

# 泥岩 風化土의 工學的 特性에 關한 實驗的 研究

—浦項地域의 泥岩風化土를 中心으로—

## Experimental Study on the Engineering Characteristics of Weathering Mudstone —In Pohang area—

김 영 수* <sup>1</sup>	정 성 관* <sup>2</sup>
Kim, Young-Su	Jeong, Seong-Kwan
박 강 우* <sup>3</sup>	김 병 탁* <sup>4</sup>
Park, Kang-Woo	Kim, Byoung-Tak

---

### Abstract

This paper is concerned with the engineering characteristics weathered mudstone soil in Pohang area. The crushability of weathered soil can be described in terms of the ratio of surface area( $S_w'/S_w$ ). In this study, the characteristics of weathered mudstone soil was investigated by performing test such as compaction, CBR, permeability, and grain size according to compaction energy.

The results are found as follows :

(1) In generally, the specific gravity of weathered mudstone soil is very small and optimum moisture content (OMC) is large and maximum dry density is small

(2) The CBR value increases as the compaction energy increases, but this value decreases from D-2 compaction( $26\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ ). the swelling ratio increases the  $(S_w'$  n paction energy to  $20.6\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$  and decreases in all compaction energy from  $20.6\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$

(3) As the compaction energy is small, the change of permeability due to water content is large and the difference between minimum coefficient of permeability and coefficient of permeability at OMC is large, but the difference is small as the compaction energy increases

(4) The decrease of permeability due to the decrease of void ratio and the increase of ratio of surface area is caused by the crush of particle due to the increase in compaction energy. Especially, the compaction energy is smaller, the change of the ratio of surface area to the coefficient of permeability is larger

---

\*1 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정희원, 경북대학교 농과대학 조경학과 부교수

\*3 정희원, 한국중공업 건설사업본부

\*4 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

## 요 지

포항지역의 이암풍화토에 관한 공학적특성에 대하여 연구하였다. 토립자의 파쇄는 토립자의 표면적비로 나타났다. 다짐시 함수비와 다짐에너지의 변화가 입도, CBR, 팽창성, 간극비 그리고 투수성에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 일반적으로 이암풍화토의 비중은 매우 작으며, 최적함수비는 크고 최대진조밀도는 작다.
2. CBR값은 다짐에너지의 증가에 따라 증가하나, D-2 다짐( $26\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$ ) 이상에서는 오히려 감소하는 경향을 나타냈다. 팽창비는 다짐에너지  $20.6\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$ 에서 최대가 되며 그 이상의 다짐에너지에서는 감소하는 경향을 나타냈다.
3. 다짐에너지가 작을수록 함수비에 따른 투수성의 변화가 크다. 그리고 최소투수계수와 최적함수비일때의 투수계수는 차이가 컸으나 다짐에너지가 증가할수록 그 차이는 거의 없었다.
4. 다짐에너지의 증가에 따른 입자의 파쇄는 간극비의 감소 그리고 표면적비의 증가와 그에 따른 투수계수의 감소가 나타났다. 특히 다짐에너지가 작을수록 표면적비와 투수계수의 변화폭은 컸다.

### 1. 서 론

우리나라 대부분의 지역은 주로 화성암과 변성암으로 구성되어 있는데 비하여, 대구, 경남·북지역은 퇴적암으로 구성되어 있어 국내 지질 분포상 특이한 지역이다. 그리고 이 지역의 퇴적암은 중생대 백악기, 신생대 3·4기의 지층으로 구성되어 있다. 지금까지 화강암 풍화토의 공학적 특성에 관한 연구는 활발히 진행되어 왔으나<sup>2, 3, 8)</sup>, 퇴적암 풍화토에 대한 연구는 일본에서 어느정도 진행되고 있으나<sup>4~7)</sup> 국내에서는 아직까지 수행되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 포항지역에 분포하고 있는泥岩(mudstone)의 風化土를 대상으로 하였다. 泥岩風化土는 함수비, 다짐에너지에 따라 토입자가 파쇄되어 밀도, CBR특성, 투수계수가 달라지고 특히 수분을 흡수하면 팽창의 정도가 크다고 알려졌다. 泥岩風化土를 각종공사의 성토재료로 이용할 경우 적합성 여부와 적합하다면 공사목적과 규모에 적합한 다짐기계, 함수비, 다짐두께, 다짐회수등의 선정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 다짐에너지 변화에 따

른 다짐특성, CBR특성, 투수성 그리고 팽창성을 알아보며 다짐에너지와 함수비에 따른 파쇄성을 고찰하고 파쇄성이 투수에 미치는 영향을 알아보려고 한다.

### 2. 이암풍화토의 광물조성

이암풍화토의 광물조성은 편광현미경과 X-Ray 회절분석으로 조사하였다. 편광현미경에 의한 광물조성 시험은 빛에 대한 광물의 고유한 상을 관찰함으로써 어떤 암석을 구성하는 광물을 파악할 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 고결도가 큰 이암을 분말하여 ZEISS AX-IOPHOT 편광현미경으로 살펴본 결과 이암은 대부분 MATRIX로 구성되어 있었으며 세립의 석영과 운모를 확인할 수 있었다. 특히 운모는 그 양이 아주 적었으며 장석류는 현미경상에서는 발견할 수가 없었다. 이러한 결과는 풍화쇄설물들이 퇴적하여 생긴 이암의 특성을 잘 보여주고 있다. 이암풍화토의 광물조성을 알아보기 위하여 시료를 분말법으로 X-Ray 회절분석을 행하였다. Bragg공식(파장,  $\lambda=2d \times \sin\theta$ )을 사용하여 찾고자 하는 물질의 면간거리  $d(\text{\AA})$ 를 구해서 시료중에 포함된 광물을 同定하였으며

그 결과는 그림 1과 같다. 그리고 습식방법을 이용하여 정량분석을 한 결과 이암풍화토는 석영( $\text{SiO}_2$ )성분이 30%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  과  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  성분이

각각 1.0%, 0.02% 함유하고 있으며, 나머지는 거의 점토광물이 함유된 것으로 나타났다.

