

# Diatom 혼합토의 공학적 특성

## Engineering Characteristics of Diatom Modified Soil Mixture

김 규 선<sup>1</sup> Kim, Kyu-Sun

### Abstract

The engineering characteristics of natural sediments containing diatom microfossils have been investigated for their abnormal deformation and strength behavior for a few decades. The presence of disk or hollow shape diatoms causes low compressibility, high hydraulic conductivity, and high shear strength of sediments. Some of these unusual differences show the characteristic of diatom owing to the interlocking of large interparticle porosity and angular particles. This phenomenon implies the possible use of diatom as modification materials to change the engineering performance of soil mixtures. This paper describes the engineering characteristics of diatom-kaolin mixture to investigate the engineering properties of diatom modified soils using conventional geotechnical tests and elastic and electromagnetic wave propagation tests. Experimental test results show the performance improvement by increasing diatom contents and the performance degradation by the breakage of interlocking between diatom particles under high effective stress.

### 요 지

Diatom 성분이 함유된 자연 퇴적토층의 공학적 특성은 대상층의 변형 및 강도의 특이한 특성 때문에 다수의 연구자에 의해 수 십년간 연구되어 왔다. 원반형 혹은 원통형 모양을 한 diatom의 존재는 재료의 낮은 압축성, 높은 투수성, 높은 전단강도 특성을 나타내게 하며, 이러한 특이한 차이점들은 큰 내부입자 간극과 모난 입자의 결합력으로 diatom의 특성을 나타낸다. 이러한 현상은 흙의 공학적 특성을 변화시켜서 지반개량 재료로써 diatom을 이용할 수 있음을 의미한다. 본 논문은 diatom 개량토의 공학적 특성을 연구하기 위해 diatom-kaolin 혼합토의 공학적 특성을 통상적인 지반공학 실험 및 탄성파를 이용한 미소변형 실험, 전자기파를 이용한 전기저항 측정실험 등을 통하여 평가하였다. 실험 결과에 따르면, diatom 함유량에 따라 흙의 공학적 개선이 이루어진 것을 확인할 수 있었으며, 높은 응력에서 diatom 입자의 결합이 파괴되어 일부 공학적 특성이 저감되는 것을 확인 할 수 있었다.

**Keywords :** Diatom, Kaolin, Microfossil, Microstructure, Soil mixture

### 1. 서 론

세립토에서는 소성지수가 증가함에 따라 전단저항각(friction angle)이 감소하는 것이 일반적인 경향이다. 하지만, 멕시코나 일본 일부 지역에 분포하는 해성 퇴적층에서는 소성지수가 매우 높음에도 불구하고 전단저항각 또한 높게 나타나는 경우가 종종 보고되고 있다.

이러한 특이한 현상은 점토에 함유되어 있는 diatom microfossil(이하 diatom)의 높은 비체적, 내부 간극, 모남 혹은 표면 거칠기, 파쇄성 등으로 인해 발생하는 흙입자 내부 공동에 많은 양의 물을 저장하는 특성 및 마찰력 증대로 인한 전단특성의 변화로 설명이 가능하다(Mesri 등, 1975; Díaz-Rodríguez 등, 1998). 많은 연구자들이 수 십년간 이러한 diatom을 함유하고 있는 흙의 특

<sup>1</sup> 정회원, 삼성물산 건설부문 기술연구센터 수석연구원 (Member, Principal Research Engineer, Construction Technology Center, Samsung C&T Corporation, 1321-20, Seocho2-dong, Seocho-gu, Seoul 137-956, Korea, Tel: +82-2-2145-6993, Fax: +82-2-2145-6477, kyusun@empas.com, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이한 거동(예를 들어, 낮은 밀도, 높은 함수비, 매우 높은 아터버그 한계, 높은 전단저항각)에 대한 이유를 규명하기 위해 diatom에 대한 연구를 진행하여 왔다(Tanaka와 Locat, 1999; Locat과 Tanaka, 2001; Shiwakoti 등, 2002; Tanaka 등, 2003; Palomino 등, 2011).

Diatom은 유기물의 골격으로 구성되는 미세(microscopic) 및 단립구조(single-celled plants)로 정의되며, 해저의 플랑크톤이 퇴적한 후 화석화하여 생성되는 것으로 보고되고 있다(Tanaka와 Locat, 1999). Diatom 퇴적물은 대체로 낮은 건조밀도와 높은 함수비를 나타내는데, 이는 0.03mm 에서 0.11mm 크기의 원통형 및 원반형 외곽 셀 구조를 가지고 있는 diatom의 구조 때문이다. Diatom의 자연 퇴적층은 diatomaceous earth 혹은 diatomite라고 부르기도 하는데, 이러한 퇴적층은 멕시코시티, 오사카만, 오이타현 등지에 다수 분포하고 있으며(Mesri 등, 1975; Khilnani와 Capik, 1989; Day, 1995; Díaz-Rodríguez 등, 1998; Shiwakoti 등, 2002), 국내의 경우에는 최근에 석유, 천연가스, 하이드레이트 관련 해저 탐사시 diatom을 함유하고 있는 해저 심해토가 동해 인근에서 발견되는 것으로 보고되고 있다(이창호 등, 2009).

