CSG 재료의 압축강도 특성 및 동결융해 저항성

Compressive Strength Properties and Freezing and Thawing Resistance of CSG Materials

연규석* · 김영익* · 현상훈* · 김용성*†

Yeon, Kyu Seok* · Kim, Young Ik* · Hyun, Sang Hoon* · Kim, Yong Seong*†

ABSTRACT

The cemented sand and gravel (CSG) method is a construction technique that adds cement and water to rock-like materials, such as riverbed gravel or excavation muck which can be obtained easily at areas adjacent to dam sites. This study was performed to evaluate the unconfined compressive strength properties and freezing and thawing resistance of CSG materials with unit cement content. The three types of CSG-80, CSG-100 and CSG-120 with cement content were designed to evaluate the optimum water content, dry density, strength, stress-strain, micro structure and durability factor. As the results, the optimum water content ratio with cement content showed almost similar tendency, and the unconfined compressive strength and dry density increased as cement content increases. The strength ratio of 7 days for 28 days were in the range of 55~61 % and the strain ratio in stress-strain curve were in the range of 0.8~1.6 % nearby maximum strength in 28 days. It is expected that this study will contribute to increasing application of CSG method as well as to increasing the utilizing of CSG materials as a environmentally friendly CSG method.

Keywords: CSG, Strength, Freezing and thawing, Stress-strain, Microstructure

1. 서 론

최근 시공기술의 발전과 더불어 환경문제가 크게 대두되면서 건설분야에서도 환경부하저감 및 공사비 감축 관련 시공법 개발에 관한 연구가 계속적으로 증가하고 있다 (Kim et al., 2009).

C.S.G (cemented sand and gravel) 재료는 댐 수몰지로부터 쉽게 얻을 수 있는 하상자갈과 원지반으로부터 채취된 굴착토를 물, 시멘트와 함께 혼합한 재료를 충칭하며 주로 댐 분야에서 사용되어 왔다. 또한 CSG 공법은 CSG 재료를 현장에서 진동 롤러 등과 같은 다짐작업을 통해 성토체를 연속적으로 축조해 나가는 공법으로 주로 댐 건설을 위한 가물막이나 성토구조물의 보호공 및 저수지내 사면의 보호공 등에 사용되어 왔으며, 시공성의 경우 콘크리트 중력식댐의 블록간 사이클 타임이 약 1주 정도 소요되는 반면 CSG 재료는 1일에도 수 사이클의 연속적인 시공이 가능하므로 공기단축을 통한 시공의 효율성을 증대시킬 수 있는 것으로 알려져 있다 (Kim et al.,

2005).

최근에는 CSG 재료를 활용한 공법의 설계 및 시공 등의 우수성에 의하여 콘크리트로 건설되고 있는 하천의 보 및 저사댐 등에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 도로 및 호안 등의 건설재료에 CSG 재료를 이용하고자 하는 시도가 증가하고 있다 (Kim et al., 2005; Bae, 2006).

한편, CSG 재료는 단위시멘트량, 재령, 입도분포, 함수비 그리고 입도 형상 등 다양한 요인에 의하여 강도 특성이 달라지는 것으로 보고되고 있다. Yamaguchi et al. (2003)은 도쿠야마댐에 대하여 CSG 공법에 의해 일시적 구조물의 건설 방법에 대한 연구를 진행하였으며, Kongsukprasert et al. (2003)은 시멘트가 혼합된 자갈에 대한 응력-변형 거동에 관하여 노후화에 따른 점성의 영향에 대하여 연구하였다. 또한 국내에서 배경운 (2006)은 CSG의 실내 및 현장배합설계를 실시하여 화북댐 시험성토 구간에 적용하였으며, 김기영 (2006)은 CSG 재료에 대해 재령, 함수비, 입도 및 단위시멘트량에 따른 압축강도 시험을 실시하고 압축강도에 미치는 영향인자를 분석하였다.

한편, 최근에는 환경친화적 재료의 이용 및 개발에 관한 연구가 증가하면서 원지반 재료인 흙의 특성을 개선하기 위하여 다양한 혼합재료를 혼합한 혼합토에 관한 연구가 많이 진행되고 있으며, 이에 대한 활용 및 적용에 관한 시공법이 개발되어

* 강원대학교 지역건설공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6463

Fax: +82-33-251-6463

E-mail address: yskim2@kangwon.ac.kr

2009년 12월 24일 투고

2010년 1월 18일 심사완료

2010년 1월 18일 게재확정

지고 있다 (Kong et al., 2001; Chae et al., 2003; Han, 2007; Youn et al., 2009).