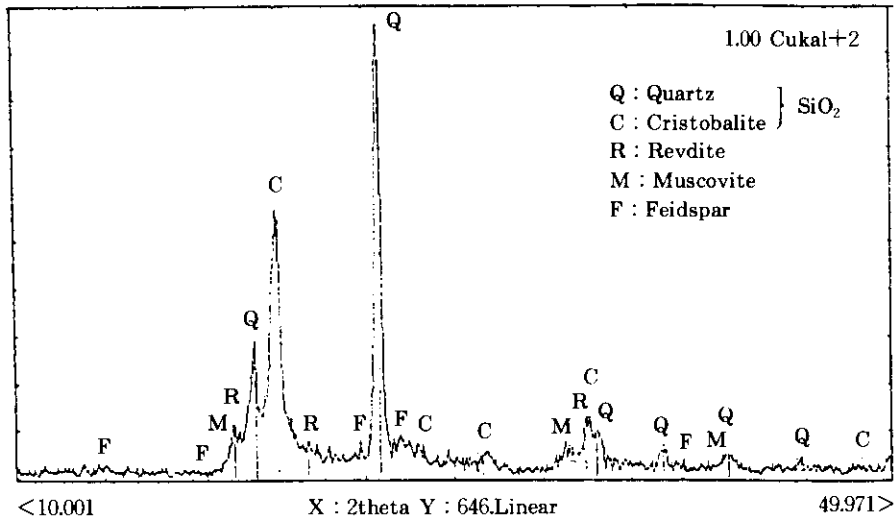


그림 1. X-Ray diffraction diagram

### 3. 이암풍화토의 공학적 특성

본 연구에서는 입도분류를 위하여 4분법으로 10개의 시료를 채취하였으며, 사용한 시료

에 대한 대표적인 입도분포곡선은 그림 2와 같다. 그리고 사용시료에 대한 토성시험 결과는 표 1과 같다.

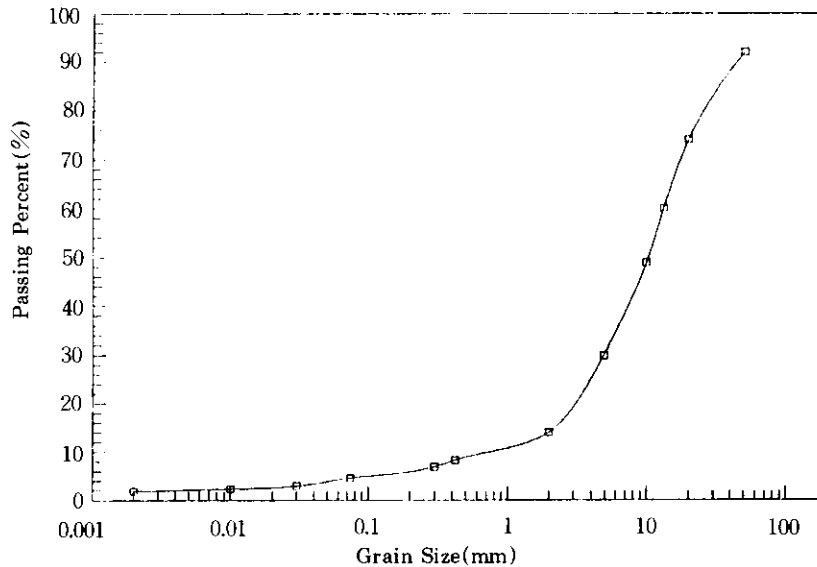


그림 2. 자연상태에서의 입도분포곡선

표 1. 시료에 대한 토성시험 결과

비중( $G_s$ )	$D_{60}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{10}$ (mm)	액성한계(LL)(%)	소성한계(PL)(%)	균등계수( $C_u$ )	곡률계수( $C_c$ )
2.502	13.28	4.95	0.705	59.0	34.5	18.837	2.617

### 3.1 다짐에너지에 따른 다짐특성과 CBR특성

다짐에너지는 D-2 수정다짐과 5층 35회, 45회 및 65회로 변화시켜 다짐시험을 행하였다. 이때 각 시료는 자연입도에 근접하게 동일 입도로 조정 사용하였으며, 건조법 및 비반복 법으로 흐트러진 시료를 사용하여 시험하였다.

#### 3.1.1 다짐특성

다짐에너지를 변화시키면서 다짐 시험한 결과는 그림 3,4와 같다. 이들 그림에 대하여 최소자승법으로 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$\begin{aligned} \gamma_{dmax} &= 0.9834 + 0.0312 \text{LN}(E) \\ W_{opt} &= 54.25 - 0.3778E \\ \gamma_{dmax} &= 1.8494 - 0.0158W_{opt} \end{aligned} \quad (1)$$

$$e = -0.07576 \text{LN}(E) + 1.5443$$

여기서,

$W_{opt}$  : 최적 함수비(%)

$E$  : 다짐에너지( $\text{kg} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3$ )

$\gamma_{dmax}$  : 최대건조단위중량( $\text{g} / \text{cm}^3$ )

$e$  : 간극비

그림 3에서, 17회에서 50회타격으로의 다짐 에너지증가때 보다 10회에서 17회타격으로의 다짐에너지증가때가 최대건조밀도의 증가폭이 1.52배 더 크며, 그림 4에서는 최대건조밀도상태의 간극비의 감소폭이 1.64배 더 크게 나타났다.

