인공적으로 고결화한 복합 지반재료(CGM)의 압축 거동

Compression Behaviors of Artificially Cemented Composite Geo-Materials

안재훈* · 김유석** · 김윤태***
Ahn, Jaehun · Kim, Yusuk · Kim, Yun-Tae

Abstract

The lightweight soil is an artificially treated soil with air form to reduce the unit weight - therefore making a good backfill material - but is often cement-treated to ensure enough strength. This artificially treated soil has been evolved to be more environment-friendly by using the dredged soft soil and mixing with the bottom ash therefore taking care of by-products of offshore construction and coal production. One of the unique characteristic of this family of Composite Geo-Material(CGM) is that they show drastic strain softening in their stress-strain curves, whose constitutive relations are not properly modeled by casual constitutive models, such as conventional hyperbolic or modified cam-clay model. A new set of modified hyperbolic equations is developed to model CGM materials, and its model parameters are presented based on the results of laboratory tests.

Key words : Strain softening, Constitutive model, Modified hyperbolic model, Environment-friendly geo-material

요 지

건설재료로서의 해상 준설토 재활용에 대한 연구가 관심의 대상이 되고 있다. 이의 대표적인 예는 경량토로서 자연 준설토에 air foaming agent를 첨가하여 단위중량을 낮추어 자중으로 인한 토압을 줄이려는 시도이다. 하지만 경량토는 자연 준설토에 기포가 들어가 있는 형태이므로 그 강도가 준설토 보다 낮아 적용성에 한계를 가지며, 이에 따라 경량토의 강도를 증진시키기 위한 일환으로 저회, 시멘트 등의 다른 물질과 경량토를 혼합하여 사용하려는 시도 및 연구가 진행되어 왔다. 지반재료가 자연적으로 혹은 인공적으로 고결화(cementation)되는 경우 고결화의 영향으로 높은 강도를 가지게 되지만, 강도가 최고점에 도달한 이후에는 고결화 구조가 파괴되어 강도가 감소하게 되고 이에 따른 잔류강도는 최대 강도보다 낮게 되는 경향을 보인다. 이와 같이 변형을 연성화(strain softening)가 명확한 재료의 경우, 지반재료의 구성모델로 많이 사용되는 쌍곡선(hyperbolic) 모델이나 수정 Cam-Clay 모델 같은 기존의 구성모델로는 모사가 불가능하거나 극히 제한적이다. 본 연구에서는 CGM 재료의 일축 압축 거동을 관찰하고, 이를 모사하기 위한 구성모델로서 기존 쌍곡선식을 변형한 모델을 제안하고, 실내시험에 근거하여 모델 계수를 산정하는 과정을 보인다.

핵심용어 : 변형을 연성화, 구성모델, 수정 쌍곡선 모델, 친환경 지반재료

1. 서 론

녹색생장에 대한 관심과 사회적 요구가 가속화되면서, 시공 및 개발 중 환경에 대한 영향을 가능한 한 줄이려는 노력이 계속되고 있다. 이에 따라, 과거에 공학적 특성이 좋지 않아 건설재료로서의 활용이 제한적이었던 해상 준설토의 재활용에 대한 연구도 관심의 대상이 되고 있다. 이의 대표적인 예는 경량토로서의 개량으로, 자연 준설토에 air foaming agent를 첨가하여 단위중량을 낮추어 자중으로 인한 토압을 줄이려는 시도이다. 경량토에 대한 연구는 특히 일본 및 한국에서 공학적 특성과 활용에 대한 연구 및 적용이 계속되고

