



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

경량기포토의 교대 뒷채움재 적용성 평가

Assessment the Applicability of Lightweight Air-Trapped Soil
for the Abutment Backfill



2013년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과
이민아

本 論文을 李玟娥의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 徐 榮 教 (印)

委 員 朴 二 根 (印)

委 員 金 泰 亨 (印)

The seal of Korea Maritime University is a circular emblem. It features a stylized ship's hull in the center, with the university's name in English, "KOREA MARITIME UNIVERSITY", arched above it. Below the hull, the year "1945" is inscribed. The Korean name "한국해양대학교" is written around the bottom inner edge of the circle.

2013年 2月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

목차	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적 및 범위	2
제 2 장 경량성토공법	4
2.1 경량성토공법의 종류	4
2.2 EPS 공법	5
2.2.1 개요	5
2.2.2 특성	5
2.2.3 적용분야	7
2.2.4 공학적 특성	7
2.3 경량기포혼합토 공법	15
2.3.1 개요	15
2.3.2 공학적 특성	20
2.3.3 현장 적용 사례 및 문제점	29
2.4 경량기포토 공법	34
2.4.1 개요	34
2.4.2 필요성	37
2.4.3 역학적 특성	37
제 3 장 경량기포토의 교대 뒷채움재 적용성 해석	44
3.1 해석프로그램	44
3.2 해석방법 및 내용	44

3.2.1 해석대상단면 및 적용 지반정수.....	44
3.2.3 해석방법.....	46
3.2.2 해석종류.....	49
3.3 해석결과.....	49
3.3.1 타설경사.....	56
3.3.2 타설거리.....	65
제 4 장 결론.....	65
참고문헌.....	67
감사의 글.....	69



List of Tables

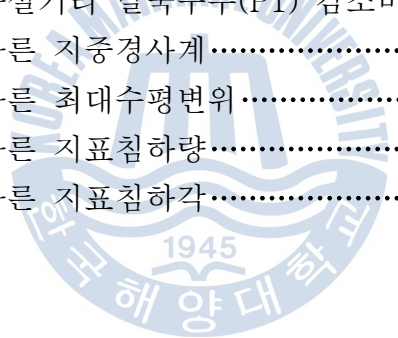
Table 2.1	경량성토공법의 종류	4
Table 2.2	EPS-모래의 마찰계수	12
Table 2.3	경량기포혼합토의 특징(하이그레이드 연구컨소시엄, 2005)	16
Table 2.4	경량기포혼합토 공법의 용도(일본도로공단, 1996)	19
Table 2.5	경량기포혼합토 배합비(Tsuchida, 1996)	20
Table 2.6	크리프 계수 및 최종압축변형률	28
Table 2.7	단위중량에 따른 일축압축강도와 변형계수의 관계 (황중호, 2010)	42
Table 3.1	수치해석 적용 지반 물성값	45
Table 3.2	수치해석 적용 구조물 물성값	46
Table 3.3	해석종류	48
Table 3.4	토사성토에 따른 타설경사 수평변위 감소비율	51
Table 3.5	토사성토에 따른 타설거리 수평변위 감소비율	58



List of Figures

Fig. 2.1 EPS블럭의 압축강도특성	8
Fig. 2.2 EPS의 압축강도(1% 변형률)와 밀도	8
Fig. 2.3 EPS의 변형계수와 밀도	10
Fig. 2.4 EPS의 포아슨비와 밀도	10
Fig. 2.5 EPS의 크리프 특성	11
Fig. 2.6 온도에 따른 EPS의 수축량	13
Fig. 2.7 EPS성토체 범면부 화재 실험 결과	13
Fig. 2.8 경량기포혼합토의 재료	15
Fig. 2.9 성토재료의 단위중량과 일축압축강도의 관계	17
Fig. 2.10 경량기포혼합토의 응력-변형 특성	21
Fig. 2.11 고화재 첨가량과 압축강도 관계	21
Fig. 2.12 양생압력과 삼축압축강도의 관계	22
Fig. 2.13 변형계수(E50)와 압축강도 관계	23
Fig. 2.14 양생일수와 압축강도의 관계	25
Fig. 2.15 습윤단위중량과 일축압축강도에 미치는 양생압력의 영향	26
Fig. 2.16 일축압축강도와 변형계수의 관계	27
Fig. 2.17 경과시간에 따른 전단크리프 변위량	28
Fig. 2.18 교대 배면 적용 사례(일본)	29
Fig. 2.19 확폭 성토 적용 사례(일본)	30
Fig. 2.20 하중경감공법으로 적용된 사례(일본)	32
Fig. 2.21 국내 시공 사례	34
Fig. 2.22 경량기포토공법 용도	35
Fig. 2.23 원료토의 특성에 따른 일축압축강도	36
Fig. 2.24 시멘트 함유율에 따른 응력-변형 거동	37
Fig. 2.25 일축압축시험 공시체의 파괴 양상	38
Fig. 2.26 양생 기간에 따른 일축압축강도	38
Fig. 2.27 단위중량과 일축압축강도	39
Fig. 2.28 시멘트 함유량과 일축압축강도	39
Fig. 2.29 공기량과 일축압축강도의 관계	40
Fig. 2.30 양생 조건에 따른 일축압축강도-28일 양생	41
Fig. 2.31 양생 조건에 따른 일축압축강도-수중양생	41
Fig. 2.32 일축압축강도와 변형계수 E_{50}	43

Fig. 2.33 단위중량에 따른 변형계수 E_{50}	43
Fig. 3.1 해석단면.....	45
Fig. 3.2 해석과정에 따른 해석단면.....	47
Fig. 3.3 해석조건 단면.....	48
Fig. 3.4 타설경사(1:S)에 해석도면.....	49
Fig. 3.5 타설경사에 따른 교대상부(A1) 수평변위.....	50
Fig. 3.6 타설경사에 따른 말뚝두부(P1) 수평변위.....	50
Fig. 3.7 토사성토에 따른 타설경사 수평변위 감소비율.....	52
Fig. 3.8 타설경사 변화에 따른 지중경사계.....	53
Fig. 3.9 타설경사에 따른 최대수평변위(S.L-1).....	54
Fig. 3.10 타설경사 변화에 따른 지표침하량.....	55
Fig. 3.11 타설경사에 대한 지표침하각.....	55
Fig. 3.12 타설거리(B/H) 도면.....	56
Fig. 3.13 타설거리 변화에 따른 교대상부(A1) 수평변위.....	57
Fig. 3.14 타설거리 변화에 따른 말뚝두부(P1) 수평변위.....	57
Fig. 3.15 토사성토에 따른 타설거리 교대상부(A1) 감소비율.....	59
Fig. 3.16 토사성토에 따른 타설거리 말뚝두부(P1) 감소비율.....	59
Fig. 3.17 타설거리 변화에 따른 지중경사계.....	60
Fig. 3.18 타설거리 변화에 따른 최대수평변위.....	61
Fig. 3.19 타설거리 변화에 따른 지표침하량.....	63
Fig. 3.20 타설거리 변화에 따른 지표침하각.....	64



Assessment the Applicability of Lightweight Air-trapped Soil for the Abutment Backfill

by
Lee, Min Ah

*Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime University*

Abstract

In this study, the numeral analysis has been conducted to verify the effect on behavior of abutment and under ground when Lightweight Air-trapped soil(ATS) is applied as abutment backfill. When the structure is installed on soft ground, because of trait change of ground, damage of subsidence of ground happens frequently before or after the construction. Especially, when the backfill of the structures such as abutment and retaining wall is conducted, as the lateral load acts on the piles top in abutment, with the piles, horizontal shifting of abutment happen so that the structural destruction of foundation happens. The light weight method is commonly used in the reinforcement methods that the weight of embankment material is being light so the ground is stabilized. EPS construction method is mostly used but because of characteristic of material, there are many problems such as long-term creep and settlement. To supplementing these problems, many researches have been conducted on ATS method which is a material mixing of air bubbles with the result of fluidization of compound of water and cement. However, until now there is little research on its field application domestically. Therefore, the numeral analysis is conducted to evaluate the applicability of abutment backfill of ATS. To identify the effect

of an amount of ATS used, the reciprocal difference is analyzed by varying the slope(1:S) and distance(B/H). With this condition, the horizontal displacement on the upper abutment and the point in pile top, and horizontal displacement of the concept of inclinometer on the surface settlement and abutment backfill are calculated.

By the results of numeral analysis, it can be found that when the ATS is used as an abutment backfill, horizontal displacement and settlement are remarkably decreased even more than applying the soil. In addition, when embankment was done with a soil, settlement rapidly was happened at the abutment joint part, but, on the applying section of ATS, the settlement gently was occurred. With these results, It can be concluded that applying ATS is effective to control horizontal shifting of abutment and minimize the settlement. And it is expected that trafficability on the joint part with the abutment is satisfactory. Upon the variations on the slope(1:S) and distance(B/H), the influence on the abutment and under ground are varied so that when the ATS is used in construction field, it must be applied according to the environmental condition of construction field; constructability, economic, etc.

This thesis is only the result of numeral analysis, based on theoretical interpretation method, so conducting laboratory test and field test is needed to suggest the applicability of design criterion for the optimum capacity to apply ATS for field.

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경

삼면이 바다로 싸여있는 우리나라는 해안, 항구 및 하천 등 연약지반이 널리 분포되어 있다. 최근 산업발전에 따른 산업물량 이송량 및 인구이동이 증가하기 때문에 고속도로, 산업도로 및 철도 등이 지속적으로 건설되고 있다. 이러한 공사들이 지반조건이 양호한 지역 뿐만 아니라 연약지반에도 실시되고 있다. 연약지반에서는 지반의 불균질, 토질정수의 불확실성 등이 내포되어 있으므로 구조물 설치 시 지반의 특성 변화로 공사시나 공사 이후 지반 침하 등 피해가 빈번하게 발생한다. 특히, 성토를 시공하거나 교대, 옹벽 등 구조물의 배면 뒷채움을 실시한 경우 편재하중이 작용하여 지반의 측방유동이나 활동파괴가 발생하게 된다. 측방유동에 의해 수평하중이 교대기초말뚝 두부에 작용하면 말뚝과 함께 교대가 수평방향으로 이동하는 현상이 발생하여 기초의 구조적인 파괴가 발생한다. 이러한 현상이 발생에 영향을 미치는 요인으로 뒷채움 성토고, 성토층의 단위중량, 연약지반상의 전단강도 및 두께, 교대의 형식 및 치수 등 여러 가지 요인들이 존재하며, 이들 영향요인을 고려한 대책공법들이 제시되어지고 있다. 특히, 뒷채움 성토체의 단위중량을 경량화하여 지반을 안정시키는 방법으로 경량성토공법이 흔히 쓰이고 있다. 대표적인 경량성토공법으로는 EPS 공법이 있다. 최근 국내에서 연약지반상의 교대 뒷채움 및 성토체 분야에 EPS 공법이 많이 사용되고 있다. EPS 공법은 도로성토하중저감공법의 하나로서 대형 EPS 블록들을 순차적으로 적층하여 성토체를 형성하는 단순한 성토공법으로 단위중량 $0.01 \sim 0.03 \text{ t/m}^3$ 정도로 일반토사의 1/100 정도의 초경량재로 연약지반상의 성토, 옹벽 및 교대의 뒷채움로 적용하는 경우 침하 및 측방유동에 대한 대책공법으로 적용이 가능하다. 그러나 EPS가 갖는 소성변형(크리프)로 인해 단차(침하) 현상이 발생되고 초경량으로 인해 중차량 주행 시 진동이 발생할 수 있다. 또한 EPS블록 시공으로 발생하는 불량토는 폐기물로 처리해야 하는 등 여러 가지 문제점이 노출되기 시작하면서 최근 원료토에 물과 시멘트를 첨가하여 유동화 시킨 것에 기포를 혼합하는 경량토(경량기포혼합토 및 경량기포토)를 적용시키고자 많은 연구가 이루어지고 있다.

경량기포혼합토는 건설발생토 등의 원료토에 물과 시멘트 등의 고화재를 혼합하여 유동화 시킨 것에 기포를 혼합하여 제작한 것으로 단위중량 $6 \sim 12 \text{ kN/m}^3$ 에서 조절이 가능하다. 일반적인 토사에 비해 가벼워 지반 및 교대 뒷채움재로 적용할 경우 하중을

경감 할 수 있다. 그러나 윤길림 등(2004), 송준호(2009), 황중호 등(2010)은 경량기포혼합토가 초기함수비 및 점토, 모래, 실트 등 현장에서 발생하는 다양한 원료토에 따라 기포의 형성 정도가 다르게 되어 품질관리에 어려움이 있기 때문에 현장적용에 있어서는 이들에 대한 철저한 시공관리가 요구되는 것을 알 수 있다. 따라서 이에 대한 단점을 보완하기 위한 품질이 균질한 경량토의 재료 개발이 요구되었다.

황중호(2010)는 원료토를 사용하는 경량기포혼합토의 단점을 보완하기 위하여 품질이 균일한 모래를 사용하였으며 이를 통해 만들어진 재료를 경량기포토라 명명하였다. 즉, 공장에서 생산된 균질한 품질의 모래를 이용하여 시멘트와 같은 고화재 및 물을 혼합하여 유동화시킨 것에 기포를 주입하여 만든 경량성토재를 말한다. 개발된 경량기포토를 실내시험을 통해 단위중량, 강도, 변형 특성(압축률, 크리프 특성 등)을 파악하여 최적의 경량기포토에 대한 기초자료가 제시되었다.

교대가 수평방향으로 이동하는 현상을 억제하기 위하여 교대 뒷채움재의 단위중량을 경량화 시키기 위해 경량기포토 재료가 될 수 있다. 그러나 현재까지 국내에서 경량기포토의 현장적용과 관련된 연구는 매우 미진한 실정이다. 따라서 교대 뒷채움재로 경량기포토를 적용했을 경우 교대 및 하부지반에 미치는 영향을 확인하고 적용 가능성을 연구해볼 필요성이 있어 본 연구가 진행되었다.

1.2 연구의 목적 및 범위

일반적으로 교대, 옹벽 등과 같은 토목구조물을 연약지반에 시공할 경우 활동과괴, 지반의 침하, 구조물의 측방이동 등 문제점이 발생한다. 이에 대한 대책공법으로 뒷채움 성토체의 중량을 경량화하여 지반의 안정을 꾀하는 대책공법으로 여러 경량성토공법이 적용되어지고 있으나 각각의 공법에 대한 문제점이 발생되어 이를 개선한 공법의 지속적인 개발이 진행되어 있고 있는 상황이다.

교대 뒷채움재로 일반적으로 적용되어지고 있는 일반성토공법은 시공 중 과도한 지반의 침하 및 변형으로 인근 건물 및 지반에 많은 영향을 미쳐 민원발생 및 공기연장으로 인한 과도한 공사비가 발생되고 있는 상황이다. 이러한 문제점을 개선하기위해 EPS공법이 현재 시공되어지고 있다. 일반성토공법에 발생되어지고 있는 문제점인 지반의 침하 및 변형을 크게 개선하고 있는 실정이다. 그러나 재료의 특성으로 인해 활동하중으로 인한 장기크리프 발생 및 초경량성으로 인해 지하수 침투 및 우천으로 인한 부력에 의한 부상으로 심각한 문제점을 초래한다. 이러한 문제점에도 불구하고 국내에서 EPS공법은 용도별로 적용분야가 확장되고 사용되어지고 있는 반면에 경량기포토공법은 현장적용과 관련된 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 교대 배면 뒷채움재로 경량기포토를 적용했을 경우 교대 및 하부지반에 미치는 영향을 확인하고 적

용 가능성을 판단하기 위해 수치해석을 실시하였다.

경량기포토가 교대 뒷채움재로 적용했을 경우의 효과를 확인하고자 토사성토 적용 시와 비교분석하였다. 또한 경량기포토 규모에 따른 영향성을 파악하기 위해서, 교대 말뚝 상부면에서 배면으로의 거리(B)를 변화시키고, 각각의 거리에서 타설경사(S)를 다양하게 변화시키면서 상호 차이를 분석하였다. 타설거리(B)의 변화는 교대높이(H)로 무차원화 하여 표현하였으며, 교대높이(H)에 대한 경량기포토의 타설경사는 1:S로 표현하였다. 경량기포토의 타설경사(1:S)를 0.5 간격으로 $S=0.5\sim 5.5$, 타설거리(B/H)는 타설경사 $S=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 에 $B/H=0, 1.5, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0$ 으로 적용하여 수치해석을 실시하였다. 이에 따른 교대상부 및 말뚝두부 지점에서의 수평변위, 지표침하와 교대배면에서의 지중경사계 개념의 수평변위량을 산정하였다. 따라서, 수치해석결과를 통하여 경량기포토의 타설경사 및 타설거리를 달리하여 교대 뒷채움재로 사용했을 경우 지반에 미치는 적용성을 평가하였다.



제 2 장 경량성토공법

2.1 경량성토공법의 종류

경량성토공법에 이용하는 경량성토재에는 경량기포혼합토, 발포스티로폼(EPS) 블록, 발포 beads혼합경량토 등이 있다. 이밖에도 석탄회나 수쇄(水碎) 슬래그와 같은 부산물이나 천연 재료를 이용하여 경량화를 도모한 것, 또는 콘크리트 박스 등의 중공구조물도 경량화공법이라 할 수 있다.

경량성토공법은 크게 경량재를 이용하는 공법, 현지 발생재를 이용하는 공법, 중공구조물에 의한 공법으로 분류된다. 따라서 경량성토공법을 이용하는 경우에는 그 목적에 따라 적절한 공법을 선정한다. 현재 사용되거나 개발 중인 경량성토공법의 종류는 Table 2.1과 같다(일본도로공단, 1996).

Table 2.1 경량성토공법의 종류

재 료	경량성토재	단위중량(kN/m ³)	특 징
경량재	석탄회, 수쇄슬래그 등	10~15 정도	입상재료, 자경성
	화산회토	12~16 정도	천연재료
	EPS블록	0.1~0.3 정도	초경량성, 합성수지 발포체
현지 발생재	경량기포혼합토	5 정도 이상	밀도조정 가능, 유동성, 자립성, 현지발생재 이용 가능
	발포Beads혼합토	7 정도 이상	밀도조정 가능, 현지발생재 이용 가능
중공구조물	중공구조물	10 정도	박스컬버트, 콜게이트 파이프 등

2.2 EPS 공법

2.2.1 개요

EPS는 화학명으로 Expandable Polystyrene(발포폴리스티렌)이라 하며 폴리스티렌 수지에 펜탄이나 부탄과 같은 발포제를 첨가시켜 가열 경화시킴과 동시에 기포를 발생시켜 발포수지로 만든 것으로서 스티렌모노머(SM)을 중합시켜 제조한다.

EPS가 토목공사에 적용되기 시작한 것은 1972년 노르웨이 오슬로 근교에 있는 교대인접부의 성토단차를 보수하기 위하여 적용된 것이 최초이며 이와 맞춘 노르웨이 국립도로연구소(NRRL)에서는 연약지반 대책공법으로서 성토전체를 대형 EPS블럭으로 시공하는 EPS 토목공법을 개발 완성하였다(강희준, 2003).

우리나라에서는 1993년 한국도로공사 서해안건설사업소 관내 서창분기점의 교대 뒷채움 부위에 시험시공을 하여 본격적인 EPS공법의 실용화시대가 열렸고, 1998년도에는 단일현장 세계최대 시공량의 암거상부 EPS공법 공사가 진행되기도 하였다. 연약지반이나 경사지 등에 일반적인 공법으로 시공할 경우 상부하중에 의한 침하나 측방유동에 의한 구조물의 변위가 발생될 우려가 있는 현장에 초경량성토 재료인 EPS블록을 사용하여 하중이나 토압에 대한 문제점을 근원적으로 제거하는 방법을 EPS공법이라 총칭한다(최용식, 2003).

2.2.2 특성

EPS 성토공법은 발포폴리스티렌(EPS)을 경량 성토재료로 토목공사에 이용하는 공법으로 EPS의 비중이 흙의 약 1/100 정도로 가벼운 초경량성에 가장 큰 장점이 있다. 토목구조물공사 또는 공원조성공사 등에 이와 같은 경량재료를 사용하는 공법으로 EPS공법은 초경량성, 자립성, 내수성, 내압축성, 시공성 및 경제성 등의 특징을 갖고 있다.

가. 초경량성

EPS의 밀도는 토사와 콘크리트의 약 1/100 정도이다. 본 공법을 연약지반의 성토재료로 적용하는 경우, 성토하중을 크게 절감시킬 수 있고 연약지반의 침하, 지지력 부족 등의 문제를 동시에 해결할 수 있다.

나. 자립성

EPS블럭은 자립성이 있기 때문에 그것을 쌓아 올린 구조물을 자립벽으로 이용할 수 있다. 외국의 경우 발포폴리스틸렌 블럭을 교대 뒤채움재로 시공 한 예가 있는데, 7년 후 그 변형을 측정 한 결과 거의 변화가 일어나지 않았다고 한다. 이것은 EPS블럭이 자립벽으로서 유효하다는 것을 입증해 준다.

다. 내수성

EPS는 물과 결합하지 않는 발수성 재료이다. 각종 지하수위 조건하에서 흡수성을 시간의 변화에 따라 측정 한 결과 흡수량은 일반적으로 극히 적었고 물의 영향도 거의 없었다. 이것은 EPS가 독립기포를 내장한 발포립의 집합체이기 때문에 장기간 수침상태에 있더라도 그 기포 내에 물이 침입하지 않는다는 사실을 증명해 준다.