이와 같은 diatom의 높은 강도 및 낮은 밀도의 상반되는 특성은 diatom을 이용하여 공학적인 특성이 개선된 공학적 처리토(engineered soil)를 개발할 수 있는 가능성을 암시하고 있다. 공학적 처리토는 자연상태의 흙의 공학적 성능을 향상시키기 위한 물리적 화학적 처리를 가한 개량된 흙을 의미하며, 이는 폐자재를 이용한 재활용 재료가 될 수도 있고, 매립지 복합차수재(composite liner)의 재료로 쓰이는 벤토나이트의 역할과 같이 혼합 재료 사용되어 재료의 성능 향상을 기대할 수도 있다. 이러한 개량된 흙들은 전통적인 토질역학에 기반했을 때 상이한 특성을 나타내어 공학적인 거동 예측이 매우 어렵기 때문에, diatom과 같이 특이한 거동을 나타내는 재료를 개량 재료로 이용하기 위해서는 diatom으로 개량된 흙에 대한 공학적 특성에 대한 평가가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 diatom의 특성을 이용한 공학적 처리토의 개발을 위한 선행 연구로서, diatom과 kaolin의 혼합토에 대한 공학적 특성을 조사하고 평가하였다. 건조 혹은 슬러리 상태의 diatom-kaolin 혼합토에 대한 아터버그 한계, 압축성, 전단강도, 전단파 속도(미소변형 강성), 전기저항 특성 등의 물리/역학/전기적 특성을 평가하였다.

## 2. 실험 재료

실험에 사용된 kaolin 재료는 미국 조지아주에서 채취되어 공기부상법(air flotation)을 이용하여 생산된 상용 kaolin이다. Diatom 재료는 상업적으로 이용이 가능한 Fossil Flour(Dirtworks™)로 불리는 유기살충제를 실험에 사용하였다. Fig. 1은 diatom과 kaolin에 대한 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope) 결과를 나타내고 있다. Diatom의 경우는 미세 간극을 포함하고 있는 원통 혹은 원반 모양의 diatom 골격을 나타내고 있는 것이 특징이다. 실험에 사용된 diatom과 kaolin의 입도분포는 Fig. 2에 나타내었다. Diatom으로 개량된 혼합토의 거동특성을 파악하기 위해, diatom과 kaolin의 중량 배합비로 조절된 혼합토(diatom 함유량 0%, 25%, 50%, 75%, 100%)를 실험 재료로 준비하였다.

## 3. 혼합토의 공학적 특성

### 3.1 물리적 특성

혼합토의 물리적 특성은 diatom 함유량을 달리한 5가지 혼합토에 대해 조사되었으며, 요약된 결과는 Table 1에

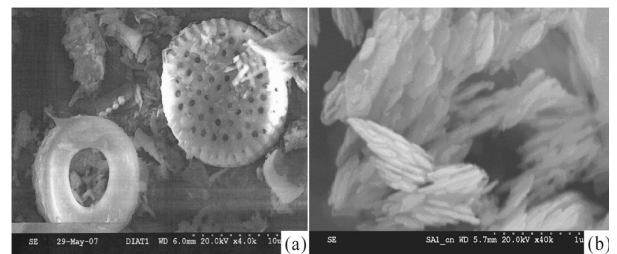


Fig. 1. SEM analysis: (a) Diatom; (b) Kaolin

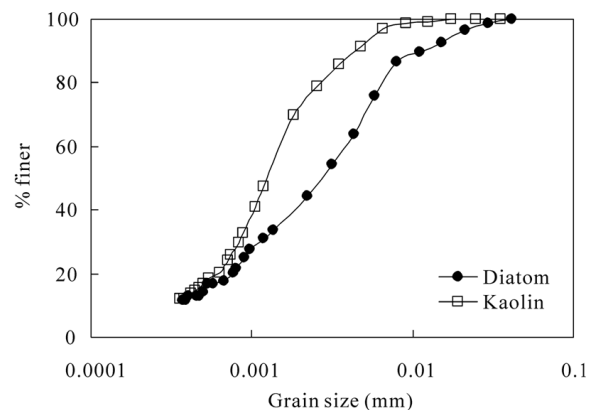


Fig. 2. Grain size distribution curves of diatom and kaolin

나타내고 있다. 단, 비중과 점토 함유율은 diatom의 함유량에 따라 선형변화 한다고 가정하여 산술적으로 산정되었다.