따라서 본 연구는 단위시멘트량에 따른 CSG 재료의 구조물 설계시 기준이 되는 압축강도 및 사용하에서 하중의 증가에 따른 응력-변형 곡선을 통한 변형률의 범위, 파괴 형태 및 시멘트의 혼입에 따른 CSG 재료의 수화특성을 분석하여 CSG 재료에서의 시멘트 영향을 구명할 뿐만 아니라 CSG 재료가 수리구조물에 적용될 수 있기 때문에 동결융해 특성을 구명하여, CSG 공법에 활용하기 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

실내배합설계의 경우 실험장비의 제약상 이러한 대형입도를 사용할 수 없으므로 다짐시험 및 강도시험용 시료의 최대골재 치수는 통상적으로 40 mm 이하를 사용한다.

단위시멘트량에 따른 CSG 재료의 특성을 분석하기 위한 재료는 터파기시 발생된 굴착토를 선별기를 이용하여 40~25,

20~10, 10~4.76 mm 그리고 4.76 mm 이하로 분리하여 사용하였으며, 시멘트는 국내 H사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. Table 1 및 Table 2는 사용된 시멘트의 물리·화학적 특성을 나타내며, Fig. 1은 사용된 굴착토의 입도 분포를 나타낸다.

2. 배합설계 및 제작

가. 배합

CSG 재료에 대한 배합설계는 CSG 재료가 목표설계기준강도와 경제성을 만족하는 합리적인 단위재료량을 결정하는 것이 중요하다. 즉 다짐 및 강도시험과 같은 실내시험을 통하여 설계기준강도를 확보할 수 있는 단위시멘트량, 물량 및 골재량을 결정하고 시험배합을 통하여 이를 확인하여 최적배합을 도출하는 것이 중요하다. CSG 배합설계에 대한 명확한 기준이 제시되고 있지 않으나 크게 다짐시험을 활용한 토질역학적인 방법과 콘크리트 배합설계방법으로 분류된다.

CSG 재료의 배합은 시멘트의 사용량에 따른 압축강도 및 동결융해 특성을 분석하기 위하여 80 kg/m³, 100 kg/m³ 및 120 kg/m³의 단위시멘트량을 혼입한 CSG-80, CSG-100 및 CSG-120의 3 종류로 하였다. Table 3은 단위시멘트량에 따른 CSG 재료의 배합설계를 나타낸다.

나. 다짐

국내의 경우 CSG 재료에 대한 다짐시험 방법은 명확한 기준은 제시되어 있지 않으며, 기존의 토질역학적 다짐시험 방법을 그대로 채택하고 있다. 미국의 경우에도 CSG 재료에 대한 다짐 기준이 제시되어 있지 않으며, 본 공법과 유사한 RCC (Roller compacted concrete) 공법의 경우 배합설계에 사용되는 다짐기준을 표준다짐 (ASTM D 698)과 수정다짐 (ASTM D 1557)으로 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 CSG 재료에 대한 다짐 시험 방법 및 시공법에 관한 명확한 기준이 아직까지 제시되어 있지 않기 때문에 최대허용입경을 37.5 mm로 제한하고 있는 수정 E 다짐방법 (KS F 2319)에 의하여 다짐시험을 실시하였다.

Table 1 Physical properties of normal portland cement

S.G	Setting time (h-min)		Compressive strength (MPa)		
	Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	5-7	7-20	19.4	21.6	32.3

Table 2 Chemical compositions of normal portland cement (Unit: %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
21.09	4.84	63.85	3.32	3.09	1.13	0.29	2.39

Fig. 1 Distribution curve of size

Table 3 Mix designs of CSG materials with cement contents (Unit: kg/m³)

Type	Cement	Aggregate	Water	W/C
CSG-80	80	2,126	188	235
CSG-100	100	2,114	188	188
CSG-120	120	2,100	189	157

Fig. 2 Specimens for strength test

다. 공시체 제작

단위시멘트량 및 재령에 따른 CSG 재료의 압축강도 특성을 분석하기 위하여 다짐시험에서 산출된 최적함수비와 최대건조단위중량을 기준으로 하여 토질역학적 삼상관계를 이용하여 수량 및 물량을 산정한 후 다짐시험에서의 수정 E 다짐과 동일한 수준의 다짐에너지를 나타낼 수 있도록 직경 15 cm, 높이 30 cm의 콘크리트 몰드에 CSG재료를 투입하고 재료분리가 발생하지 않도록 5층으로 나누어 다짐을 실시하여 공시체를 제작하였다. 압축강도시험을 위한 공시체는 각 배합당 12개를 1조로 하여 3회 반복하여 제작하였으며, 재령에 따른 강도 특성을 구명하기 위하여 재령 3, 7, 28 및 91일 동안 양생을 실시하였다. Fig. 2 (a)는 압축강도 측정을 위한 공시체 제작 모습을 보여주며, Fig. 2 (b)는 소정의 기간 동안 양생 모습을 보여준다.