라. 내압축성

EPS의 압축강도는 EPS의 단위체적중량에 의해 달라지나, 일반적으로 허용압축강도가 탄성범위 내에서 30~140 kPa 정도이기 때문에 성토재료로 적용이 가능하다. EPS는 흙과 달리 소성영역에 있어서도 일축방향의 압축력이 탁월하여 명확한 전단영역이 발생하지 않는 특징도 갖고 있다. 따라서 EPS는 점착력 및 내부 마찰각이란 개념보다는 내압축 재료로서의 블럭을 쌓아올려 성토를 구축하는 것이다.

마. 시공성

EPS블럭을 쌓을 때에는 대형 건설기계가 필요하지 않으며 인력으로도 시공 가능하다. 시공속도가 빠르고 연약지반, 급경사지, 좁은 장소 등 대형기계의 사용이 어려운 곳에서의 시공도 용이하다. 또한, EPS블럭은 현지에서 열선을 이용하여 간단하게 절단할 수 있기 때문에 구조물 및 지형에 따른 가공도 용이하다.

바. 경제성

연약지반상의 성토공사에서는 지반개량공법이 불필요하며, 완성 후에 계속되는 침하 또한 발생하지 않기 때문에 보수 등의 유지관리비가 적게 들어 경제적이다. 또한 경사지에서의 성토공사, 확폭공사 등에서는 최소한의 용지로 시공을 완성할 수 있으며, 옹벽 등의 토류공사가 불필요할 뿐만 아니라 가설공사의 규모도 축소할 수 있어 경제적이다.

2.2.3 적용분야

EPS는 경량성, 자립성, 시공성 등이 우수하여 연약지반상의 성토 및 옹벽·교대의 뒤채움, 자립벽, 또는 매설관 기초 등의 각종 구조물에의 적용이 가능하다. 또한, 시공시 대형 건설기계가 필요치 않으므로 건설기계의 지지력 확보가 곤란한 경우나 근접시공을 필요로 하는 경우, 소음·진동 등의 주변환경에의 배려가 필요한 경우 등에도 적용성이 우수하며, 급속 시공이 필요한 경우나 가설도로 등에서의 적용시 시공과 복구 등이 간단하므로 이에 따른 공기단축 효과도 얻을 수 있다. 현재까지 적용되고 있는 EPS 공법의 주요 적용분야는 성토, 구조물 뒷채움, 기초, 구조물 보호 채움 확장, 가설 복구 등이다.

2.2.4 공학적 특성

가. 압축 및 변형 특성

1) 압축 강도

Fig. 2.1에서는 대표적인 EPS블럭의 일축압축시험 결과를 보여준다. EPS블럭은 약 1% 압축 변형률까지는 탄성거동을 보이며 그 이상의 변형률에서는 소성거동을 보임을 알 수 있다. 또한, EPS 밀도에 관계없이 1% 변형에서의 압축강도가 5% 변형시의 압축강도의 1/2 정도로 나타나며, 탄성한계 변형률 (1% 변형률)에서의 EPS의 압축강도는 밀도증가에 따라 선형적으로 증가하고 있다(Fig. 2.12 참조).

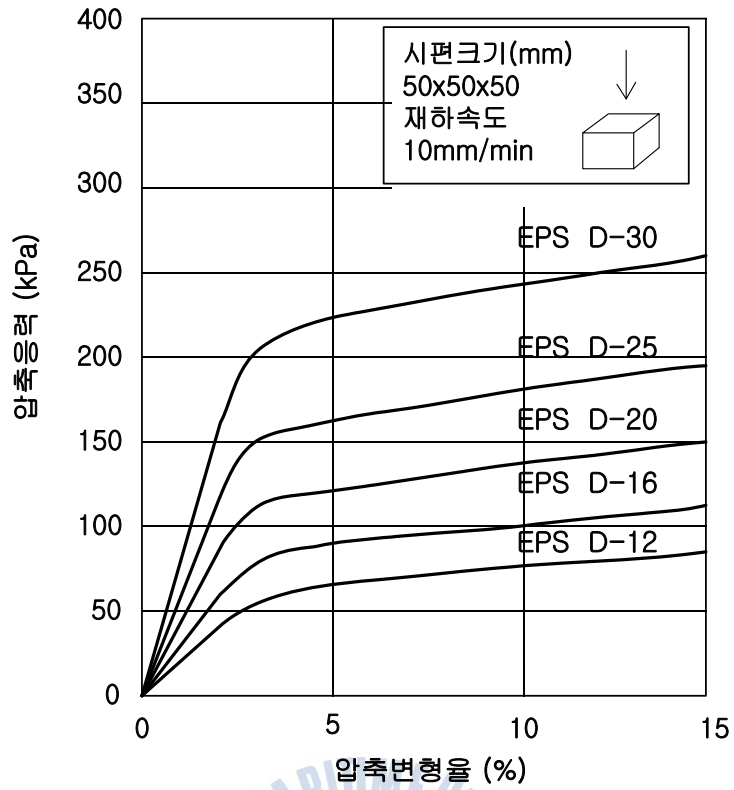


Fig. 2.1 EPS블럭의 압축강도특성

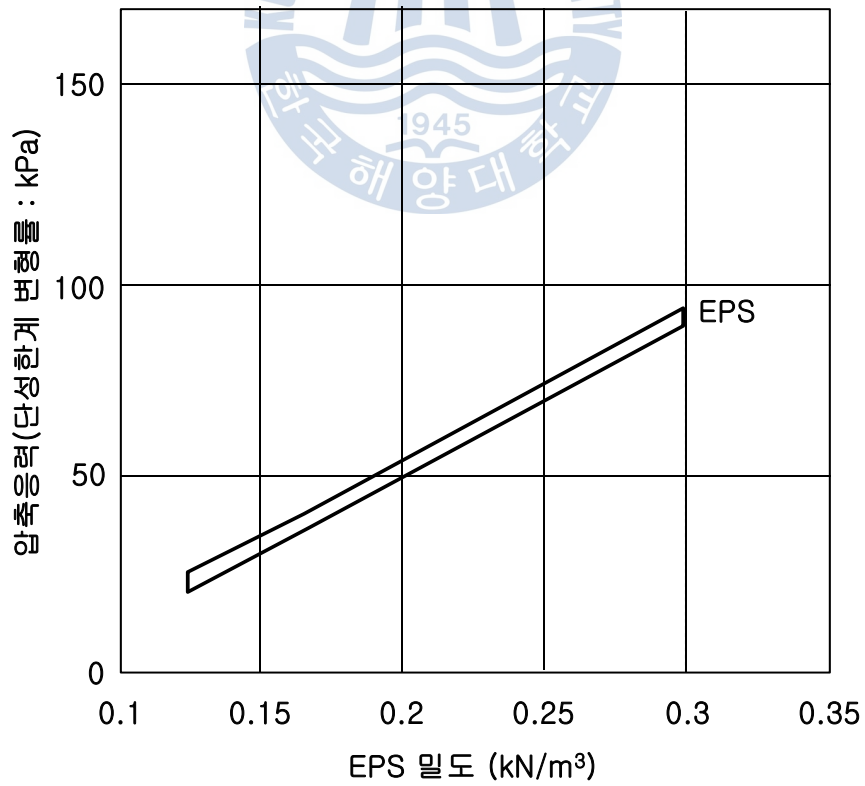


Fig. 2.2 EPS의 압축강도(1% 변형률)와 밀도

2) 변형계수

Fig. 2.3에서는 Fig. 2.1의 결과를 토대로 추출한 EPS블럭의 초기접선 변형계수와 밀도와의 상관관계를 보여주는데, EPS의 밀도 증가에 따라 초기 접선변형계수도 거의 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 安田 등의 연구 결과에 의하면 D-20(밀도 : 0.2 kN/m^3) EPS의 변형계수는 5000~6000 kPa 정도의 범위를 나타내는 것으로 밝혀졌다.

3) 포아슨비(Poisson's ratio)

Fig. 2.14에서는 EPS 블럭의 밀도증가에 따른 포아슨비의 변화형태를 보여주는데, EPS 블럭의 밀도증가에 따라 포아슨비가 선형적으로 증가하며, 탄성한계 변형률 (1% 변형률)내에서의 포아슨비는 대체로 일정한 값(0.1~0.15)을 보여주지만 소성영역에서의 포아슨비는 점차적으로 감소함을 알 수 있다.

4) 반복압축 특성

교통하중 및 열차하중 등의 동적 반복하중에 대한 EPS의 압축강도 특성에 관해 그동안 많은 연구들이 수행되어 졌으며 그 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 5Hz의 반복 재하하중 하에서는, 그 최대 재하하중을 EPS 항복응력의 50%로 하면 10만회의 반복하중 작용시 EPS성토체의 변위는 거의 없고, 탄성계수도 변화하지 않는다.
- 5% 압축변형률에서의 일축압축강도의 0.4배 정도 이하의 재하하중 하에서는 100만회의 반복하중이 작용하여도 EPS 성토체의 변위는 거의 없고, 진동주파수의 영향도 없다.
- 동적 반복하중 하에서도 EPS 성토체는 측면으로 팽창하지 않고, 하중 제거 후에도 초기상태로 회복된다.
- 265 kN 및 400 kN 덤프트럭을 합계 16,000회 주행시킨 결과, EPS 성토체는 노상·노반으로서 교통하중을 충분히 견디며, 변형량도 작고 포장층에의 영향도 작은 것이 확인되었다.

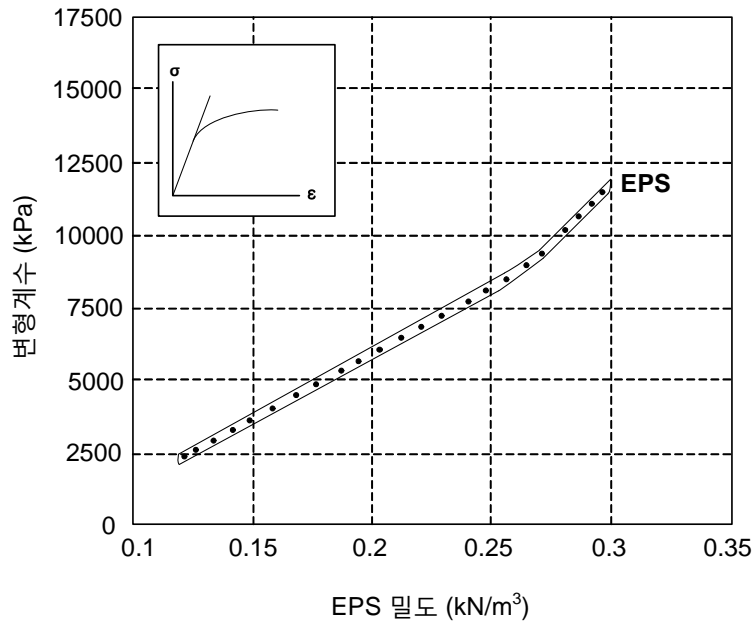


Fig. 2.3 EPS의 변형계수와 밀도

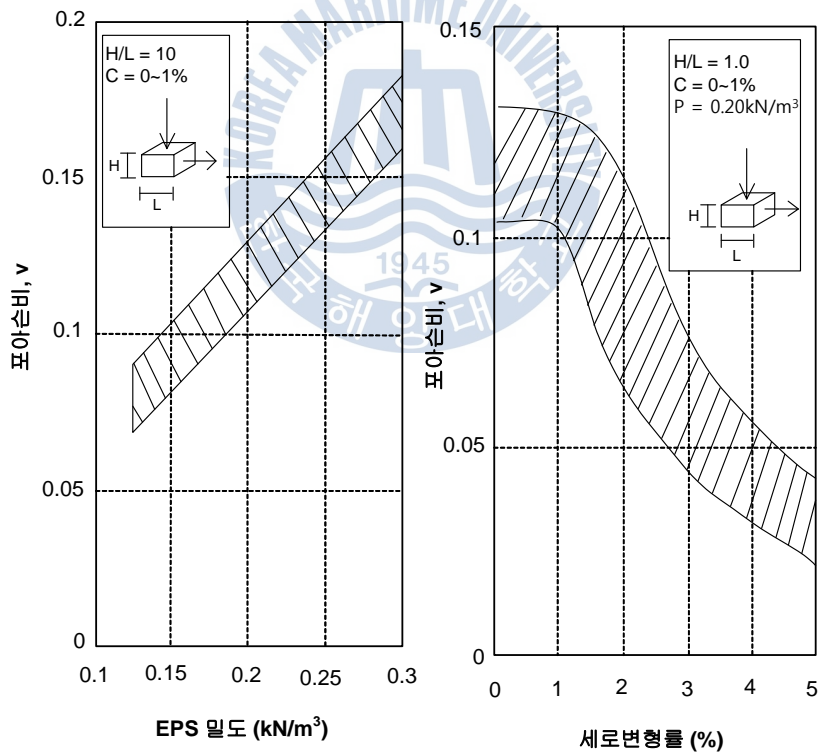


Fig. 2.4 EPS의 포아슨비와 밀도

5) 크리프 특성

EPS성토체의 장기적인 변형 정도를 나타내는 크리프 특성을 평가하기 위해 일본에

서 5cm×5cm×5cm의 EPS블록 시료에 대해 일축압축 크리프 시험을 수행한 연구결과를 보면 다음과 같다(Fig. 2.5).

- 재하하중이 작은 경우에는 시간경과에 따른 압축변형이 거의 없다.
- 재하하중이 크게 되면 시간경과에 따라 압축변형이 꾸준히 증가된다.
- 크리프에 대해 안정상태를 유지할 수 있는 재하하중은 대체로 5% 변형률에서의 EPS압축강도의 1/2 이하로 평가할 수 있다.

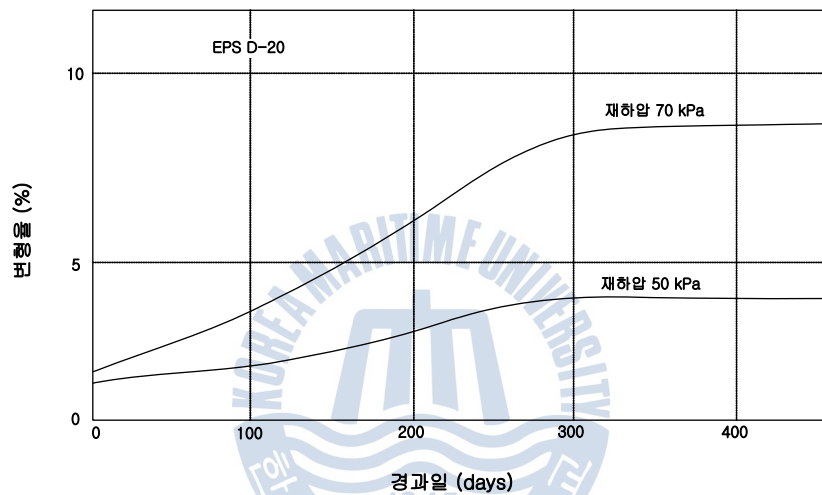


Fig. 2.5 EPS의 크리프 특성

6) EPS의 허용압축응력

앞에서 살펴본 바와 같이 동적 반복재하하중이 작용할 경우에도 5% 변형률시 압축응력의 1/2 정도의 재하하중에서는 EPS의 변형은 거의 나타나지 않았고, 이 재하하중 하에서의 크리프 특성은 안정 상태로 되는 것이 확인되었다. 또한, 1% 변형률에서의 압축응력은 5% 변형률에서의 압축응력의 1/2 정도이므로, EPS 성토공법 설계에서는 1% 변형률에서의 EPS 압축응력을 허용 압축응력으로 사용하고 있다.

나. 마찰 특성

일반적으로 EPS블럭 상호간의 마찰은 상당히 좋은 것으로 평가되고 있다 EPS블럭-EPS블럭, EPS블럭-모래의 마찰계수를 노르웨이에서는 0.7로, 卷内 등의 실험연구에서는 0.55 ~ 0.76의 범위로 평가하고 있다. 특히, 卷内 등은 EPS블럭-모래의 마찰계

수가 건조한 모래에서는 0.58(조밀)~0.46(느슨), 습윤모래에서는 0.52(조밀)~0.25(느슨) 등으로 밀도와 함수비 상태에 따라 변화하는 것을 제시하였다(Table 2.2).

Table 2.2 EPS-모래의 마찰계수

건조한 모래	조 밀	0.58
	느 슨	0.46
습윤상태의 모래	조 밀	0.52
	느 슨	0.25

다. 흡수성 및 동상성

일반적으로 EPS는 물을 흡수하지 않는 것으로 알려져 있으나, 지하수위 근처에서는 모관상승고(capillary rise : 약 20cm 정도)에 의해서, 지하수위 아래에서는 발포입자 사이의 틈새를 통해 흡수한다. 흡수량은 침수 후 1~2일 사이에 대부분 발생하고 그 이후에는 서서히 증가하며, 수압이 클수록 흡수량도 크게 되는 것으로 알려져 있다.

흡수량은 설계시의 EPS밀도 설정에 중요한 요소로서, EPS가 지하수위 위에 설치 될 경우에는 1%(부피 백분율) 미만, 계절적으로 침수되는 경우에는 4%, 영구히 침수되는 경우에는 8~9% 정도를 고려하는 것이 일반적이다. 예로서 D-20(밀도 0.2 kN/m³) EPS를 지하수위 하부에 사용할 경우에 EPS 하중 계산 시에는 8% 정도의 흡수량을 고려하여 EPS 밀도를 1 kN/m³로, 부력 계산 시에는 안전측을 고려하여 0.2kN/m³로 보고 설계하고 있다.

한편, EPS의 열전도율은 0.03 kcal/m·hr·°C 정도이며, 캐나다에서 동상 방지용으로 사용된 EPS를 5년 후에 채취하여 구조적 특성과 열적특성을 평가해 본 결과 EPS는 동상에 대해서 매우 만족스러운 재료로 밝혀졌다.

라. 내열성과 내화성

EPS의 원재료는 폴리스틸렌 수지로서, 열가소성 수지이므로 고온에서 수지 자체가 연화하여 팽창하거나 수축하는 등의 변형을 일으킨다. 그러나 Fig. 2.6에서 보듯이 EPS의 변형과 강도 저하를 유발시키는 온도는 70°C 이상이므로 EPS 사용 시는 70°C 이하에서 사용하여야 한다.

EPS는 일반적으로 가연성이므로 현장에서 보관중이나 시공 중에 화원(담배불, 용접 불꽃 등)이 공급되지 않도록 각별한 주의가 필요하다. 또한, EPS성토체가 완성되어 도로 등으로서 사용될 경우 법면부 화재가 EPS에 미치는 온도 상승을 방지하기 위해 최

소한 20~25cm의 복토가 필요한 것으로 규명되었으며, 현재 설계 시에는 30~50cm 정도의 복토를 하도록 하고 있다(Fig. 2.7 참조).

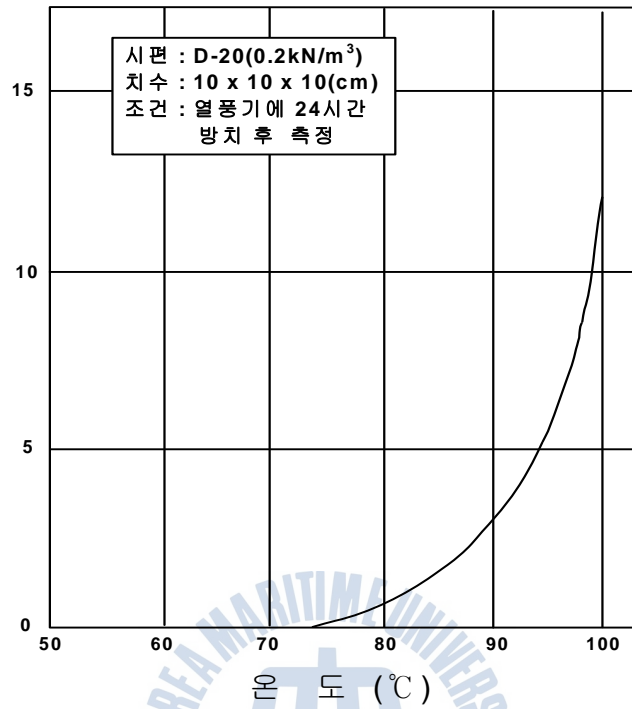


Fig. 2.6 온도에 따른 EPS의 수축량

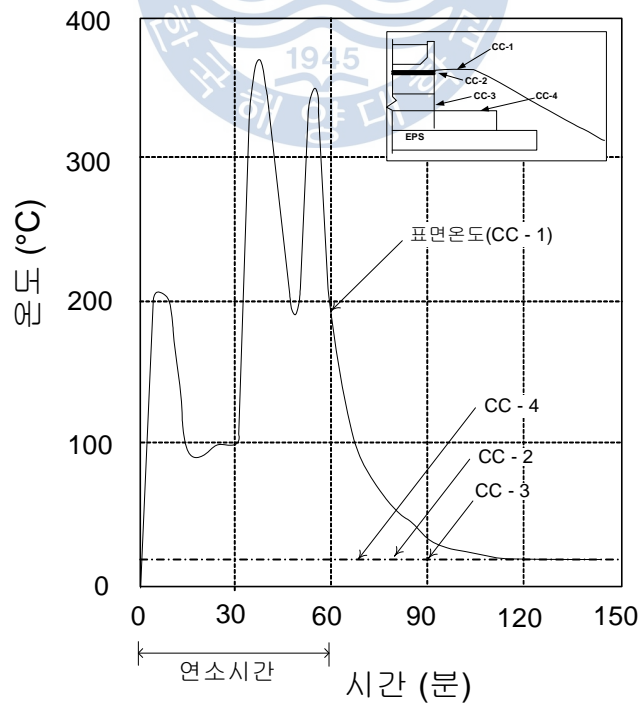


Fig. 2.7 EPS성토체 법면부 화재 실험 결과

마. 내구성

1) 내후성

EPS는 자외선에 의해 표면이 황색으로 변색되면서 특성 저하가 나타나므로 시공 현장에 반출된 후에는 1주일 정도의 단기간에 사용하는 것이 좋으며, 현장에 장기간 보존하여야 할 경우에는 시트 등으로 보호하는 것이 좋다.