지반재료의 조직 조합(combination of fabric), 화학적 구성(chemical composition), 광물학적 조성(mineralogical constitution), 입자간 작용력(interparticle force) 등의 미세구조(microstructure)는 해성 퇴적토의 거동에 영향을 미치며, 지반재료의 미세구조는 흙의 조성 및 퇴적이력을 반영한다(Tanaka와 Locat, 1999). Diatom의 존재는 아터버그 한계를 조절하는 한 가지 인자이며, kaolin에 diatom과 같은 비소성 재료를 추가시키는 것은 소성지수는 다소 감소함에도 불구하고, 현저하게 액성한계 및 소성한계를 증가시키게 된다(Díaz-Rodríguez 등, 1998; Ohtsubo 등, 2002). Tanaka (2000)는 diatom 함유량에 따라 최대 30~40%의 액성한계 차이를 발생 시킨다고 보고하기도 하였다.

Fig. 3은 혼합토에서의 diatom 함유량에 따른 아터버그 한계를 나타내고 있다. Diatom 함유량의 증가에 따라 혼합토의 액성한계가 현저하게 증가하는 것이 관찰되는데, 이는 diatom의 내부골격으로 생긴 간극 때문에 물을 저장하고 있는 공간이 증가하기 때문이다(Tanaka와 Locat, 1999). 반대로 소성지수가 다소 감소하는 이유는 비소성인 diatom 함유량이 증가함에 따라 혼합토의 비소성성이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4의 소성도표에서는 diatom 성분이 증가할수록 소성도표상 우측 하단부로 이동하는 것이 관찰되었으며, Fig. 5에서 나타낸 활성도의 경우에는 diatom 함유량에 따른 영향

이 민감하지 않는 것으로 관찰되었다.

### 3.2 압축 특성

혼합토의 압축특성 파악을 위하여 중량대비로 혼합된 건조시료와 탈이온수(de-ionized water)로 조성한 슬러리 공시체에 대해 24시간 단계재하 표준압밀시험(ASTM D2345, 2004)을 수행하였다. 슬러리는 액성한계의 한 배 또는 두 배 정도의 함수비를 나타내며 유사한 초기간극비의 공시체를 형성할 수 있도록 조성되었다. Diatom을 함유한 지반은 낮은 밀도와 높은 함수비를 가지고 있다 할지라도, 거친 표면 및 높은 입자간 결합력으로 발생하는 높은 전단저항각으로 인해서 낮은 유효응력 상태에서 지지력이 크게 발휘된다. 그러나, 높

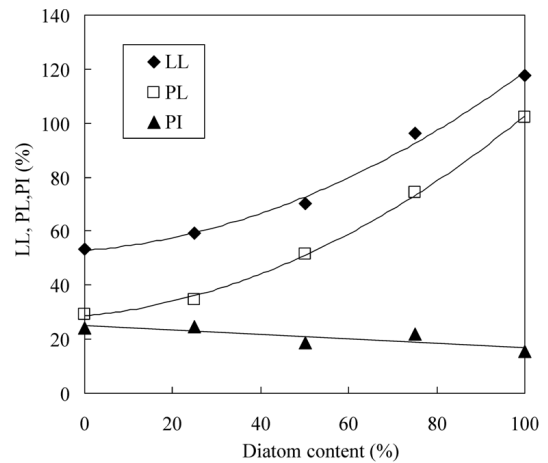


Fig. 3. Atterberg limits of soil mixtures with diatom contents

Table 1. Physical properties of soil mixtures

Soil type	Diatom content (%)	Gs	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Clay fraction (%)	A
K100	0	2.61	53.35	29.40	23.95	86.8	0.28
K75-D25	25	2.47*	59.31	34.55	24.76	74.1*	0.33
K50-D50	50	2.34*	70.08	51.31	18.77	61.4*	0.31
K25-D75	75	2.20*	96.05	74.37	21.68	48.6*	0.45
D100	100	2.06	117.61	102.06	15.54	35.9	0.43

\*: Specific gravity and clay fraction of soil mixtures are proportionally calculated based on those of pure soil materials.

Table 2. Conventional consolidation test: properties of slurry specimens

Soil type	LL(%)	w(%)	w/LL	Void ratio	Remarks
K100	53.35	100.73	1.89	2.629	
K75-D25	59.31	108.18	1.82	2.675	
K50-D50	70.08	116.91	1.67	2.730	
K25-D75	96.05	118.34	1.23	2.600	
D100	117.61	154.35	1.31	3.180	Excluding data from an analysis

