

## 부산지역 연약지반 점토의 광물성분과 물성

### Mineral Composition and Physical Properties of Clays from the Soft Ground in Pusan Area

황진연<sup>1)</sup>, Jin-Yeon Hwang, 이선갑<sup>2)</sup>, Sun-Gap Lee, 이정우<sup>3)</sup>, Jung-Woo Lee

<sup>1)</sup> 부산대학교 지질학과 교수, Professor, Dept. of Geology, Pusan National University

<sup>2)</sup> 부산대학교 지질학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Geology, Pusan National University

<sup>3)</sup> 주식회사 동아지질 대표, President, Dong-A Geological Engineering Co., LTD.

**SYNOPSIS** : In this study, soft ground clays of the Pusan area were examined to understand their mineralogical and chemical composition, their physical properties such as liquid limit, plastic limit and unconfined compressive strength, and the relationship between the mineral composition and physical properties. The result of the study shows that the clays are composed of non-clay minerals and clay minerals. Non-clay minerals include quartz, feldspar, mica, hornblende and calcite, and clay minerals include illite, smectite, chlorite and kaolin minerals. Quartz is found in all samples and its contents are about 10-30%, and feldspar contents are 7-40%. Other non-clay minerals are scarce. Clay minerals are abundant in the clays and range from 30 to 75%. Illite is the most abundant clay mineral and constitutes about 20-70% of total clay minerals. Smectite constitutes about 2-30% of the samples. The study on the relationship between physical properties and mineral composition of soft ground clays reveals that the liquid limit, plastic limit and water content generally increase, and the compressive strength and the coefficient of strain tend to decrease as the content of clay minerals increase.

Key words: Soft ground, Clay, Clay mineral, Physical properties

## 1. 서 론

일반적으로 연약지반은 주로 점성토에 해당되며, 미립의 점토물질을 다량 포함하고 있다 (일본토질공학회, 1988; 1992). 이러한 물질의 특성에 의한 지반침하, 액상화 등의 문제 때문에 토목공학적으로 많은 관심의 대상이 되고 있으며, 이에 관하여 국내외적으로 많은 공학적 연구가 수행되어 왔다(장용체 외, 1995; 박성재 외, 1995; 안중필, 홍원표, 1994; Critchfield and MacDonald, 1990; Hashast and Whittle, 1996). 이러한 연구들은 현장토목

시험 및 계측, 토질시험, 안정화공법개발 등의 외형식 구조 및 물성에 관한 공학적 연구가 대부분이다. 연약지반의 근본적인 특성을 나타내는 것은 미립의 점토물질이므로 이에 대한 기초적인 이해와 연구도 필요하다. 지표면에 나타나는 점토물질은 지질학적 작용에 의해 천연적으로 형성된 것으로 주로 미립의 광물로 구성되어 있다. 이들 광물은 대부분 점토광물에 해당된다. 점토광물은 상온상압에서도 쉽게 성질이 변화되는 광물로서 높은 비표면적, 이온교환성, 팽윤성, 흡착성, 촉매성 등의 물리화학적 특성이 매우 다양하고 복잡하다. 따라서 연약지반의 물성은 이를 구성하는 점토광물의 특성과 밀접히 관계된다. 그림에도 불구하고 우리나라의 연약지반 문제에 있어 점토광물과 관련된 조사 및 연구는 거의 수행되지 않고 있는 실정이다. 일반적인 지반조사의 항목으로도 광물성분과 그 특성의 조사가 포함되어 있으나(윤지선, 1991), 실제적으로 이러한 검토는 수행되지 않고 있다. 따라서 금번 연구는 부산지역에 분포하는 연약지반의 점토에 대한 일반적인 토질특성을 조사하고, 그리고 특히 이들의 구성광물을 조사하여 광물성분을 밝히고, 나아가 광물성분과 토질공학적 물성과의 상관관계를 검토하고자 하였다. 이러한 지반을 구성하는 근본물질인 구성광물에 대한 검토는 연약지반의 조사, 평가 및 안정화공법 개발 등에 기초자료가 제공될 수 있을 것으로 생각된다.