3. 시험방법

가. 압축강도시험

압축강도시험은 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 재령 3, 7, 28 및 91일에 $\phi 150 \times 300$ mm인 공시체를 Instron사의 만능시험기를 사용하여 1 mm/min의 속도로 하중을 재하하여 측정하였다.

나. SEM

시멘트의 혼입에 따른 CSG 재료의 수화특성을 분석하기 위하여 재령 28일된 공시체에서 시료를 채취하여 주사전자현미경 (SEM: scanning electronic microscope)을 이용하여 1,000배 및 5,000배로 측정하였다.

다. 동결융해시험

동결융해시험은 KS F 2456 (급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험 방법)에 준하여 수중 급속 동결융해시험을 하였으며, 이때 공시체의 온도는 동결시 -18°C , 융해시 4°C 가 되게 하였다. 동결융해의 1사이클은 2시간 40분이 소요되었다.

시험동안 매 50사이클 간격으로 중량변화 및 동탄성계수를 측정하였으며, 동결융해의 반복이 300사이클이 되었을 때 시험을 완료하였다. 동탄성계수로부터 다음 식에 의하여 상대동탄성계수를 계산하여 내구성 지수를 산출하였다.

(a) 상대동탄성계수

$$P_c = (n_1^2/n^2) \times 100$$

여기서, P_c = 동결융해 C 사이클 후의 상대동탄성계수 (%)

n = 동결융해 0 사이클에서의 가로 1차 진동주파수

n_1 = 동결융해 C 사이클에서의 가로 1차 진동주파수

(b) 내구성 지수

$$DF = PN/M$$

여기서, DF = 내구성 지수

P = N 사이클에서의 상대동탄성계수 (%)

N = 동결융해의 노출이 끝나게 되는 순간의 사이클 수

M = 동결융해의 노출이 끝날 때의 사이클 수

III. 결과 및 고찰

1. 다짐

단위시멘트량에 따른 CSG 재료의 다짐 특성에 의한 최적함수비 및 최대건조단위중량을 분석하기 위하여 시멘트량을 80, 100 및 120으로 달리하여 수정 E 다짐에 의한 다짐시험을 실시하고 각 단위시멘트량에 따른 최대건조단위중량 및 최적함수비를 도출하였다. Fig. 3은 단위시멘트량에 따른 최적함수비 및 최대건조단위중량을 나타낸다.

단위시멘트량에 따른 다짐시험 결과 CSG-80 배합의 최적함수비는 대략 8.5 %로 나타났으며, CSG-100 및 CSG-120 배합의 최적함수비는 각각 대략 8.4 % 및 8.5 %로 나타나 단위시멘트량에 따른 최적함수비는 거의 차이가 없이 유사한 경향

Fig. 3 Optimum water content curve by E compaction

을 나타내었다. 한편, 최적함수비에서 CSG-80 배합의 최대건조밀도는 2.07 g/cm^3 로 나타났으며, CSG-100 및 CSG-120 배합에서 최대건조밀도는 각각 2.1 g/cm^3 및 2.12 g/cm^3 로 나타나 단위시멘트량이 증가함에 따라 최적함수비에서 최대건조밀도는 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 입도에 따른 CSG 재료의 다짐시험에서 하한입도의 경우 단위시멘트량에 따른 최적함수비는 대략 6.5~7.5 %, 최대건조단위중량은 $2.13\sim 2.18 \text{ g/cm}^3$ 로 나타나 단위시멘트량의 증가에 따른 함수비는 거의 유사한 경향을 나타내는 반면에 최대건조단위중량은 다소 증가하는 것으로 보고한 김기영 (2006)의 연구 결과와 유사하다. 또한 김기영 등 (2005)은 탐진댐 시료에 대한 CSG 재료의 다짐시험 결과 전체 중량에 대한 약 3~4.2 %의 단위시멘트를 사용한 경우 시멘트량이 다짐 특성에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다고 하였다. 한편, Watanabe 등 (2003)은 2.5 %의 시멘트를 사용한 CSG 재료에서 최적함수비는 다짐방법에 따라 차이가 있으나 대략 5~8.7 %, 최대건조단위중량은 $2.15\sim 2.2 \text{ g/cm}^3$ 정도 인 것으로 발표한 바 있다.