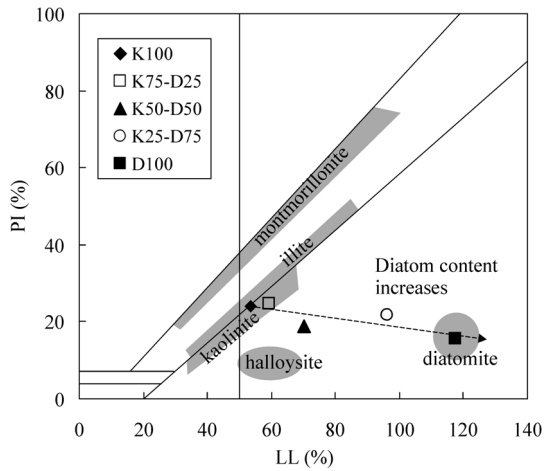


Fig. 4. Variations in the plasticity chart with diatom contents (Mitchell and Soga, 2005)

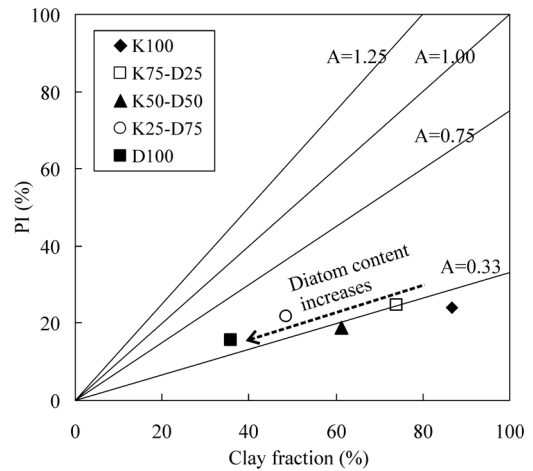


Fig. 5. Variations in the activity chart with diatom contents

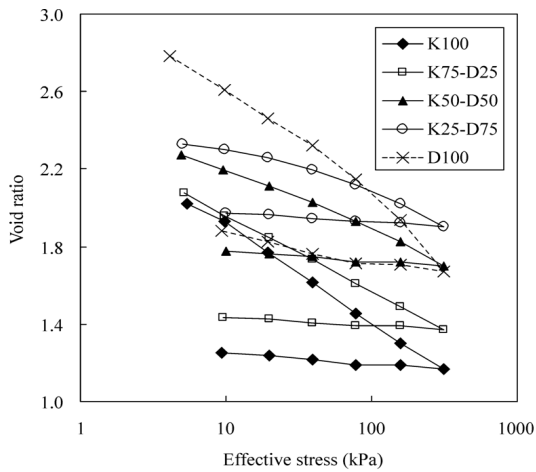


Fig. 6. Consolidation curves of slurry specimens with diatom contents

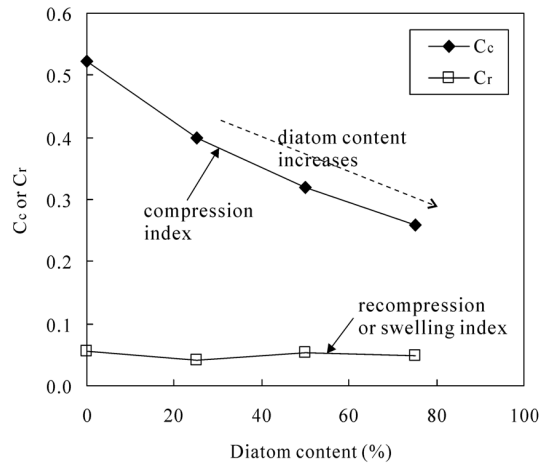


Fig. 7. Compression and recompression indexes with diatom contents

은 유효응력이 작용하는 조건에서 diatom의 원통형 구조가 파괴될 경우에는 압축성이 현저하게 증가할 수도 있다. 기존의 연구에서도 diatom을 함유한 흙에서의 조직 결합력의 파괴로 인하여 높은 압축성을 나타내기도 하는 것으로 보고되고 있다(Day, 1995; Shiwakoti 등, 2002; Hong 등, 2006). 따라서, 압력에 따라 변화하는 혼합토의 공학적 특성은 diatom의 역학적 특성 연구에서 흥미로운 현상 중 하나이며, diatom 혼합토의 압밀 매커니즘은 통상의 압축의 과정뿐만 아니라 항복하중 이상에서 diatom 입자간 결합력의 붕괴 및 입자의 파괴과정 또한 포함될 수도 있다.

Fig. 6은 혼합토로 조성된 슬러리 공시체에 대한 압밀 시험에 의한 압축곡선을 나타낸다. 슬러리 공시체는 초기간극비 2.6~2.7을 목표로 조성되었으나, 순수 diatom 슬러리의 경우에는 사질토와 같은 거동을 보이다가 순

간적으로 물을 흡수하며 슬러리화 되므로 동일한 초기간극비의 공시체를 조성하기에는 어려움이 있었다. 따라서, Fig. 6에 나타난 바와 같이 순수 diatom의 경우에는 다른 혼합토와는 상이한 거동을 보이므로, 압밀시험 결과 분석에서는 제외하였다. 전반적으로 혼합토는 diatom의 함유량이 증가함에 따라 압축지수는 감소하고 재압축지수는 큰 변화는 없는 것으로 나타났다(Fig. 7). 압축지수가 감소하는 이유로는 diatom의 증가로 발생하는 입자간 마찰력으로 인해 압축성이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 슬러리 시료에 대한 압밀시험 결과에서는 diatom 입자의 파괴 여부는 알 수 없지만, diatom 함유량이 증가할수록 압밀곡선에서 곡률이 생기는 경향성으로 미루어보아 입자간의 결합력의 손실이 발생하였음을 추측할 수 있다(Fig. 6 - diatom 75% 시료).