따라서 17회이상의 다짐에너지에서 다짐에너지 변화에 따른 최대건조밀도의 변화는 아주 작게 나타남을 알 수 있다.

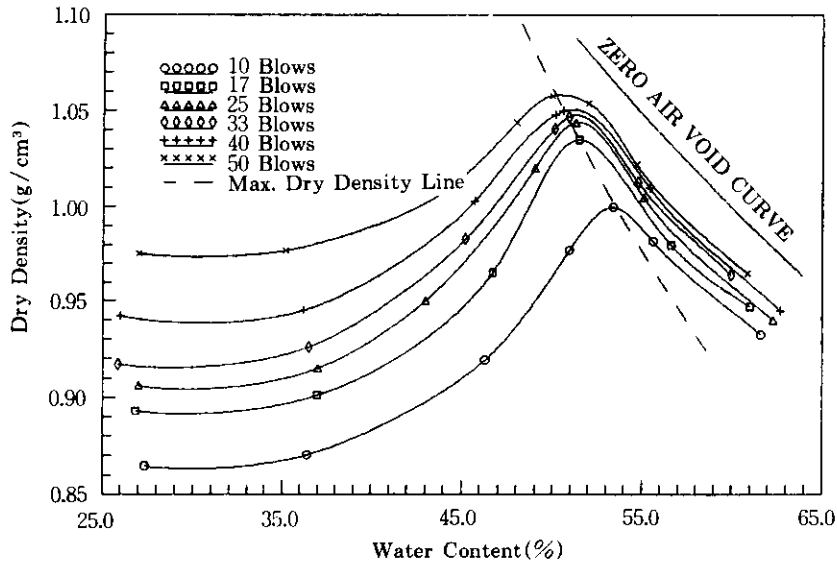


그림 3. 다짐에너지에 따른 다짐곡선

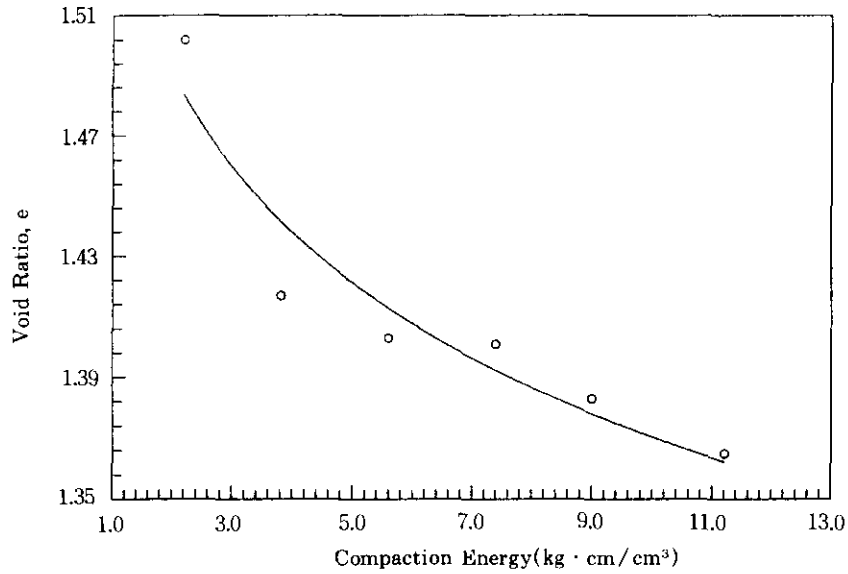


그림 4. 다짐에너지 증가에 따른 간극비의 변화(최대전조밀도 일때)

### 3.1.2 CBR 특성

다짐에너지에 따른 CBR값의 변화를 그림 5에 나타냈다. 그림 5에서 보는 바와 같이 다짐회수가 55회(다짐에너지,  $26 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$ )까지의 CBR값은 증가 추세이나, 그 이상의 다짐에너지에서의 CBR값은 다짐에너지의 증가에 따라 오히려 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또

한, 수침후의 시간경과에 따른 다짐에너지변화에 의한 팽창비의 변화는 그림 6과 같이 나타났으며, 그림과 같이 팽창비는 다짐회수가 45회(다짐에너지,  $20.6 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$ )일때 최대로 나타났으며 그 이상의 다짐에너지에서는 감소하였다.

