

## 자갈이 함유된 화강풍화토의 다짐특성에 관한 연구

### An Experimental Study on Compaction Characteristics of Gravel-mixed Decomposed Granite Soil

함 태 규<sup>1</sup> Ham, Tae-Gew

#### Abstract

In order to clarify the influence of gravel content on the mechanical properties of gravel-mixed decompose granite soils, large-scale one-dimensional compression tests were performed. The sample used in the study was a decomposed granite soil from Shimonoseki in Yamaguchi prefecture in Japan. After adjusting the grain size of the said soils, the specimen compacted with a certain level of compaction energy was put to the test. Based on the results obtained, when gravel-mixed decomposed granite soil was compacted at the same energy level, there existed the specific gravel content at which dry density was maximum and which also produced the minimum compression index. Furthermore, from these results, an expression based on a two-phase mixture theory was proposed to quantitatively evaluate the effects of gravel content and initial dry density and the material parameters calculated through the proposed method proved to exactly estimate the actual measuring value.

#### 요 지

자갈혼합재료의 역학특성에 미치는 자갈혼합율의 영향을 분석하기 위하여 화강풍화토를 이용한 대형 일차원압축시험을 실시하였다. 본 연구에서는 일본 야마구치현(山口県) 시모노세키시(下関市)에서 채취한 화강풍화토를 이용해 입도를 조절한 후 일정한 다짐에너지로 다짐한 공시체를 시험에 사용하였다. 시험결과, 동일한 함수비에서 동일한 다짐에너지로 다짐을 실시하여도 자갈혼합율에 따라 서로 다른 건조밀도를 보였고, 이로부터 최대건조밀도를 나타내는 자갈혼합율이 존재하는 것과 이 자갈혼합율에서 최소의 압축지수를 보이는 것을 확인하였다. 또한 본 연구에서는 이상혼합체이론(two-phase mixture theory)을 이용해 자갈혼합율의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하였고, 제안한 방법을 통해 산정한 초기건조밀도와 재료정수는 실내시험으로부터 얻은 실측값을 정확히 추정하는 것으로 평가되었다.

**Keywords** : Compression index, Decomposed granite soil, Dry density, Gravel content, Two phase mixture theory

#### 1. 서 론

최근 필댐이나 고성토와 같은 대규모 흙구조물에 있어서는 공공사업의 경비절감과 친환경화를 위하여 원지반을 절토하여 생성된 토질재료를 입도조절 없이 곧바로 성토재료로 사용하는 경우가 늘어나고 있다. 이와 같은 재료에는 75mm를 넘는 조립토를 포함하는 경우

도 많으며, 시공하는 성토의 설계나 밀도관리를 위해 필요한 다짐특성이나 재료정수는 직접 실내시험을 통해 구하는 것이 바람직하다. 그러나 실내시험기의 특성상 시험을 통해 직접 다짐특성이나 재료정수를 구하지 못하고, 흙 입경의 허용범위(보통 2mm이하의 모래)를 정해 실시한 실내시험결과를 통하여 자갈의 혼합량에 따른 보정값을 이용해 초기밀도와 재료정수 등을 구하는

<sup>1</sup> 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher in Chief, Geotechnical Engrg. Division, Korea Institute of Construction Technology, hamtg@kict.re.kr)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

것에 그치고 있는 실정이다. 현재까지 제안된 자갈혼합 재료의 다짐특성보정식으로는 Walker-Holtz 식(1951), Humphres 식(1957), Makinouch의 식(1951), Ostermayer의 식(1979), Hukumoto의 식(1984, 1998), Sibata의 식(1986, 1987), Hsu and Saxena의 식(1991), Mori의 식(1996) 등이 있으며, 이 중 현재 일반적으로 가장 널리 사용되는 식으로는 Walker-Holtz 식(1951)이라고 할 수 있다. 그러나 Walker-Holtz 식(1951)은 물리적인 의미가 명확하지 않고 자갈 혼합량이 40%를 넘는 재료에는 적용할 수 없다는 지적을 받고 있다.

한편, Itou 등(1991)은 Walker-Holtz 식(1951)을 이용해 자갈혼합재료의 압축곡선을 추정하여 실내시험을 통해 얻은 압축곡선과 비교한 결과, 매우 흡사한 결과를 얻었으며 자갈혼합재료의 압축지수( $C_c$ )와 팽창지수( $C_s$ )를, 흙 입경의 허용범위(보통 2mm이하의 모래)를 정해 실시한 실내시험 결과로부터 개략적으로 추정할 수 있다는 결론을 얻었다. 그러나 연직응력( $\sigma_v$ )이 증가함에 따라 보정값은 실측값과 멀어지는 경향을 보이고, 자갈 혼합량이 40%를 넘는 재료에는 적용할 수 없다는 결론을 유출하고 있다.