따라서 CSG 재료에서 단위시멘트량의 증가는 최적함수비에 의한 다짐 특성보다 건조단위중량의 증가에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

2. 압축강도

가. 단위시멘트량-압축강도

CSG 재료에서 단위시멘트량은 강도 특성과 밀접한 관계가 있으며, 시멘트량이 많을수록 강도는 증가하지만 경제성 및 설계기준강도 등을 고려하여 단위시멘트량에 대한 최적배합비를 도출하는 것이 중요하다.

Fig. 4는 CSG 재료의 단위시멘트량에 따른 재령별 압축강도를 나타낸다. 시멘트를 80 kg/m^3 혼입한 CSG-80에서 재령 3일 및 7일의 압축강도는 1.2MPa 및 1.9MPa로 나타났으며, 재령 28일 및 재령 91일의 압축강도는 3.2 MPa 및 5 MPa로 나타났다. 또한 CSG-100 배합에서 재령 3일 및 7일의 압축강도는 2.4 MPa 및 3.4 MPa로 나타났으며, 재령 28일 및 재령 91일의 압축강도는 6.1 MPa 및 7 MPa로 나타났다. 한편 CSG-120 배합에서 재령 3일 및 7일의 압축강도는 2.9 MPa 및 3.7 MPa로 나타났으며, 재령 28일 및 재령 91일의 압축강도는 6.4 MPa 및 7.4 MPa로 나타났다. 단위시멘트량에 따른 재령별 압축강도는 단위시멘트량이 증가할수록 동일 재령을 기준으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 재령 초기인 3일 및 7일 보다는 재령 28일 및 재령 91일에서 강도 발현율이 보다 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 CSG 재료에 사용된

함수비가 낮기 때문에 CSG 재료에서 시멘트의 수화반응이 천천히 발생하였기 때문으로 판단되며, CSG 재료의 많은 부분을 공극물이 큰 흙이 차지하기 때문에 시멘트의 수화생성물이 조직을 치밀하게 하여 강도 증진에 기여한 것으로 보여진다. 또한, 단위시멘트량에 따른 재령별 압축강도에 대한 상관성은 80~82 %를 나타내었다.

한편, 배경운 (2006)은 CSG 재료에 대한 압축강도 시험결과 단위시멘트량이 60 kg/m^3 에서 80 kg/m^3 으로 증가할 경우에 비하여 80 kg/m^3 에서 100 kg/m^3 으로 증가한 경우의 강도 증가율이 우수하기 때문에 단위시멘트량이 80 kg/m^3 을 초과할 경우 CSG 재료의 강도는 시멘트에 의한 영향을 더 많이 받는다는 연구결과를 발표하였다.

본 연구에서도 단위시멘트량이 100 kg/m^3 에서 120 kg/m^3 으로 증가한 경우 보다 80 kg/m^3 에서 100 kg/m^3 으로 증가했을 때의 강도 상승폭이 큰 것으로 나타났으며, 일정 수준 이상의 단위시멘트량을 혼입하는 경우 시멘트량에 정비례하여 압축강도가 증가하지 않기 때문에 단위시멘트량을 결정함에 있어 설계기준강도 및 경제성 등을 만족하는 최적배합을 도출하여야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 100 kg/m^3 의 시멘트를 혼입한 경우 재령 28일의 압축강도가 6 MPa 이상으로 시멘트의 혼입에 따른 효과가 다른 배합에 비하여 높은 것으로 나타나 최적의 배합으로 판단된다.

나. 재령-압축강도

Fig. 5는 단위시멘트량별 재령 28일에 대한 각 재령별 강도비를 나타낸다. CSG-80 배합에서 재령 28일 강도에 대한 재령 3일 및 재령 7일의 강도비는 각각 36 % 및 61 %로 나타났으며, 재령 28일에 대한 재령 91일의 강도비는 130 %로 나타났다. 또한, CSG-100 배합에서 재령 28일 강도에 대한 재

Fig. 4 Relation between strength and cement contents with curing ages

Fig. 5 Strength ratio with cement contents

령 3일 및 재령 7일의 강도비는 각각 40 % 및 56 %로 나타났으며, 재령 28일에 대한 재령 91일의 강도비는 115 %로 나타나 CSG-80 배합과 재령 3일 및 재령 7일에 대한 강도비가 거의 유사한 경향을 나타내었다.