2) 흡수 안정성, 미생물성

EPS는 완전합성 열가소성 수지로 구성되므로 부식성이 없으며, 노르웨이에서 10여 년간의 사용실적을 보면 흡수 속에 묻혀 있는 EPS에는 미생물이나 세균 등에 의한 침식은 없었고, 흡수 속에서 EPS는 장기간 안정한 상태를 유지하고 있었음이 밝혀졌으며, EPS에는 셀룰로오스나 영양물질이 없어 두더지, 들쥐, 흰개미 등의 침입 가능성도 극히 적다.

3) 내화학성

일반적으로 EPS는 산이나 알칼리, 동식물 기름, 염류 등에 우수한 저항성을 갖고 있으나, 방향족 탄화수소, 할로젠 탄화수소, 케톤류, 에스테르류 등의 광유류계 약품에는 용해하기 쉬운 성질을 갖고 있다. 따라서 휘발유나 디젤유 등의 석유제품과 접착제, 도료제, 세정제 등의 물질과의 접촉이 우려되는 경우에는 콘크리트 슬래브나 폴리에틸렌 시트 등으로 EPS를 보호하는 방법도 강구할 수 있다(한국건설기술연구원, 1996).

2.3 경량기포혼합토 공법

2.3.1 개요

가. 경량기포혼합토의 정의

경량기포혼합토는 일반적인 흙의 구조와는 달리 재료의 경량화와 강도증대를 위하여 추가적인 재료를 원료토와 혼합하여 제작된다. 경량기포혼합토란 용어는 일본에서 먼저 사용하였으며, 액성한계 이상으로 조정하여 슬러리화 시킨 준설토나 건설발생토 등의 원료토와 시멘트와 같은 고화재 및 경량화 재료를 첨가·혼합해서 매립과 뒤채움용의 지반재료로서 사용하고 경량화로 안정한 지반을 만들어 내는 것을 의미한다(Fig. 2.8). 여기서 원료토란 준설토 또는 현장발생토로서 경량기포혼합토의 재료로 이용 가능한 것을 말한다. 고화재는 원료토나 기포를 화학적으로 안정 처리하여 소정의 강도나 강성을 가지도록 하기 위해 첨가하는 시멘트계 재료를 말한다. 그리고 필요에 따라 특수한 고화재로 사용할 수 있다. 경량화재는 재료의 경량화를 위해 혼합하는 재료로서 일본에서는 주로 기포나 발포비즈를 대상으로 하고 있다. 기포제는 혼합한 재료의 경량화와 유동성을 가지게 하기 위해 기포를 발생시키는 재료를 말하며, 기포제를 물에 희석하여 발포하며, 주로 사전발포(Pre-foam) 방식을 사용한다(황중호, 2010).

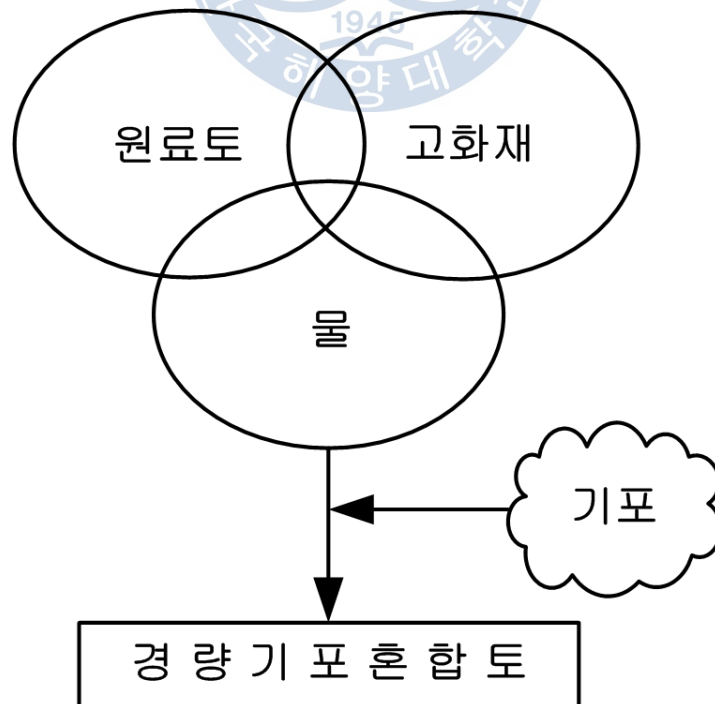


Fig. 2.8 경량기포혼합토의 재료

나. 경량기포혼합토의 특징

경량기포혼합토는 건설발생토 등의 원료토에 물과 시멘트 등의 고화재를 혼합하여 유동화 시킨 것에 기포를 혼합하여 제작한다. 단위중량은 6~12 kN/m³에서 조절이 가능하다. 제작 직후에는 유동성을 나타내나 고화재의 반응에 따라 최종적으로는 양질의 토양재료와 같거나 그 이상의 강도특성을 가지는 고화처리토가 된다.

경량기포혼합토는 일반적인 토사에 비해 가벼우며 지반 등에 미치는 하중을 경감할 수 있다. 또한 유동성이 높으므로 펌프를 이용하여 압송에 의한 타설이 가능하므로 시공이 용이하다. 게다가 진흙 등의 저품질 토양을 유효하게 활용할 수 있다(Table 2.3). Fig. 2.9는 성토재료에 따른 일축압축강도와 단위중량의 관계를 나타낸다.

Table 2.3 경량기포혼합토의 특징(하이그레이드 연구컨소시엄, 2005)

항 목	특 징
단위중량	단위중량을 6~12 kN/m ³ 사이에서 임의로 설정 가능 (경량화재의 혼합량에 따라 단위중량을 조정)
강 도	일축압축강도를 1,000 kPa 정도까지 설정 가능 (고화재의 첨가량으로 일축압축강도를 조정)
유동성	공동충진, 협소부 되메우기 등의 펌프압송에 의한 시공이 가능 (유동성이 크고 셀프레벨링을 유지)
시공성	전압, 조임 및 고정, 균일화 작업이 필요 없으므로 시공인력의 절감
유효성	각종 발생토를 유효하게 활용 가능

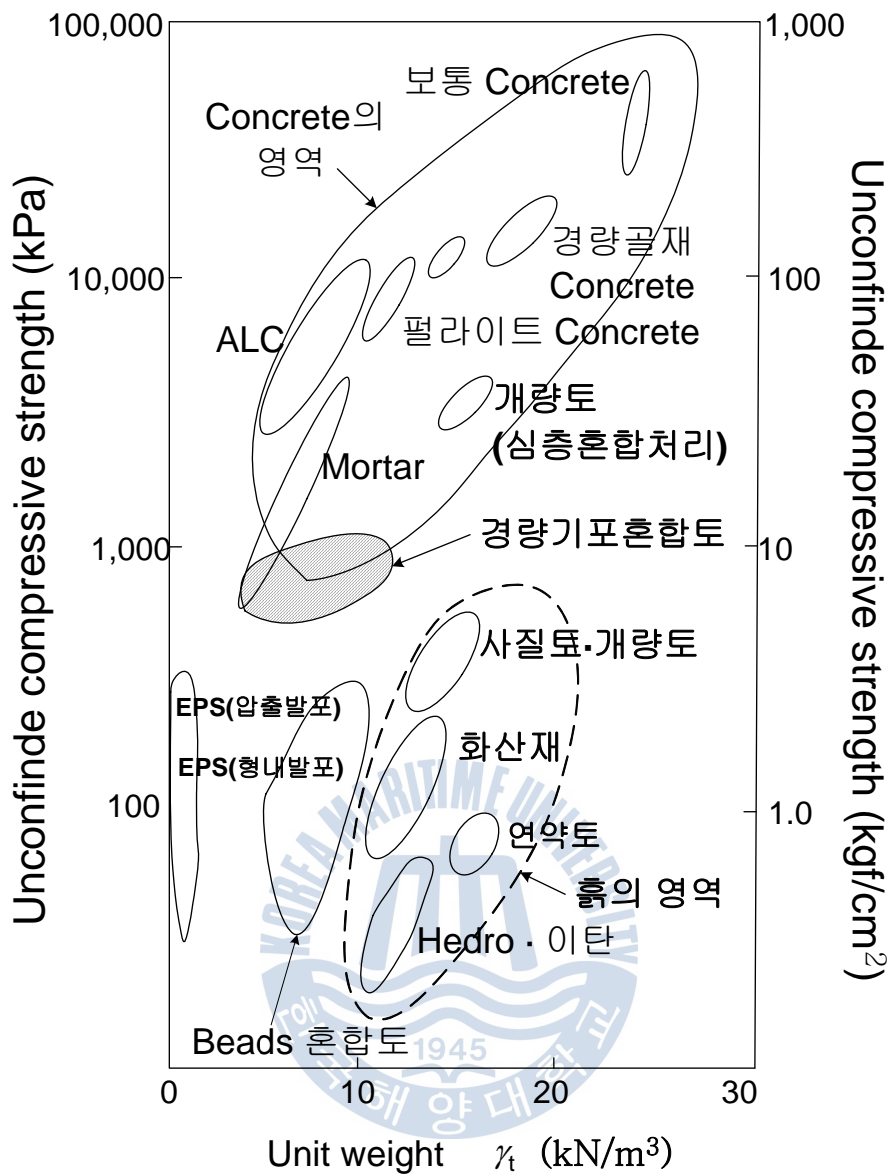


Fig. 2.9 성토재료의 단위중량과 일축압축강도의 관계
 (古谷俊明, 山内豊聡, 浜田英治, 1988)

다. 경량기포혼합토의 용도

경량기포혼합토는 경량성인 특징을 살려 일반적인 흙에서는 시공이 곤란한 장소에서의 시공에 가장 적합하다.

1) 확폭 성토

가옥이나 일반도가 근접하는 장소에서의 도로의 신설이나 확폭을 하는 경우에 근접지나 기설 성토로의 성토 하중의 저감을 도모할 수 있다. 또 단기간에 저소음, 저진동으로 연직 성토가 가능해진다. 특히 연약지반일 때는 침하, 측방 변형 등의 경감을 도모할 수 있다.

2) 지반 활동지에서의 성토

지반활동 두부의 성토에 경량기포혼합토를 이용함으로써 성토하중을 저감하고, 지반활동 대책의 경감을 도모할 수 있다.

3) 구조물 배면토압의 경감

교대나 옹벽 등의 구조물 뒷채움부에 경량기포혼합토를 이용함으로써 구조물 배면에 작용하는 토압을 경감할 수 있기 때문에, 기초 말뚝 등의 구조물의 규모를 작게 하는 것이 가능해진다.

4) 급경사지에서의 연직성토

산악도로 등, 급경사지에서 복부(연결) 성토에 경량기포혼합토를 이용함으로써 공사용 진입로나 재료 운반을 경감할 수 있다. 또한 절성토량을 감소시킬 수 있다.

4) 협소부의 충전

경량기포혼합토는 유동성이 우수하기 때문에 발판 아래의 공동이나, 지하 매설물의 내부의 충전 등에 적합하다.

경량기포혼합토 공법의 용도에 따른 목적 및 효과가 Table 2.4에 나타나 있다.

Table 2.4 경량기포혼합토 공법의 용도(일본도로공단, 1996)

설계 타입	용도	개념도	특징			목적 및 효과
			경량	유동	자립	
하중 경감 공법의 설계	연약지반상의 화폭성토		○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> - 용지, 시공폭의 축소 - 저소음, 저진동 - 대형기계 시공상 불필요 - 다짐불필요 - 침하, 측방변형의 억제
	지반활동지성토		○		○	<ul style="list-style-type: none"> - 활동력의 경감 - 억지말뚝 등 지반활동 대책공의 경감
	급경사지성토		○		○	<ul style="list-style-type: none"> - 재료운반, 절성토량의 저감 - 대형기계 시공상 불필요 - 다짐 불필요
토압 경감 공법의 설계	구조물에서의 토압경감		○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> - 구조물 배면토압의 경감 - 측방유동압의 경감 - 단차 방지
	신도로면		○		○	<ul style="list-style-type: none"> - 시설 컬버트 박스위에 성토를 쌓아 올리는 경우에도 박스의 보강·철거가 불필요
참고	공동충진			○		<ul style="list-style-type: none"> - 지진시 안정성의 확보 - 부등침하의 방지
	협소부위메우기			○		<ul style="list-style-type: none"> - 협소공간으로의 되메우기로 이용

2.3.2 공학적 특성

가. 삼축압축 특성

Tsuchida(1996)는 삼축압축시험기를 사용하여 경량기포혼합토의 변형특성과 강도특성을 고찰하는 연구를 수행한 바가 있다. 그의 연구에 의하면, 해수 하부에 타설된 경량기포혼합토에는 수압이 작용하는 상태에서 고화되고, 양생되기 때문에 실내 실험에서 몰드로 타설하고 경량기포혼합토 시료를 직접 해수를 채운 용기 내에서 50, 100, 200, 300 kPa의 압력 하에서 양생하였다.

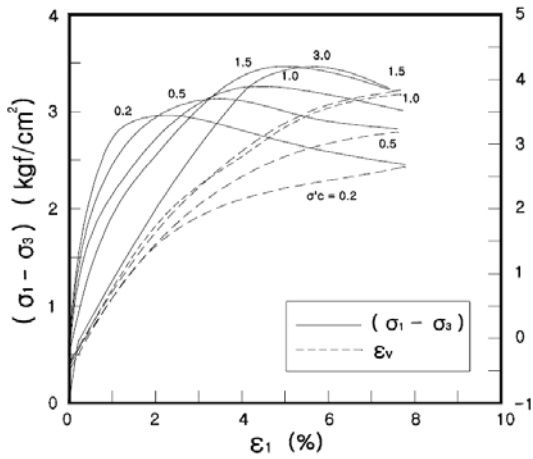
삼축압축시험은 소정의 양생기간이 경과된 후에 시료를 압력용기에서 꺼내어 삼축셀 내에 양생압력과 같은 배압을 가한 상태로 압밀하고 비배수압축시험을 실시하였다. 본 실험에 있어서는 카와사키항 점토를 원료토로서 준설직후 목표 단위중량을 12 kN/m³, 그리고 28일 양생후의 압축강도의 목표치를 200, 400 kPa로 하는 배합비를 Table 2.5와 같이 제시하였다.

Table 2.5 경량기포혼합토 배합비(Tsuchida, 1996)

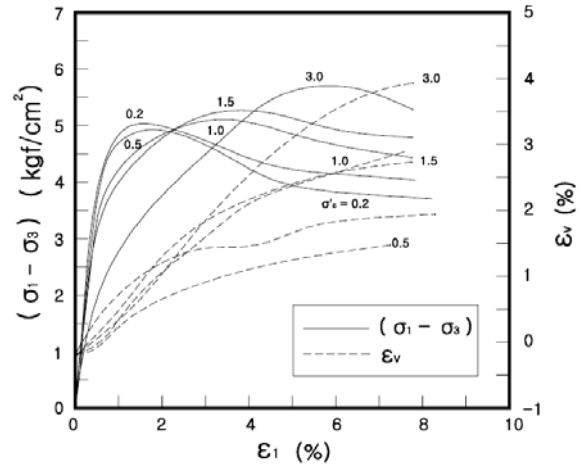
목표강도 (kPa)	원료토			고화재		경량재	
	함수비 (%)	무게 (kN)	체적 (m ³)	무게 (kN)	체적 (m ³)	무게 (N)	체적 (L)
200	186	11.33	0.896	0.67(17%)	0.021	41.5	0.083
400	186	11.24	0.888	0.76(19%)	0.025	43.6	0.087

1) 유효구속압의 영향

흙의 경우 재료의 응력-변형 거동은 유효구속압의 크기에 의존하고 있는 것으로 알려져 있다. 경량기포혼합토의 경우에는 압축성이 있는 기포의 존재로 인하여 흙과 같은 응력-변형 거동 특성이 나타날 수 있을 것이다. Tsuchida(1996)는 이러한 특성을 삼축압축시험으로부터 Fig. 2.10과 같이 밝히고 있다. 그의 연구결과에 의하면 유효구속압이 증가 할수록 응력-변형 곡선의 초기기울기는 완만한 경사를 갖는 것으로 밝히고 있다. 또한 유효구속압의 증가에 따른 압축강도는 Fig. 2.10에 근거한다면 증가하는 것으로 파악된다(湯怡}新, 1996).



(a) 목표압축강도 200 kPa



(b) 목표압축강도 400 kPa

Fig. 2.10 경량기포혼합토의 응력-변형 특성

2) 고화재 첨가량

경량기포혼합토의 강도는 고화재의 첨가량에 의해 지배된다고 할 수 있다. 고화재 첨가량을 달리한 경우에 대하여 삼축압축시험을 수행하고, 고화재 첨가량에 따른 압축강도의 변화를 경량기포혼합토와 경량 beads혼합토(준설토+ 고화재+ EPS)에 대하여 Fig. 2.11과 같이 제시하고 있다.

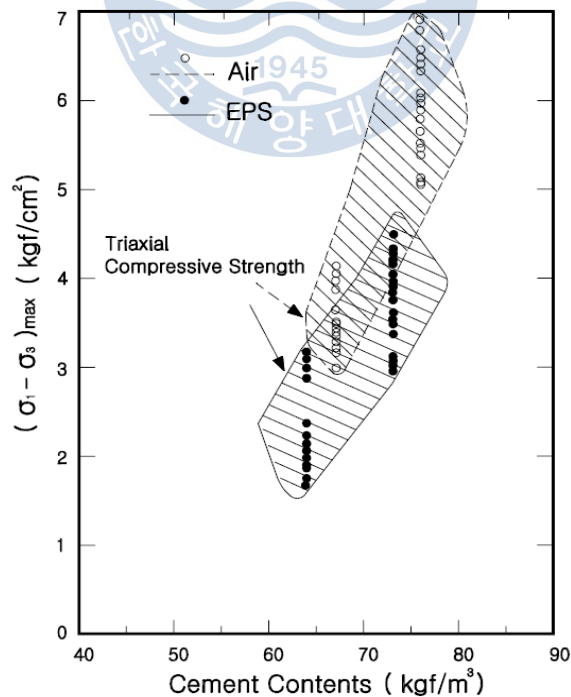


Fig. 2.11 고화재 첨가량과 압축강도 관계

고화재 첨가량과 압축강도를 나타낸 Fig. 2.11에는 사전의 혼합 시험으로부터 얻어진 고화재 첨가량과 일축압축강도 관계 곡선도 함께 나타내었다. 연구결과에 의하면, 양생압력 및 유효구속압의 크기에 의하여 비배수 삼축압축시험에서 얻어진 압축강도가 분산되어 있고, 임의의 특정범위에 분포하고 있다. 그림에서 빗금친 부분이 그 범위를 나타내고 있으며, 수압 하에서 양생한 경량혼합토의 삼축압축강도는 대기압에서 양생한 시료보다 30%~70%정도 크다고 밝히고 있다.

3) 양생압력의 영향

경량기포혼합토의 타설이 수중에서 이루어지는 경우 양생시 수압에 의한 영향으로 응력-변형거동이 변화하였는지를 고찰하기 위하여 다양한 양생압력이 작용하는 경우에 대한 삼축압축시험을 수행하였다. 연구결과 양생압력 후 압력 제거 시에 공시체의 균열이 발생하였으며, 이를 방지하기 위하여 양생압력의 제거는 충분한 시간을 두고 실시해야 한다고 밝히고 있다.

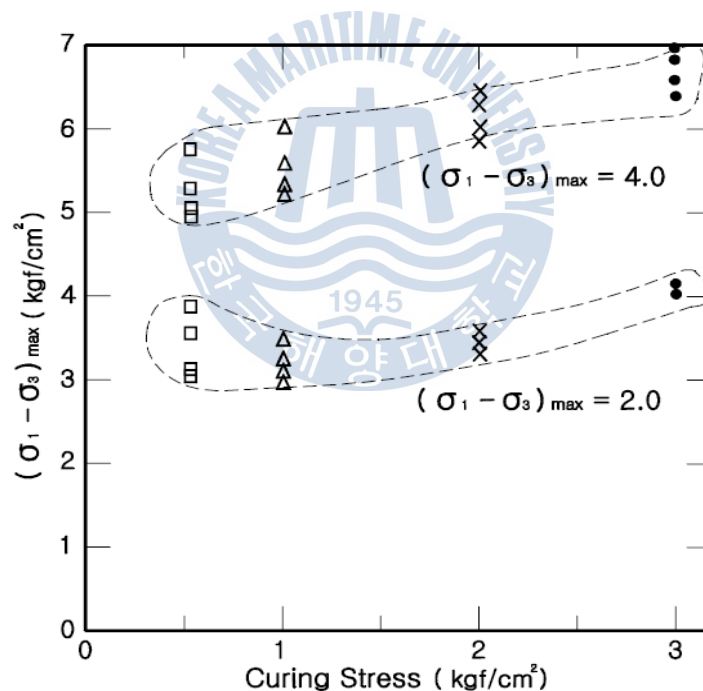


Fig. 2.12 양생압력과 삼축압축강도의 관계

Fig. 2.12는 경량기포혼합토의 양생과정에서 양생압력이 50~300 kPa 일 경우에 대하여 목표압축강도에 따라 구분하여 양생압력과 압축강도의 관계를 나타내고 있다. 연구결과에 의하면 양생압력의 증가에 따른 응력-변형거동의 변화는 거의 찾아볼 수 없으며, 동일한 양생압력의 조건에서 구속압의 증가에 따른 응력-변형곡선은 완만하게

증가하는 경향을 나타내었다. 한편 같은 양생압력에 따른 압축강도의 변화는 양생압력이 증가할수록 목표압축강도가 큰 경우에 전반적으로 증가하는 경향을 보였다.