만약, 자갈혼합재료의 명확한 초기밀도와 재료정수를 흙 입경의 허용범위(보통 2mm이하의 모래)를 정해 실시한 실내시험결과를 통하여 간편히 얻을 수 있다면 조립토를 포함한 자갈혼합재료의 사용이 용이하여 친환경적이고, 입도조절에 필요한 경비절약과 공기 단축을 기대할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 자갈을 포함한 화강풍화토를 이용하여 대형 일차원압축시험을 실시해 다짐특성과 재료특성에 미치는 자갈혼합량의 영향을 명확히 하고, 자갈 혼합재료의 역학특성을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하는 것을 그 목적으로 하고 있다.

## 2. 사용한 시료의 물성치 및 시험개요 (One-dimensional compression test)

### 2.1 시험 시료

본 연구에서는 일본 야마구치현(山口県) 시모노세키

표 1. 시료의 물리적 특성

흙 종류	Grain size (mm)	Plastic Index (PI)	Gravity of Soil $G_s$	Gravity of gravel $G_G$	Ignition loss (%)
화강풍화토	~9.52	NP	2.685	2.650	1.83

시(下関市)에서 채취한 9.52mm이하의 세립 자갈을 포함한 화강풍화토를 대상으로 일차원압축시험을 실시하였다. 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 표 1과 같다.

본 연구에서는 모래, 자갈을 분리하여 각각 밀도 시험을 실시하였고, 그 결과, 자갈의 비중( $G_G$ )은 2.650, 모래의 비중( $G_s$ )은 2.685로 밝혀져, 자갈이 모래에 비해 0.035 작은 값을 보이는 결과를 얻었다.

Hukumoto & Hara(1998), Nakata 등(1999)에 의하면 입자 강도는 입자크기, 형태, 구성광물, 재료 내에 존재하는 결손(크랙) 등에 의해 크게 변동하는 것으로 알려져 있다. 자연모래는 인공모래와 달리 재료 안에 많은 결손(크랙)이 존재하며, 본 연구에서 실시한 비중시험결과 자갈이 모래에 비해 작은 비중값을 나타내는 것은 입경이 커짐에 따라 재료 안에 결손(크랙)이 존재 할 확률이 높아지는 데에 유인한 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용하고 있는 화강풍화토의 1차광물 및 점토광물을 조사하기 위해 X선 회절시험을 실시하였다. X선 회절시험은 75 $\mu$ m이하의 세립분을 사용하였고, 그 결과를 그림 1에 나타내고 있다. 시험결과로부터 본 연구에서 사용하고 있는 화강풍화토는 석영, 장석, 운모로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

풍화도가 높은 시료일수록 높은 보습성을 나타내는 것은 Matsuo 등(1979)에 의해 밝혀져 있고, Yasuhuku (1985)에 의하면 화강풍화토의 풍화도를 나타내는 지표로서, 비표면적, 강열감량, 흡수율 등을 사용하는 방법

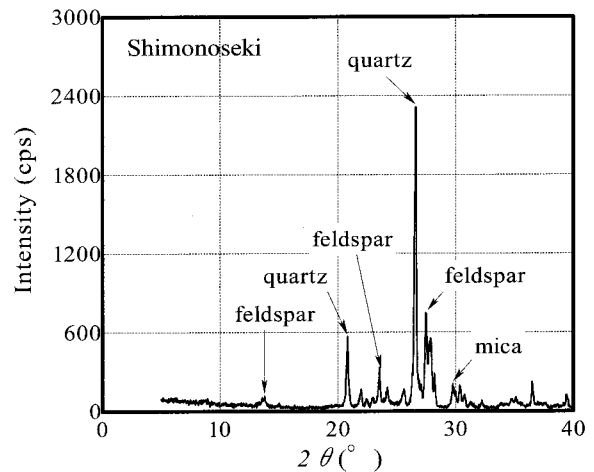


그림 1. XRD회절시험 결과

이 타당하다고 되어 있다. 따라서 본 연구에서는 실험방법이 용이한 강열감량을 조사하여 화강풍화토의 풍화도를 조사하였다. 강열감량법은 일본규격 JIS A 1226에 의거하여 실시하였고, 건조로에 일정한 질량이 될 때까지 건조시킨 시료를 증발접시에 넣어 750°C의 건조로에 한 시간 건조시킨 후 강열전후의 질량차를 조사하였다. Murata 등(1987)이 일본의 중국지역에 분포되어 있는 10종류의 히로시마(広島)형 화강풍화토를 대상으로 강열감량을 조사한 결과에 의하면, 가장 작은 값을 나타내는 화강풍화토는 0.84, 가장 큰 값을 나타내는 화강풍화토는 4.99로 밝혀졌다. 본 연구에서 사용하는 화강풍화토의 강열감량 값은 1.8로 강열감량 값으로 볼 때 그다지 풍화가 진행되지 않은 시료라고 할 수 있다.