한편, CSG-120 배합에서 재령 28일 강도에 대한 재령 3일 및 재령 7일의 강도비는 각각 45 % 및 57 %로 나타났으며, 재령 28일에 대한 재령 91일의 강도비는 116 %로 나타나 CSG-100 배합과 재령에 따른 강도비가 매우 유사한 경향을 나타내었다. 김기영 (2006)은 화북담의 CSG 재료에 대한 압축강도 시험결과 모든 단위시멘트량에서 재령이 증가함에 따라 압축강도 증가율은 비선형적으로 증가하며, 하한입도의 경우 모든 단위시멘트량에서 재령 28일에 대한 재령 3일의 강도 발현율은 평균 60 % 이하이고, 재령 7일에서의 강도 발현율은 대략 75 % 수준으로 나타났다고 발표하였다. 또한, 일본 토목기술 자료 (2000)의 CSG 강도 특성에서 단위시멘트량 80 kg/m³을 기준으로 재령 28일 강도는 재령 7일 강도의 약 2배, 재령 91일 강도는 약 3배 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 전반적으로 시멘트량에 관계없이 재령 28일에 대한 재령 7일의 강도비는 약 56~61 % 수준으로 나타났으며, 단위시멘트량이 증가할수록 재령 28일에 대한 재령 91일의 강도비가 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

다. 응력-변형

Fig. 6 및 Fig. 7은 재령 7일 및 28일에 대한 단위시멘트량에 따른 CSG 재료의 응력-변형 곡선을 보여준다.

CSG 재료에 대한 응력-변형의 거동 양상이 일반적인 토사에서 나타나는 비선형 거동보다는 탄성적 거동이 우세하게 나타나기 때문에 CSG 공법의 설계 및 안정성 분석은 탄성해석을 기반으로 이루어진다 (Kim et al., 2005). Fig. 6은 재령 7일에 대한 단위시멘트량에 따른 응력-변형 곡선으로 응력이

Fig. 6 Strength and strain curve with cement content (curing age: 7 days)

Fig. 7 Strength and strain curve with cement content (curing age: 28 days)

증가함에 따라 최대 강도 발현 시점까지 직선 형태의 탄성거동 형태를 나타내었다. 또한 최대 강도에 도달한 후 취성 파괴에 이르는 양상을 나타내었으며, 최대 강도 부근에서의 변형률은 0.5~1.0 % 범위를 나타내어 매우 높은 변형률을 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 재령 28일에 대한 응력-변형은 재령 7일에서의 응력-변형과 마찬가지로 응력이 증가함에 따라 단위시멘트량이 증가할수록 응력-변형 곡선의 기울기는 거의 선형적인 관계를 나타내었으며, 최대 강도 부근의 변형률은 0.8~1.6 %로서 매우 높은 변형률을 나타내었다. 콘크리트 구조물의 설계시 콘크리트의 최대변형률을 0.003으로 규정하고 있는 것을 고려할 때 CSG 재료의 응력에 대한 변형률이 매우 높은 것으로 판단된다. 이러한 결과는 CSG 재료의 압축 거동은 시멘트량에 의해 좌우되며 토사와 콘크리트의 중간적인 거동 양상을 나타낸다는 연구결과와 유사하다 (Kim et al., 2005). 또한, 공길용 등 (2001)은 보통 시멘트를 혼입하지 않은 고함수비 흙의 응력-변형 곡선은 뚜렷한 파괴점이 형성되지 않고 변형률 15~20 %까지 응력이 증가하거나 같은 값을

보이지만 시멘트를 혼입한 경우 응력-변형 곡선은 2 % 내외의 변위에서 파괴되어 최대강도를 나타낸다는 연구결과를 제시하였다.

라. 파괴모드

Fig. 8은 압축강도 시험에 따른 공시체의 파괴 형태를 나타내며, Fig. 9는 파괴시 발생된 균열 모습을 확대한 것을 보여준다.