나. 변형특성

1) 변형계수(E50)

재료의 수치해석 시 변형계수(E_{50})는 전단강도정수와 함께 중요한 해석변수이다. 따라서 변형계수의 변화를 파악하는 것은 재료의 특성을 파악하는데 중요하다 할 수 있다. Fig. 2.13은 경량기포혼합토의 변형계수와 압축강도의 관계를 나타낸 것이다. 삼축 압축상태에서의 압축강도와 변형계수의 관계는 분산의 정도가 크게 나타나고 있는데, 이는 구속압의 영향에 의한 것으로 밝히고 있다.

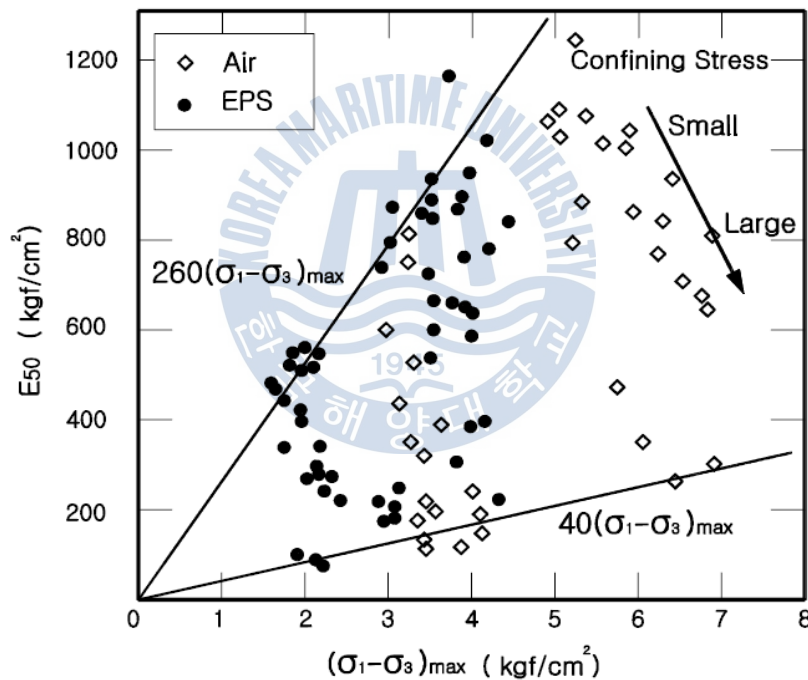


Fig. 2.13 변형계수(E_{50})와 압축강도 관계

Fig. 2.13에 의하면 상한계의 압축강도-변형계수 관계의 기울기는 낮은 구속압에서의 결과들이며, 하한계의 압축강도-변형계수 관계기울기는 높은 구속압에서의 결과들이라 밝히고 있다. 변형계수와 압축강도 상관관계는 식 (2.1)과 같이 제시하고 있다.

$$E_{50} = (40 \sim 260) \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} \quad (2.1)$$

2) 체적 변형

경량기포혼합토의 재료로서 기포와 발포비드는 큰 압축성을 가지고 있기 때문에 경량기포혼합토의 체적은 비배수 조건에서 전단응력이 가해지는 경우에도 재료의 압축성으로 인하여 변화한다. 체적변형량은 내부 cell속의 수위 변화에 의해 측정될 수 있으며, Tsuchida(1996)는 체적변형을 직접 측정하여 변화정도를 제시하고 있다. Fig. 2.10에서 비배수 삼축압축에 동반하는 체적변형률(ϵ_v)의 변화가 파선으로 표시되어 있다.

연구 결과에 의하면 일반적으로, 유효구속압이 증가할수록 전단시에 생기는 체적변형이 커지는 경향을 나타낸다. 그러나 경량혼합토가 300 kPa의 구속압을 받을 때 체적변형이 반대로 적어지는 경우도 있다. 그러나 구속압의 크기가 어느 이상으로 되면 초기 및 압축 전단에 의해 총 체적변형은 그다지 변하지 않는다고 밝히고 있다. 비배수 조건에서 전단응력이 가해지는 경우에 경량혼합토의 체적변형의 이유를 Tsuchida(1996)는 다음과 같은 이유로 설명하고 있다. 삼축압축시험기에서의 압축 전단에 앞서, 양생압력과 같은 배압 이상으로 유효구속압을 가했지만, 배압시의 공시체는 반드시 압력 해방 이전의 상태로 되돌아오지는 않았다. 압력양생 시에 있어서는 흙 골격에 작용하는 유효응력은 '0'이고, 기포 및 간극수에 작용하는 압력은 양생압력과 같다. 이때, 기포와 흙 골격과의 사이에 응력은 작용하지 않았다고 생각된다. 공시체는 양생압력의 해방에 의해 간극수압이 거의 완전하게 작용하지 않는 상태가 될 것이다. 따라서 기포의 팽창에 의하여 흙 골격이 신장 응력상태로 바뀌는 것으로 추정된다. 다음으로 공시체에 구속압(u_c)이 가해지지만 기포의 압축성에 의해 불포화 상태이기 때문에 전응력의 상당한 비율은 흙 골격에 의해 지지되고, 흙 골격은 유효응력에서 압축된다. 골격과 기포가 일체로서 변형한다고 생각하면, 이때 기포는 압력양생 시에 비해 더욱 더 압축된 상태로 있다. 압축전단에 따라 골격 구조가 파괴되고, 양자의 변형 조합 조건은 차츰차츰 없어지고, 기포가 비교적 자유롭게 팽창할 수 있어 공시체 전체의 체적이 감소하는 결과가 된다고 밝히고 있다(青山憲明, 1992).

다. 일축압축강도 특성

1) 압축강도의 시간적 증가

고화재가 포함된 경량기포혼합토의 압축강도 발현은 양생일에 따라 비례하는 것으로 알려져 있으며, Tsuchida(1996)는 이를 고찰하기 위하여 상온·대기압 상태에서 7일, 14일 및 28일간 양생하고, 양생일에 따른 일축압축강도를 고찰하였다. Fig. 2.14는 경량기포혼합토의 압축강도와 양생일수의 관계를 나타내고 있다. 그의 연구결과에 의하

면 양생일에 따른 압축강도의 발현은 비선형적인 증가양상을 보이고 있으며, Fig. 2.14에서와 같이 시간의 대수함수로서 압축강도의 변화를 식(2.2)와 같이 표현할 수 있었다.

$$q_u = q_{u(3)} + b \cdot \ln(T-2) \quad (2.2)$$

여기서, T는 양생일수이고, $q_{u(3)}$ 은 양생 3일 때의 일축압축강도이다. 식(2.2)에서 $q_{u(3)}$ 및 고화재 첨가량 b는 혼합한 경량재의 종류나 원료토의 초기함수비 또는 양생 온도에 의하여 변화한다고 밝히고 있다. Fig. 2.14의 괄호 안에 나타난 수치는 각 조건에 대한 $q_{u(3)}$ 과 b의 값을 의미한다.

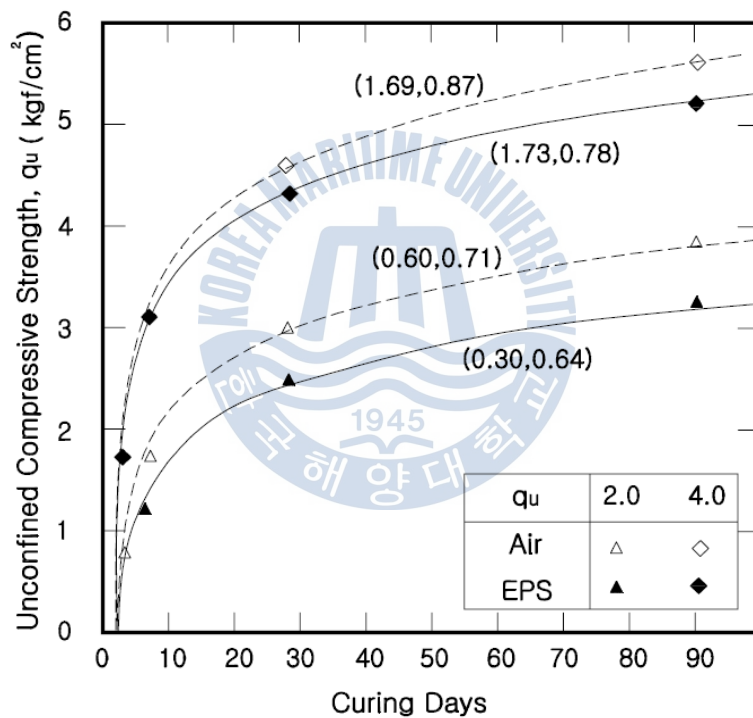


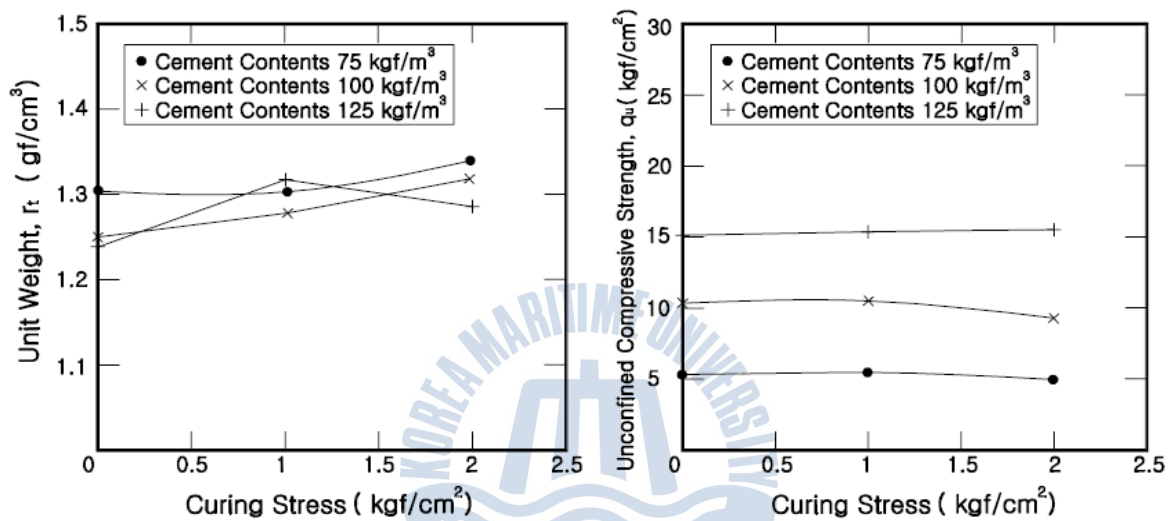
Fig. 2.14 양생일수와 압축강도의 관계

2) 양생압력이 일축압축강도에 미치는 영향

삼축압축 상태에서의 마찬가지로 일축압축 상태에서도 수압이 작용하는 경우 압축강도에 영향을 받을 것이다. Casai(1996), Tsuchida(1999) 등은 경량기포혼합토의 공시체를 굳지 않은 상태에서 50~200 kPa의 수압 하에서 수중양생하고, 압력양생조건이 경량기포혼합토의 일축압축강도와 단위체적중량에 미치는 영향을 고찰한 바가 있다. 그들의 연구결과에 의하면 경량기포혼합토를 수압 하에서 양생하면 단위체적중량이 증

가하고, 일축압축강도 역시 증가하는 것으로 밝히고 있다.

畑田聖載(1996)등이 양생압력이 압축강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 준설토 함수비, 고화재 첨가량, 단위중량 등의 조건을 변화시켜 일축압축시험을 수행한 바가 있다. 그의 연구결과를 도시하면 경량기포혼합토에서의 양생압력과 습윤단위중량 및 일축압축강도의 관계는 Fig. 2.15와 같다. 그림에서와 같이 양생압력의 증가에 따라 단위중량은 증가하는 경향이 있지만 이것은 양생압력으로 Boyle's 법칙에 의해 경량기포 혼합토의 체적이 감소하였기 때문으로 설명하고 있다. 일축압축상태에서는 양생압력에 의한 압축강도의 변화를 거의 찾아볼 수가 없는 것으로 밝히고 있다.



(a) 양생압력과 습윤단위중량의 관계 (b) 양생압력과 일축압축강도의 관계

Fig. 2.15 습윤단위중량과 일축압축강도에 미치는 양생압력의 영향

3) 변형 특성

일축압축강도와 변형계수(E_{50})의 관계를 Tsuchida(1999)는 일본 내 점토에 대하여 제시하고 있다. 그의 결과는 Fig. 2.16과 같으며, 그림에서와 같이 일축압축강도- E_{50} 의 관계는 배합시의 조건들에 영향을 받으므로 분산된 분포를 보여주고 있다. 따라서 일축압축강도-변형계수의 관계기울기는 특정한 범위를 갖는 것으로 제시되며, 이는 식 (2.3)과 같다.

$$E_{50} = (100 \sim 200) \cdot q_u \quad (2.3)$$

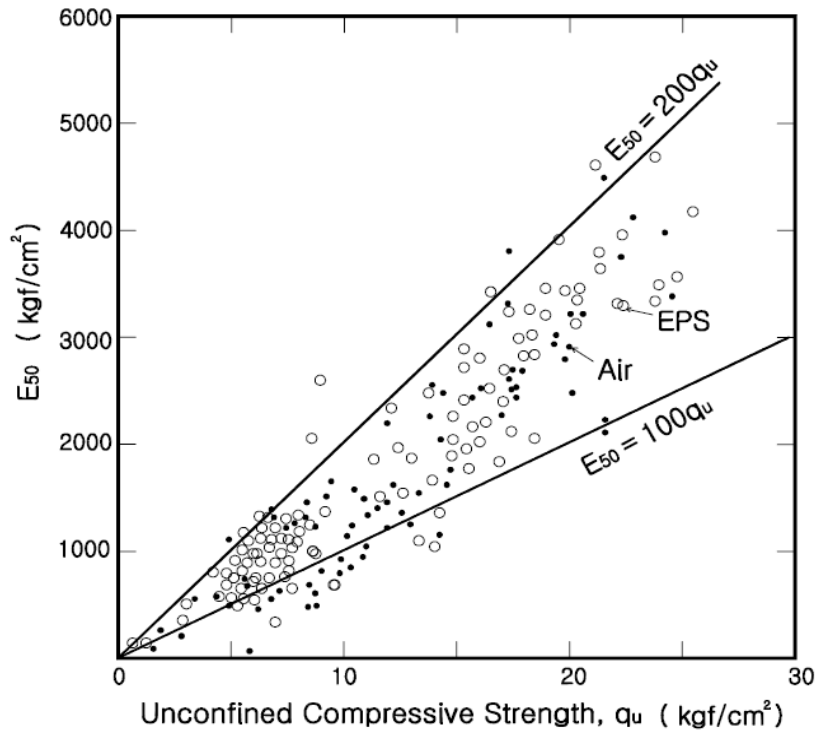


Fig. 2.16 일축압축강도와 변형계수의 관계

라. 크리프 특성

1) 전단크리프 시험

Fig. 2.17은 일면전단시험의 결과로서, 최대전단강도의 70% 및 80%의 전단응력을 일주일동안 계속해서 재하해서 크리프 변위량을 측정한 결과를 나타낸다. 여기서 수직 응력은 일축압축강도의 50%로 했다. 이 그림에서 재하초기의 변위량이 대부분이고, 시간경과에 따른 변위는 대단히 작다는 것을 알 수 있다.

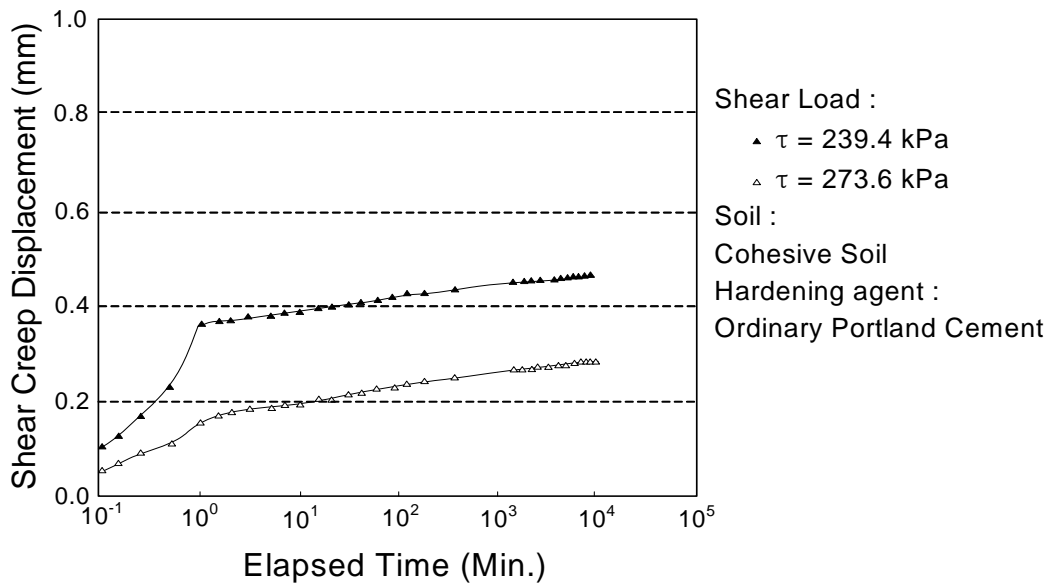


Fig. 2.17 경과시간에 따른 전단크리프 변위량
 (설정강도 500 kPa, 설정밀도 10 kN/m³)

2) 장기압축시험

일차원압밀시험에서의 압축하중을 장기간 받았을 때의 영향을 조사하기 위해서, 장기압축시험을 실시했다. 장기간의 압축하중으로서는 항복하중의 0.5배 및 1.5배를 사용하였으며, 시험결과를 Table 2.6에 나타내었다. 압축하중이 압축항복응력의 0.5배에서는 최종압축변형률은 약 3.0%~5.0% 이내이고, 크리프 계수도 상당히 작은 결과가 나왔다. 이것으로부터 항복응력 이하의 응력에서의 장기적인 침하량에 대해서는 거의 문제가 없다고 말할 수 있다. 이는 EPS가 가지고 있는 장기크리프로 인한 단차저감의 단점을 보완하고 있다.

Table 2.6 크리프 계수 및 최종압축변형률

설정강도 (kPa)	설정단위중량 (kN/m ³)	장기압축하중 0.5P _y		장기압축하중 1.5P _y	
		최종압축 변형률 ϵ (%)	크리프계수* C _{ac} (%)	최종압축 변형률 ϵ (%)	크리프계수 C _{ac} (%)
200	10	2.8	1.87×10^{-1}	16.1	7.43×10^{-1}
	11	4.9	3.06×10^{-1}	25.4	7.95×10^{-1}
500	10	4.6	1.92×10^{-1}	23.3	7.59×10^{-1}
	11	4.4	1.96×10^{-1}	23.3	7.74×10^{-1}

2.3.3 현장 적용 사례 및 문제점

가. 해외 사례

1) 교대 뒷채움

Fig. 2.18은 교대 배면의 뒷채움재로 적용된 사례들이다.