있다(Tsuchida, 1995; Tsuchida 등, 1996; Otani 등, 2002; Watabe 등, 2004; Yoon 등, 2004; 김윤태 등, 2007; Kim 등, 2008, 2010). 하지만 경량토는 자연 준설토에 기포가 들어 있는 형태이므로 그 강도가 낮아 적용성이 제한적일 수 있으며, 이에 따라 경량토의 강도를 증진시키기 위한 노력으로 저회, 시멘트 등의 다른 물질과 경량토를 혼합하여 사용하려는 시도 및 연구도 진행되어 왔다(김윤태 등, 2007; Kim 등, 2008, 2010). 저회는 석탄 연소과정의 부산물로서 조립질 입자를 가지는 구조 때문에 친환경 건설재료로서 재사용되고 있다(Ghafoori와 Bucholc, 1996; Churchill와 Amirkhanian, 1999; Andrade 등, 2007; Bouvet 등, 2007;

*정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 조교수(E-mail : jahn@pusan.ac.kr)

**부산대학교 사회환경시스템공학부 석사과정

***정회원 · 부경대학교 해양공학과 부교수(교신저자)

Chen 등, 2008; Pan 등, 2008). 김윤태 등(2007)은 해상 준설토를 air foaming agent, 저회, 시멘트 등과 혼합하여 공학적 성능을 개선한 혼합물을 CGM(Composite Geo-Material)이라 하고 실내시험을 통해 연구하였으며, 본 연구에서도 동일한 CGM 이라는 명칭을 사용하기로 한다.

지반재료가 자연상태에서 고결화(cementation)하거나 혹은 인공적으로 재료의 성능을 향상시키기 위해 고결화시키는 경우, 고결화의 영향으로 강도는 증가하게 되지만, 강도가 최고점에 도달한 후 변형이 계속된다면 고결화 구조가 파괴되어 강도가 감소하게 되고, 이에 따른 잔류강도는 일반적으로 최대 강도보다 낮아지는 경향을 나타낸다. 이와 같이 변형을 연성화(strain softening)가 명확한 재료의 경우, 지반재료의 구성모델로 많이 사용되는 쌍곡선(hyperbolic) 모델(Duncan와 Chang, 1970)이나 수정 Cam-Clay 모델(Roscoe와 Burland, 1968) 같은 구성모델로는 모사가 불가능하거나 극히 제한적이다.

본 연구에서는 시멘트 함유율, 함수비, air foaming agent 함유율, 저회 함유율에 따른, CGM 재료의 일축압축거동을 관찰하고, 이를 모사하기 위한 구성모델로서 Tatsuka 등(1993)의 쌍곡선 식을 참조하여 제안한다.

2. 재료배합 및 실내시험

복합재료 CGM의 실내시험을 통한 역학적 특성은 한우중(2008)에 의해 보고된 바 있다. 본 연구의 주된 목적은 변형을 연성화가 극명하게 나타나는 CGM 재료의 응력-변형률 관계를 모사하는 구성모델을 제안하는 것이며, 이를 위해 한우중(2008)의 시험결과를 먼저 요약 및 분석하기로 한다.

본 연구의 대상인 CGM은 앞서 언급한 대로 준설토, 시멘트, air foaming agent와 저회의 혼합물로 구성된다. 본 연구에 사용된 해상 준설토는 부산 신항만 배후부지에 매립된 것으로 채취된 시료의 기본적인 물성은 표 1에 제시되어 있다(김윤태 등, 2007). 표에 보인 대로 사용된 준설토는 통일 분류법에 따라 저소성점토(CL)로 분류된다. 해상 준설토의 입도분포가 그림 1에 제시되어 있다.

경량화를 위해 사용되는 air foaming agent는 면도거품과 유사한 형태의 물질로서 노출 시 초기 부피의 약 20배까지 팽창한다. 혼합재료의 강도증진을 위해 포틀랜드 시멘트가 사용되었으며, 마찰력 증진을 위한 저회는 삼천포 공장에서 생산된 것을 사용하였다.