## 2. 연구방법

토목공사가 시행되는 여러 공사장에서 시추 및 굴착에 의한 시료를 채취하였다. 이번에 시료를 채취한 곳은 김해 및 녹산의 낙동강 하류지역과, 해운대, 남천동, 수영, 수정동 등의 부산 동남부 해안지역이다. 이들 시료에 대하여 주식회사 동아지질의 장비를 임차하여 통상적인 토질시험을 실시하였다. 그리고 이들 시료에 대해서는 모두 건조시킨 후 X-선분말 회절분석을 행하여 구성광물을 식별하고 그 함량을 측정하였다. 또한 모든 시료에 대해서는 수중침강법에 의해 2 $\mu$ m이하의 점토성분을 분리하여 정방위 시편을 만들어 에칠렌글리콜 등의 각종 처리를 행하여 X-선회절분석을 실시하여 점토광물의 식별 및 함량을 조사하였다. 화학분석은 X-선형광분석기에 의해 행하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 부산지역 연약지반의 분포상태

부산지역에는 미고결의 점토질 퇴적물로 구성된 연약지반이 비교적 많다. 일반적으로 알려진 바와 같이 미고결의 점토질 물질을 다량 함유하는 지층을 연약지반으로 간주하고, 이들을 구성하는 점토질 물질을 연구대상으로 하였다. 여기서 점토질 물질 즉 점토는 순수 점토 뿐만아니라 사질점토, 실트 등의 연약지반을 구성하는 다양한 물질을 포함한다. 부산지역의 연약지반은 크게 낙동강 하류의 연변부 지역과 동남부의 해안 인접부 지역으로 나눌 수 있다. 낙동강 하류 지역에는 김해, 구포, 사상, 녹산 등이 포함되며, 연약지반은 주로 낙동강에 의한 하상퇴적층으로 구성된다. 동남부 해안지역으로는 부산항구에 인접한 수정동,

중앙동 등의 시가지 중심부가 있고, 그리고 광안리, 남천동, 수영, 해운대 등의 일부 지역이 포함된다. 이 지역의 연약지반은 오래된 해저퇴적물과 함께 가까운 육상의 풍화생성물이 함유되어 있다. 연약지반의 두께에 있어서는 낙동강 하류지역에서 약 40-50m 이상으로 매우 두껍게 나타나고 있고, 연안지역에서는 비교적 얇다. 이들 연약지반의 점토는 주로 회색 내지 암회색을 띠며 2미크론 이하의 점토입자가 약 30-70%를 차지하고 있다. 심도에 따라 입도의 분포가 다소 변하는데 사질입자의 함량이 많은 곳이 부분적으로 협재되고 있다. 남천동 및 해운대에서는 기반암의 변질된 물질로 보이는 담갈색의 점토물질들이 많이 포함된다.

### 3.2 연약지반의 토질공학적 물성

채취한 모든 연약지반 점토에 대하여 일반적인 토목공학적 토질시험을 실시하였다. 여기서 점토는 미립의 점토물질이 다량 함유되고 미고결의 퇴적물 및 변질물을 말하며, 연암 및 풍화암은 제외된다. 토질시험에 의해 입도, 자연함수비, 비중, 액성한계, 소성한계, 소성지수, 유동지수, 터프니지수, 액성지수, 연경지수, 굳지수, 활성도, 일축압축강도, 변형계수, 습윤단위중량, 간극비, 포화도, 점착력, 내부마찰각, 압축지수, 압밀항복응력 등의 시험치를 산출하였다. 이러한 검토 결과, 일본토질공학회의 토질분류법(1979)에 의한 토질분류로 볼 때 이들 연약지반 점토들은 대부분 CH에 해당되며, 그 다음으로는 CL이 많고 그 외에 SM, SP, GM, ML, SC 등이 드물게 나타났다. 낙동강 하류지역에 해당되는 녹산 및 김해지역의 시추에 의한 점토층들은 거의 모두 CH형이고 일부 CL형이 포함된다. 연안지역 연약지반에 해당되는 부산항 주변의 수정동에서는 CL형이 주로 나타나고 CH, ML, GM형이 간혹 포함된다. 해운대지역에서는 CH형이 주로 나타나고, 수영에서는 GM과 SM형이 많고, 남천동지역에서는 CL형이 많지만 SC, SM, SP도 간혹 나타난다. 이와같이 지역에 따라 연약지반의 토질이 다르게 나타나는 특징을 보였다. 녹산 및 김해지역에 있어 점토입자함량은 40-60%이고, 사질입자가 대부분 10% 이하인 것에 비하여, 수정동, 수영, 남천동에 있어서는 점토입자가 20-50%이고, 사질입자가 10-40%를 나타내었다. 이와같이 부산의 동남부의 연안에 가까운 연약지반에서 입자 크기의 변화범위가 비교적 다양하게 나타났다. 이는 암석의 풍화물 및 매립토 등이 혼합되어 있기 때문으로 생각된다. 전술한 토질시험치에 있어서도 장소에 따라 다양하게 나타났다. 토질분류와 입도가 거의 비슷한 녹산지역에 있어서는 대부분의 토질시험치도 큰 차이가 없이 비슷하게 나타났다. 그러나 부산 동남부 연안에 가까운 연약지반에서는 시료에 따라 토질시험치가 비교적 큰 폭의 변화를 나타내었다.