## 2.2 시험 개요 및 공시체 작성방법

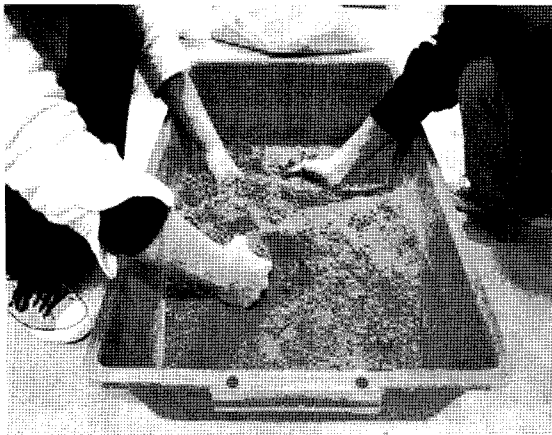
압축특성에 미치는 자갈 혼합율의 영향을 조사하기 위하여 일차원압축시험을 실시했다. 실시한 일차원압축

시험은 직경150mm, 높이150mm의 링을 사용했고, 공시체는 식(1)로 정의되는 자갈혼합율( $P$ )이 0%, 30%, 40%, 50%, 80%, 100%가 되도록 모래와 자갈을 혼합해, 함수비 13%가 되도록 조절하여 2.5kg의 램머를 이용해 다짐에너지  $E_c=187.469\text{kJ/m}^3$ 로 다짐 작업하였다. 일차원압축시험은 재하속도 0.5mm/min로 연직하중을 증가시켜 최대압축응력 10MPa까지 실시했다. 그림 2에 일차원압축시험에 사용한 공시체 제작과정 및 일차원압축시험기 전경을 나타내고 있다.

$$P = \frac{m_{s2}}{m_{s1} + m_{s2}} \times 100 \quad (1)$$

식(1)에서,  $m_{s1}$ 은 모래의 건조질량,  $m_{s2}$ 는 자갈의 건조질량을 나타낸다.

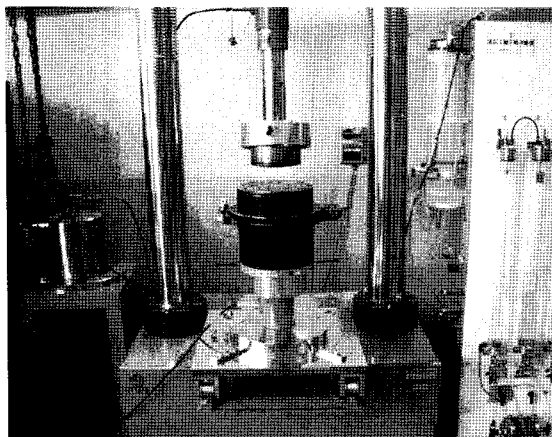
본 연구에서 사용된 공시체의 함수비( $w$ )와 다짐에너지( $E_c$ )는, 본 연구에서 사용한 화강풍화토 2mm이하의 모래성분을 이용해 실시한 다짐실험결과로부터 얻어진 최적함수비( $w_{opt}=13\%$ )와 다짐도  $D_c=90\%$ 에 상응하



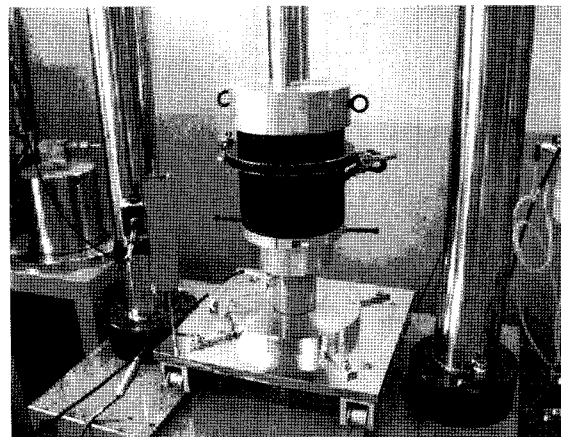
(a) 함수비 조절



(b) 다짐



(c) 시험기에 세팅



(d) 재하

그림 2. 일차원압축시험에 사용한 공시체 제작과정 및 일차원압축시험기 전경

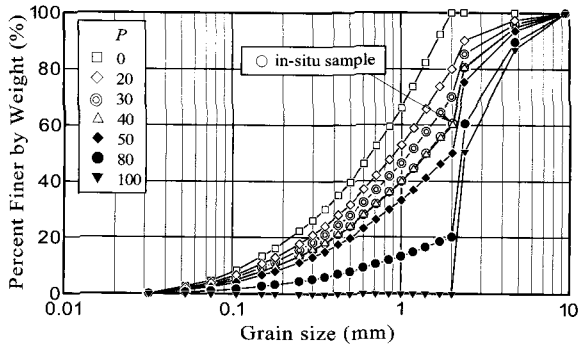


그림 3. 일차원압축시험에 사용한 시료의 초기입도분포곡선

는 다짐에너지이다.

그림 3에 일차원압축시험에 사용한 시료의 초기입도분포곡선을 나타내고 있다.