표 1. 준설토의 물성치(김윤태 등, 2007)

물성	값
함수비 (%)	54.7
액성한계 (%)	39.2
소성한계 (%)	18.5
소성지수 (%)	20.7
비 중	2.60
No. 200 표준체 통과율 (%)	81.2
통일 분류법	CL

그림 1. 준설토와 저회의 입경 분포(김윤태 등, 2007)

그림 2. 저회의 화학 조성(Kim 등, 2010)

저회의 입도분포가 그림 1에 제시되어 있다. CGM과 혼합된 저회는 No. 4 표준체에 한 번 거른 것을 사용하였으며, 한 번 걸러진 저회의 입도분포 또한 그림 1에 주어졌다. No. 4 표준체를 통과한 저회의 유효입경(D_{10})은 0.35 mm, 균등계수와 곡률계수는 각각 2.54와 0.99로 계산된다. 저회의 입자크기 분포는 입도분포가 불량한 모래와 유사하고 비중은 약 2.0으로 산정되었다.

저회의 화학조성은 그림 2에 보인 바와 같으며, 주로 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO 등으로 구성된다(Kim 등, 2010). 저회는 조립질 재료로서 마찰 뿐 아니라 포졸란 반응에 의한 결합에 의해서도 전단강도 증진에 효과적인 것으로 알려져 있다(Jaturapitakkul와 Cheerarot, 2003; Kim 등, 2010).

일축압축시험을 위해 배합된 CGM의 시멘트, 물, air foaming agent, 저회의 배합비가 표 2에 주어져 있다. 기본 배합비로는 표에 표시한 대로, Ci = 20%, Wi = 120%, Ai = 2%, BAi = 100%를 사용하였으며, 각각 배합재료가 달라지는 경우에 따른 압축거동의 차이를 확인하기 위하여 기본 배합비를 바탕으로 각각의 배합재료를 표와 같이 변화시키며 압축특성을 관찰하였다(한우중, 2008). 시멘트 함유율이 Ci =

표 2. 배합 상태(한우중, 2008)

배합물	함유율 (%)
시멘트 함유율, Ci	8, 12, (16), 20*
함수비, Wi	120*, 130, 140, 150
Air foaming agent 함유율, Ai	0, 1, 2*, 3
저회 함유율, BAi	0, 25, 50, 75, 100*

*기본 배합비

16%인 경우 시험은 수행되었으나 그 결과가 다른 시험결과와 비교해 볼 때 합리적이지 않아 시험결과 해석 시에는 사용하지 않았으며, 본 내용은 다음 절에 다시 기술하기로 한다.

압축시료에 쓸 시료는 준설토와 시멘트, air foaming agent, 저회를 표 2에 주어진 비율로 혼합하여 성형 몰드에 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 온도 하에 28일 양생을 하여, 직경 72 mm, 높이 148 mm인 공시체로 제작하였다. 각 공시체는 변형률 속도 1.0%/min로 일축압축을 하였다(한우중, 2008).

3. 실험결과 및 구성모델

3.1 일축압축거동

앞서 언급된 시료성형 및 시험 방법을 따라 행해진 CGM의 일축압축거동을 관찰하였다. 그림 3은 일축압축 하의 응

그림 3. 시멘트 함유율변화에 따른 응력-변형률 관계(한우중, 2008)

력-변형률 관계를 보여주는 대표적인 경우로서 표 2의 기본 배합 상태에 시멘트 함유율을 달리 했을 경우를 보여준다. 시멘트 함량이 증가할수록 침투 일축압축강도(q_p)가 증가하며, 한 편 해당 변형률(ϵ_p)은 작아지는 즉, 취성이 커지는 형태를 가진다. 다만, $C_i = 16\%$ 일 경우 침투강도가 $C_i = 20\%$ 인 경우보다 커지는 예외적인 경우가 관찰되었는데, 이는 표 2에 제시되지 않은 다른 경우의 결과(한우중, 2008)와 비교해 볼 때 $C_i = 16\%$ 인 경우의 결과가 시험상의 오류로 잘못 관측된 것으로 판단된다. 따라서 $C_i = 16\%$ 인 결과는 그림 3에 나타내지 않았다. 침투강도에 도달한 후의 응력-변형률 관계는 변형률 증가에 따라 강도가 점차 줄어드는 변형률 연성화 경향을 보인다. 하지만 시멘트 함유율에 따른 잔류강도(q_r)의 뚜렷한 경향은 찾을 수가 없었고, 그림에 보이는 대로 잔류강도는 20 kPa 내외로 수렴하는 경향을 가지는 것을 가지는 것을 볼 수 있었다.