### 3.3 연약지반의 구성광물

연약지반을 구성하는 점토에 대하여 X-선회절분석을 행하여 구성광물과 그 함량을 검토하였다. 그 결과 이들 물질에서는 석영, 장석, 운모, 각섬석 등의 비점토광물과 함께 일라이트, 스멕타이트, 녹니석, 고령석광물 등의 점토광물이 주로 나타났다. 여기서 석영은 모든 시료에서 검출이 되었으며 그 함량은 약 10-30%의 범위로 시료에 따라 다르게 나타났다. 장석도 거의 모든 시료에서 나타났으며, 주로 사장석이 많으며 장석의 함량은 7-40%로 그

범위가 매우 넓게 나타난다. 이러한 석영과 장석 이외에 각섬석, 운모, 방해석, 스틸사이트 등의 광물이 시료에 따라 드물게 수반되고 있다. 석영, 장석, 각섬석, 방해석 등의 광물에 대한 함량을 검토하였으며, 이들 비점토광물의 함량을 제외하여 점토광물의 함량으로 간주하였다. X-선회절선의 형태로 보아서도 모든 시료에서 다량의 점토광물이 함유되고 있음을 알 수 있다. 분리한 점토입자에 대해 X-선회절분석을 행하여 점토광물종에 따른 상대적 함량비를 검토하였다. 이상과 같은 검토 결과, 점토광물의 함량은 약 30-75%의 범위를 나타내었다. 그러나 몇몇 시료를 제외하고는 거의 모두가 50% 이상의 점토광물 함량을 나타내었다. 이것으로 보아 점토광물의 함량이 비점토광물에 비해 아주 많은 것으로 나타났으며, 그 함량의 변화범위도 시료에 따라 아주 다양한 것으로 나타났다. 점토광물로는 일라이트, 스멕타이트, 녹니석, 카오린광물이 주로 나타나고 일부 시료에서는 혼합층점토광물도 드물게 포함된다. 여기서 일라이트가 일반적으로 가장 많이 산출하고 있으며 전체 점토광물의 약 20-70%를 차지하고 있다. 낙동강 하류인 녹산의 시료에서는 일라이트가 40-56%로 함량비가 거의 일정하게 나타난다. 그러나 동남부 해안지역인 남천동, 수영, 수정동의 시료에서는 시료에 따른 일라이트의 함량 변화가 크다. 스멕타이트는 모든 시료에서 보통 약 2-30%로 적게 나타지만 장소에 따라 그 변화폭은 큰 편이다. 녹산지역의 시료에서는 스멕타이트가 약 2-15%로 대체로 일정하게 다소 적게 나타난다. 그러나 남천동, 수영 및 수정동의 시료에서는 2-40%로 그 범위가 매우 넓다. 특히 남천동의 시료에서 가장 많은 스멕타이트 함량을 나타내었다. 카오린광물과 녹니석은 낙동강 하류지역에서는 약 10-40%의 함량 범위로 비슷한 함량을 나타내고 있다. 그러나 동남부 해안지역의 시료에서는 카오린광물이 녹니석보다 아주 많이 포함되는 경향이 있다. 이와같이 구성광물성분도 전술한 토질시험치와 같이 지점에 따라 다소 다르게 나타난다.