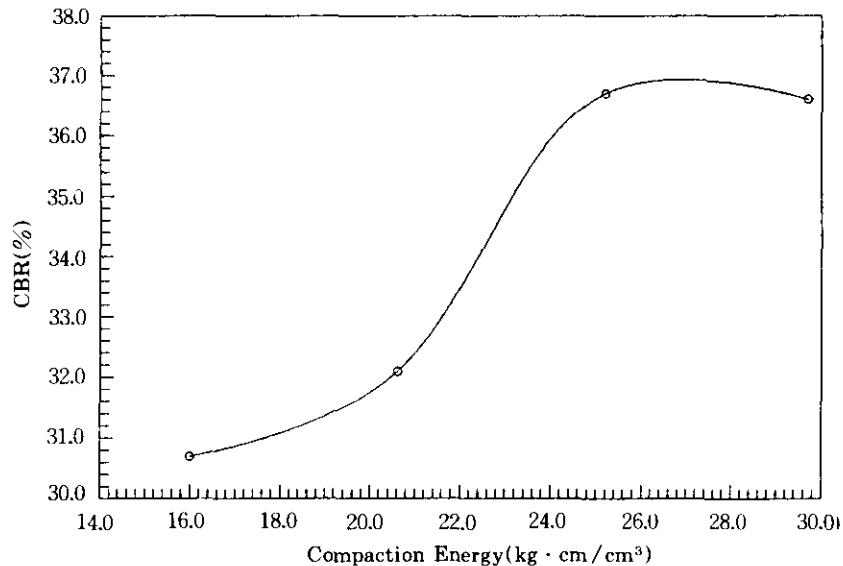


그림 5. 다짐에너지에 따른 최대건조밀도 상태에서의 CBR의 변화

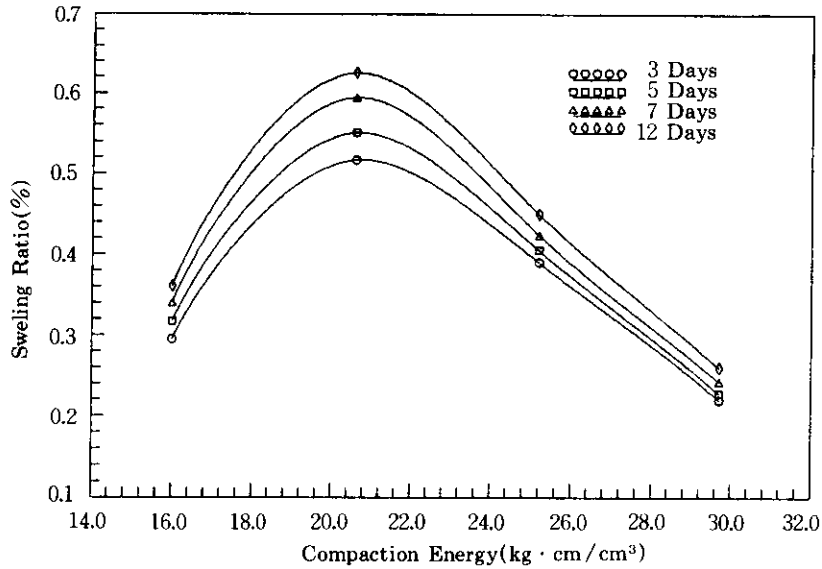


그림 6. 수침후 시간의 경과에 따른 팽창비의 변화

### 3.2 투수성

다짐에너지 및 함수비를 변화시켜 다짐한 후 변수위 투수시험을 실시한 결과는 그림 7과 같이 나타났다. 그림 7에서 보는 바와 같이 다짐회수가 33회 이상이거나 함수비가 55%이상일 경우 투수계수의 변동은 거의 나타나지 않고 있다. 그림 7에서 33회이상의 다짐에너지에 대한 투수계수의 변화가 거의 없지만, 확대하여

보면 55회다짐에너지에서  $1.2 \times 10^{-7}$  cm/sec로 최소투수계수를 찾을 수 있다(그림 8 참조). 위의 시험결과 투수계수는  $1.50 \times 10^{-4}$ 에서  $1.2 \times 10^{-7}$  cm/sec사이의 아주 작은 값을 가지므로 Earth Dam의 Core재료 등과 같은 불투수성 재료로서의 사용이 가능하며, 이 때의 다짐에너지는 40회이상의 타격에너지가 바람직하다.

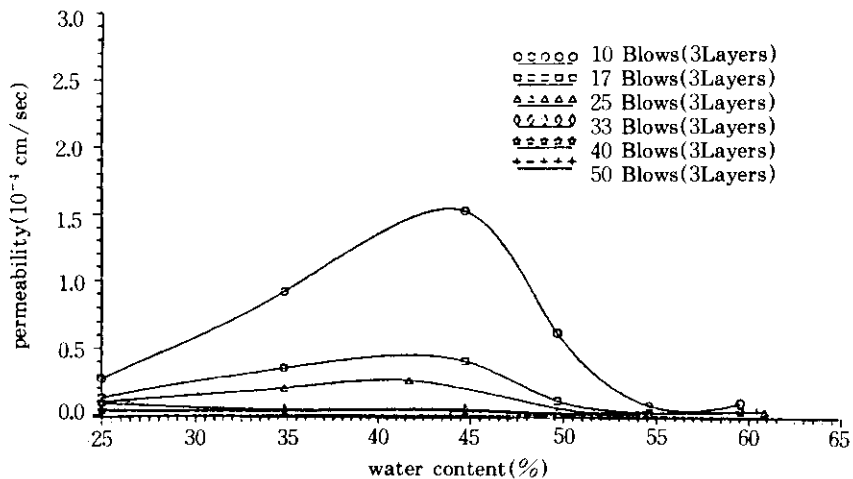


그림 7. 다짐에너지와 함수비에 따른 투수계수

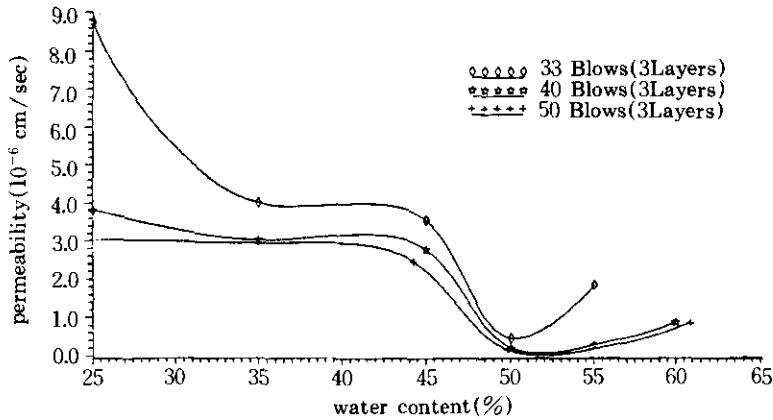


그림 8. 다짐 33회이상에서의 투수계수 변화

그림 9는 투수계수가 최소일 때의 함수비와 최적함수비일 때의 투수계수를 나타낸 것이다. 여기에서 보는 바와 같이 최소 투수계수는 최적함수비(OMC)보다 약 1~3%정도 습윤측에 존재하고 있다. 이러한 현상은 최적함수비보다 다짐함수비가 적을 때에는 흙의 입자 배열이

덩어리로 뭉친 團粒구조이거나 함수비가 최적 함수비보다 증대됨에 따라 입자의 배열은 單粒 구조로 변화되어 입자배열이 균일하게 되므로 입자사이의 간극이 작아지기 때문이라 사료된다.