### 3. 시험 결과 및 분석

#### 3.1 일차원압축시험

초기 건조밀도에 미치는 자갈혼합율( $P$ )의 영향을 조사하기 위하여 그림 4에 초기 건조밀도와 자갈혼합율( $P$ )과의 관계를 나타내고 있다. 그림 중에는 일반적으로 널리 사용되고 있는 Walker-Holtz 식(1951)을 이용하여, 자갈 혼합재료의 건조밀도를 보정한 결과(실선)를 함께 나타내고 있다. 그림 4로부터 본 연구에서 사용한 화강 풍화토는 자갈혼합율( $P$ )이 40%이하의 범위에서는 자갈혼합율( $P$ )이 증가할수록 초기 건조밀도도 함께 증가하고 있으나, 자갈혼합율( $P$ )이 40%를 넘는 범위에서는 초기 건조밀도가 반대로 저하되어 자갈혼합율( $P$ )이 40%에서 최대의 건조밀도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이로써 동일한 함수비에 동일한 다짐에너지를 이용해 다짐을 실시하여도 가장 효과적으로 다져지는 자갈혼합율( $P$ )이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

또한, Walker-Holtz 식(1951)을 이용한 보정치(실선)는 자갈 혼합율 40%까지의 실측치와 정확히 일치하는 반면, 40%를 넘는 자갈혼합율에 있어서는  $P$ 가 증가할수록 실험값과 멀어지는 경향을 보여, Walker-Holtz 식(1951)은 자갈혼합율이 40%를 넘는 자갈혼합 재료에는 적용할 수 없다는 것이 본 연구결과로부터 재확인 되었다.

Walker-Holtz 식(1951)은, 자갈 혼합재료를 다짐할 경우 자갈의 간극을 모래가 충전시키고, 자갈의 간극 안에 충전된 모래의 건조밀도는 동일한 다짐에너지로 모래만을 다짐할 때와 동일한 건조밀도를 나타낸다는 가정

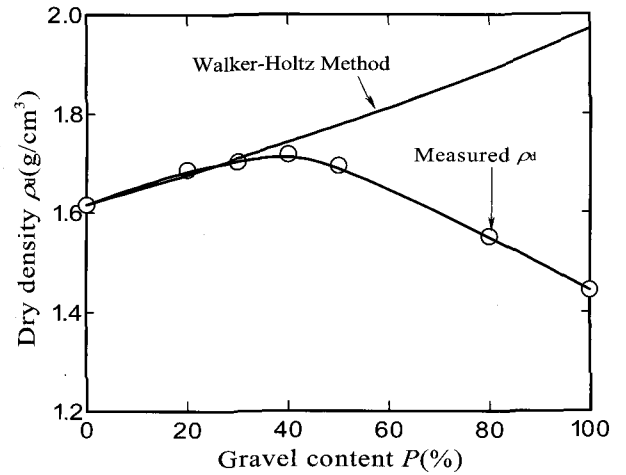


그림 4. 초기 건조밀도와 자갈혼합율 관계

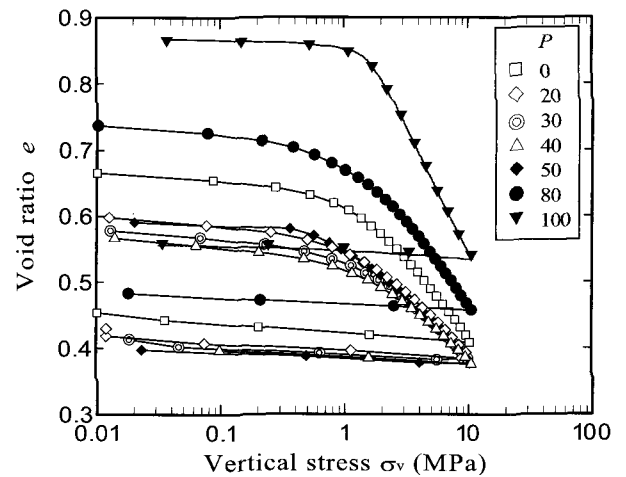


그림 5. 일차원압축곡선

으로부터 전개되어 있다. 이 식은 자갈 혼합율( $P$ )이 작은 혼합재료에 있어서는 모래의 밀도가 증가하는 것은 혼합재료 전체의 밀도가 증가하는 것을 의미하므로 타당하다고 할 수 있다. 즉, Walker-Holtz 식(1951)은 자갈혼합율이 증가하면 건조밀도도 증가하여 자갈혼합율이 100%일 때 최대의 건조밀도를 나타내는 것으로 가정되어 있다. 그러나 자갈 혼합율( $P$ )이 증가하면 자갈의 간극을 충전시킬 수 있는 모래의 양은 감소되고, 이로 인해 혼합재료 전체의 간극비가 증가하여 자갈혼합재료의 건조밀도는 감소하게 된다. 그러므로 Walker-Holtz 식(1951)은 자갈 혼합량의 증가와 함께 모래 혼합량의 감소로 인한 자갈혼합재료의 건조밀도의 감소경향을 실질적으로 표현하지 못하는 것으로 평가할 수 있고, 이것을 정량적으로 평가할 수 있는 보정식을 제안할 필요가 있다고 할 수 있다.