표 2에 제시된 모든 경우에 대해 이와 같은 분석을 수행 하였으며, 첨가물 함유율에 따른 침투강도와 해당 변형률의 결과가 그림 4와 5에 주어졌다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이, 시멘트와 저회의 함유율이 증가할수록 침투강도가 증가하는 경향을 보였으며, 함수비와 air foaming agent 함유율의 증가는 침투강도의 감소를 초래하였다. 이 중 시멘트와 air foaming agent 함유율의 변화는 침투강도에 특히 큰 영향을 주는 것을 볼 수 있었다.

침투강도가 발현될 때의, 즉 파괴 시의, 변형률은 그림 5에서 보인 대로 시멘트 함유율이 증가함에 따라 감소하는 다시 말해 취성이 증가하는 경향을 보인다. 함수비의 증가는 파괴 시 변형률의 증가를, air foaming agent의 증가는 파괴 시

(a) 시멘트 함유율 변화

(b) 함수비 변화

(c) Air foaming agent 함유율 변화

(d) 저회 함유율 변화

그림 4. 첨가물 함유율에 따른 침투강도(q_p)(한우중, 2008)

(a) 시멘트 함유율 변화

(b) 함수비 변화

(c) Air foaming agent 함유율 변화

(d) 저회 함유율 변화

그림 5. 첨가물 함유율에 따른 파괴 시 변형률(ϵ_p)(한우종, 2008)

그림 6. Air foaming agent 함유율에 따른 잔류전단강도

변형률의 감소를 초래하는 양상을 보였으며, 저회의 함유율의 변화로부터는 파괴시 변형률의 뚜렷한 변화 양상을 확인할 수 없었다.

잔류강도의 변화는 첨가물 함유율의 변화에 따라서 뚜렷한 경향을 찾기가 힘들었으나, 단 air foaming agent 함유율의 변화는 잔류강도에 크게 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 이에 따라, 그림 6에는 air foaming agent 함유율에 따른 잔류강도의 경향을 보였다. 그림 4(c), 5(c), 6에 나타난대로 air foaming agent의 첨가는 혼합재료의 침투강도와 잔류강도를 모두 저하시키고, 취성 또한 증가시키는 것으로 보아, 지반의 강도가 중요시 되는 구조물에는 경량토의 사용에 각별한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

3.2 수정 쌍곡선 모델

변형률 연성화가 극명하게 나타나는 CGM 재료의 응력-변

형률 관계를 묘사하는 구성모델을 만들기 위해 일축, 삼축압축하중 하에서 지반재료의 거동을 표현하기 위해 널리 쓰이는 쌍곡선 모형을 근간으로 하였다. 다음은 x , y 축 상의 쌍곡선 모델의 기본 식을 보여준다.

$$y = \frac{x}{a + bx} \quad (1)$$

본 논문에서는 x , y 를 각각 파괴 시 변형률과 침투강도로 정규화한 변형률과 응력으로 정의하였다($x = \epsilon/\epsilon_p$, $y = q/q_p$). 지반재료의 응력-변형률 관계를 식 (1)의 형태로 묘사하고 해당 모델계수 a , b 를 산정하는 방법은 Duncan과 Chang(1970)에 의해 제안된 바 있으며, 두 모델계수는 x - y 그래프의 절편과 기울기로부터 산정할 수 있다(a = 절편, b = 기울기). 하지만, 본 시험결과로부터 얻어진 응력-변형률 관계는 x - y 평면에서 직선으로 얻어지지 않아 모델계수의 산정이 힘들었으며, 이에 따라 식 (1)의 쌍곡선 관계를 다음과 같이 변형하기로 하였다. 식 (2)는 Darendeli(2001)가 제안한 정규화된 전단탄성계수 감소곡선의 쌍곡선 제안식과 유사한 형태를 가진다.