### 3.4 연약지반 점토의 화학성분

연약지반의 점토시료 중 지역별 심도별로 대표되는 32개의 시료에 대해서 우선 화학성분을 분석하였다. 그 결과  $\text{SiO}_2$ 는 47-65%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 13-21%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 는 3-11%,  $\text{CaO}$ 는 1-9%,  $\text{MgO}$ 는 1-4%,  $\text{K}_2\text{O}$ 는 1-3%,  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 0.2-3%의 범위를 나타내었다. 그리고  $\text{MnO}$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  등은 약 1% 이하의 적은 함량을 나타내었으며, 주로 물의 함량에 해당되는 작열감량은 3-19%의 비교적 넓은 범위를 나타내었다. 이상과 같이 주화학성분에 있어 시료에 따른 그 함량의 차이가 그다지 크지 않게 나타나고 있다. 이것은 전술한 구성광물성분이 성분상 큰 차이가 없는 규산염광물로 주로 되어 있기 때문으로 생각된다. 그러나 적은 함량의 차이이라도 근본적으로는 구성광물종의 성분에 관련되는 것으로 생각된다. 이들 화학성분을 자세히 해석하기 위해서는 구성광물의 종류 및 함량 뿐만아니라 비정질물질 및 공극수 등에 대한 지구화학적 측면의 검토도 필요하다. 그리고 이들 자료에 대해 연약지반의 토목공학적인 물성과의 관련성에 대한 검토도 요구된다.

### 3.5 물성과 구성광물성분과의 상관관계

토질시험 및 광물분석을 행한 결과에 있어서 연약지반 물질의 공학적 물성과 광물성분과

의 상관관계를 일부 검토해 보았다(그림 1-4). 지반의 물성은 기본적인 물질단위인 광물의 종류와 함량에 일차적으로 기인된다고 볼 수 있다. 전술한 바와 같은 구성광물로 볼 때 석영과 장석 등의 광물은 점토광물에 비하여 특성과 반응성이 다양하지 못하다. 이에 비하여 점토광물은 변화성이 많은 물리화학적 특성을 가지고 있으며, 연약지반물질의 대부분을 차지하고 있다. 따라서 공학적 물성과 점토광물의 함량과의 관계성을 우선 검토해 보았다. 토질분류의 기초가 되는 액성한계 및 소성한계의 수치가 점토광물의 함량에 따라 대체적으로 높아지는 경향이 나타났다(그림 1). 그러나 모든 시료가 직선적인 관계로 잘 일치하지 않았다. 특히 남천동의 시료에 있어서는 점토광물의 함량이 높은데도 불구하고 비교적 낮은 액성한계를 나타내고 있다. 수정동의 시료에서도 다소 비슷한 경향이 보인다. 이와같이 연약지반 점토에 있어서 산출 지역에 따른 특성이 매우 강한 것으로 나타났다. 점토광물의 함량에 따라 함수비가 대체로 증가하고 있으며(그림 2), 간극비도 약간 증가하는 경향이 있다. 반면에 점토광물 함량의 증가에 따라 일축압축강도, 변형계수, 건조단위밀도, 내부마찰각 등이 대체로 감소하는 경향이 나타난다(그림 3, 4). 그러나 이들도 시료의 산출지에 따른 특성이 강하게 나타나서 흡족할 만한 직선적인 관계는 나타나지 않는다. 그리고 토질공학적인 방법에 의해 입도분석한 점토입자의 함량에 대한 점토광물 함량과의 관계에 있어서도 대체로 점토함량이 많은 시료에서 점토광물의 함량이 많은 경향이 있다. 그러나 일부 지역의 시료에서는 일반적으로 추정되는 경향과 약간 벗어나고 있다. 이것은 점토입자들의 응집상태, 굵은 입자들의 구성광물, 점토광물의 결정도 등의 다양한 요인이 관여되기 때문으로 생각된다. 이상과 같이 토질시험에 의한 토목공학적인 물성과 구성광물성분과의 상관관계를 대략적으로 검토해 본 결과, 점토광물의 함량에 따른 각종 물성의 변화에 약간의 상관관계를 보여주었다. 그러나 시료의 산출지점에 따라 다소 특성이 강하게 나타났으며, 상관관계가 불분명한 것들도 나타났다. 이것으로 볼 때 연약지반 점토의 공학적 물성은 점토광물의 함량 뿐만 아니라 더 세밀한 구성광물의 종류 및 함량과, 광물의 결정형태, 조직, 간극수의 성분, 분산 및 응집 현상, 표면화학적 성질 등의 많은 요인이 관여되기 때문으로 생각된다. 따라서 이런 점을 감안하여 여러 가지 측면에서 검토가 필요하다.