그림 5는 실시한 일차원압축시험에 의해 산정된 간극

비와 연직응력과 관계 나타내고 있다. 동일한 함수비 상태( $w_{op}=13\%$ )에서 동일한 다짐에너지( $E_c=187.469\text{kJ/m}^3$ )로 다짐을 실시하여도 자갈혼합율( $P$ )에 따라  $e-\log\sigma_v$  곡선의 기울기 (특히, 압축지수)가 현저히 다른 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 자갈혼합량에 따라 자갈혼합재료의 압축특성이 크게 변화하는 것을 의미하며, 압축특성은 초기 건조밀도에 의존하는 것으로 사료된다.

### 3.2 자갈혼합재료의 재료특성 보정방법

#### 3.2.1 건조밀도의 보정방법

본 연구에서는 Gutierrez(2003)가 제안한 이상혼합체 이론을 이용하여 자갈혼합재료의 건조밀도 및 압축지수를 보정하는 방법을 제안하였다.

이상혼합체이론(2003)에 의하면 모래와 자갈의 두 종류의 입자가 혼합되면 혼합재료 전체의 간극비  $e(P)$ 는 식(2)에 의해 정의 된다.

$$e(P) = e_s(1-P) + e_g P \quad (2)$$

식(2)에 포함되어 있는  $e_s$ 는 모래 간극비,  $e_g$ 는 자갈 간극비,  $P$ 는 자갈혼합율을 나타내고 있다.

여기에서 자갈 혼합재료를 다짐할 경우 자갈 간극비  $e_g$ 에 모래가 혼합되는 것을 가정할 수 있고, 이로 인해 자갈 간극비  $e_g$ 는 변화하게 된다. 그러므로 혼합재료 전체의 간극비  $e(P)$ 는 식(3)을 이용해 정의 되어야 하고, 이때 자갈의 유효간극비  $e'_g$ 는 식(4)로 정의된다.

$$e(P) = e_s(1-P) + e'_g P \quad (3)$$

$$e'_g = e_g - e_g R_m(1-P) \quad (4)$$

식(4)에 포함되어 있는  $R_m$ 은 Gutierrez(2003)가 제안한 혼합재료의 혼합정도를 나타내는 실험정수로서 모래와 자갈이 전혀 혼합되지 않는 경우 (그림 6(b)),  $R_m$ 은 0이 되고, 모래와 자갈이 그림 6(d)와 같이 완전히 혼합되면  $R_m$ 은 1이 된다고 할 수 있다.

자갈 혼합재료의 간극비  $e(P)$ 는 식(4)를 식(3)에 대입하여 정리한 식(5)에 의해 정의 되고, 혼합재료의 건조밀도는 식(6)에 의해 정의 된다.

$$e(P) = e_s(1-P) + e_g P \{1 - R_m(1-P)\} \quad (5)$$

$$\rho_d(P) = \frac{G_e(P)}{e(P) + 1} \quad (6)$$

식(6)에서  $G_e(P)$ 는 모래와 자갈의 건조질량비를 고려하여 산출한 자갈혼합재료의 비중을 나타내고 있다.

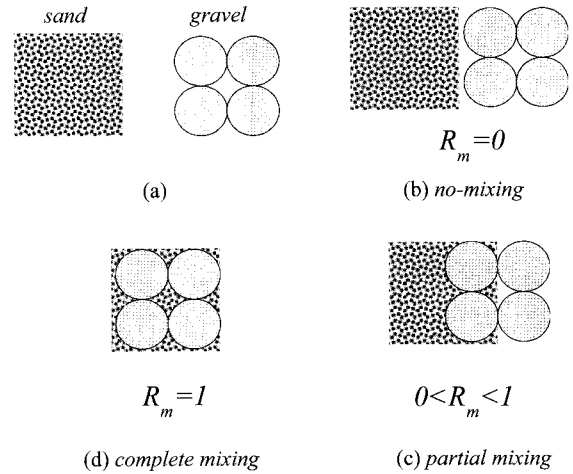
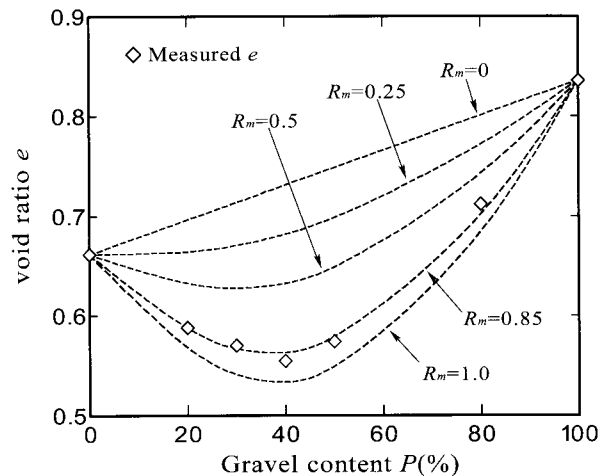
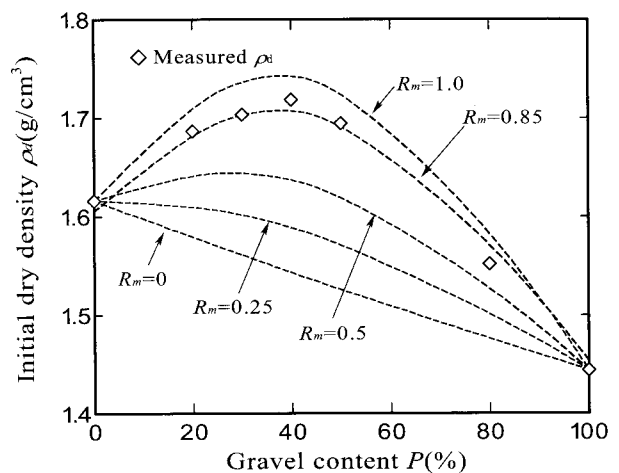