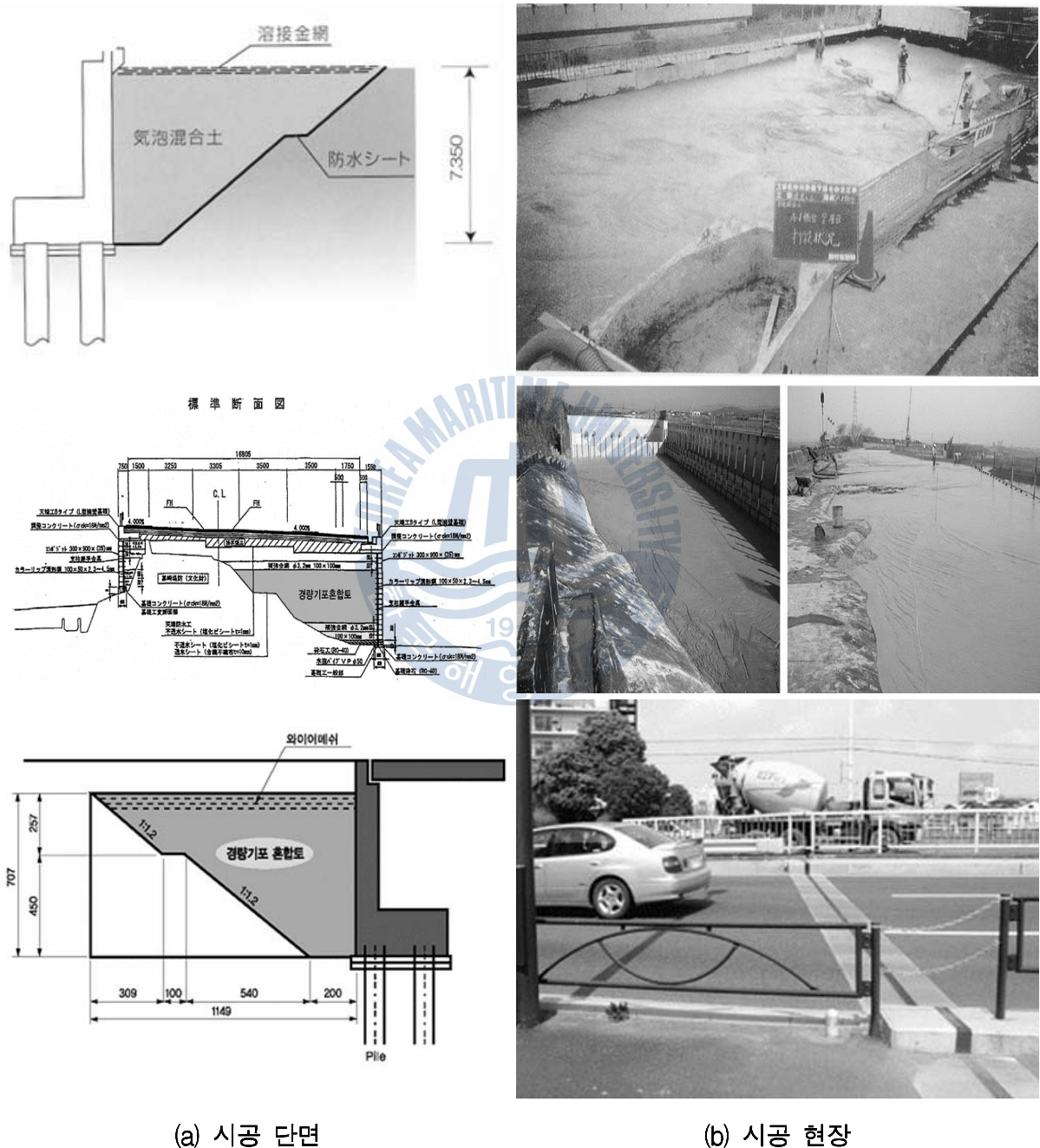


Fig. 2.18 교대 배면 적용 사례(일본)

2) 확폭 성토

Fig. 2.19(a)는 주택가에 인접하여 도로의 확폭 성토 시공한 사례로 좁은 지역에서도 시공이 가능하고 저소음, 저진동으로 공사가 가능하다. 또한 Fig. 2.19(b)는 해안 지역의 기존 도로의 확폭 공사에 시공한 사례로 물막이 및 지반안정처리 없이 수중에 경량 기포혼합토의 타설이 가능하다.

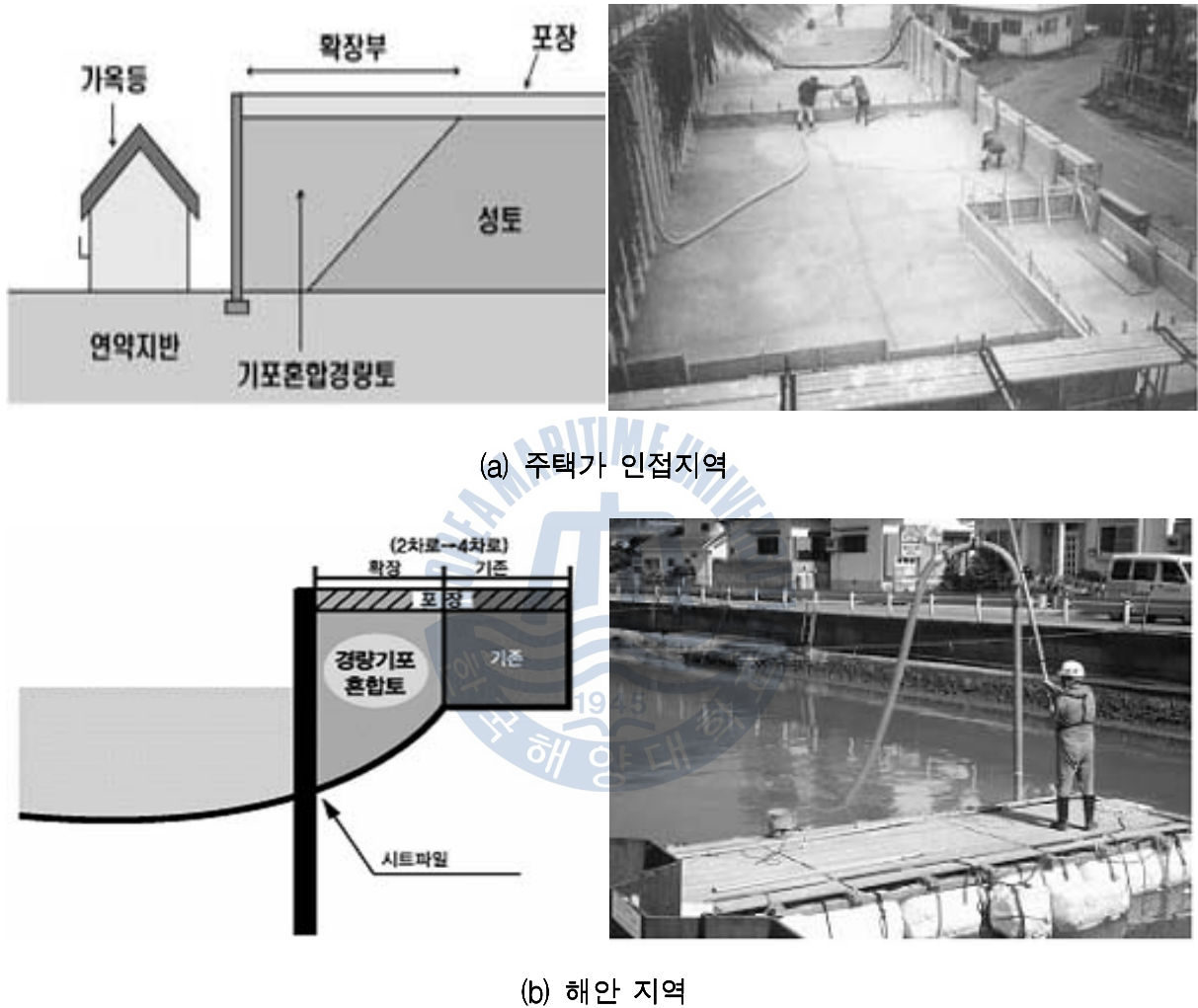
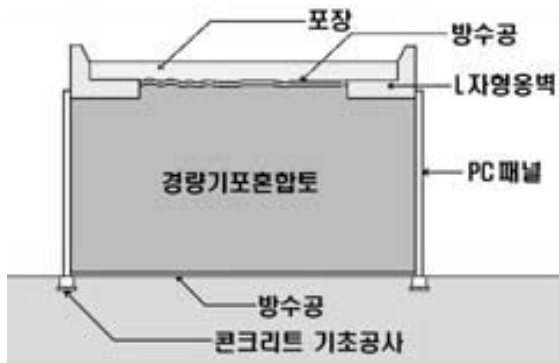


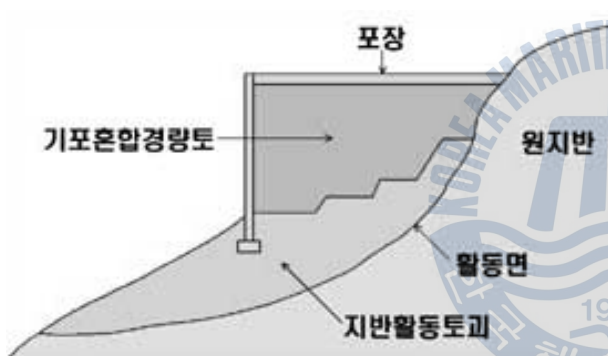
Fig. 2.19 확폭 성토 적용 사례(일본)

3) 하중경감

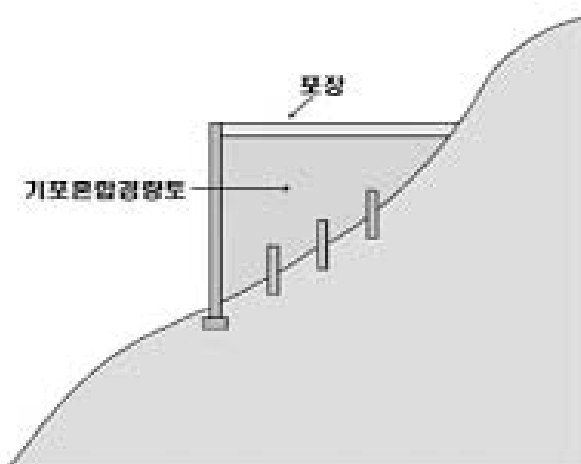
Fig. 2.20과 같이 경량기포혼합토는 토사에 비해 하중을 경감시키고 경화 후에는 자립하기 때문에 연직성토 시공이 가능하며 급경사 지역이나 지반 활동지역에서도 시공이 가능하며 구조물의 규모를 작게 할 수 있다.



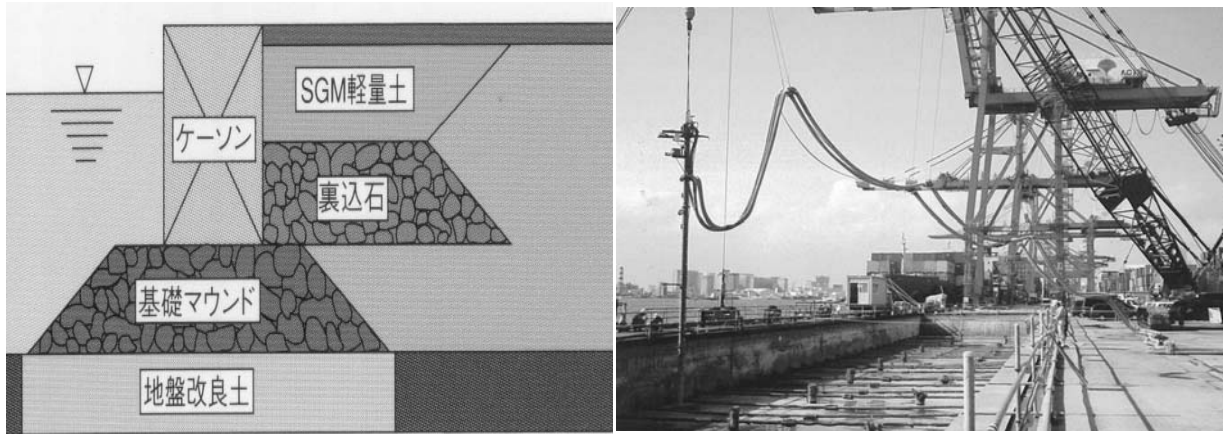
(a) 교대배면 직립시공



(b) 지반활동 지역의 성토



(c) 급경사지의 성토



(d) 호안의 뒷채움

Fig. 2.20 하중경감공법으로 적용된 사례(일본)



나. 국내 사례

Fig. 2.21과 같이 국내에서도 되메움재, 기존 도로의 확폭 성토, 경량성토재 및 뒷채움재 등 다양한 공사에 경량기포혼합토 공법(목표단위중량 10 kN/m^3)이 적용되고 있으며 각종 폐기물을 시멘트의 대체 재료로 활용하고자 많은 연구가 이루어지고 있다.



(a) 수영 1호교 관로 되메움(시공일시: 2007.03-550m³)



(b) 부산 지하철도 확장 성토(시공일시: 2007.11-6,000m³)



(c) 녹산 배수펌프장 성토(시공일시: 2007.09-10,270m³)



(d) 부산신항 배후도로 교대 뒷채움(시공일시: 2007.04-7,200m³) (계속)



(e) 도계-초정간 도로 확장 성토(시공일시: 2008.04-30,000m³)

Fig. 2.21 국내 시공 사례

2.4 경량기포토 공법

2.4.1 개요

가. 경량기포토의 정의

원료토를 사용하는 경량기포혼합토의 단점을 보완하기 위하여 공장에서 생산된 품질이 균일한 모래를 사용하여 물과 시멘트와 같은 고화재에 혼합하여 유동화 시킨 것에 기포를 혼합하여 경량화한 것을 경량기포토(Air-Trapped Soil)라 한다.

나. 경량기포토의 특성

경량기포토는 단위중량 6~12 kN/m³의 지반재료로써 혼합물은 제작 직후 유동성을 나타내나 고화재의 반응에 따라 최종적으로 양질의 토양재료와 같거나 그 이상의 강도 특성을 가지는 경량성토재료이다. 일반 토사보다 가벼워 지반 등에 미치는 하중을 경감할 수 있고 구조체로서 기능을 발휘할 수 있다. 또한 유동성이 높으므로 펌프압송에 의한 타설이 가능하며 시공이 용이한 장점을 가지고 있다.

이러한 특성으로 도로의 신설이나 확폭성토 및 구조물 뒷채움부, 하중의 경감, 토압의 경감, 측장변위 억제 및 시공성의 향상 등을 기대할 수 있는 곳에 적용할 수 있다. 경량기포토공법의 용도를 Fig. 2.22에 나타내었다.

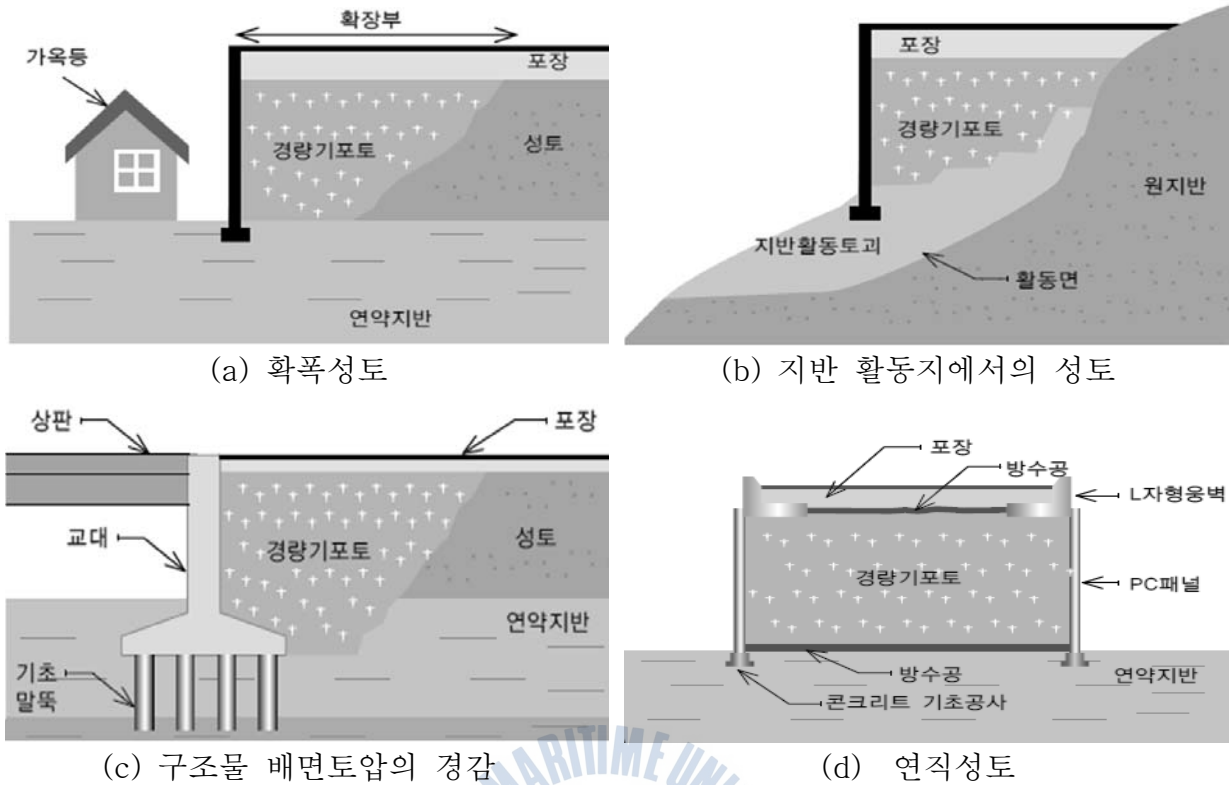


Fig. 2.22 경량기포토공법 용도

2.4.2 필요성

경량기포혼합토 공법의 품질관리에서 가장 중요한 인자는 원료토로 연구배경에서 설명한 바와 같이 원료토의 채취지역에 따라 경량기포혼합토의 일축압축강도가 달라지는데 그 이유는 원료토를 구성하고 있는 모래, 실트, 점토의 함유량에 의해 결정되기 때문이다. 송준호 등(2008)은 원료토의 특성에 따른 일축압축강도의 변화를 알아보기 위해 양생 28일, 목표단위중량 11 kN/m^3 의 조건으로 시멘트 첨가량을 2, 2.5, 3 kN/m^3 로 달리 하여 분석하였고 원료토의 물리적 특성과 일축압축강도의 변화와 소성지수, 곡률계수 등과의 상관관계를 분석하였다. 분석 결과 단일 변수와의 상관관계는 일부 조건에서는 뚜렷한 상관관계를 나타냈지만 일반화하기에는 분산이 큰 것으로 나타났다. 이는 동일한 물리적 특성을 가진 원료토라도 모래, 실트, 점토의 비율이 다를 수 있으며, 실제 강도에 영향을 미치는 인자는 모래, 실트, 점토의 입자이기 때문이다. 점토와 모래의 함유율이 높아짐에 따라 일축압축강도는 감소하는 경향을 나타내고, 소성지수와 곡률계수가 증가함에 따라 일축압축강도가 감소하는 것을 알 수 있다(Fig. 2.23). 즉, 원료토를 구성하고 있는 모래, 실트, 점토의 함유량에 따라 기포의 형성을 방해하는 소포현상이 발생하여 그 영향으로 경량기포혼합토의 단위중량, 강도, 변형특

성 모두에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 원료토는 경량기포혼합토의 다른 특성(변형, 투수, 균열, 내구성 등)에도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 예를 들면, 원료토에 포함된 점토입자에 의해 습윤 정도에 따라 경량기포혼합토의 특성은 매우 큰 영향을 받을 것으로 판단된다.

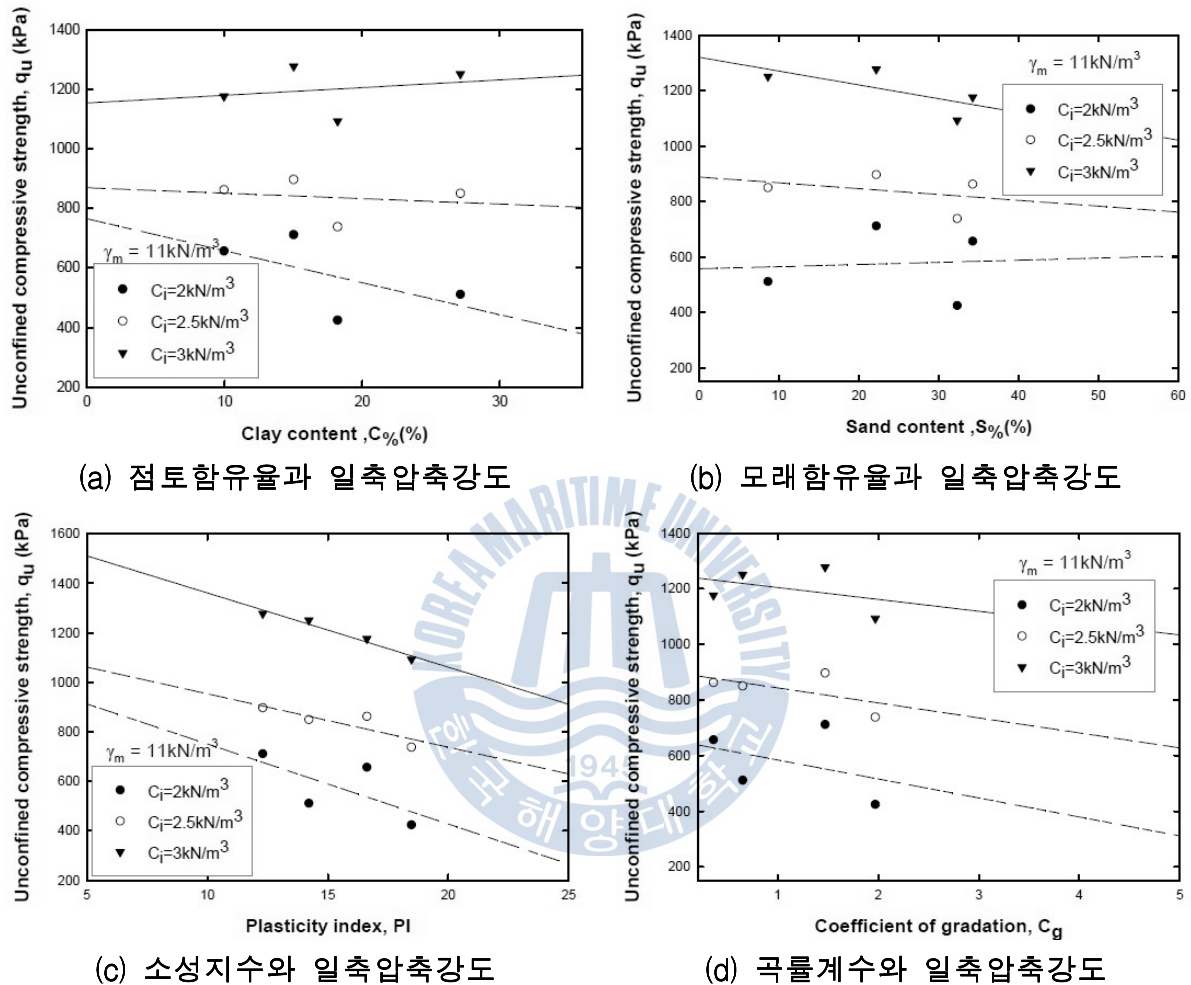


Fig. 2.23 원료토의 특성에 따른 일축압축강도(송준호 등, 2008)

이와 같이 경량기포혼합토의 경우는 현장에서 발생하는 다양한 원료토에 따라, 기포의 형성 정도가 다르게 되어 품질관리에 어려움이 있는 것이 사실이므로 현장적용에 있어서는 이들에 대한 철저한 시공관리가 요구되는 것을 알 수 있다. 현재 국내에서도 현장에서 발생된 원료토를 이용하는 경량기포혼합토 공법을 사용하고 있는데 품질관리에 있어 많은 문제점을 갖고 있어 대부분 단위중량이 10 kN/m^3 로 시공이 이루어지고 그 이하의 단위중량으로는 시공이나 설계가 이루어지지 않고 있다. 따라서 이에 대한 단점을 보완하는 문제가 시급한 실정이다(황중호, 2010).