#### 4. 결 론

부산지역에서 채취된 많은 연약지반 점토에 대하여 구성광물성분 및 화학성분 등을 검토하였으며, 그리고 토질시험을 행하여 액성한계, 소성한계, 일축압축강도, 간극비 등의 물성치를 산출하여 광물성분과의 상관관계에 대해서 검토해 보았다. 구성광물의 조사 결과, 연약지반의 물질에서 석영, 장석, 운모, 각섬석, 방해석 등의 비점토광물과 함께, 일라이트, 스멕타이트, 녹니석, 카올린광물 등의 점토광물이 주로 나타났다. 여기서 석영은 모든 시료에서 검출이 되었으며 그 함량은 약 10-30%의 범위였고, 장석은 7-40%의 범위로 대체로 넓게 나타났다. 그 이외의 광물들은 드물게 수반된다. 점토광물의 함량은 약 30-75%의 범위로 다양 나타났다. 점토광물로는 일라이트가 가장 많이 포함되어 있으며 전체 점토광물의 약 20-70%를 차지하고 있다. 스멕타이트는 모든 시료에서 대체로 약 2-30%로 적게 나타났다. 그리고 토질물성과 구성광물 함량과의 상관관계를 대략적으로 검토해 본 결과, 점토광물함량의 증가에 따라 액성한계, 소성한계, 함수비 등이 대체로 증가하며 압축강도 및 변형계수가 감소하는 경향이 나타났다. 이와같이 점토광물의 함량에 따른 각종 물성의 변화에