그림 6. 자갈과 모래의 혼합정도  $R_m$ 의 모식도



(a)  $R_m$ 을 변화시켜 구한 자갈혼합율과 간극비 관계



(b)  $R_m$ 을 변화시켜 구한 자갈혼합율과 건조밀도 관계

그림 7.  $R_m$ 을 변화시켜 구한 자갈혼합율과 간극비, 건조밀도 관계

다음으로 본 연구에서 제안한 방법을 통하여 자갈을 포함한 화강풍화토의 건조밀도를 보정하여 그 공학적 적용성에 대하여 고찰하였다.

그림 7(a)에 시험으로부터 얻은 실측값( $\diamond$ )을 자갈혼합율과 간극비의 관계로 나타내었다. 또한 모래( $P=0\%$ )를 다짐해 얻은 모래간극비 $e_s$ 와 자갈( $P=100\%$ )을 다짐해 얻은 자갈간극비 $e_g$ 를 식(5)에 각각 대입하여, 혼합정도( $R_m$ )를 0~1.0으로 변화시켜 구한 혼합재료의 간극비 $e(P)$ 를 점선으로 나타내었다. 그림 7(a)로부터 일차원 압축시험을 통해 얻은 자갈 혼합재료의 간극비 $e(P)$ 는  $R_m$ 을 0.85로 상정하여 보정한  $e(P)$ 와 정확히 일치하는 것을 확인 할 수 있고, 이를 통해 본 연구에서 사용한 화강풍화토의 혼합정도  $R_m$ 은 0.85인 것으로 평가할 수 있다. 또한 같은 방법으로 식(6)을 이용해 산정한 건조밀도는 그림 7(b)과 같다.

### 3.2.2 재료정수의 보정방법

모래 ( $P=0\%$ )와 자갈 ( $P=100\%$ )을 이용한 일차원 압축시험의 결과로부터 각각의 자갈혼합율( $P$ )을 갖는 자갈혼합재료의 재료정수를 보정하는 방법을 제안하였다. 그 일련의 과정은 다음과 같다.

먼저, 모래 ( $P=0\%$ )와 자갈( $P=100\%$ )을 이용해 실시한 일차원 압축시험의 결과인 각각의 간극비  $e_s$ ,  $e_g$ 를 식(5)에 대입하고,  $R_m$ 은 그림 7을 통해 평가된 0.85를 대입한다. 또한 각각의 자갈혼합율( $P$ )을 식(5)에 대입하여 자갈혼합재료의 간극비 $e(P)$ 를 구한다. 이와 같은 방법을 통하여 추정된  $P=50\%$ 의 자갈혼합재료의 일차원 압축곡선을 그림 8에 나타내었다.

그림 8에 있어 실선은 모래( $P=0\%$ ), 자갈( $P=100\%$ ), 그리고  $P=50\%$ 의 자갈혼합재료를 이용해 실시한 일차원 압축시험 결과를 나타내고 있고, 점선은 본 연구에서 제안한 방법을 통해 보정한  $P=50\%$ 의 자갈혼합재료의 일차원 압축곡선을 나타내고 있다. 그림 8로부터, 제안한 방법을 통해 보정한  $e$ - $\log \sigma_v$  곡선은 일차원 압축시험을 통해 얻은 실측값과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

동일한 방법으로 자갈혼합율( $P$ )이 각각 서로 다른 자갈혼합재료의  $e$ - $\log \sigma_v$  곡선을 보정하였고(그림 9), 보정을 통해 얻은  $e$ - $\log \sigma_v$  곡선으로부터 압축지수 $C_c$ 와 팽창지수 $C_s$ 를 산정하였다. 그 결과를 그림 10에 나타내고 있다.