시멘트의 혼입 유무에 따른 파괴형태를 비교하기 위하여 제작된 시멘트를 혼입하지 않은 CSG-0 배합에서 파괴형태를 보면 공시체의 상부에 미세 균열이 하중 재하에 따라 조금씩 진전하면서 최종 파괴에 도달하는 파괴형상을 나타내었다. Fig. 9 (a)에서 보는 바와 같이 공시체의 상부에 미세하게 발생된

Fig. 8 Fracture mode after compressive strength test

Fig. 9 Fracture mode after compressive strength test with cement contents

다수의 균열을 확인할 수 있었다. 반면에 시멘트를 혼입한 CSG 재료의 경우 단위시멘트량이 증가할수록 하중 재하에 따라 상부에서 발생된 균열이 하중이 증가함에 따라 균열 폭 및 균열 길이가 점차 증가하다가 최종 파괴에 도달하는 파괴 형태를 나타내었다. Fig. 9 (b), 9 (c) 및 9 (d)에서 단위시멘트량에 따른 압축파괴시 균열 발생 및 진전 모습을 확인할 수 있다. 한편, 송준호 등 (2008)은 시멘트를 혼입하지 않은 흙에 대한 압축강도시험시 하중의 증가에 따라 변형률이 계속적으로 증가하지만 뚜렷한 파괴 형상이 나타나지 않는 벌집파괴 (bulging failure)의 경향이 나타나는 반면에 시멘트의 혼입에 따라 단위중량 및 시멘트의 혼입량이 증가할수록 압축파괴시 상부에 국부 파괴가 발생한 후 전반적인 파괴로 진행되는 연구결과를 발표하였다.

본 연구에서는 CSG 재료에 대한 압축하중 재하시 균열이 점차적으로 진전하면서 최종 파괴에 도달하는 파괴형상으로 인하여 단위시멘트량이 증가할수록 압축하중에 대한 최대 강도가 증가하면서 뚜렷한 파괴점이 형성되지만 압축강도가 낮은 일반 혼합토의 경우 최대강도에 따른 명확한 파괴점이 나타나지 않았다. 이러한 결과는 압축강도의 크기에 기인한 것으로 압축강도가 매우 낮은 시멘트를 혼입하지 않은 배합의 경우 하중의 증가에 따라 연성거동의 특성을 나타내는 반면에 시멘트의 혼입이 증가할수록 하중의 증가에 따라 탄성거동 후 취성 파괴 특성을 나타내기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 일반 시멘트 콘크리트의 경우 할렬파괴 및 전단파괴가 조합된 파괴형태를 나타내지만 CSG 재료의 경우 시멘트의 혼입 유무 및 혼입량에 관계없이 압축강도가 시멘트 콘크리트에 비하여 상대적으로 매우 낮아 하중 재하시 압축하중에 의한 수직방향의 균열이 초기에 발생하여 진전함으로써 할렬파괴 형태를 나타내는 것으로 판단된다.

2. CSG 재료의 미세구조

Fig. 10 및 Fig. 11은 단위시멘트량에 대한 CSG 재료의 재령 28일에 채취된 시료에 대하여 주사전자현미경에 의해 1,000배 및 5,000배로 측정된 미세구조를 보여준다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 CSG 재료에 혼입된 시멘트의 수화에 의하여 수화생성물이 다소 형성된 것을 알 수 있으며, 단위시멘트의 혼입량에 따른 수화생성물의 형성의 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 한편, 일반 콘크리트의 경우 시멘트의 혼입량이 많기 때문에 다량의 수화생성물이 형성되는 반면, CSG 재료의 경우 시멘트의 혼입량이 상대적으로 적기 때문에 혼합토의 간극에 채워진 시멘트의 수화에 의해 소량의 수화생성물이 형성되고 간극을 충전하는 것으로 판단된다 (Kellsen, 1996).

Fig. 10 Micro structure of CSG materials with cement contents (×1000)

Fig. 11 Micro structure of CSG materials with cement contents (×5000)

한편, Fig. 11에서 보는 바와 같이 시멘트의 혼입에 의해 전형적인 침상의 에트링자이트 (ettringite)가 다소 생성된 것을 확인할 수 있으며, 매우 미세한 형태의 수화물이 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 혼합토 속에 분포된 시멘트의 입자에 의한 약간의 수화생성물이 관찰되는 것으로 보아 강도발현에 직접적으로 관련이 있는 calcium silicates상의 수화가 이루어진 것으로 판단된다.