### 3.3 전단 특성

건조 혼합시료에 대한 전단특성 파악을 위해서 직접 전단시험(ASTM D3080, 1998)을 이용하여 네 가지 연직응력(100, 200, 400, 600 kPa)에 대해 최대 전단응력을 평가하였다(Table 3과 Fig. 8). Fig. 9는 diatom 함유량에 따른 최대 전단응력을 나타낸다. 시험결과 diatom 함유량 증가에 따라 뚜렷하게 최대 전단응력이 증가하지는 않았지만, 대체적으로 diatom 함유량 40~60%를 기준으로 최대 전단응력이 다소 증가하는 경향을 나타낸다. 단, 연직하중 600kPa을 작용시킨 순수 diatom 시료의 경

우에는 diatom 함유량이 50%, 75%인 혼합토에 비하여 diatom 함유량이 증가했음에도 불구하고 최대 전단응력이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 diatom 입자결합 구조의 파괴로 인해서 전단강도 개선효과가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

### 3.4 미소변형 특성

건조 혼합토의 미소변형 강성을 측정하기 위해 벤더 엘리먼트(bender element)를 이용하여 다양한 응력수준에 대한 전단파 속도가 평가되었다. 전단파 속도를 측정

Table 3. Direct shear test: properties of dry specimens

Soil type	Gs	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Void ratio associated with normal stress			
			100 kPa	200 kPa	400 kPa	600 kPa
K100	2.61	4.56~5.05	4.520	4.500	4.610	4.068
K75-D25	2.47	4.53~4.77	4.352	4.091	4.214	4.079
K50-D50	2.34	4.21~4.36	4.346	4.290	4.452	4.270
K25-D75	2.20	4.05~4.18	4.158	4.328	4.317	4.254
D100	2.06	3.69~3.81	4.470	4.317	4.305	4.300