그림 10으로부터 본 연구에서 제안한 방법을 통해 산정한 압축지수 $C_c$ 와 팽창지수 $C_s$ 는 일차원 압축시험을 통해 얻은 실측값을 거의 정확하게 보정하고 있는 것을

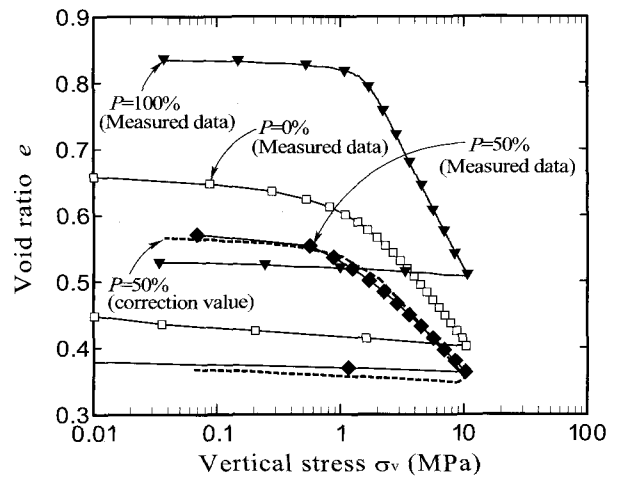
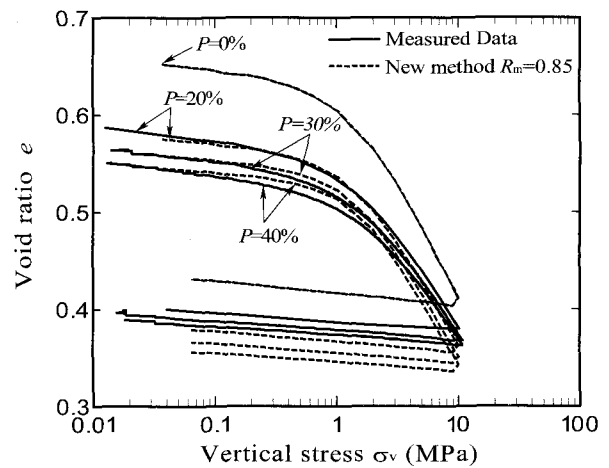
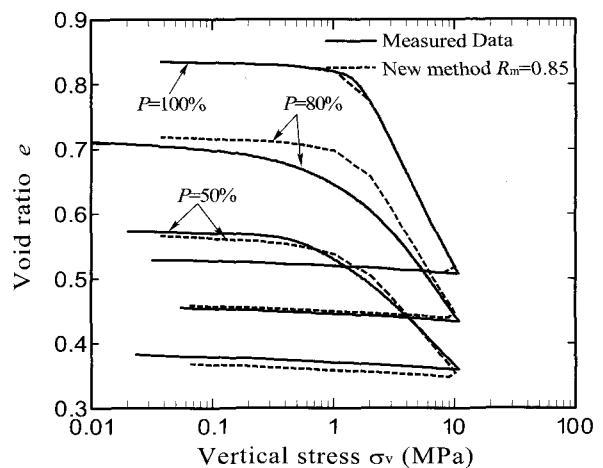


그림 8. 일차원 압축곡선 보정방법 ( $P=50\%$ )



(a)  $R_m=0.85$  ( $P=0, 20, 30, 40\%$ )



(b)  $R_m=0.85$  ( $P=50, 80, 100\%$ )

그림 9. 일차원 압축곡선 (실측값 및 보정값)

알 수 있다. 또한 자갈혼합율( $P$ )=40%에서 최소의 압축지수 $C_c$ 를 나타내는 것은 그림 4에서 확인할 수 있는 초기 건조밀도가 최대값을 나타내는 것에 기인하는 것으

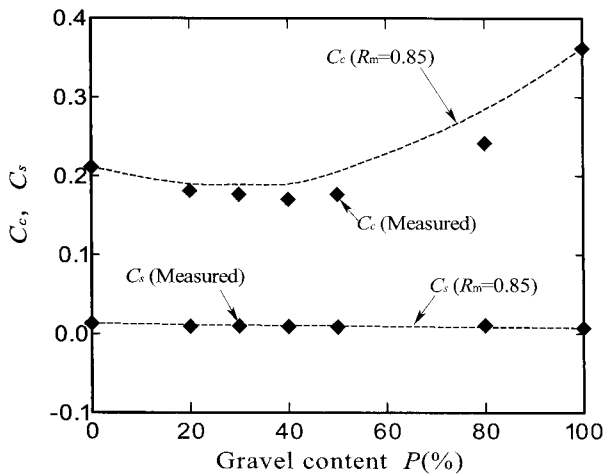


그림 10. 자갈혼합율과 재료정수( $C_c$ ,  $C_{cs}$ )

로 사료되며, ( $P$ )=40% 이후의 자갈혼합재료의 압축지수  $C_c$ 가 급격히 증가하는 것도 건조밀도의 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