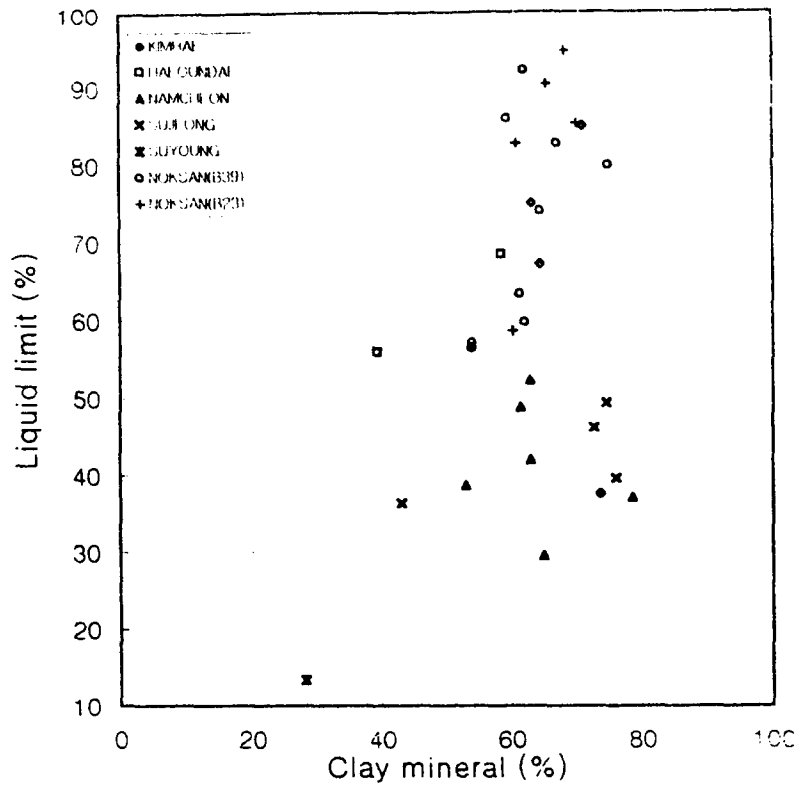


그림 1. 액성한계와 점토광물 함량과의 관계

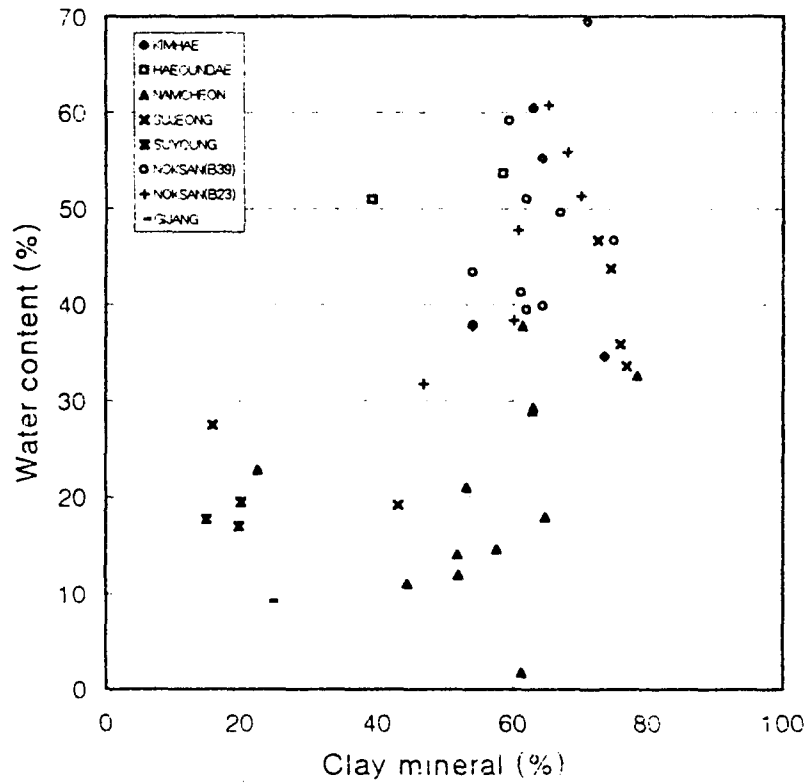


그림 2. 함수비와 점토광물 함량과의 관계

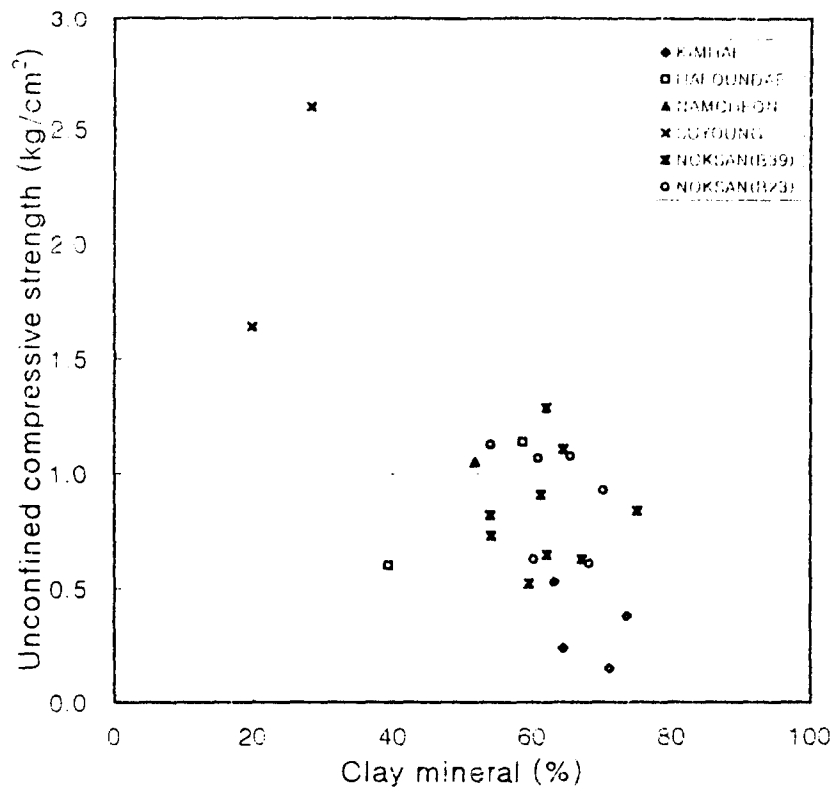


그림 3. 일축압축강도와 점토광물 함량과의 관계

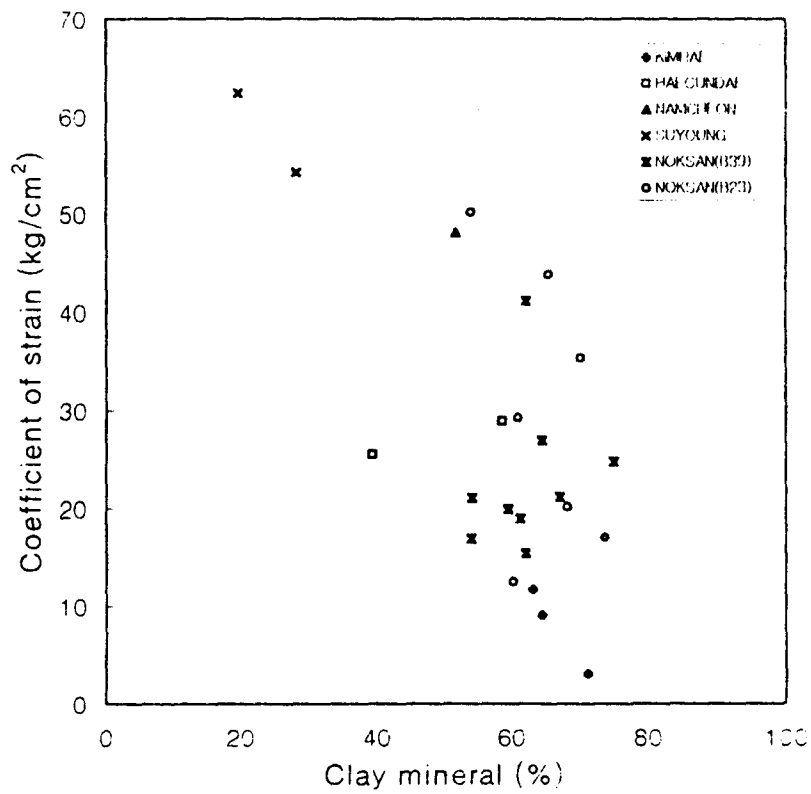


그림 4. 변형계수와 점토광물 함량과의 관계

약간의 상관관계를 보여주었다. 그러나 시료의 산출지점에 따라 다소 특성이 강하게 나타났으며, 상관관계가 불분명한 것들도 나타났다. 이것으로 볼 때 연약지반 점토의 공학적 물성은 점토광물의 함량 뿐만아니라 더 세밀한 구성광물의 종류 및 함량과 광물의 결정형태, 조직, 간극수의 성분, 분산 및 응집 현상, 표면화학적 성질 등의 많은 요인이 관여되기 때문으로 생각된다. 따라서 이런 점을 감안하여 여러 가지 측면에서 더 많은 검토를 할 예정이다. 이러한 광물성분의 검토는 연약지반의 공학적 물성을 이해하고 연약지반을 개량하는데 기초자료가 됨은 두 말할 필요가 없다. 따라서 이러한 관점에서 앞으로 연약지반의 구성물질에 대한 연구와 이에 관한 많은 관심이 요구된다.