2.4.3 역학적 특성

경량기포토는 Fig. 2.24와 같이 시멘트 함유율이 높고 단위중량이 증가 할수록 응력-변형 거동의 최대값이 뚜렷하고 기울기가 증가하였으며, Fig. 2.25(a)와 같이 수직에 가깝고 취성적으로 파괴되었다. 반면에 시멘트의 함유율이 낮고 단위중량이 감소할수록 변형계수가 감소하고 Fig. 2.25(b)와 같이 전체적으로 스펀지처럼 시료의 상부 또는 하부에서 압축되며 연성적으로 파괴되는 거동을 보였다.

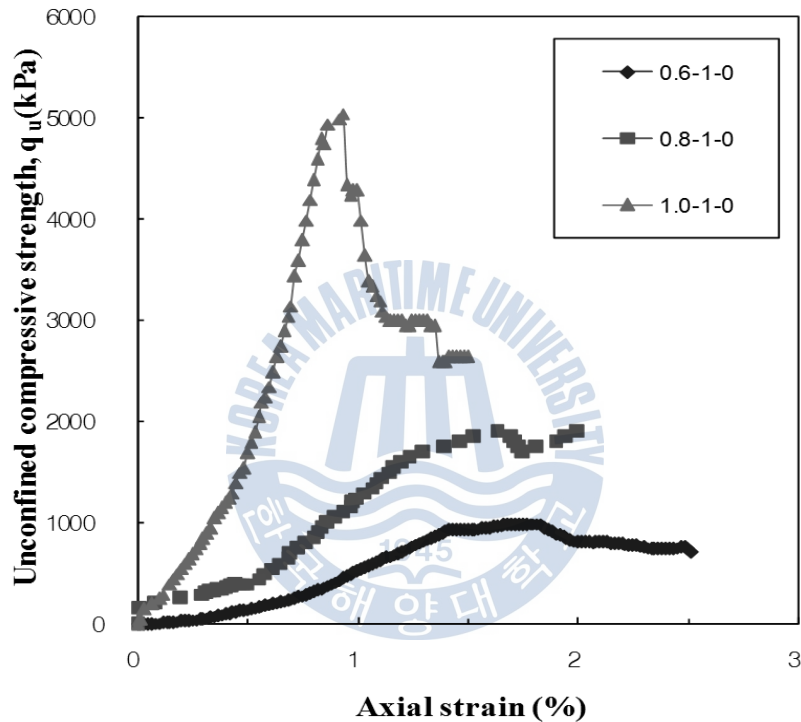
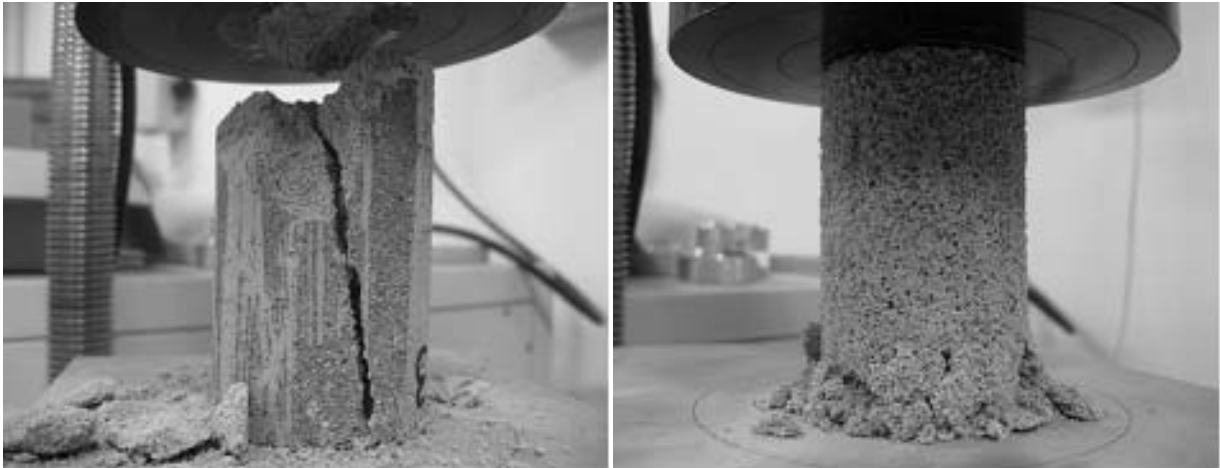


Fig. 2.24 시멘트 함유율에 따른 응력-변형 거동 (황중호, 2010)



(a) 단위시멘트량, 단위중량이 높은 경우 (b) 단위시멘트량, 단위중량이 낮은 경우
Fig. 2.25 일축압축시험 공시체의 파괴 양상 (황중호, 2010)

양생기간이 경과하고 단위중량이 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하였고, 시멘트의 함유율이 높을수록 급격하게 증가하는 경향을 나타냈다(Figs. 2.26~2.28). 또한 공기함유율이 대략 30~40%의 범위에서 일축압축강도가 급격하게 감소하여 공기량이 40%를 초과하는 경우에는 품질에 세심한 주의가 요구되는 것을 알 수 있다(Fig. 2.29).

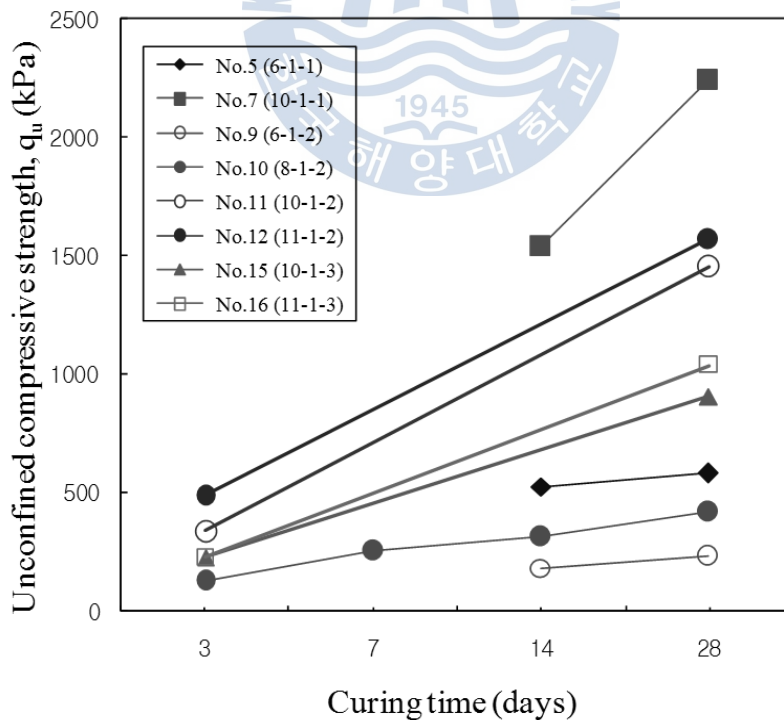


Fig. 2.26 양생 기간에 따른 일축압축강도 (황중호, 2010)

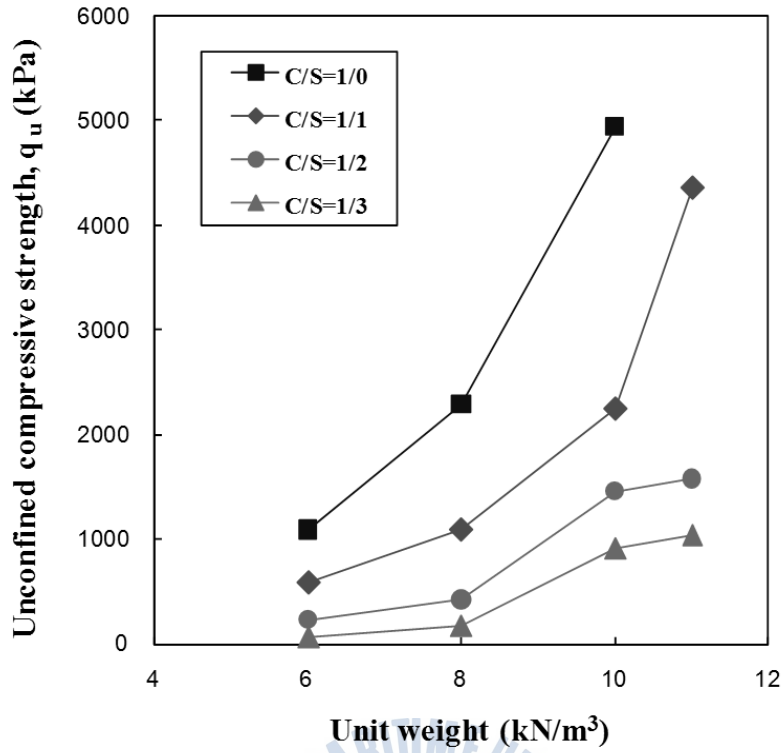


Fig. 2.27 단위중량과 일축압축강도 (황중호, 2010)

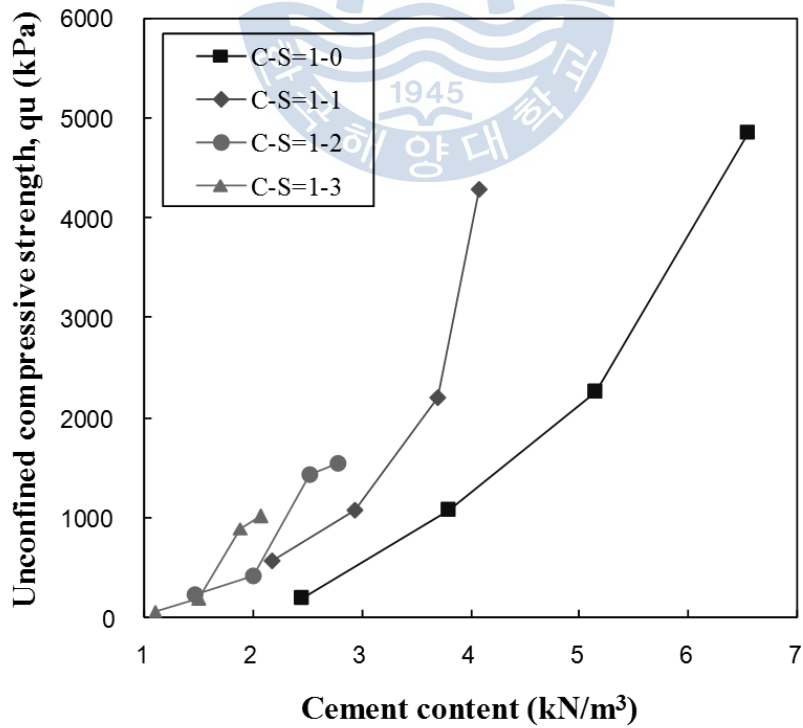


Fig. 2.28 시멘트 함유량과 일축압축강도 (황중호, 2010)

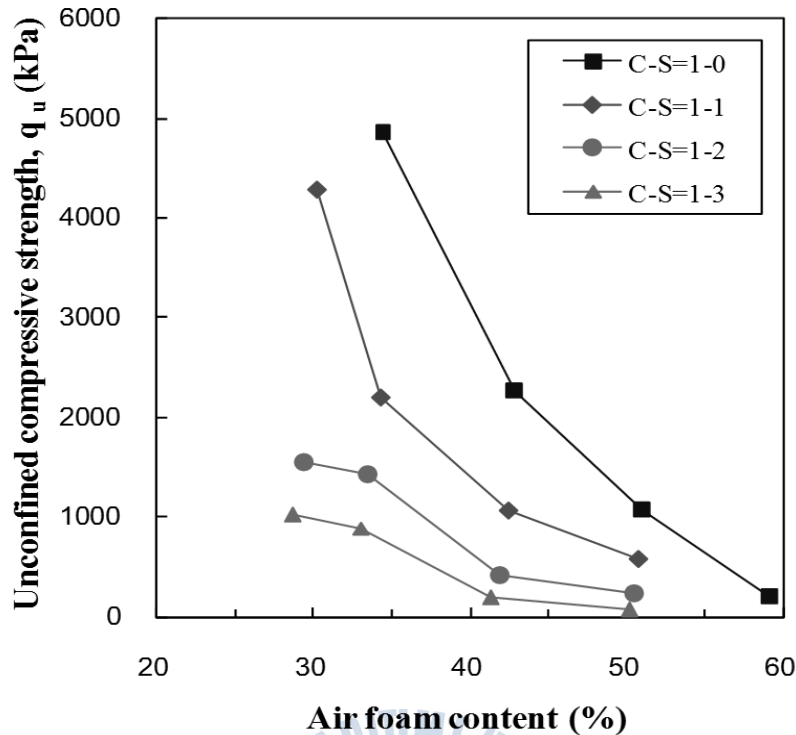


Fig. 2.29 공기량과 일축압축강도의 관계 (황중호, 2010)

수중 양생한 경우에는 양생 7일 공시체와 양생 28일 공시체의 일축압축강도의 차이가 적은 것으로 보아 습윤 양생한 경우에 비해 시멘트의 강도발현이 거의 되지 않은 것으로 보이며 모래 함유량이 많을수록 더 높은 일축압축강도가 나타났다(Fig 2.30, 2.31). 따라서 경량기포토를 수중에 타설해야 하는 경우에는 차수 처리를 하거나 별도의 첨가제나 혼화제가 필요할 것으로 판단되고 수중 양생하는 경우에는 수압에 의한 소포량의 증가가 예상되므로 이를 고려한 수정 배합이 필요할 것으로 보인다. 또한 Fig 2.30에서는 공기양생과 습윤양생의 차이를 볼 수 있다. 공기 중에서 양생한 경우의 일축압축강도는 습윤 양생한 경우에 비하여 8.5~12.6% 정도의 감소율을 보이며 다소 작은 일축압축강도 결과를 보인다.

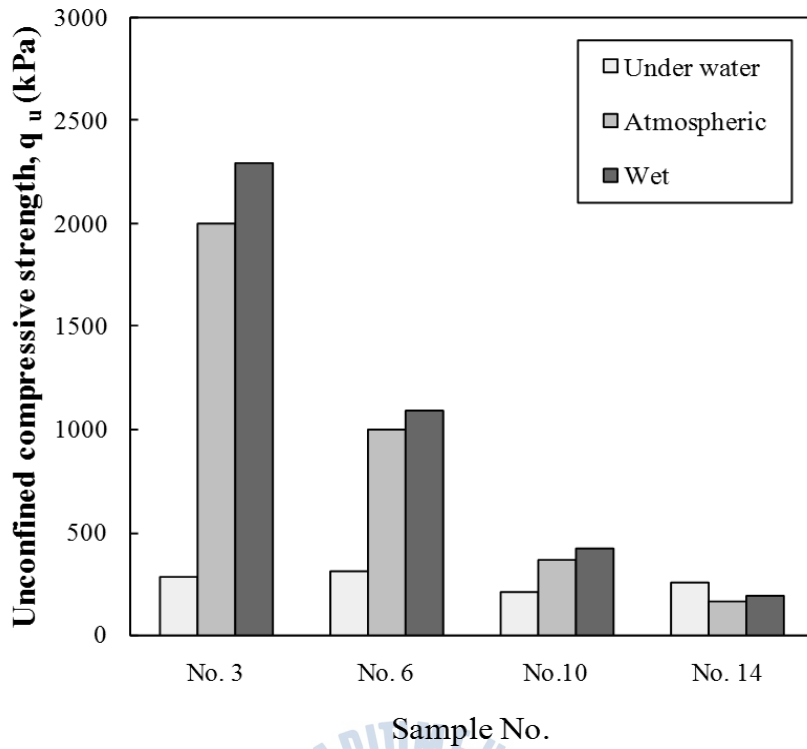


Fig. 2.30 양생 조건에 따른 일축압축강도-28일 양생 (황중호, 2010)

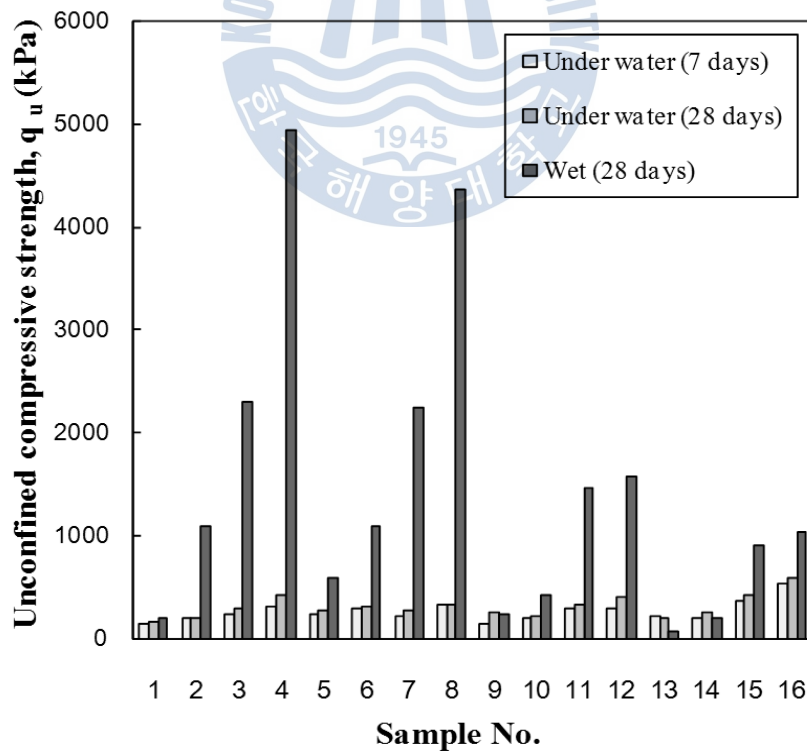


Fig. 2.31 양생 조건에 따른 일축압축강도-수중양생 (황중호, 2010)

28일 양생된 경량기포토의 일축압축강도와 변형계수 E_{50} 의 관계는 Fig. 2.32와 같이 나타났다. 이 관계를 수식으로 나타내면 식 (2.1)과 같고 기존의 연구에서와 유사한 범위를 가지는 것으로 나타났다.

$$E_{50} = (60 \sim 150) \cdot q_u \quad (2.1)$$

여기서, E_{50} : 변형계수(kPa)

q_u : 일축압축강도(kPa)

경량기포토의 단위중량이 증가할수록 변형계수는 크게 나타났으며, 동일한 하중에서 더 많은 변형을 유발하는 것을 나타낸다(Table 2.7).