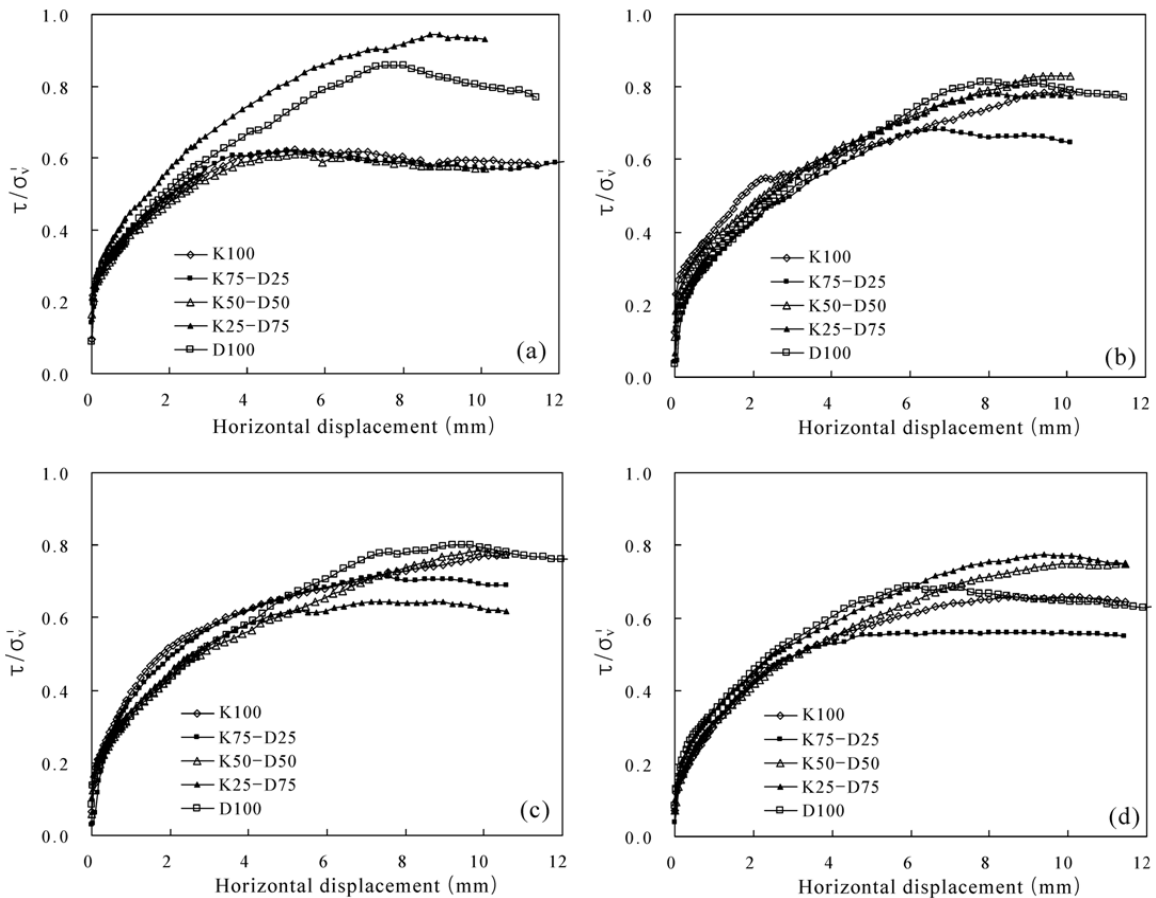


Fig. 8. Direct shear tests with diatom contents and normal stresses: (a) normal stress 100 kPa; (b) normal stress 200 kPa; (c) normal stress 400 kPa; (d) normal stress 600 kPa

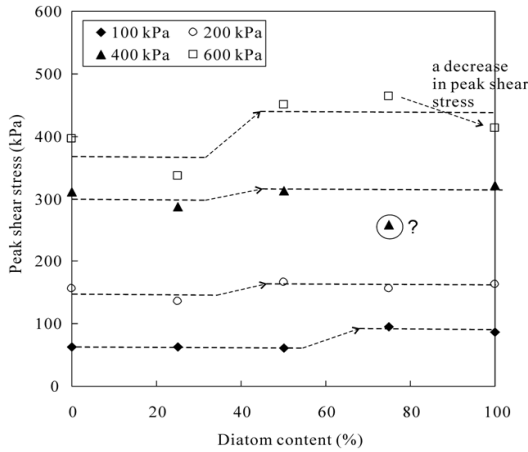


Fig. 9. Peak shear strength values with diatom contents

Table 4. Shear wave velocity measurement: properties of dry specimens

Soil type	Gs	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Void ratio
K100	2.61	5.50	3.651
K75-D25	2.47	4.90	3.940
K50-D50	2.34	5.18	3.431
K25-D75	2.20	4.31	4.011
D100	2.06	4.21	3.798

하기 위해 2개의 횡방향(vertically polarized), 2개의 종방향(horizontally polarized) 벤더엘리먼트를 장착한 PVC (polyvinyl chloride) 셀을 제작하였으며, 시험에 사용된 공시체의 초기조건은 Table 4에 나타내었다. 압밀시험 프레임에 제작된 셀을 장착하여 응력조건을 변화(10-20-40-80-160-320kPa)시키며 연직응력을 가하여 재하 단계 별 전단파 속도를 측정하였다. 전단파 속도는 응력의 상태와 파의 전파방향에 영향을 받을 수 있으므로, 파의 전파는 횡방향 및 종방향 극성의 파형 모두 측정하여 극성의 영향성을 비교하였으나, 시험결과에서는 그 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 극성에 상관없이 모든 데이터를 분석에 활용하였다. 흙의 전단파 속도는 유효응력과 거듭제곱의 형태를 가지며 식 (1)과 같이 표현할 수 있다(Duffy와 Mindlin 1957; Hardin과 Richart 1963).

$$V_s = \alpha_s \cdot \left( \frac{\sigma'_m}{p_r} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서,  $\sigma'_m$ (kPa)은 평균유효응력,  $p_r$ 는 기준응력(= 1kPa),  $\alpha_s$ (m/s)는 흙의 조직과 입자의 강성과 관련한 계수,  $\beta$ 는 유효응력 변화에 따른 입자간 접촉특성 및 흙의 조직의

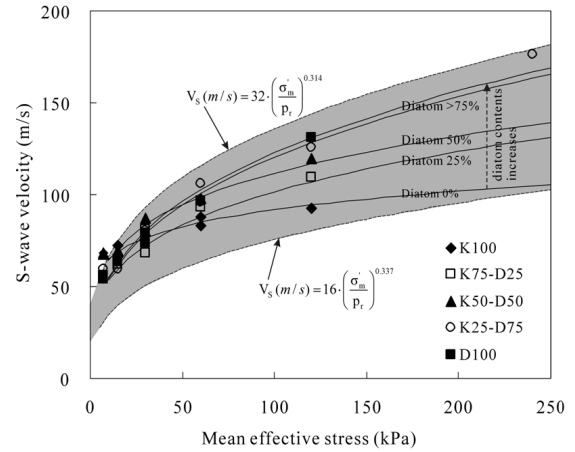


Fig. 10. Shear wave velocity measurements with diatom contents

Table 5. Electrical resistance measurement: properties of slurry specimens

Soil type	LL(%)	w(%)	w/LL	Void ratio
K100	53.35	47.5	0.89	1.241
K75-D25	59.31	56.5	0.95	1.395
K50-D50	70.08	82.5	1.18	1.930
K25-D75	96.05	109.0	1.13	2.419
D100	117.61	135.4	1.15	2.788

안정성과 관련한 지수를 의미한다.