$$y(x) = \frac{x^{c_1}}{a_1 + b_1 x^{c_1}} \quad (2)$$

식 (2)에서는 먼저 c_1 계수를 고정시킬 경우, x^{c_1} - y 의 관계가 선형일 경우 모델계수 a_1 , b_1 을 손쉽게 산정할 수 있다. 이 때, 모델계수의 첨자 1은 응력-변형률 관계가 최고점에 이르기 전의 관계를 나타내기 위하여 사용되었다. 최고점

(a) $c_1 = 1$ 인 경우

(b) $c_1 = 2$ 인 경우

그림 7. 모델계수 a_1, b_1 의 산정($W_i = 140\%$ 인 경우)

에 이른 후의 연성화 과정 동안의 응력-변형률 관계는 첨자 2를 가진 모델계수로 설명된다.

그림 7은 식 (1)과 (2)를 사용하여 모델계수를 산정하는 경우의 예를 보인다. 식 (1)을 사용할 경우, 즉 $c_1 = 1$ 인 경우의 $x^{c_1} - x^{c_1}/y$ 의 관계는 그림 7(a)에 보인대로 비선형의 형태를 가지기 때문에 a_1, b_1 의 계수가 유일한 값을 가지지 않는다. 이에 반해, $c_2 = 2$ 를 사용한 경우에는 그림 7(b)에 보인 대로 $x^{c_1} - x^{c_1}/y$ 의 관계가 선형이기 때문에 절편과 기울기로부터 손쉽게 a_1, b_1 계수를 산정할 수 있다. 시험결과를 잘 묘사할 수 있는 c_1 의 값을 찾기 위해 몇 가지 다른 계수들을 시도해 보았으며, 이 결과 $c_1 = 2$ 일 경우가 시험결과와 가장 잘 맞는 것으로 확인되었다. 따라서, 첨두강도에 이르기 전까지의 응력-변형률 관계는 식 (2)와 $c_1 = 2$ 를 사용하기로 하였다.

첨두강도에 이른 이후의 변형률 연성화 경향을 나타내기 위해 식 (2)를 응용한 형태로 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$y = y_p - (y_p - y_r) \frac{(x - x_p)^{c_2}}{a_2 + b_2(x - x_p)^{c_2}} \quad (3)$$

이 때, a_2, b_2, c_2 는 첨두강도 이후의 곡선을 설명하기 위한 모델계수이며, x_p 와 y_p 는 각각 최고점에서의 정규화된 변형률과 응력, x_r 와 y_r 는 정규화된 잔류강도를 나타낸다. 즉, x_p 와 y_p 는 실제로 1의 값을 가진다. 그림 7에 보인 바와 유사하게 첨두강도 이후의 응력-변형률 곡선에 잘 맞출 수 있

는 c_2 를 찾기 위한 시도를 하였으며 그 결과 $c_2 = 3$ 이 적합한 것으로 판단하였다.