투수계수와 간극비의 관계는 그림 10과 같으

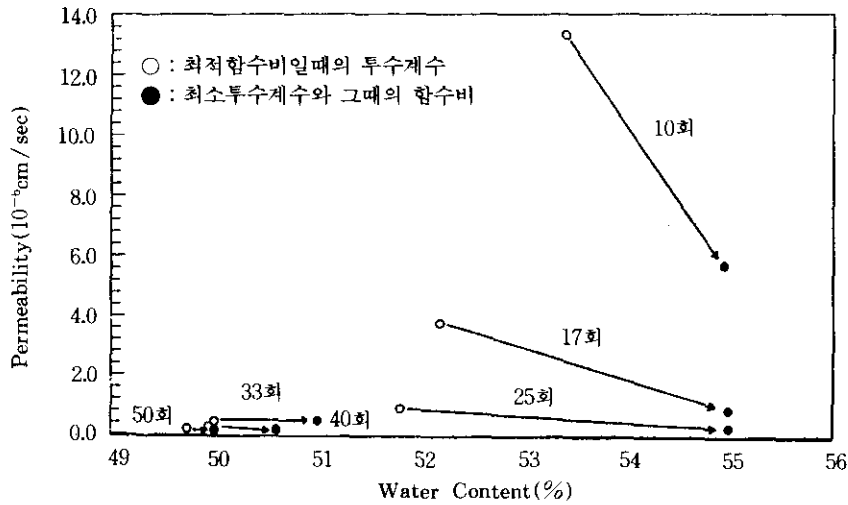


그림 9. 투수계수가 최소일때의 함수비와 최적함수비일때의 투수계수

며, 이 그림으로부터 최소자승법을 이용하여 다음과 같은 관계식을 유도하였다.

$$k = 1.2807 \times 10^{-13} \times e^{43.177}$$

여기서 k : 투수계수(cm/sec)

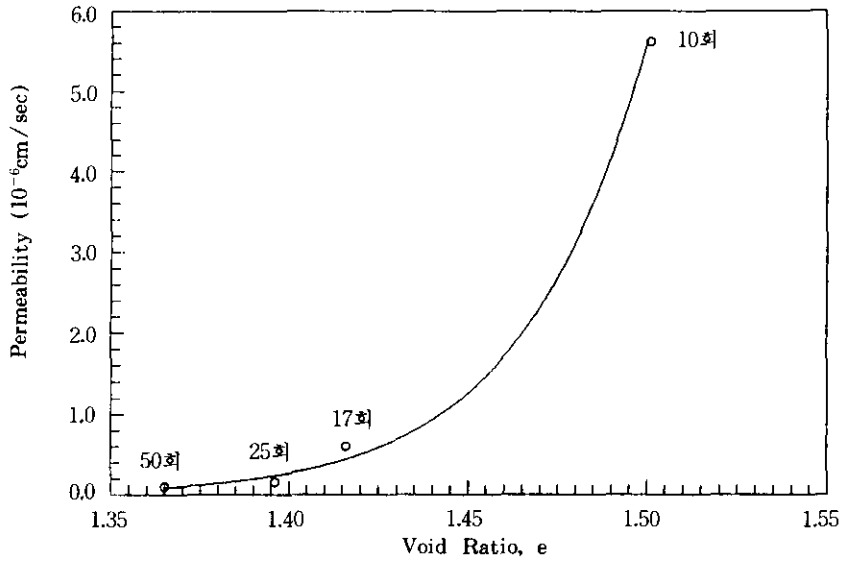


그림 10. 투수계수와 간극비의 관계(각 다짐에너지의 최적함수비 상태)

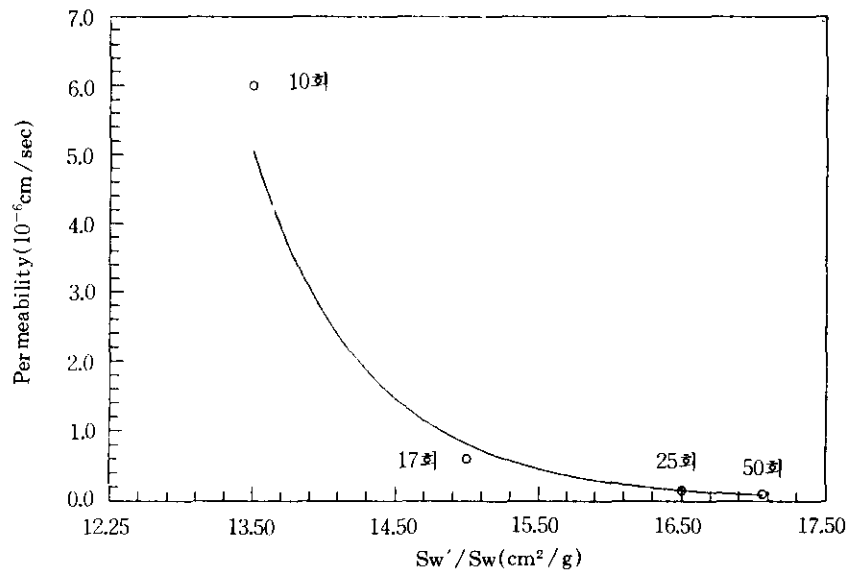


그림 11. 투수계수와 표면적비의 관계(각 다짐에너지의 최적함수비 상태)