응력수준에 따른 전단파 속도를 나타내는 식 (1)을 이용하여 도시한 실험 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 각 혼합시료에 대한 전단파 속도의 차이는 크지 않지만, 전반적으로 diatom 함유량이 증가할수록 입자간 마찰력이 증가되므로 전단파 속도도 증가하는 경향성을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 흙의 강도와 응력-변형 관계의 영향을 고려하는 Duncan의 쌍곡선 모델(hyperbolic model)에서 간접적으로 설명이 가능하다. 이 모델에서는 흙의 응력-변형 거동 특성(탄성계수 및 포아송비)은 유효응력뿐만 아니라 유발강도 수준(percentage of strength mobilized) 또한 영향을 미친다고 제시하고 있다(Duncan 등, 1980).

### 3.5 전기저항 특성

임피던스(impedance) 애널라이저(HP-4192A)를 이용하여 혼합토에 대해 10Hz~10MHz의 범위에 해당하는 주파수에 따른 전기저항을 측정하였다(Santamarina 등, 2001). 유사한 컨시스턴시를 가지는 혼합토 슬러리를 직경 63.08mm, 높이 4mm의 아크릴 셀에 조성하여 전기저항을 측정하였다(Table 5). Fig. 11은 diatom 함유량

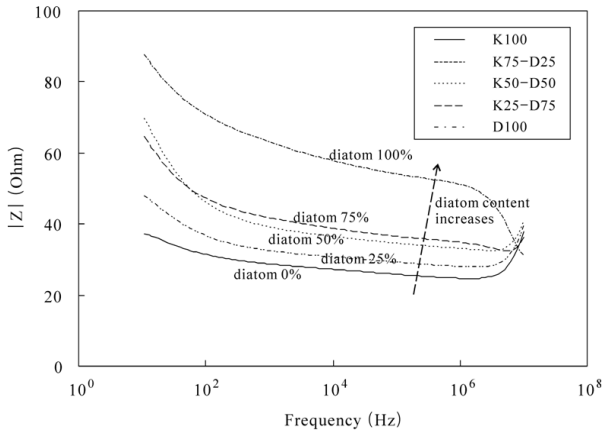


Fig. 11. Electrical resistance measurements with diatom contents

에 따른 주파수-전기저항의 측정 결과를 나타낸다. 10Hz와 10MHz에서는 측정값에 공진이 발생하여 전기저항값을 결정하기는 어렵지만, 1kHz에서 1MHz의 주파수 범위에서는 전기저항이 감소하나 대체로 안정적인 값을 나타내었다. 조성된 공시체는 diatom의 함유량이 증가할수록 생성되는 diatom 내부간극 및 공시체의 초기 간극비 조건 등의 복합적인 영향으로 인해 전기저항성이 큰 물을 많이 함유하게 되므로, 혼합토의 전기저항 또한 증가하는 것으로 나타난다.

#### 4. 결론 및 요약

Diatom으로 개량된 혼합토의 공학적 특성을 평가하기 위해, diatom과 kaolin 혼합토에 대한 물리/역학/전기적 특성을 통상적인 지반공학 실험과 전단파 속도 측정, 전기저항 측정 등을 통하여 평가하였다. Diatom의 함유량에 따른 혼합토의 공학적인 거동은 일반적인 흙과는 상이한 것을 확인 할 수 있었으며, 일련의 실험을 통하여 관찰 및 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지반재료의 미세구조는 지반의 조성특성을 반영하는데, 이는 조직 조합, 화학적 구성, 광물학적 조성, 입자간 작용력 등에 영향을 미친다. Kaolin에 diatom을 첨가하게 되면 액성한계와 소성한계가 급격하게 증가하는데, 이는 diatom으로 인해 크게 형성된 내부구조 때문에 물을 저장하는 공간이 커지게 되기 때문이다.
- (2) Diatom 혼합토는 낮은 밀도와 높은 함수비를 나타내게 되므로, 물리적으로는 불리한 조건이기는 하

지만, diatom으로 개량된 혼합토는 높은 전단저항으로 인하여 큰 지지력을 발휘하여 역학적 성능이 개선될 수 있다. 압밀시험 결과는 diatom 함유량이 증가함에 따라 압축지수는 감소하고, 재압축지수는 큰 변화가 나타나지 않았다. 직접전단시험 결과는 diatom 함유량이 증가함에 따라 최대 전단응력이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 개선된 공학적 특성은 diatom 입자의 거친 표면으로 생기는 높은 내부 결합력(interlocking)으로부터 나타나게 된다. 하지만, 항복하중 이상의 하중이 재하될 경우에는 diatom 입자간 결합력이 손실되어 압축성이나 전단강도 개선효과가 사라지게 될 가능성도 존재한다.