식 (2)와 식 (3)을 사용하여 첨두강도 전, 후의 응력-변형률 관계를 묘사할 경우 최고점에서 기울기가 불연속적인 곡선이 만들어지며, 이는 실제 시험결과와도 상이할 뿐 아니라 이후에 구성모델로 사용하여 경계조건문제를 해석하는 경우에 한 점에서 두 개의 접선 탄성계수를 가지게 되므로, 이를 개선해야 할 필요가 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 Tatsuoka 등(1993)이 제안한 함수를 활용하여 식 (2)를 식 (4)에 정리하였다. 본 식들의 유도절차는 원문에 있으므로 여기에는 생략하고 그 결과만을 나타내기로 한다.

$$y(x) = p(x) \cdot f(x) + [1 - p(x)] \cdot g(x) \quad (4a)$$

$$p(x) = \frac{1}{2} [\cos(\pi x^t) + 1] \quad (4b)$$

$$g(x) = \left(\frac{2\sqrt{x}}{x+1} \right)^s \quad (4c)$$

$$t = \frac{\log \left[\frac{\arccos(2\alpha - 1)}{\pi} \right]}{\log \frac{a_1 \beta}{1 - b_1 \beta}} \quad (4d)$$

$$s = \frac{\log \beta}{\log \left(\frac{2 \left(\frac{a_1 \beta}{1 - b_1 \beta} \right)^{1/2c_1}}{\frac{a_1 \beta}{1 - b_1 \beta} + 1} \right)} \quad (4e)$$

여기에서 $f(x)$ 는 식 (2)에 제안된 식을 나타내고 첨두강도에 이르기까지의 응력-변형률 관계는 식 (2) 대신 식 (4)를 사용하게 된다.

따라서 본 연구에 사용된 고결화된 지반재료의 응력-변형률 거동은 먼저 응력과 변형률의 첨두강도와 파괴시 변형률로 정규화를 한 후에, 첨두강도에 이르기 전까지는 식 (4a)를 이용하고, 그리고 첨두강도 이후의 연성화 과정은 식 (3)을 이용하여 묘사할 수 있다.

제안된 식으로 지반재료의 응력-변형률 관계를 나타내기 위한 모델계수는, 먼저, 첨두강도 q_p 와 파괴시 변형률 ε_p , 잔류강도 q_r 이 있으며, 또한 식 (2)와 (4)의 $a_1, b_1, c_1, \alpha, \beta$, 그리고 식 (3)의 a_2, b_2, c_2 가 존재한다. 이 중 첨두강도 q_p 와 파괴시 변형률 ε_p , 잔류강도 q_r 은 물리적 의미가 분명한 중요한 모델계수이며, α 와 β 는 각각 0.25와 0.8로 고정시켰을 경우에, 시험결과와 응력-변형률 관계를 설명하는 데에 문제가 없음을 확인하였다. Tatsuoka 등(1993)의 연구에는 고결화된 사질토를 해석하기 위해 $\alpha = 0.9, \beta = 0.8$ 의 값을 고정하여 사용하였으나 본 연구에서는 사용된 재료와 식 (2)의 쌍곡선 모델이 다르므로 α 와 β 가 다를 수밖에 없음을 밝혀 둔다. 식 (2)의 모델계수 c_1 와 식 (3)의 c_2 의 경우 앞서 언급한 대로 $c_1 = 2, c_2 = 3$ 인 경우 실험결과를 잘 반영하였다.

이 후 남은 모델계수 a_1, b_1, a_2, b_2 를 산정하기 위하여 표 2에 주어진 각각의 시험그룹별로 정규화된 응력-변형률 관계를 바탕으로 모델계수를 산정하였다. 가능한 모델계수의

(a) 시멘트 함유율 변화

(b) 함수비 변화

(c) Air foaming agent 함유율 변화

(d) 저회 함유율 변화

그림 8. 제안된 구성모델과 응력-변형률 관계

표 3. 첨가물 변화에 따른 모델계수의 범위

첨가물	a_1	a_2	$y_r = q_r/q_p$
시멘트	0.03-0.06	0.25-0.7	0.1-0.4
함수비	0.03-0.06	0.35-1.3	0.15-0.23
Air foaming agent	0.03-0.09	0.03-3.0	0.1-0.2
저회	0.05-0.1	0.7-2.3	0.17-0.3

값을 고정시켜 산정이 필요한 모델계수의 수를 줄이려는 노력을 하였으며, 이를 바탕으로 $b_1 = 0.95$, $b_2 = 1$ 의 값이 검토된 모든 시험결과에 적합한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 b_1 과 b_2 는 본 값들로 고정시키고, a_1 , a_2 그리고 정규화된 잔류강도인 y_r 값만을 변형하여 제안된 모델이 응력-변형률 곡선을 예측하게 하였다. 본 해석의 결과가 그림 8에 제시되어 있다.