Table 2.7 단위중량에 따른 일축압축강도와 변형계수의 관계 (황중호, 2010)

단위중량 (kN/m ³)	관계식
6	$E_{50} = 53.26q_u$
8	$E_{50} = 91.99q_u$
10	$E_{50} = 114.91q_u$
11	$E_{50} = 100.59q_u$

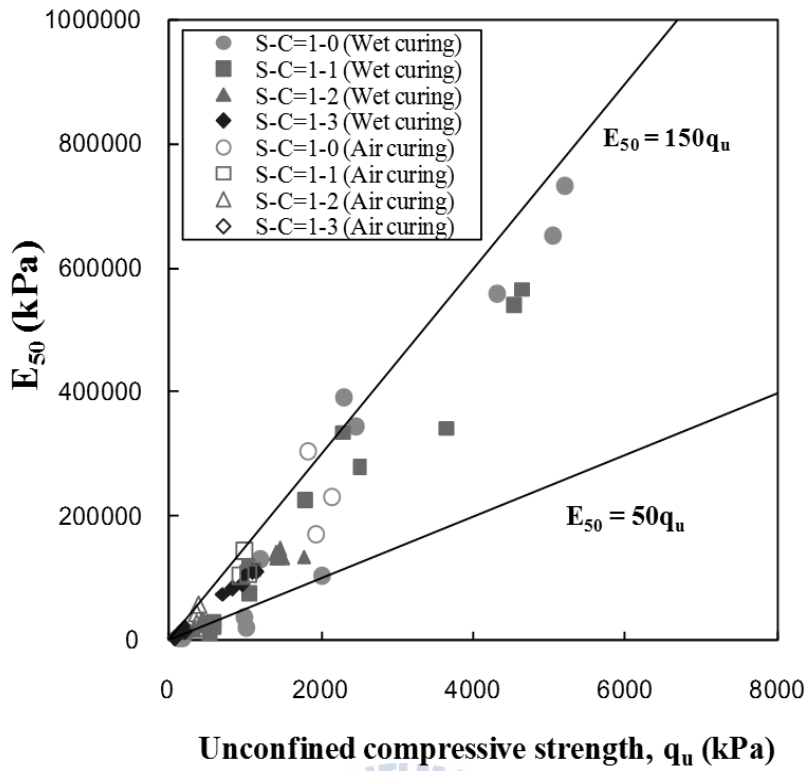


Fig. 2.32 일축압축강도와 변형계수 E_{50} (황중호, 2010)

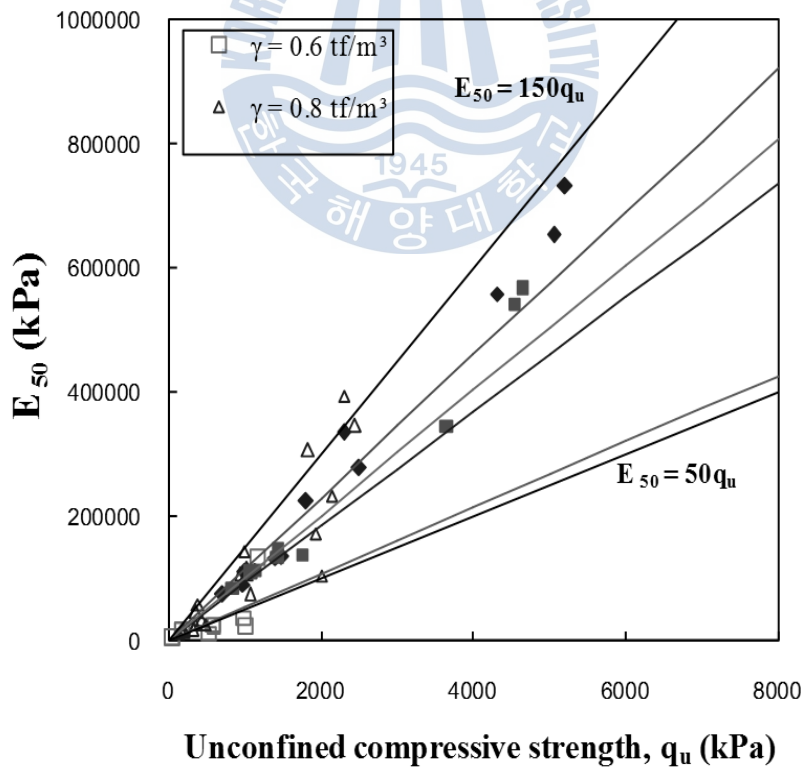


Fig. 2.33 단위중량에 따른 변형계수 E_{50} (황중호, 2010)

제 3 장 경량기포토의 교대 뒷채움재 적용성 해석

본 장에서는 경량성토공법중 하나인 경량기포토를 교대 뒷채움재로 적용성을 파악하기 위한 수치해석이 실시되었다. 교대 뒷채움을 타설경사 및 타설거리를 달리하여 해석을 실시하였다. 교대상부 및 말뚝두부의 수평변위와 임의위치에서의 심도별 수평변위와 침하량을 산정하였다. 본 해석에 사용된 해석프로그램은 "MIDAS-GTS ver. 410"으로 MIDAS information Technology Co.,Ltd.에서 개발한 유한요소해석을 위한 프로그램을 사용하였다.

3.1 해석프로그램

MIDAS-GTS의 해석기법은 유한요소법(Finite Element Method)을 적용한 프로그램이며 터널, 토류벽, 기초, 사면, 침투력 및 응력-침투력 연계해석등에 적용이 가능하고, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Hoek-Brown, Duncan-Chang의 다양한 탄소성 모델을 제공한다. 또한 시공단계에 따라 일부요소 및 지보재 요소의 반복적인 제거와 설치 가능하며, 지하수 침투해석, 발파, 지반지동 및 지진에 대한 동해석이 가능하다. 프로그램 적용분야는 터널해석, 지하구조물 기초 해석, 침투류 해석, 사면 해석, 토류벽 해석 등으로 다양하다(MIDAS-GTS). 일반적인 GTS의 해석흐름은 다음과 같다.

- (1) 기하 모델링(Geometry Modeling)
- (2) 요소망 생성(Mesh Generattion)
- (3) 해석조건의 부여(Analysis Condition)
- (4) 해석(Analysis)
- (5) 결과분석(Post-processing and Result Evaluation)

3.2 해석방법 및 내용

3.2.1 해석대상단면 및 적용 지반정수

본 논문에서는 현장에서 교대 및 말뚝이 먼저 시공이 이루어지는 경우를 고려하여

수치해석을 실시하였다. 연약지반이 포함된 3개의 서로 다른 재질로 구성된 지층에 교대 및 말뚝이 설치된 모델로 교대 배면 뒷채움으로 경량기포토를 적용하였을 경우의 영향성을 검토하고자 하였다. 지반 물성값은 문헌 값을 참조하였으며, 연구 목적을 위해 일부 수정하여 적용하였다.

Fig. 3.1은 해석대상단면이며, Table 3.1 및 Table 3.2는 지반 및 구조물 물성값을 나타내고 있다.

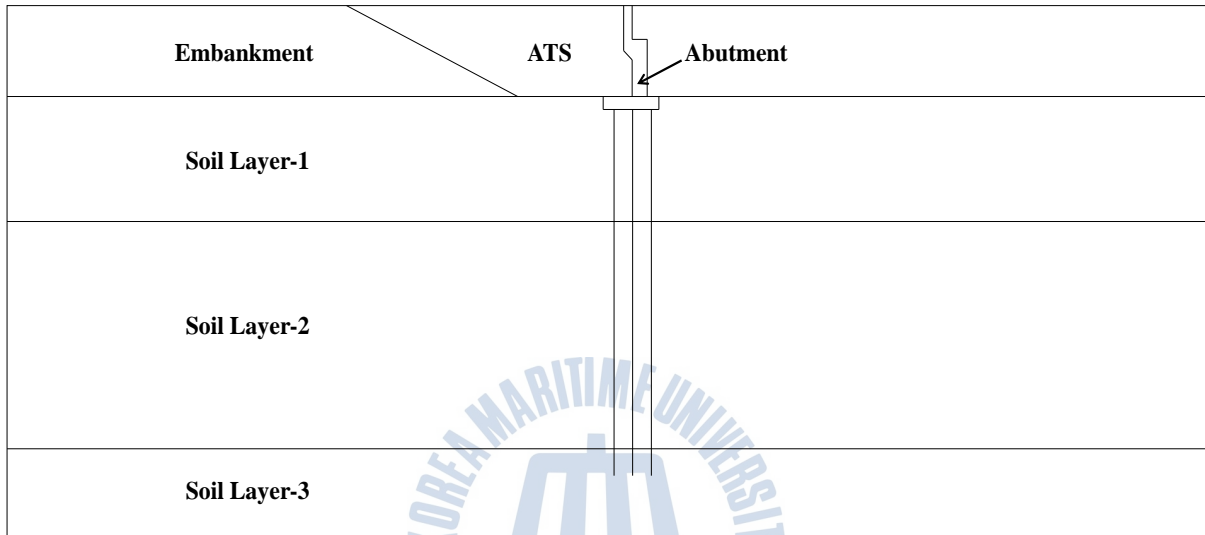


Fig. 3.1 해석단면

Table 3.1 수치해석 적용 지반 물성값

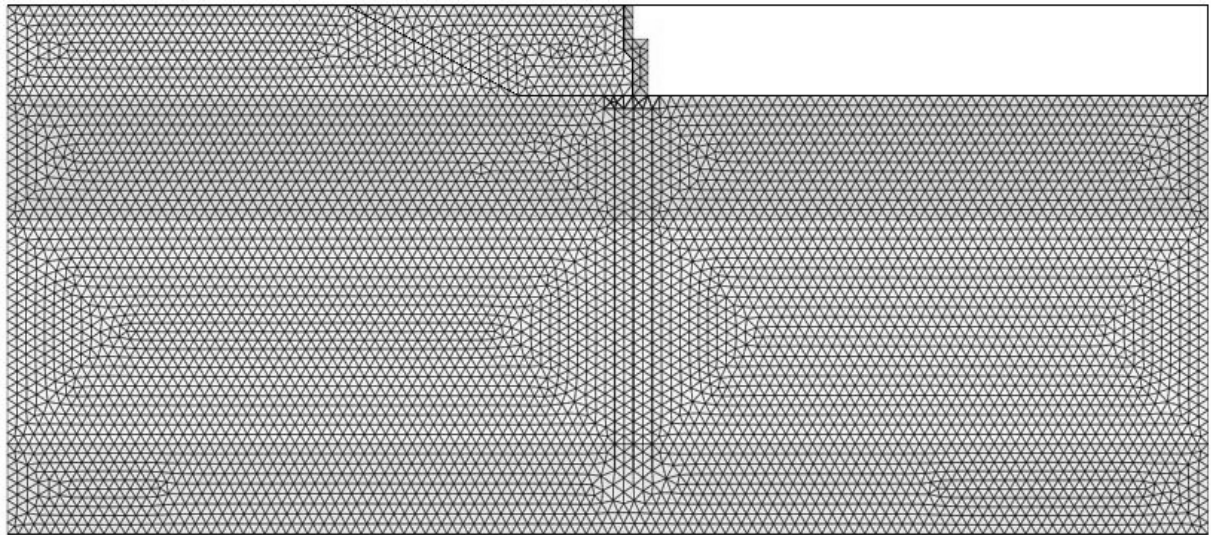
	S.L-1	S.L-2	S.L-3	Emb.	ATS
변형계수(tonf/m ²)	850	3500	50000	5000	10200
포아송비	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
단위중량(tonf/m ³)	1.7	1.7	2.3	1.65	0.8
포화단위중량 (tonf/m ³)	1.7	1.8	2.3	1.75	0.8
점착력(tonf/m ²)	5	2	20	2	12
마찰각(°)	20	32	35	30	0

Table 3.2 수치해석 적용 구조물 물성값

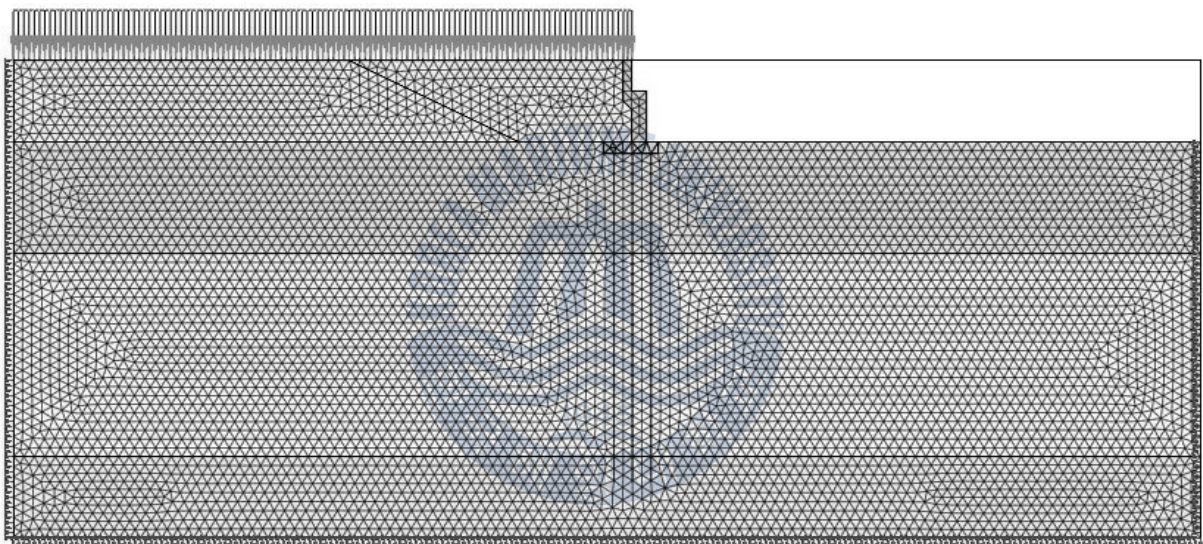
	Concrete	Pile
탄성계수(tonf/m ²)	2300000	21000000
포아송비	0.18	0.3
단위중량(tonf/m ³)	2.5	7.8
포화단위중량 (tonf/m ³)	2.5	-
점착력(tonf/m ²)	300	-
마찰각(°)	36	-

3.2.3 해석방법

본 연구에서는 교대 배면 뒷채움에 경량기포토 적용 범위에 따른 적용성을 평가하기 위해서 수치해석을 실시하였다. 연약지반이 포함된 서로 다른 재질로 구성된 지반은 탄소성모델을 사용하였고 교대 및 말뚝은 탄성모델을 적용하였다. 2D로 생성된 기하형상에 삼각형 종류의 요소망을 고차요소로 생성하였다. Fig 3.2(a)는 경량기포토 적용한 최종단계 요소망을 나타낸 것이다. S.L-3층 바닥면을 x, y방향의 변위를 구속하였고, S.L-1~S.L-3층의 양측면과 토사성토층을 구분하여 양측면을 수평방향의 변위만을 구속하여 지반경계조건 및 성토경계조건을 지정하였다. 토사성토 및 경량기포토 상부에는 교통하중을 고려하여 등분포하중 1.3 t/m²을 적용하였다. Fig 3.2(b)는 경계조건 및 등분포하중이 적용된 것을 나타낸 것이다. 시공단계해석을 위하여 원지반 조건에서 순차적으로 교대 및 말뚝 설치, 토사성토 시공, 경량기포토 시공, 교통하중 적용 순으로 시공단계를 정의하였다. 토사성토 및 경량기포토에 대한 영향성만 알아보기 위해 교대 및 말뚝 설치단계에서는 변위초기화를 실행하였다.



(a) 최종단계 요소망



(b) 경계조건 및 등분포하중 적용

Fig. 3.2 해석과정에 따른 해석단면

3.2.2 해석종류

교대의 측방이동을 방지하기 위해서 교대배면에 경량기포토가 적용 가능한지에 대한 판단을 위해 경량기포토의 적용범위별로 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서 변화시킨 적용범위는 Fig. 3.3과 같이 교대 푸팅 상부면에서 배면으로의 거리(B)를 변화시키고, 각각의 거리에서 타설경사(S)를 다양하게 변화시키면서 상호 차이를 분석하였다. 거리(B)의 변화는 교대높이(H)로 무차원화 하여 표현하였으며, 어떤 거리에 대한 경량

기포토의 타설경사는 1:S로 표현하였다. 해석대상으로 한 해석종류에 대해서는 Table 3.3에 상세하게 나타내었다.

교대배면에 토사를 성토하였을 때에 비해 경량기포토를 타설하였을 때의 효과를 확인하기 위해서 교대 상부(A1) 및 말뚝두부(P1)지점에서의 수평변위, 지표침하와 교대 배면에서의 지중경사계(I) 개념의 수평변위를 분석하였다.

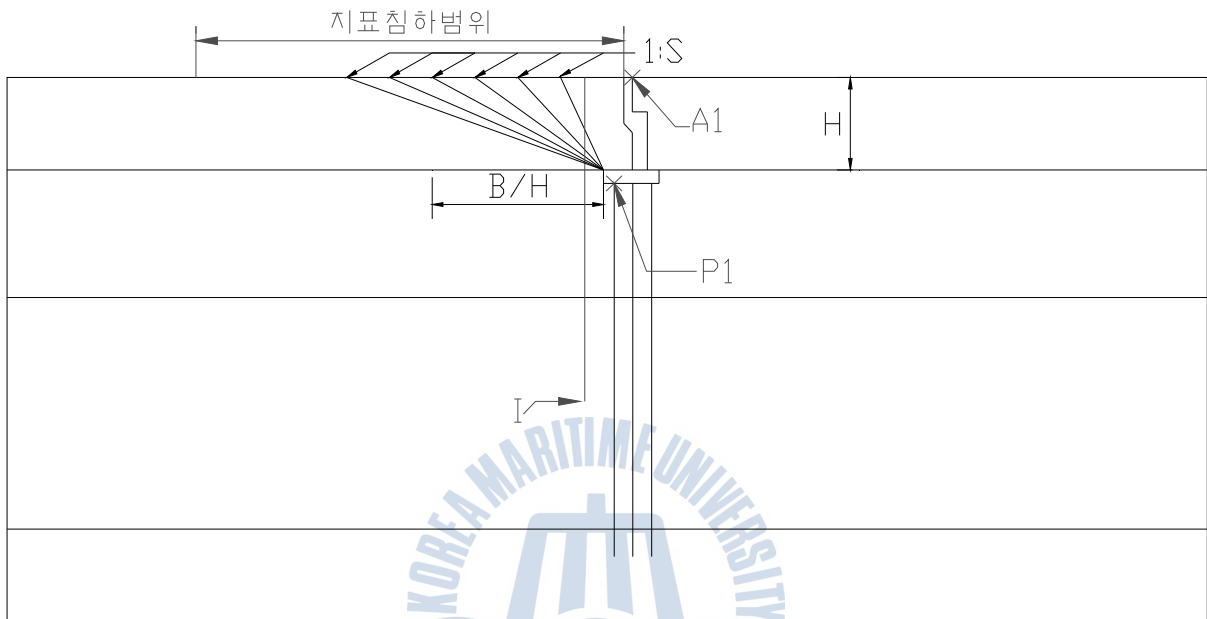


Fig. 3.3 해석조건 단면

Table 3.3 해석종류

타설거리(B/H)	타설경사(1:S)	해석수
0.0	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5	12
0.5	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	4
1.0	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	4
1.25	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	4
1.5	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	4
1.75	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	4
2.0	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	4

3.3 해석결과

3.3.1 타설경사

경량기포토를 교대배면에 뒷채움재로 사용할 경우 교대 및 지반에 미치는 영향을 파악하고자 타설경사(1:S)를 달리하여 적용하였으며, 교대 뒷채움을 토사성토로 적용했을 경우와 비교분석 하였다. 타설경사(1:S)를 S=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5로 적용하여 12가지 경우로 나누어 해석하였다(Fig. 3.4).

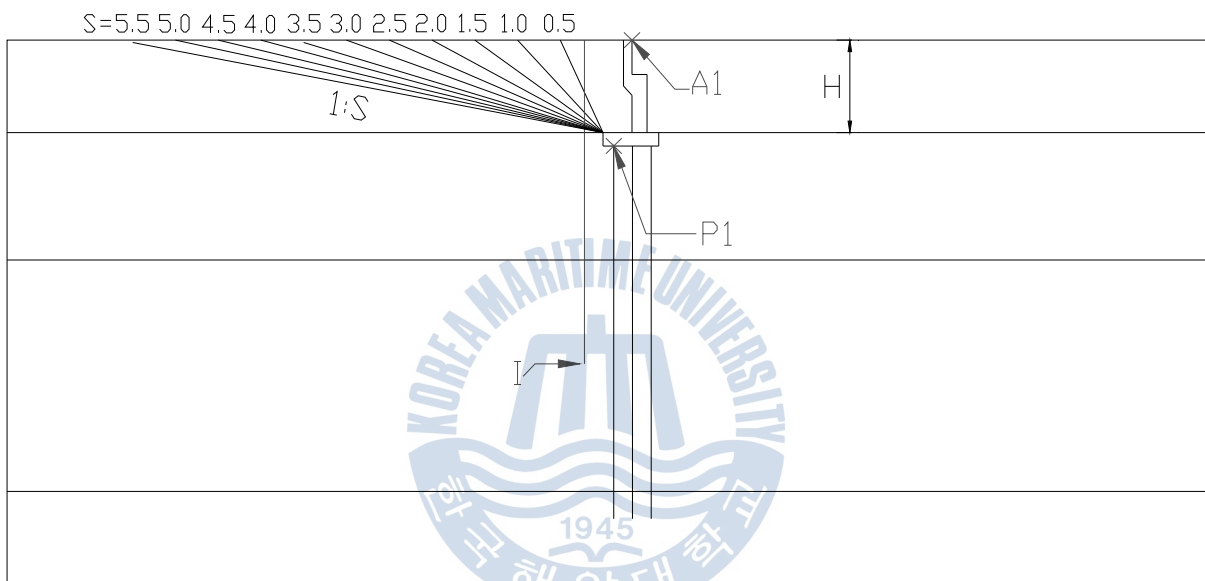


Fig. 3.4 타설경사(1:S)에 해석도면

가. 수평변위

Fig. 3.5와 Fig. 3.6은 교대상부(A1) 및 말뚝두부(P1) 지점에서의 수평변위에 대한 해석결과이다. 교대 뒷채움재를 경량기포토로 적용했을 경우 토사성토(Emb.)보다 교대상부(A1) 및 말뚝두부(P1)에서의 수평변위가 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.5에서 경사가 증가함에 따라 교대상부 수평변위가 선형적으로 감소하다가 타설경사 S=5 이후 수평변위가 교대 배면쪽으로 발생하는 현상이 나타났다. 경량기포토 타설경사가 S=5일 때까지 타설경사가 증가 할수록 수평변위가 감소하는 영향으로 효과적이지만 그 이후 경사에서는 변위가 반대로 발생하기 때문에 주의가 필요할 것으로 판단된다.