#### 4. 파쇄성

본 연구에서는 福本武明의 파쇄량이론<sup>3)</sup>을 적용하여 검토하였다. 福本武明의 이론 외에도 Leslie<sup>9)</sup>, Marshall<sup>10)</sup>, 吉越洋<sup>11)</sup> 등에 의한 파쇄 이론이 있다. 福本武明에 의하면 토립자의 파쇄가 그 개수와 표면적의 증대를 가지고 온다

는 사실에 따라, 표면적의 변화율이 파쇄의 정도를 나타내는 하나의 합리적인 기준이 된다고 하였다. 그의 가정과 이론을 요약하면 아래와 같다.

- ① 원재료의 입도는 대수정규형으로 하고, 분포형은 시험후에도 변하지 않는 것으로 한다.



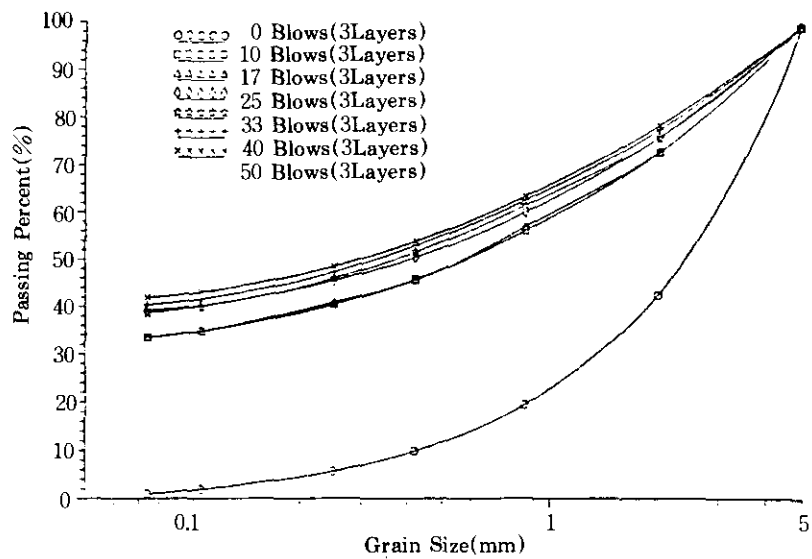


그림 12. 최적함수비에서의 다짐에너지의 증가에 따른 압도변화

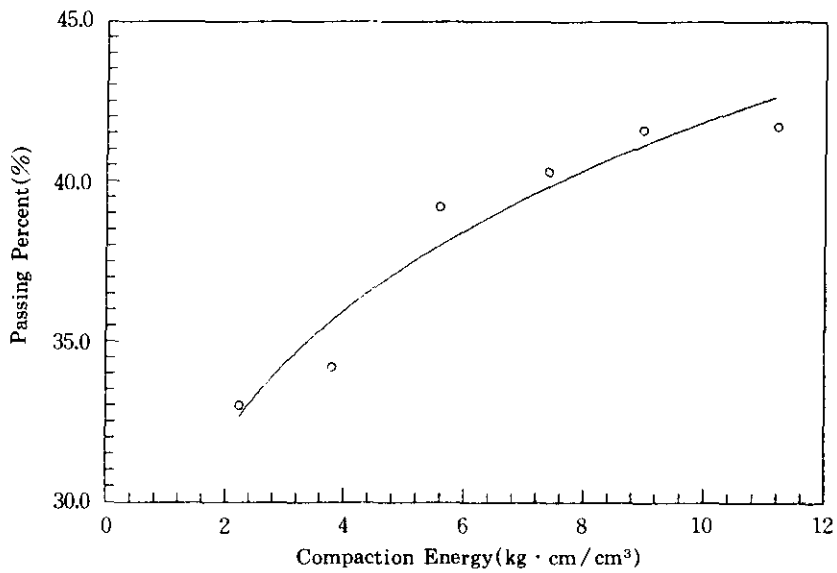


그림 13. 다짐에너지의 증가에 따른 #200체 통과율의 변화

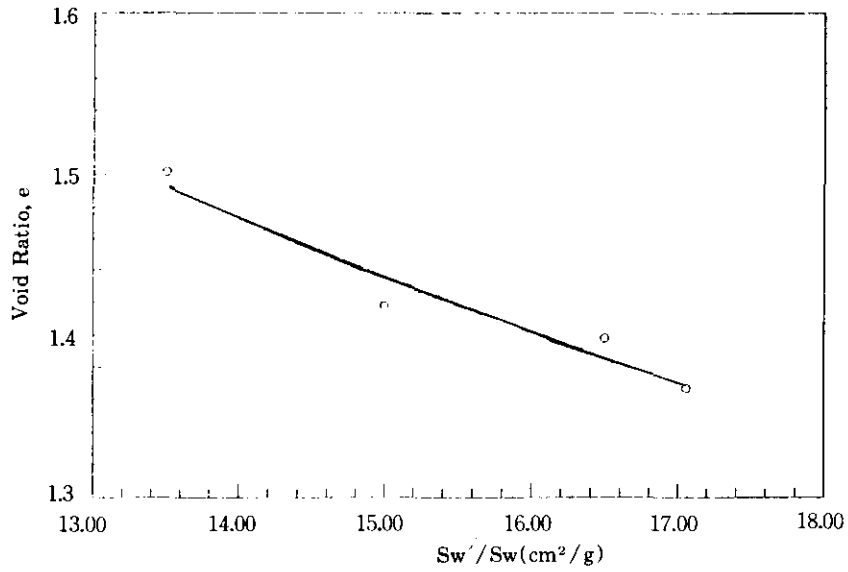


그림 14. 표면적비와 간극비의 관계(각 다짐에너지의 최적함수비 상태)