그림에서 볼 수 있듯 일축압축시험으로부터 얻어진 응력-변형률 관계는 침투강도 q_p 와 파괴시 변형률 ϵ_p 로 정규화 하였을 때, 침투강도에 이르기 전까지의 곡선은 표 2에 제시된 것과 같은 첨가물 변화에도 불구하고 매우 좁은 범위 내에 있었고, 반면 침투강도 이후에는 비교적 큰 폭의 변화를 가지는 것을 알 수 있었다. 하지만 침투강도 이후의 거동은 air foaming agent의 함유율이 변할 때를 제외하고는 모델계수 a_2 와 정규화된 잔류강도 y_r 의 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다. 단 air foaming agent가 0에서 3%로 변화하는 경우, 모델계수 a_2 는 0.03에서 3으로 크게 증가하는 경향을 보였다. 그림 7에 나타난 수정 쌍곡선 모델 곡선의 상한과 하한치에

해당하는 모델계수가 표 3에 정리되어 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 해상 준설토와 저회, air foaming agent, 시멘트의 첨가물을 혼합하여 준설토를 재활용하기 위한 친환경 건설재료인 CGM의 일축압축거동을 분석하고 수정 쌍곡선 모델을 제안하였다.

시멘트와 저회의 함유율이 증가할수록 침투강도가 증가하는 경향을 보였으며, 함수비와 air foaming agent 함유율의 증가는 침투강도의 감소를 초래했다. 이 중 시멘트와 air foaming agent 함유율의 변화는 침투강도에 특히 큰 영향을 주는 것을 볼 수 있었다. 잔류강도의 변화는 첨가물 함유율의 변화에 따라서 뚜렷한 경향을 찾기가 힘들었으나, 단 air foaming agent 함유율의 변화는 잔류강도에 크게 영향을 미치는 것으로 관찰되었다.

제안된 수정 쌍곡선 모델계수 중 본 시험결과를 모사하기 위한 모델계수는 침투강도, 파괴시 변형률, 잔류강도에 더해 침투강도 전후의 응력-변형률 추세를 나타내는 a_1 , a_2 계수이며, 일축압축시험에 사용된 혼합비율을 바탕으로 모델계수 값을 나타내었다.

실내시험으로부터 구해진 응력-변형률 관계는 침투강도와 파괴시 변형률로 정규화 했을 때, 침투강도에 이르기 전에는 매우 좁은 범위 내에 존재했지만, 침투강도 이후에는 비교적 광범위하게 첨가물의 혼합율에 따른 별다른 추이 없이 변형률 연성화 과정을 보였다. 단, 예외적으로 air foaming

agent의 함유율이 달라질 경우에는 연성화 추세의 경향이 함유율에 따라 뚜렷하게 변하는 것을 알 수 있었다.