3. 동결융해저항성

시멘트 콘크리트에 동결융해가 반복적으로 작용하면 콘크리트 내부에 물이 얼게 되고 이 때 팽창에 의하여 콘크리트 내부 구조에 균열이 발생하여 내구성이 저하한다. 반면에 토양 지반이 동결하면 동결하기 전에 비하여 매우 단단해지며, 지반이 동결할 때는 흙의 종류, 토립자의 배열 상태, 함수비, 부동수분, 건조단위중량, 염분함유량 등 여러 가지 요인이 작용하므로 역학적 성질이 매우 복잡한 형상을 나타내는 것으로 알려져 있다 (Kim, 2003).

동탄성계수시험은 전혀 하중을 가하지 않고 전파를 공시체의 상대편에 방사하여 주파수를 측정하여 동탄성계수를 구하는 방법으로서 콘크리트 내부의 밀도, 화재에 의한 열화상황, 산, 알칼리 등의 화학약품에 의한 저항성 등의 콘크리트 성능을 평가하는 비파괴 시험의 일종이다 (Blake, 1990).

Fig. 12는 동결융해 사이클에 따른 CSG 배합의 상대동탄성계수를 나타낸다. 동결융해사이클의 수가 증가함에 따라 단위시멘트량에 따른 CSG 배합에 관계없이 상대동탄성계수가 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 물속에 완전 침적된 CSG 배합의 시편에서 간극에 수분이 침투된 후 동결융해가 반복되면서 간극 속의 수분이 체적 팽창을 일으켜 밀도의 감소를 초래하였기 때문으로 판단된다. 또한, 동결융해 사이클이 반복됨에 따라 시편의 표면에서 표면 탈락 등의 박리 현상이 발생하였다. 또한, Fig. 12에서 보는 바와 같이 동결융해사이클 60 및 80에서 CSG-80 배합 및 CSG-100 배합의 상대동탄성계수가 각각 60 % 이하로 감소하였으며, 동결융해사이클 100에서 CSG-120 배합의 상대동탄성계수가 60 % 이하로 감소하였다.

한편, Fig. 13에서 보는 바와 같이 동결융해사이클이 완료된 후 상대동탄성계수에 의해 계산된 내구성지수는 단위시멘트량이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 나타내었으나, 모든 배합에서 동결융해사이클이 목표사이클인 300 사이클에 도달하지 못하였기 때문에 내구성지수가 작게 나타나는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 CSG 재료의 주재료가 흙으로서 시멘트의 혼입에도 불구하고 내부에 많은 공극으로 인한 투수계수가 클 뿐만 아니라 흙 자체의 결합력이 시멘트에 비하여 낮기 때문에 동결융해 반복에 의하여 결합력이 감소하기 때문으로 판단된다. 한편, CSG 재료를 활용한 공법의 적용시 물과 항시 접하

Fig. 12 Relative dynamic modulus of elasticity with freezing and thawing cycles

Fig. 13 Durability factor for freezing and thawing cycles

는 구조물에 적용할 경우 동결융해에 대한 문제를 검토해야할 것으로 판단되며, CSG 재료의 동결융해저항성에 관한 다양한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 단위시멘트량 및 재령에 따른 CSG 재료의 압축강도, 응력-변형, 미세구조 및 동결융해저항성 등의 물리·역학적 특성을 구명한 것으로, 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. CSG 배합의 최적함수비는 대략 8.4~8.5 %로 나타나 단위시멘트량에 따른 최적함수비는 거의 차이가 없이 유사한 경향을 나타내었으며, 단위시멘트량이 증가함에 따라 최적함수비에서의 최대건조밀도는 다소 증가하는 경향을 나타내었다.
2. 단위시멘트량에 따른 재령별 압축강도는 단위시멘트량이 증가할수록 동일 재령을 기준으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 재령 초기보다는 재령 28일 및 재령 91일에서 강도 발현

율이 보다 우수한 것으로 나타났다. 또한, 시멘트량에 관계없이 재령 28일에 대한 재령 7일의 강도비는 약 56~61 % 수준을 나타내어 CSG 재료의 경우 혼입된 시멘트가 강도 발현에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

3. 재령 28일에 대한 응력-변형 곡선에서 단위시멘트량이 증가할수록 곡선의 기울기는 거의 선형적인 관계를 나타내었으며, 최대 강도 부근의 변형률은 0.8~1.6 %로서 매우 높은 변형률을 나타내었다. CSG 재료의 압축거동은 시멘트량에 의해 좌우되며 토사와 콘크리트의 중간적인 거동 양상을 나타내는 것으로 판단된다.