- (3) 건조상태의 혼합토의 전단파 속도는 일반적인 흙의 거동과 같이 유효응력이 증가함에 따라 증가하게 된다. Diatom 함유량이 증가할 경우에는 diatom 입자간의 저항으로 인한 내부결합력 증가로 전단파 속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고, 혼합토 슬러리는 diatom의 함유량이 증가할수록 혼합토가 내부간극과 초기간극비의 영향으로 인해 물을 많이 저장하게 되므로 전기저항이 크게 나타난다.

종합적으로, diatom을 이용한 혼합토는 내부간극을 크게 하면서, 밀도는 작고, 전단강도가 큰 재료로 지반 개량이 가능함을 실험을 통하여 관찰할 수 있었다. 개선된 혼합토를 이용하여 높은 공학적 성능을 만족하는 대체 재료(예, 배면 매립토)로 사용할 수 있는 가능성을 확인하였으며, 구체적인 활용 방안 수립을 위해 재료에 대한 경제성 평가 등의 추가적인 연구가 필요하다.

#### 참 고 문 헌

1. 이창호, 윤태섭, 산타마리나, 박장준, 이종섭(2009), “동해, 울릉 분지 심해토의 지반공학특성”, *한국지반공학회 논문집*, 제25권 6호, pp.17-29.
2. ASTM D2345 (2004), *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
3. ASTM D3080 (1998), *Standard Test Methods for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
4. Day, R. W. (1995), “Engineering properties of diatomaceous fill”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.121, No.12, pp.908-910.
5. Díaz-Rodríguez, J. A., Lozano-Santa Cruz, R., Dávila-Alcocer, V. M., Vallejo, E., and Girón, P. (1998), “Physical, chemical, and mineralo-

- gical properties of Mexico City sediments: a geotechnical perspective”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.4, pp.600-610.
6. Duffy, J. and Mindlin, R. D. (1957), “Stress-strain relations of a granular medium”, *Journal of Applied Mechanics.*, Vol.24, No.4, pp.585-593.
  7. Duncan, J. M., Byrne, P., Wong, K. S. and Mabry, P. (1980), *Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Soil Masses*. Report No. UCB/GT/80-01, University of California, Berkeley, USA, 70p.
  8. Hardin, B. O. and Richart, F. E. (1963), “Elastic wave velocities in granular soils”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, Vol.89, No. SM1, pp.33-65.
  9. Hong, Z., Tateishi, Y., and Han, J. (2006), “Experimental study of macro- and microbehavior of natural diatomite”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.5, pp.603-610.
  10. Khilnani, K. and Capik, M. L. (1989), “Diatomaceous soils: a new approach”, *Civil Engineering*, ASCE, Vol.59, No.2, pp.68-70.
  11. Locat, J. and Tanaka, H. (2001), “A new class of soils: fossiliferous soils”, *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*, Istanbul, Turkey. pp.2295-2300.
  12. Mesri, G, Rokhsar, A., and Bohor, B. F. (1975), “Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay”, *Géotechnique*, Vol.25, No.3, pp.527-554.
  13. Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005), *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons. New Jersey.
  14. Ohtsubo, M., Egashira, K., Tanaka, H., and Mishima, O. (2002), “Clay minerals and geotechnical index properties of marine clays in east Asia”, *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol.20, No.4, pp.223-235.
  15. Palomino, A. M., Kim, S., Summitt, A., and Fratta, D. (2011), “Impact of diatoms on fabric and chemical stability of diatom-kaolin mixtures”, *Applied Clay Science*, Vol.51, No.3, pp.287-294.
  16. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves*, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
  17. Shiwakoti, D. R., Tanaka, H., Tanaka, M., and Locat, J. (2002), “Influence of diatom microfossils on engineering properties of soils”, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.3, pp.1-17.
  18. Tanaka, H. and Locat, J. (1999), “A microstructural investigation of Osaka Bay clay: the impact of microfossils on its mechanical behaviour”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, No.3, pp.493-508.
  19. Tanaka, H. (2000), “Re-examination of established relations between index properties and soil parameters”, *Coastal Geotechnical Engineering in Practice: Proceedings of the International Symposium, IS-Yokohama 2000*, pp.3-24.
  20. Tanaka, H., Shiwakoti, D. R., Omukai, N., Rito, F., Locat, J., and Tanaka, M. (2003), “Pore size distribution of clayey soils measured by mercury intrusion porosimetry and its relation to hydraulic conductivity”, *Soils and Foundations*, Vol.43, No.6, pp.63-73.

(접수일자 2012. 2. 6, 심사완료일 2012. 4. 17)