## 사 사

이 연구는 1997년 과학재단 산학협력연구비(과제번호: 97-2-05-01-2)의 지원에 의해 수행되고 있으며, 이에 감사한다.

## 참 고 문 헌

1. 장용체의 1인(1995), "연약지반에서의 토질공학", 도서출판 새론, 제4, 5장.
2. 윤지선(1991), "岩石, 岩盤의 調査와 試驗", 歐美書館, pp. 1-131.
3. 박성재, 정경환외 2인(1995), "洛東江 下流地域과 大阪灣 海底地盤의 土質特性比較", 대한토목학회논문집, 15권, 4호, pp. 1055-1064.
4. 안중필, 홍원표(1994), "측방유동을 받는 연약지반의 변형거동에 관한 연구", 한국지반공학회지, 10권, 2호, pp. 25-40.
5. 日本土質工學會 編(1988), "軟弱地盤對策工法", 日本土質工學會.
6. 日本土質工學會 編(1992), "軟弱地盤の理論と實際", 日本土質工學會.
7. Hashast, Y.M.A. and Whittle, A.J. (1996). "Ground movement prediction for deep excavations in soft clay", Jour. of Geotechnical Engineering, v. 122, pp. 474-486.
8. Critchfield, J.W. and MacDonald, J.F. (1990). "Downtown in soft ground", Civil Engineering, v. 60, pp. 36-39.