저위화에 의해서 일어난다고 할 수 있다. 따라서 다음과 같은 토질정수들을 압축성의 지배적 요소로 생각할 수 있다.

1. 초기 간극비, e_o

간극비의 변화는 토립자의 크기, 배열 및 결합상태, 응력이력 등과 밀접한 관계가 있고 지반의 체적변화를 나타내므로 점토의 압축특성을 나타내는데 가장 적합한 기본적 요소이다. Yong 등²⁵⁾에 따르면, 점토입자의 퇴적구조와 점토광물의 종류에 따라서도 압

<Table 1> Equations for prediction of soil compression index and compressibility ratio

Equations	Applicability	Reference
$C_c = 0.007(W_L - 10)$ $C_c = 0.0046(W_L - 9)$ $C_c = 0.009(W_L - 10)$	Remoulded clays Brazilian clays Normally consolidated clays	Skempton Cozzoline Terzaghi & Peck
$C_c = 0.006(W_L - 9)$ $C_c = (W_L - 13)/109$	All clays with liquid limit less than 100% All clays	Azzouz et al ⁶⁾ Mayne
$C_c = 0.85\sqrt{w_N/100^3}$ $C_c = 0.0115W_N$ $C_c = 0.01(W_N - 5)$ $C_c = 0.01W_N$ $C_c = 0.01(W_N - 7.549)$	Finnish muds and clays Organic soils, peat organic silt and clay All clays All clays All clays	Helenelund Moran et al. Azzouz et al ⁶⁾ Koppula Herrero
$C_c = 0.54(e_o - 0.35)$ $C_c = 0.29(e_o - 0.27)$ $C_c = 0.35(e_o - 0.50)$ $C_c = 0.43(e_o - 0.25)$ $C_c = 0.75(e_o - 0.50)$	All clays Inorganic, cohesive soil, organic silt, clay Organic, fine-grained soil, organic silt, little clay Brazilian clay	Nishida Hough Hough Cozzolino
$C_c = 0.141G_s \left(\frac{1+e_o}{G_s} \right)^{2.38}$	All clays	Herreo
$C_c = \frac{1}{2} \cdot I_p \cdot G_s$	Remoulded clays of the Gulf of Mexico and the North Sea	Wroth & Wood
$C_r = 0.0043 \cdot W_N$ $C_r = 0.0045 \cdot W_N$	Marine clays of South Asia	Cox
$C_r = 0.014(e_o + 0.007)$ $C_r = 0.03(W_N + 7)$ $C_r = 0.02(W_L + 9)$	Clays from Greece and some parts of the U.S.A	Azzouz et al ⁶⁾
$C_r = 0.056(W_N - 0.037)$	Bangkok clays	Brenner et al.

밀곡선의 형상이 달라질 뿐만 아니라 간극비가 서로 다르다.

2. 자연함수비, w_N

액성한계나 소성한계는 공학적인 의미는 있으나 실험자의 숙련도에 따라서 값의 변화 폭이 크므로 신뢰성이 저하되고, 일반적으로 문제가 되는 점토층은 투수계수가 작고, 두께가 상당하므로 함수비는 기상조건의 변화에 의하여 큰 영향을 받지 않은 상태에서 흙의 물리적 특성을 잘 나타낸다.

3. 액성한계, w_L

액성한계는 흙의 액성상태와 소성상태의 경계가 되는 함수비로서 흙의 자중에 의해 유동이 시작될 때의 함수비이다. 액성한계는 점토광물의 종류, 양 및 유기물의 함유량에 따라서 그 크기가 달라지며, 흙의 압축성에도 영향을 미친다. <Table 2>는 대표적인 점토광물의 Atterberg 한계값을 나타낸 것으로서 압축성의 크기는 Kaolinite < Illite < Montmorillonite의 순서이다.