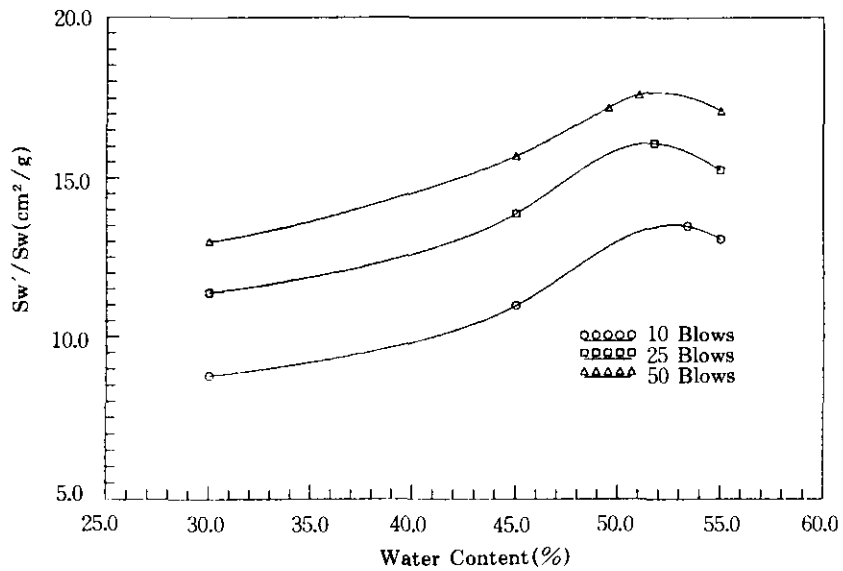


그림 15. 다짐 에너지별(3층) 함수비 변화에 따른 표면적비

② 토립자의 비중과 형상은 변하지 않는다. 라고 가정하였다. 단위중량당의 토립자의 전표면적  $S_w(\text{cm}^2/\text{g})$ 는 다음 식으로 나타낸다.

$$S_w = 10\phi_s D_s^2 / G_s \phi_v D_v^3 \quad (2)$$

여기서,  $G_s$ 는 비중이고  $\phi_s$ 와  $\phi_v$ 는 각각 면적의 형태계수와 체적형태계수이고  $D_s$ 와  $D_v$ 는 개수분포에 있어서 면적평균경과 체적평균경이다. 위에서 밝힌 가정을 사용하여 표면적비는 다음과 같이 표시한다.

$$\begin{aligned} (S'_w/S_w) &= 2^{S.I.} \\ S.I. &= (P'_1 - P_1) + (1.1513 \log 2) \\ &\quad [2(P'_2 - P_2) - (P'_1 - P_1)(P'_1 + P_1 + 1)] \end{aligned}$$

여기서,  $P_1$ 과  $P_2$ 는 파쇄전의 1회째와 2회째의 가적통과율 總和의 1/100이고  $P'_1$  및  $P'_2$ 는 파쇄후의 것이다. 파쇄가 그 개수와 표면적의 증대를 가지고 온다는 사실에 따라 파쇄전의 표면적  $S_w(\text{cm}^2/\text{g})$ 에 대한 파쇄후의 표면적  $S'_w(\text{cm}^2/\text{g})$ 와의 비는 흙의 입도분포를 대수 정규형으로 가정함에 따라 위의 식은 근사적으로 다음과 같이 표시할 수 있다고 하였다.

$$\begin{aligned} S'_w/S_w &= (2^{1/3})^{S.I.} \\ S.I. &= 2(P'_2 - P_2) - (P'_1 - P_1)(P'_1 + P_1 - 2) \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 S.I.는 입자 파쇄량으로 정의되고, 이 파쇄량(S.I.)은 토립자 표면적비( $S'_w/S_w$ )의 대수에 비례하는 양으로서 특히 파쇄에 따르는 투수성의 저하 등 물과 관계되는 제반현상을 고려할 때 유용하다고 생각된다.

파쇄성 시험에 사용된 시료의 입도는 투수시험에 사용된 입도로 임의 조정하여 시험하였다. 시험에 사용된 시료의 입도를 동일한 입도로 임의 조정하여 사용한 까닭은 파쇄성이 투수성에 미치는 다짐에너지 및 함수비의 변화에 따른 파쇄성 영향을 파악하고자 할 때 입도차

이에 의한 영향을 배제하기 위함이다.

함수비와 다짐에너지를 달리하여 다짐시험을 행한 후 #200체로 씻어 #200체 통과시료는 버리고 #200체 잔류시료만 24시간 동안 노건조 한뒤 입도분석하여 다짐전후의 파쇄정도를 비교하였다.

함수비는 30%, 45%, OMC 및 55%로 하였으며 다짐에너지는 3층 10회, 25회 및 50회로 행하였다. 투수계수와 표면적비와의 관계는 그림 11.과 같으며, 이 그림으로 부터 최소자승법을 이용하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$k = 0.0067(S'_w/S_w)^{-16.731}$$

단,  $S'_w/S_w$ 는 1/10  $\text{cm}^2/\text{g}$ 이다.