향후 본 연구에서 제안된 수정 쌍곡선 모델은 다른 실내시험의 결과를 통해 보완하여, 실제 CGM 재료가 사용된 지반구조물의 경계조건문제의 해석을 위해 활용될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 지역혁신인력양성사업(2011-07-대-04-034)과 중견연구자지원사업(2011-0029426)의 지원으로 수행된 것으로, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김운태, 한우중, 정두희 (2007) 준설토와 Bottom Ash 재활용을 위한 복합지반재료 개발, **한국지반공학회 논문집**, 제23권, 제11호, pp. 77-85.
- 한우중 (2008) **준설토와 Bottom ash 재활용을 위한 무보강 및 섬유보강 복합지반재료의 역학적 특성 비교**, 석사학위논문, 부경대학교.
- Andrade, L.B., Rocha, J.C. and Cheriaf, M. (2007) Evaluation of concrete incorporation bottom ash as a natural aggregates replacement. *Waste Manage.*, Vol. 27, No. 9, pp. 1190-1199.
- Bouvet, M., Francois, D. and Schwartz, C. (2007) Road soil retention of Pb leached from MSWI bottom ash. *Waste Manage.*, Vol. 27, No. 6, pp. 840-849.
- Chen, J.S., Chu, P.Y., Chang, J.E., Lu, H.C., Wu, Z.H. and Lin, K.Y. (2008) Engineering and environmental characterization of municipal solid waste bottom ash as an aggregate substitute utilized for asphalt concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 20, No. 6, pp. 432-439.
- Churchill, E.V. and Amirkhanian, S.N. (1999) Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 11, No. 4, pp. 295-301.
- Darendeli, B.S. and M.S. (2001) *Development of A New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*. Ph.D. dissertation, The University of Texas, Austin, Texas, USA.
- Duncan, J.M. and Chang, C.Y. (1970) Nonlinear analysis of stress

- and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 96(SM5), pp. 1629-1653.
- Ghafoori, N. and Bucholc, J. (1996) Investigation of lignite-based bottom ash for structural concrete. *J.Mater. Vic. Eng.*, Vol. 8, No. 3, pp. 128-137.
- Kim, Y.T., Kim, H.J. and Lee, G.H. (2008) Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 26, pp. 512-518.
- Kim, Y.T., Lee, C. and Park, H.I. (2011) Experimental study on engineering characteristics of Composite Geo-Material for recycling dredged soil and bottom ash. *Marine Georesource and Geotechnology*, Vol. 29, pp. 1-15.
- Kim, Y.T., Ahn, J., Han, W.J. and Gabr, M.A. (2010) Experimental evaluation of strength characteristics of stabilized dredged soil. *J. Mat. In Civ. Engrg.*, Vol. 22, No. 5, pp. 539-544.
- Roscoe, K.H. and Burland J.B. (1968) *On the generalised stress-strain behaviour of 'wet' clay*, *Eng.plasticity*, Cambridge Univ. Press, pp. 535-609
- Otani, J., Mukunoki, T. and Kikuchi, Y. (2002) Visualization for engineering property of in-situ light weight soils with air foams., *Soils Found.*, Vol. 4, No. 3, pp. 93-105.
- Pan, J.R., Huang, C., Kuo, J.J. and Lin, S.H. (2008). Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement. *Waste Manage.*, Vol. 28, No. 7, pp. 1113-1118.
- Tanaka, T. (1988) : Communication to Tatsuoka et al. (1993).
- Tatsuoka, F., Mohammed, S.A.S., Park, C.S., Sakamoto M, and Fumihiro A. (1993) Modelling stress-strain relations of sand. *Soils And Foundations*, Vol. 33, No. 2, pp. 60-81.
- Tsuchida, T. (1995) Super geo-material project in coastal zone. *Proc., Int. Symp. on Ocean Space Utilization COSU '95*, pp. 22-31.
- Watabe, Y., Itou, Y., Kang, M.S. and Tsuchida, T. (2004) One-dimensional compression of air-foam treated lightweight geo-material in microscopic point of view. *Soils Found.*, Vol. 44, No. 6, pp. 53-67.
- Yoon, G.L., Jeon, S.S. and Kim, B.T. (2004) Mechanical characteristics of light-weighted soils using dredged materials, *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol. 24, No. 4, pp. 215-229.

© 논문접수일 : 2012년 07월 03일

© 심사외뢰일 : 2012년 07월 03일

© 심사완료일 : 2012년 07월 13일