<Table 2> Typical values of Atterberg limits of clay minerals

Clay minerals	Liquid limit(%)	Plastic limit(%)
Kaolinite	35~100	25~35
Illite	50~100	30~60
Montmorillonite	100~800	50~100

이로부터 점토광물의 상대적인 함유율에 따라서 그 흙의 압축성이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 또한 점토의 함유량과 액성한계는 직선적인 비례관계가 있으며, 이는 곧 점토의 함유율이 클수록 압축성이 큼을 의미한

다. 점토내의 유기물은 생화학적 분해과정을 거치면서 지반의 침하를 유발시킨다. Andersland 등³⁾에 따르면 유기물의 함유량이 많을수록 압축성이 크다고 하였으며, Araman⁴⁾에 의하면 Terzaghi의 압밀이론에 의한 침하량 산정방법은 유기물의 함유량이 중량비로 20% 이하인 경우에만 적용이 가능하며, 점토내의 유기물 함유량이 20% 이상인 경우에는 비선형적인 해석을 하여야 한다고 한다.

4. 소성지수, I_p

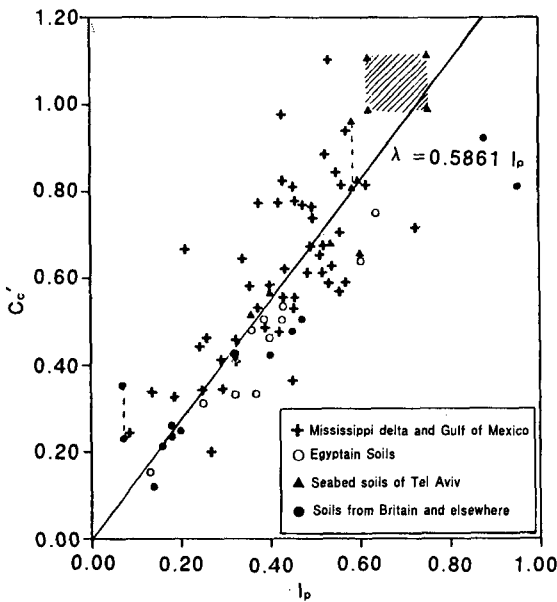
반죽된 세립토가 소성을 나타내는 함수비의 범위를 나타내는 지수인 소성지수는 액성한계와 소성한계의 차로 표시되는데, Atterberg, Terzaghi, Russel 및 Seed 등에 의하면 점토광물의 종류가 동일한 경우에는 점토의 함유량에 거의 직선적으로 비례한다. Wroth & Wood²⁴⁾는 Skempton & Northey¹⁸⁾의 연구결과와 한계상태 이론을 토대로 소성한계시의 반죽된 점토의 비배수 전단강도는 액성한계시의 약 100배라는 시험결과로부터 반죽된 점토의 압축지수와 소성지수의 관계식을 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$C_c = \frac{1}{2} \cdot I_p \cdot G_s \quad (5)$$

III. 분석방법

1. 다변수 모델에 의한 상관분석

y 를 종속변수 x_1 및 x_2 의 선형함수라 할



<Fig. 1> Values of compressibility(C_c) and plasticity index(I_p)¹⁷⁾

때 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 \quad (6)$$

여기서, 계수 a_0 , a_1 및 a_2 는 각각 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a_0} &= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_{1,i} - a_2 \cdot x_{2,i}) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a_1} &= -2 \sum x_{1,i} \cdot (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_{1,i} - a_2 \cdot x_{2,i}) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a_2} &= -2 \sum x_{2,i} \cdot (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_{1,i} - a_2 \cdot x_{2,i}) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, E는 $i = 1 \sim n$ 의 각 경우의 잔차의 제곱의 합이다.

2. 분석에 사용된 토질시료의 성질

분석에 사용된 시료의 토질정수는 <Table

3)과 같으며, 토질범위는 $w_N = 12.0 \sim 147.4\%$, $w_L = 24 \sim 166\%$, $e_0 = 0.365 \sim 3.685$, 압축지수 $C_c = 0.041 \sim 1.450$ 이며, 통일흙 분류법(USCS)에 따른 흙의 분류와 시료의 점수는 점토(CH 23점, CL 33점)와 유기질 토(OH 14점)로서 총 72점이다.