이상의 결과는 본 연구에서 제안한 보정 방법은 자갈혼합율의 영향을 정량적으로 평가할 수 있고, 여러 가지 자갈혼합율을 갖는 혼합재료에서도 적용가능하다는 것을 시사하고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 재료특성에 미치는 자갈혼합율의 영향을 밝히고 이상혼합이론을 이용해 자갈혼합율의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) Walker-Holtz 식은 자갈혼합율이 40%를 넘는 자갈혼합 재료에는 적용할 수 없다는 것이 본 연구결과로부터 재확인 되었다. 이것은 Walker-Holtz 식은 자갈혼합율의 증가와 함께 모래혼합율의 감소로 인한 자갈혼합재료의 건조밀도의 감소경향을 실질적으로 표현하지 못하는 것에 기인한다.
- (2) 본 연구에서 사용한 화강풍화토는 자갈혼합율( $P$ )이 40%에서 최대의 건조밀도를 나타내며, 이로써 동일한 함수비에 동일한 다짐에너지를 이용해 다짐을 실시하여도 가장 효과적으로 다져지는 자갈혼합율( $P$ )이 존재하는 것을 확인하였다.
- (3) 자갈혼합율( $P$ )=40%에서 최소의 압축지수를 나타내는 것은 초기건조밀도가 최대값을 나타내는 것에 기인하고, ( $P$ )=40% 이후의 자갈혼합재료의 압축지수

가 급격히 증가하는 것 또한 건조밀도의 감소에 기인한다.

- (4) 이상혼합이론을 이용하여 자갈혼합율을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하였고, 제안한 방법을 통해 산정한 초기건조밀도와 재료정수는 일차원 압축시험을 통해 얻은 실측값과 거의 정확히 일치하였다.

#### 감사의 글

본 연구에 아낌없이 조언을 해 주신 일본 야마구치(山口)대학교 Masayuki Hyodo 교수님, Yukio Nakata 조교수님께 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 또한 본 연구는 06건설핵심D02에 일부지원을 받았습니다.

#### 참고 문헌

1. Gutierrez, M., (2003), "Mixture Theory Characterization and Modeling of Soil Mixtures Geomechanics: Testing" *Modeling and Simulation, 1st Japan-U. S. Workshop on Testing, Modeling and Simulation*, Boston, Massachusetts, USA, pp.600-616.
2. Hsu, T. S. and Saxena, S. K. (1991), "A General Formula for Determining Density of Compacted Soils with Oversize Particles", *Soils and Foundations*, Vol.31, No.3, pp.91-96.
3. Humphres, H. W. (1957), "A method for controlling compaction of granular materials", *H. R. B. Bulletin*, No.159, pp.41-57.
4. Matsuo, S., Nishida, K. and Sasaki, S. (1979), "Physical Properties of Weathered Granite Soil Particles and Their Effect on Permeability", *Soil and Foundation*, Vol.19, No.1, pp.13-22.
5. Nakata, Y., Hyde, A. F. L., Hyodo, M., and Murata, H. (1999), "A probability approach to sand particle crushing in the triaxial test" *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.567-583.
6. Schwab, H. H. (1993), "A contribution to the examination of hydraulic stability of earth and rock", *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, pp.307-308.
7. Walker, F. C and Holtz, W. G (1951), "Control of Embankment Material by Laboratory Testing", *Proc. ASCE*, Vol.77, No.108, pp. 1-25.
8. 福本武明 (1984), "新しい密度補正式の提案", 立命館大学地盤研究室発表会資料, pp.1-5.
9. 福本武明, 増井久, 松田欲光 (1998), "締固められた粗粒土の新密度補正式", 第33回地盤工学研究発表会概要集, pp.403-404.
10. 福本武明, 原健夫 (1998), "粒状体の粒子破碎強度分布に関する研究" 土木学会論文集, No.596, III-43, pp.91-99.
11. 伊藤雅夫, 太田秀樹, 石黒健, 米谷敏 (1991), "礫分を混入する締固め土の先行圧縮応力と強度の推定" 土木学会論文集 No.439/III-17, pp.27-36.
12. 卷内一夫 (1951), "土の突固めに対する粗骨材の影響", 日本大学工学研究報告, No.2, pp.25-32.
13. 村田秀一, 兵動正幸, 安福規之 (1987), "風化度に着目した乱さないまき土の圧縮・せん断特性" 土木学会論文集, 第382号III-7, pp.131-140.
14. 森 満雄 (1996), "礫混じり土の締固め密度の推定に関する研究",

土木学会論文集, No.541, pp.159-171.

15. 柴田英明 (1986), “土の粗粒分を混入した場合の締固め密度の算定式に関する一提案 (第2報)”, 第21 回土質工学研究発表会講演集, pp.1759-1760.
16. 柴田英明 (1987), “締固めレキ混じり土の密度補正に関する提案”,

第22回土質工学研究発表会講演集, pp.1681-1682.

17. 安福規之(1985). “風化度に着目したまき土の圧縮・せん断特性”, 山口大学工学部研究報告, Vol.36, No.1.

(접수일자 2007. 5. 10, 심사완료일 2007. 11. 26)