4. CSG 재료에 분포된 시멘트의 입자에 의한 약간의 수화생성물이 관찰되는 것으로 보아 칼슘 실리케이트상의 수화가 이루어진 것으로 판단되며, 시멘트의 혼입량이 상대적으로 적기 때문에 혼합토의 간극에 채워진 시멘트의 수화에 의해 소량의 수화생성물이 형성되었다.

5. 동결융해사이클의 수가 증가함에 따라 단위시멘트량에 따른 CSG 배합에 관계없이 상대동탄성계수 및 내구성지수가 감소하는 경향을 나타내었다.

6. CSG 재료를 활용한 CSG 공법을 적용할 경우 공사현장에서 발생되어지는 골재를 활용함으로써, 골재 수급을 위한 채석장 등이 불필요하여 환경훼손 방지 등으로 인한 환경친화적 시공법의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [과제번호: C1006558-02-01] 연구비 지원 및 강원대학교 석재복합건설신소재연구소의 기자재를 이용하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Blake, Jr. R. A., 1990, Test Methods (ultrasonic nondestructive evaluate on techniques for composite materials), *Technomic Publishing Company*, 57-78.
2. Bae, K. U., 2006, Laboratory and In-situ Mix Designs for Applications of the CSG Method, Thesis for the Degree of Master, Chungnam National University (in Korean).
3. Chae, K. I., M. N. Kwon, S. H. Lee., and H. S. Nam, 2003, Permeability of Soil-Bentonite Mixtures, *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 45 (1): 55-62 (in Korean).
4. CSG materials research, 2000, Analysis and Design

- Method of CSG Materials, *Material skill*, 166 (in Japanese).
5. Han, J. M., and Y. M. Oh, 2007, Hydraulic Characteristics of Water Affinity Sea-wall Block, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* 19 (2): 179-182 (In Korean).
 6. Kong, K. Y., H. T. Kim, J. K. Ro., and B. M. Hong, 2001, Study on the Mechanical Properties of Low Mix Soil-Cement, *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 43 (6): 127-134 (in Korean).
 7. Kongsukprasert, L., and F. Tatsuoka, 2003, Viscous Effects Coupled with Ageing Effects on the Stress-strain Behaviour of Cemented-mixed Gravel, *Deformation Characteristics of Geomaterials*.
 8. Kim, Y. J., 2003, Experimental Studies on the Uniaxial Compression Strength, Unfrozen Water Content and Ultrasonic Wave Velocity of Frozen Soils, *Journal of the Korea Society of Civil Engineers* 23(5): 309-307 (in Korean).
 9. Kellsen, K. O., 1996, Heat Curing and Post-Heat Curing Regimes of High-Performance Concrete: Influence on Microstructure and C-S-H Composition, *Cement and Concrete Research*, 26(2): 295-307.
 10. Kim, K. Y., H. G. Park, and J. S. Jeon, 2005. Strength Characteristics of Cemented Sand and Gravel, *Journal of the Korean Geotechnical Society* 21(10): 61-71 (in Korean).
 11. Kim, K. Y., 2006. The Effect Affecting the Unconfined Compressive Strength of C.S.G Materials, *Journal of the Korean Geotechnical Society* 22(10): 33-45 (in Korean).
 12. Kim, G. Y., H. G. Choi, J. S. Nam, H. Y. Song, and D. H. Lee, 2009, Long-Term Durability of Construction Structure and Effective Use of Technology for Construction Waste, *Journal of Korean Institute of Resources Recycling* 18(3): 11-19 (in Korean).
 13. Oie, M., Y. Yamaguchi, K. Fujita., and S. Jikan, 2003, The Construction of Temporary Structures by CSG Method in Tokuyama Dam Project, Rlooor Compact Dams.
 14. Song, J. H., J. C. Lim, and S. W. Hong, 2008, Analysis of Compressive Strength of Lightweight Air-Soil According to he Properties of Soil, *Journal of the Korean Geotechnical Society* 24(11): 157-166 (in Korean).
 15. Watanabe, K., M. Tateyama, G. L. Jiang, F. Tatsuoka., and T. N. Lohan., 2003, Strength Charateristics of Cement Mixed Gravel Evaluated by Large Triaxial Compression Test, Proc. 3rd Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials. Di, B. ed., Lyon: 683-693.
 16. Youn, J. N., C. Y. Sung., and Y. I. Kim, 2009, Physical and Mechanical Properties of Porous Concrete Using Waste Activated Carbon, *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 51(2): 21-27 (in Korean).