<Table 3> Soil-index properties and their classification used in multivariate regression analysis

w_N	w_L	e_0	C_c	USCS	w_N	w_L	e_0	C_c	USCS
26.8	51	.775	.114	CH	227	38	.635	.117	CL
41.7	60	1.151	.339	CH	29.6	-	.857	.119	CL
32.7	87	0.975	.134	CH	17.1	-	.544	.061	CL
30.3	55	.858	.136	CH	40.5	45	1.146	.256	CL
28.7	65	.802	.090	CH	35.5	35	1.110	.041	CL
45.6	92	1.240	.387	CH	26.1	35	.740	.068	CL
37.3	55	1.010	.210	CH	12.6	31	.368	.072	CL
44.0	81	1.200	.370	CH	30.5	-	.867	.210	CL
48.3	83	1.290	.380	CH	25.2	40	.695	.190	CL
34.7	64	.940	.340	CH	16.8	35	.508	.125	CL
45.6	84	1.290	.450	CH	21.8	39	.596	.145	CL
35.2	67	.938	.260	CH	22.2	96	.593	.141	CL
30.9	92	.880	.270	CH	17.5	43	.474	.113	CL
26.9	80	.850	.215	CH	19.3	37	.529	.110	CL
21.6	54	.570	.094	CH	13.6	29	.508	.113	CL
26.1	53	.740	.201	CH	19.2	27	.508	.126	CL
45.6	69	1.315	.360	CH	12.4	39	.476	.140	CL
28.5	58	.779	.170	CH	14.6	36	.480	.087	CL
39.7	91	1.140	.440	CH	46.7	41	1.262	.450	CL
39.3	77	1.037	.302	CH	16.5	31	.481	.120	CL
32.0	46	.862	.260	CH	21.0	38	.567	.140	CL
38.7	85	1.070	.180	CH					
51.8	52	1.371	.460	CH					
25.4	47	.750	.068	CL	63.6	56	1.544	.510	OH
24.6	48	.680	.220	CL	88.1	112	2.489	.870	OH
12.0	44	.870	.340	CL	93.6	104	2.363	.990	OH
20.7	24	.623	.172	CL	65.8	96	1.737	.500	OH
31.0	47	.864	.270	CL	129.3	166	3.045	1.420	OH
26.5	32	.765	.180	CL	101.0	120	2.704	1.070	OH
17.6	45	.505	.076	CL	103.9	109	2.651	.820	OH
34.4	45	.953	.225	CL	147.4	134	3.685	1.450	OH
13.0	29	.365	.051	CL	108.5	122	2.643	.900	OH
26.4	47	.727	.170	CL	101.4	124	2.482	1.020	OH
20.3	45	.580	.119	CL	132.7	164	3.141	1.430	OH
22.2	42	.618	.107	CL	111.5	130	2.918	1.000	OH
25.5	39	.716	.098	CL	127.2	115	3.254	1.160	OH
					109.4	121	2.854	1.130	OH

IV. 해석 및 고찰

$$C_c = -0.1252 + 0.00454w_N + 0.2473e_o \quad (8)$$

1. 압축지수와 토질정수와의 관계

압축지수와 여러 토질정수의 관계를 여러 가지 선형회귀모델로 나타낸 것으로서 각각에 대한 상관분석 결과를 함께 나타내었다. <Table 4>에서 보는 바와 같이 다변수모델을 이용할 경우에 단일변수 모델보다 다소 높은 상관성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 단 w_L 과의 상관성이 낮은 것은 시험자의 숙련도에 따라서 결과치에 차이가 많은 것을 반영한 것으로 판단된다. 본 연구에서 다변수모델을 이용한 회기분석의 결과에 의하면, 자연함수비 w_N 및 초기 간극비 e_o 와 압축지수 C_c 의 관계는 식 (8)과 같다.

(상관계수 $r=0.979$, 표준편차 $S=0.074$)
 여기서, 상관계수 및 표준편차 등은 Al-Khafaji 등이 보고한 액성한계 w_L 및 초기간극비 e_o 와의 상관성($r=0.957$, $S=0.077$)보다 비교적 높다.