최적함수비에서의 다짐에너지 변화에 따른 입도곡선변화와 그때의 #200체 통과량의 증가를 알아보기 위하여 서로 다른 6개의 다짐에너지를 가지고 시험하였으며 그 결과는 그림 12 와 그림 13에 나타내었다. 이들 그림으로부터 다짐에너지의 증가에 따른 이암풍화토의 파쇄정도는 심하다는 것을 알 수 있다.

표면적비와 간극비, 함수비, 다짐에너지와의 관계는 그림 14, 15, 16.에서와 같다. 그림 14에서 보는 바와 같이 표면적비와 간극비의 관계는 반비례 관계를 이루고 있다. 그리고 그림 15에서 살펴보면 동일한 다짐에너지 일때는 함수비가 증가하면서 표면적비는 증가한다. 그러나, 최적함수비 부근에서 표면적비는 최대로 증가하고 그 이후의 함수비에 관해서는 감소하는 것을 살펴볼 수 있다. 그림 16 에서 나타난 바와 같이 동일한 함수비일때는 에너지가 커지면서 표면적비는 증가한다. 표면적비의 증가율은 표준다짐 이하에서는 크나 그 이상의 다짐에너지일때는 완만해짐을 알 수 있다.

## 5. 결 론

포항지역의 이암풍화토의 각종 실험에 의한 공학적특성은 다음과 같이 요약된다.

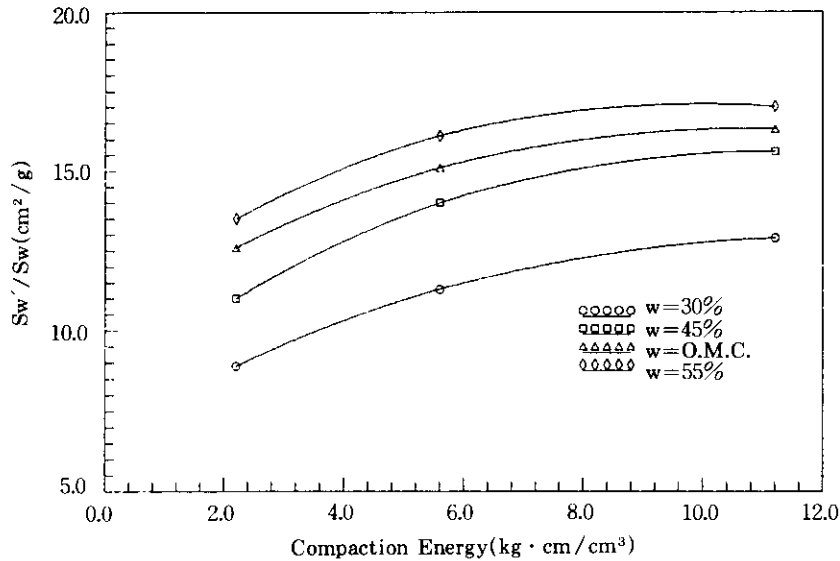


그림 16. 함수비별 다짐에너지 변화에 따른 표면적비

1. 화강암풍화토에 비하여, 이암풍화토의 비중은 매우 작으며, 일반적으로 최적함수비는 크고 최대건조밀도는 작다.
2. CBR 값은 다짐에너지의 증가에 따라 증가하나, D-2 다짐(26kg·cm/cm³) 이상에서는 오히려 감소하는 경향을 나타냈다. 팽창비는 다짐에너지 20.6kg·cm/cm³에서 최대가 되며 그 이상의 다짐에너지에서는 감소하는 경향을 나타냈다.
3. 다짐에너지가 작을수록 함수비에 따른 투수계수의 변화가 크다. 그리고, 최소투수계수와 최적함수비일때의 투수계수는 차이가 컸으나 다짐에너지가 증가할수록 그 차이는 거의 없었다.
4. 다짐에너지의 증가에 따른 입자의 파쇄는 간극비의 감소 그리고 표면적비의 증가와 그에 따른 투수계수의 감소가 나타났다. 특히 다짐에너지가 작을수록 표면적비와 투수계수의 변화폭은 컸다.

### 참고 문헌

1. 도덕현·강우목(1979). "화강암 풍화토의 파쇄성에 관한 연구." 한국농공학회지 제21권 제3호, pp. 81~103.
2. 이영수(1983). "화강암풍화토의 파쇄 및 다짐에

3. 福本武明(1976). "帝國の マサ土の 密度に 關する 粒子破碎の 影響", 土質工學會論文報告集, Vol.16, No.4, pp. 93~101.
4. 室 達朗·本多秀夫(1979). "泥岩の吸水膨脹壓と變形に關する一考察", 第11回 土質工學研究發表會, pp. 925~928.
5. 森田 勳·中村一幸·吉澤光三(1982). "島尻層泥岩の水侵影響による強度低下", 第1回 土質工學研究發表會, pp. 473~476.
6. 仲野良紀(1980). "軟岩なめくる諸問題—泥岩の力學特性—", 土と基礎, Vol.28, No.7, pp. 1~10.
7. 小島圭二·齊藤保佑(1984). 軟岩の膨脹·スレーキック特性(その1), 應用地質, Vol.25, No.1, pp. 10~22.
8. Matsuo, S. & Sawa, K.(1975). "Study of crushability of decomposed granite soil grains", Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Vol.11, pp. 71~76.
9. Leslie, D.D.(1963). "Large scale Triaxial Test on Gravelly Soils", Proc. 2nd American conf. S.M., Vol.1.
10. Marshal, R.J.(1967). "Large scale testing of rockfill materials", Proc. A.S.C.E, Vol.93, No. SM2, pp. 27~43.
11. 吉越洋, "しきの大型" 三軸試験, 第5回土質工學會研究發表會 概要.

(접수일자 1994. 2. 19)