2. 압축비와 토질정수와의 관계

압축비 C_r 에 대한 다변수모델을 이용한 회기분석결과는 식 (9) 및 식 (10)과 같으며, 상관계수와 표준편차가 각각 0.915, 0.918과 0.033, 0.032으로 상관성이 매우 높은

<Table 4> Regression equations for the comprssion index and the compressibility ratio

Parameter Models	Regression Equation	Correlation Coefficient, r	Standard Deviation, S
Compression index, C_c			
$f(W_N)$	$C_c = -0.147 + 0.434e_o$	0.978	0.0762
$f(W_N)$	$C_c = -0.095 + 0.011W_N$	0.977	0.0772
$f(W_N)$	$C_c = -0.260 + 0.010W_N$	0.897	0.1627
$f(W_N, e_o)$	$C_c = -0.1252 + 0.0045W_N + 0.2473e_o$	0.979	0.074
$f(W_L, e_o)$	$C_c = -0.1554 + 0.00058W_N + 0.41115e_o$	0.978	0.076
$f(W_N, W_L, e_o)$	$C_c = -0.1327 + 0.00426W_N + 0.00043W_L + 0.2423e_o$	0.979	0.0747
Compressibility Ratio, C_r			
$f(e_o)$	$C_c = -0.319 + 0.091e_o$	0.915	0.0328
$f(W_N)$	$C_c = -0.043 + 0.002W_N$	0.907	0.0342
$f(W_L)$	$C_c = -0.008 + 0.002W_N$	0.854	0.0425
$f(W_N, e_o)$	$C_c = -0.0286 - 0.00073W_N + 0.12061e_o$	0.915	0.033
$f(W_L, e_o)$	$C_c = -0.0277 - 0.00030W_N + 0.07869e_o$	0.918	0.032
$f(W_N, W_L, e_o)$	$C_c = -0.0223 - 0.0010W_N + 0.00034e_o + 0.1186e_o$	0.919	0.0322

것으로 나타났다. 또한 계수값의 크기로부터 초기 간극비에 따라서 압축비의 변화가 큰 것으로 나타났다. 따라서 Rao 등¹⁵⁾이 제안한 바와 같이 유기질이 많은 점성토의 경우에 압축비를 이용하여 압밀 침하량을 추정하여도 무방할 것으로 판단되며, 약 92%의 신뢰도를 갖는 식 (9)와 식 (10)은 많은 토질시험 결과를 이용한다면 훨씬 좋은 상관성을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

압축비는 압축지수와 마찬가지로 초기 간극비를 이용한 상관식이 모두 높은 상관성을 보이고 있다. 따라서 정확하게 측정이 가능한 자연함수비를 포함하는 압축비의 식이 실용적 측면에서 바람직할 것으로 사료된다.

$$C_r = 0.0286 - 0.00073W_N + 0.12061e_o \quad (9)$$

($r = 0.915$, $S = 0.033$)

$$C_r = 0.0277 - 0.00030W_N + 0.07869e_o \quad (10)$$

($r = 0.918$, $S = 0.032$)

V. 결론

다변수모델을 이용한 압축지수 및 압축비의 회귀분석은 단일변수 모델을 이용하는 것보다 상관성이 비교적 높게 나타났다.

압축비에 대한 상관성은 압축지수에 대한 상관성보다 다소 낮으나 충분히 신뢰할 수 있다. 특히 자연함수비는 비교적 쉽고 빠르게 측정이 가능하며, 측정된 Data의 분산도가 적은 이점이 있으며, 초기간극비는 흙의 압축성을 지배하는 요소이므로 이들 두 토질정수를 독립변수로 하는 압축지수 및 압축비의 식을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 그러나 이와 같은 상관식은 예비설

계용 Data로 이용하기에 적절한 것이므로 본 설계시에는 절대적인 값으로 사용되어서는 안될 것으로 판단되며, 이론적 근거가 명확하고 간편한 상관식을 개발하는 것이 장차의 연구과제이다.

참고문헌

1. 황정규 1992. 건설기술자를 위한 지반공학의 기초원리, 구미서관.
2. Al-Khafaji, A.W.N and O.B. Andersland, 1992. "Equations for Compression index Approximation", ASCE, Vol.118, No.1, June, pp.148~153
3. Andersland, O.B. and A.W.N. Al-Khafaji, 1980. Material and Soil Compressibility, ASCE, Vol. 106, GT.7, pp.749~758
4. Arman, A., 1970. Engineering Classification of organic Soils, Highway Research Record, No.310, National Academy of Science National Academy of Engineering, Washington, D.C., pp.75~89
5. Attewell, P.B. and R.K. Tayler, 1984. Ground Movements and Their Effects on Structures, Surrey University Press, pp.268~302.
6. Azzouz, A.S., R.J Krizek, and R.B. Corrotts, 1976. Regression Analysis of Soil Compressibility, Soils and Foundations, Vol.16. No.2, June, pp.19~29.
7. Bolt, G.H., 1956. Physicochemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays, Geotechnique, 33, pp. 86~93.
8. Carrier III, W.D., L.G. Bromwell, and F. Somogyi, 1983. Design Capacity of Slurried of Mineral Waste Ponds, ASCE, Vol.109, No. GT5, May, pp.699~716.
9. Chapra, S.C. and R.P. Canale, 1989. Numerical Methods for Engineers, 2nd

- ed., McGraw-Hill, pp. 319~364.
10. Delage, T.S., A. Sridharan, and M.S. Jayadeva, 1983. Double Layer Theory and Compressibility of Clays : Discussion, *Geotechnique*, Vol. 33, pp.461~462.
 11. Herrero, D.H. and G.D. Coleman, 1976. The Correlation of Surface Area with Other Properties of Nineteen British Clay Soils, *Journal of Soil Science*, 18, No.1, pp. 118~124.
 12. Herrero, O.R., 1980. Universal Compression Index Equation, ASCE, November pp.1179~1200.
 13. Mitchell, J.K., 1976. *Fundamentals of Soil Behavior*, John-Wiley & Sons, pp.171~185.
 14. Olson, R.E. and G. Mersi, 1970. Mechanism Controlling the Compressibility of Clays, ASCE, Vol. 96, No. SM6, pp.1863~1878.
 15. Rao, S.K., L.k. Martin, and R.K. Seals, 1977. Settlement of Refuse Land Fills, Proc. Specialty Conf. of Geotech. Eng. Practice for Disposal of Solid Waste Materials, Ann Arbor, Michigan, 1977, pp. 574~598.
 16. Skempton, A.W., 1944. Notes on the Compressibility of Clays, *Quarterly Journal for Geological Society*, Vol. 100, pp.119~135.
 17. Skempton, A.W. and R.D. Northey, 1953. The Sensitivity of Clays, *Geotechnique*, 30(1), pp. 30~53.
 18. Sridharan, A. and M.S. Jayadeva, 1982. Double Layer Theory and Compressibility of Clays, *Geotechnique*, 32., No.2, pp.133~144
 19. Stamatopoulos, A.C. and P.C. Kotzias, 1973. The Specific Constrained Modulus, *Proceeding*, Vol. 1, Part 2, Moscow, pp.397~402.
 20. Terzaghi, K. and P.B. Peck, 1967. *Soil Mechanic in Engineering Practice*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., pp.72~73.
 21. Wesley, L.D., 1988. Compression Index : Misleading Parameter?" , No.6.
 22. Wood, D.M., 1990. *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, New York, pp.262~309.
 23. Wroth, C.P. and D.M. Wood, 1978. The Correlation of index Properties with Some Basic Engineering Properties of Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No.2, pp.137~145.
 24. Yong, R.W. and B.P. Warkentin, 1966. *Introduction to Soil Behavior*, The Macmillan Company.
 25. 土質工學會編, 1978. 土質工學における化學の基礎と應用-土質基礎工學ライブラリー, 土質工學會, pp. 28~84.