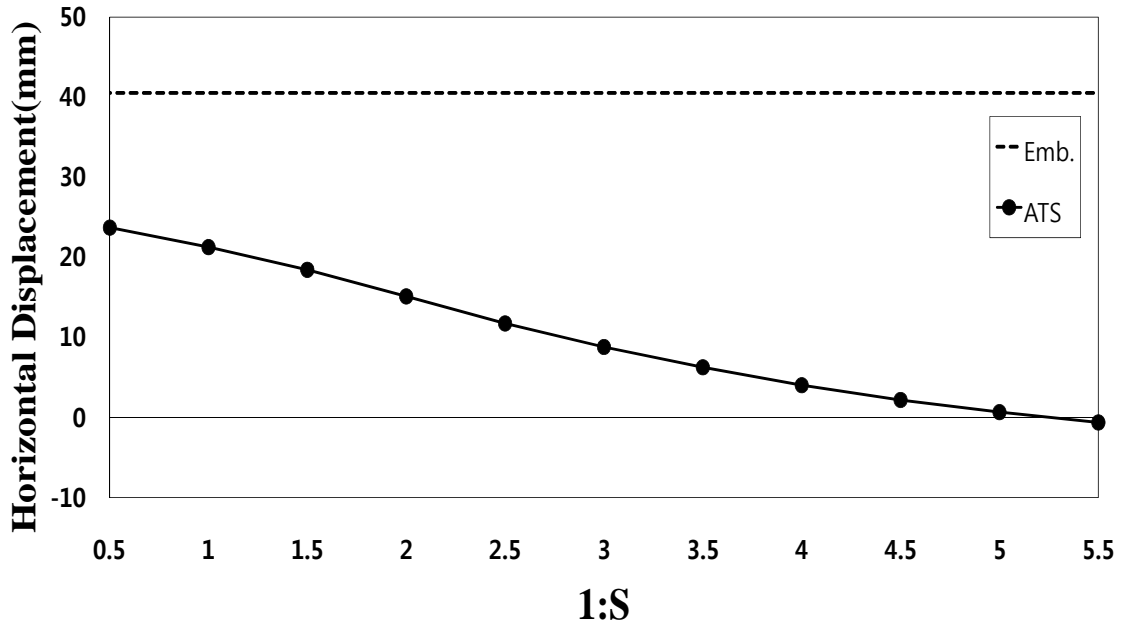


Fig. 3.5 타설경사에 따른 교대상부(A1) 수평변위

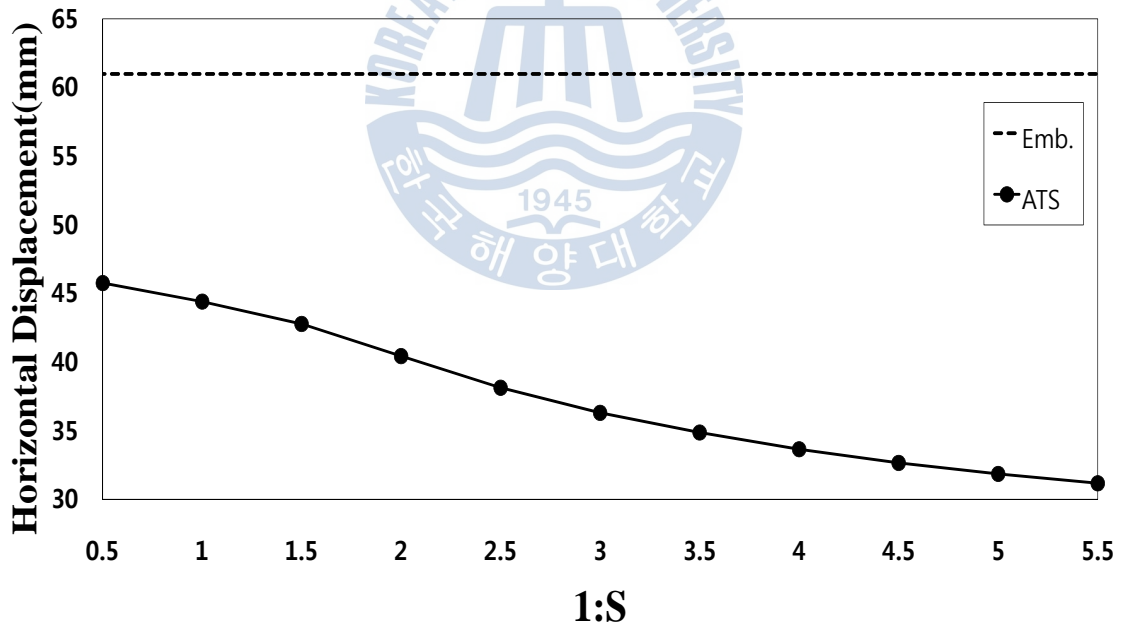


Fig. 3.6 타설경사에 따른 말뚝두부(P1) 수평변위

Tabel 3.4와 Fig. 3.7은 토사성토시 발생하는 수평변위와 타설경사에 따른 수평변위를 비교하여 감소비율로 정리하였다. 타설경사가 증가할수록 감소비율도 증가하였고 S=5일 때 교대상부에서의 감소비율이 100%에 가까워지는 것을 알 수 있었다. 또한 교대상부에서의 감소비율이 40~100%으로 범위가 큰 반면에, 말뚝두부에서의 감소비율은 20~50%로 보다 작은 것으로 나타난 것으로 보아, 경량기포토로 적용했을 경우 말뚝두부보다 교대상부에 더 효과적인 영향으로 작용하는 것으로 판단된다.

해석결과를 통해 교대 뒷채움을 토사성토로 적용했을 경우보다 경량기포토로 적용했을 경우 교대의 측방 이동을 억제 하는데 효과적이라 판단된다. 교대상부에서의 수평변위는 경사가 증가함에 따라 감소하지만 일정 경사 이후에서는 성토체 쪽으로 변위가 발생하여 주의가 필요한 것으로 판단된다.

Table 3.4 토사성토에 따른 타설경사 수평변위 감소비율 (단위: %)

타설경사(1:S)	교대상부(A1)	말뚝두부(B1)
0.5	41.5	25.0
1.0	47.5	27.2
1.5	54.5	29.9
2.0	62.7	33.7
2.5	71.0	37.5
3.0	78.3	40.5
3.5	84.5	42.8
4.0	90.1	44.8
4.5	94.6	46.5
5.0	98.4	47.8
5.5	101.5	48.9

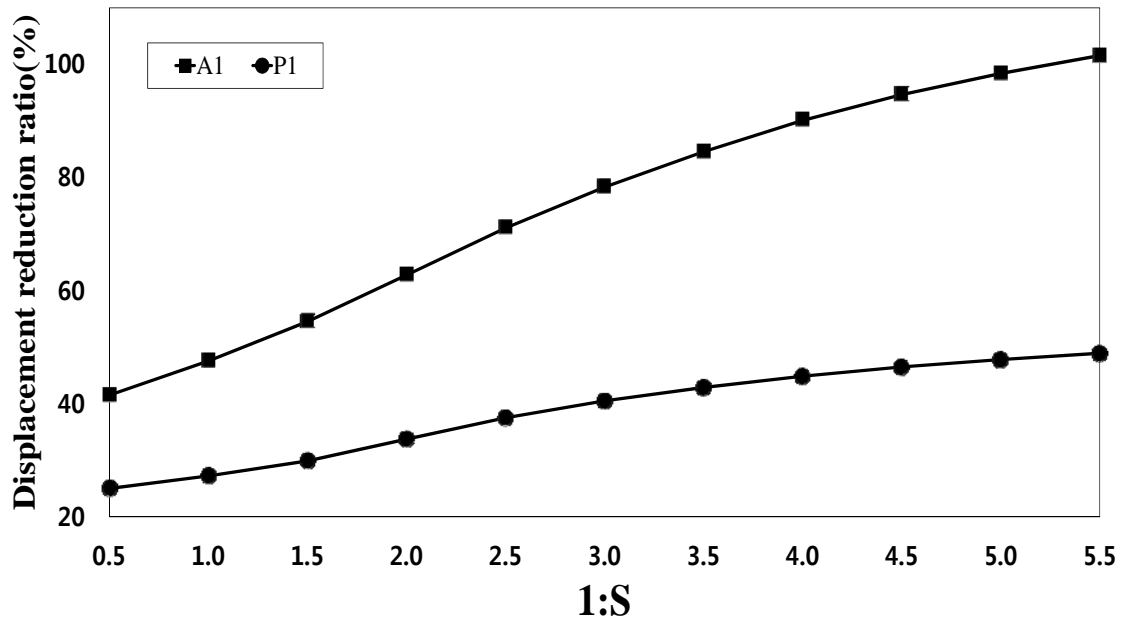


Fig. 3.7 토사성토에 따른 타설경사 수평변위 감소비율

경량기포토가 교대 배면 및 하부지반 수평변위에 미치는 영향을 파악하기 위하여 시공현장에서 지중경사계(Inclinometer)를 설치한 개념으로 Fig. 3.4와 같이 교대 배면에 경량기포토가 포함된 한 지점을 지정하여 지표로부터 S.L-2까지의 수평변위를 확인하였다.

Fig. 3.8은 타설경사에 따른 교대배면 및 하부지반에서의 수평변위에 대한 해석결과이다. 전체적으로 비슷한 양상으로 수평변위가 발생하고, 세부적으로 교대배면, S.L-1, S.L-2 각 층마다 변위가 다르게 발생하는 것을 알 수 있다. 교대배면에서의 변위는 토사성토(Emb.) 적용시보다 경량기포토 적용시 큰 변화가 없으며, 변위가 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 타설경사 $S=0.5, 1.0$ 으로 적용 시 교대 하부에서 변위가 발생하는데 이는 지중경사계가 경량기포토와 토사성토 경계구간에 위치로 인한 영향으로 판단된다.

연약지반인 S.L-1에서 변위의 변화가 가장 크게 나타나다가 S.L-2에서 변위가 감소하면서 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 특히, S.L-1의 심도 약 1/3 지점에서 최대 수평변위가 발생하였다. Fig. 3.9는 최대수평변위를 정리한 해석결과이다. 토사성토 ($S=0$) 경우보다 경량기포토를 적용하였을 때 변위값은 작게 일어났으며, $S=0.5\sim 1.5$ 에서는 변위가 비슷하게 발생하였다. 그 이후의 경사에서는 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.

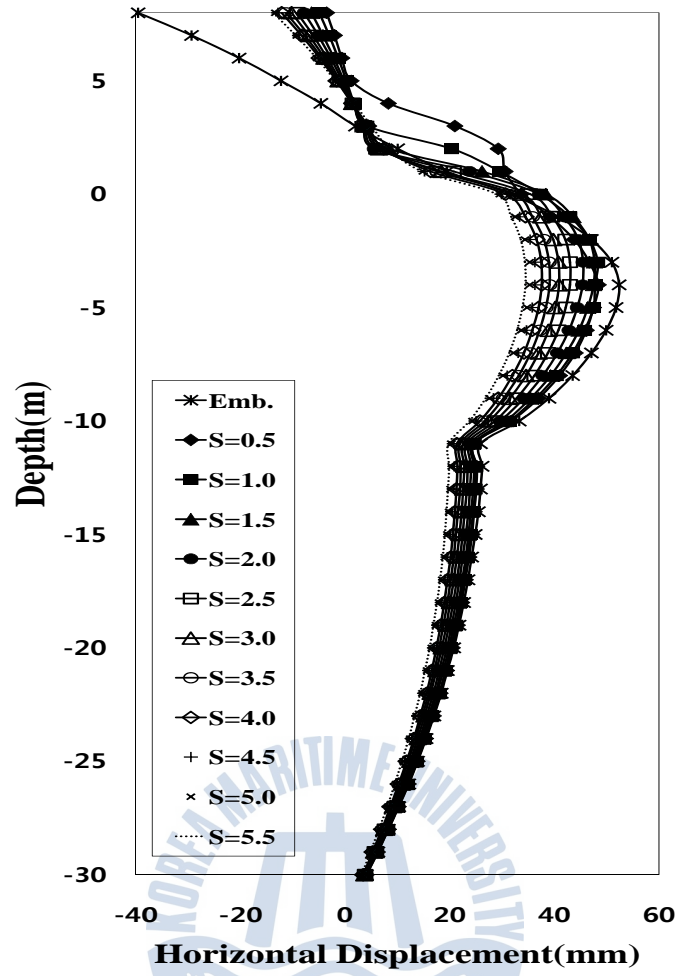


Fig. 3.8 타설경사 변화에 따른 지중경사계

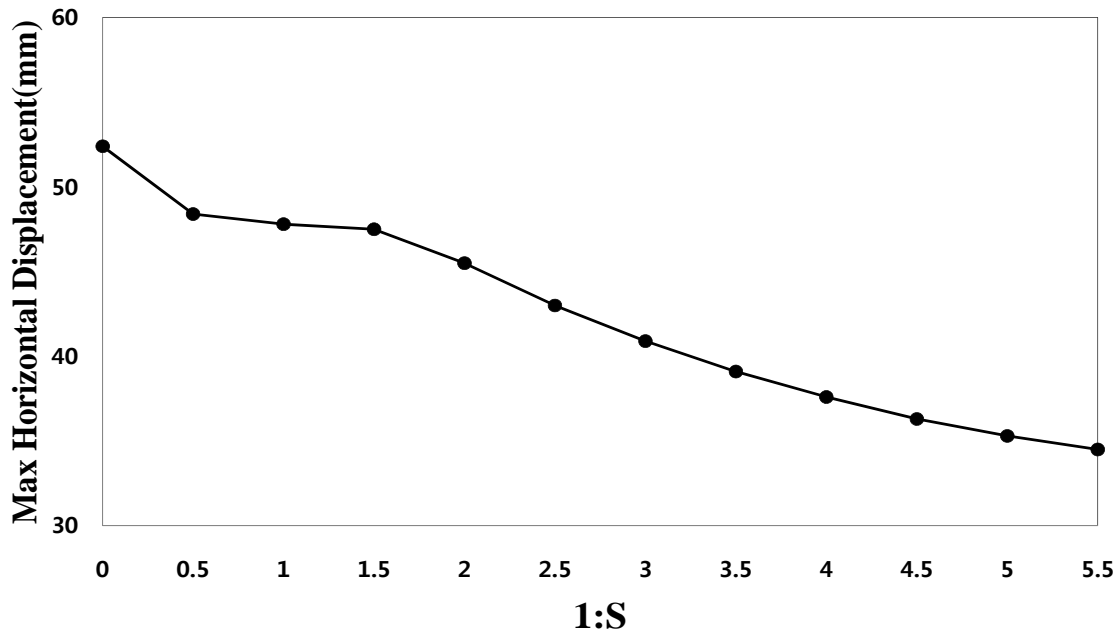


Fig. 3.9 타설경사에 따른 최대수평변위(S.L-1)

나. 침하량

교대 배면 뒷채움재를 경량기포토로 적용했을 경우 타설경사에 따른 지표침하량 해석결과를 Fig. 3.10에 나타내었다. 토사성토(Emb.) 시 교대 접속부에서부터 침하가 급격하게 발생하는 것을 알 수 있다. 반면에 경량기포토 적용 구간에서는 침하량이 토사성토로 적용했을 경우보다 작게 발생했으며, 전체적인 침하경향은 유사하게 나타났다.

타설경사가 증가함에 따라 급격하게 침하가 발생하는 지점이 교대배면 쪽에서 성토체 쪽으로 거리가 이동되는 현상을 볼 수 있는데 이는 경량기포토 적용 시 상부 성토구간과의 경계구간에서 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이 구간에서 단차가 예상되므로 현장 시공 시 이와 같은 문제점을 고려하여 안정화 될 수 있도록 시공이 이루어져야 할 것이다.

최대 침하가 발생하는 지점에 대한 침하각 정리를 Fig. 3.11에 나타내었다. 토사성토(S=0)를 적용한 경우 보다 경량기포토를 적용 했을 경우 침하각이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 경량기포토 구간에서 교대와의 접속부에서 주행성이 토사성토때 보다 양호할 것으로 판단된다. 반면에 타설경사 S=4.5에서부터 침하각이 갑자기 증가함으로 인해 문제가 예상되므로 이후 경사는 적용을 피해야 할 것으로 판단된다.

위와 같은 결과를 통해 교대 배면 뒷채움재로 경량기포토를 적용했을 경우 침하를 최소화 하는데 매우 효과적인 방법임을 알 수 있다.

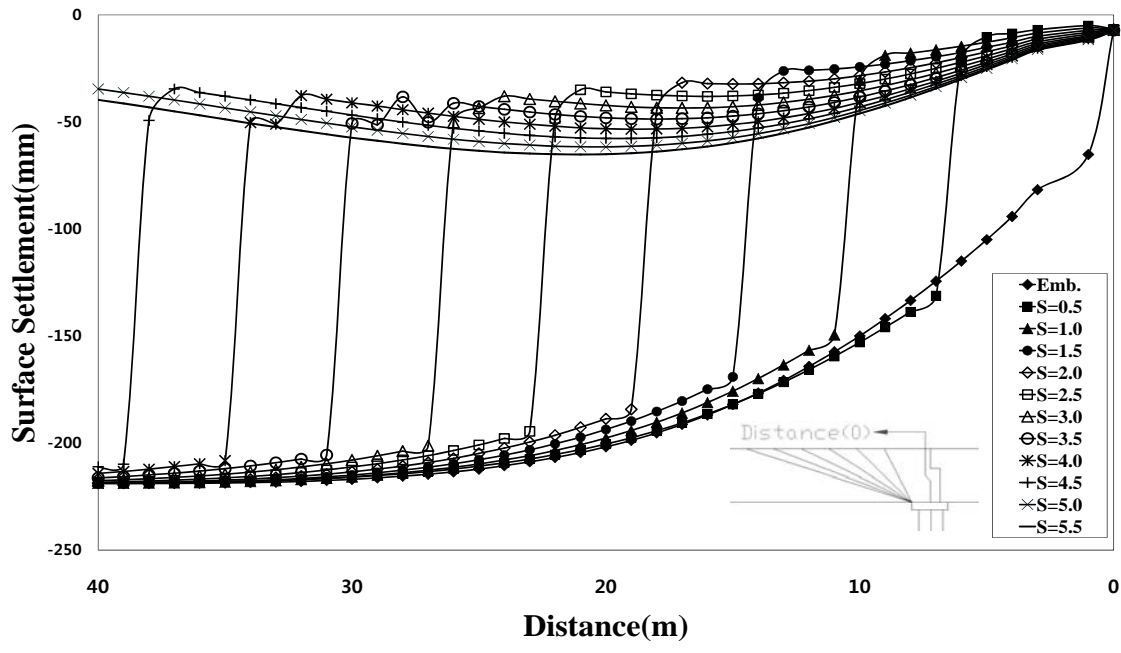


Fig. 3.10 타설경사 변화에 따른 지표침하량

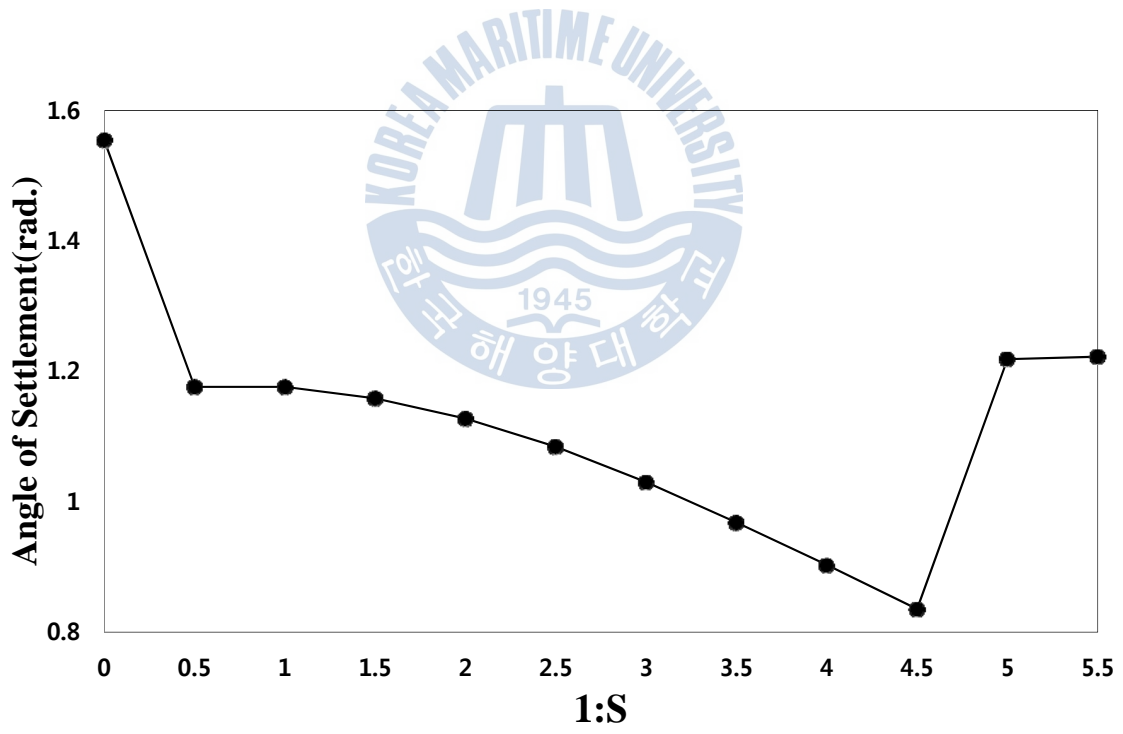


Fig. 3.11 타설경사에 대한 지표침하각

3.3.2 타설거리

경량기포토를 교대 뒷채움재로 적용할 경우 교대 및 지반에 미치는 영향을 파악하고자 타설거리(B/H)를 달리하여 적용하였다. 타설경사(1:S) S=0.5, 1.0, 1.5, 2.0에 각 타설거리(B/H) 0, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0으로 적용하여 28가지 경우로 나누어 해석을 실시하였다(Fig. 3.12).

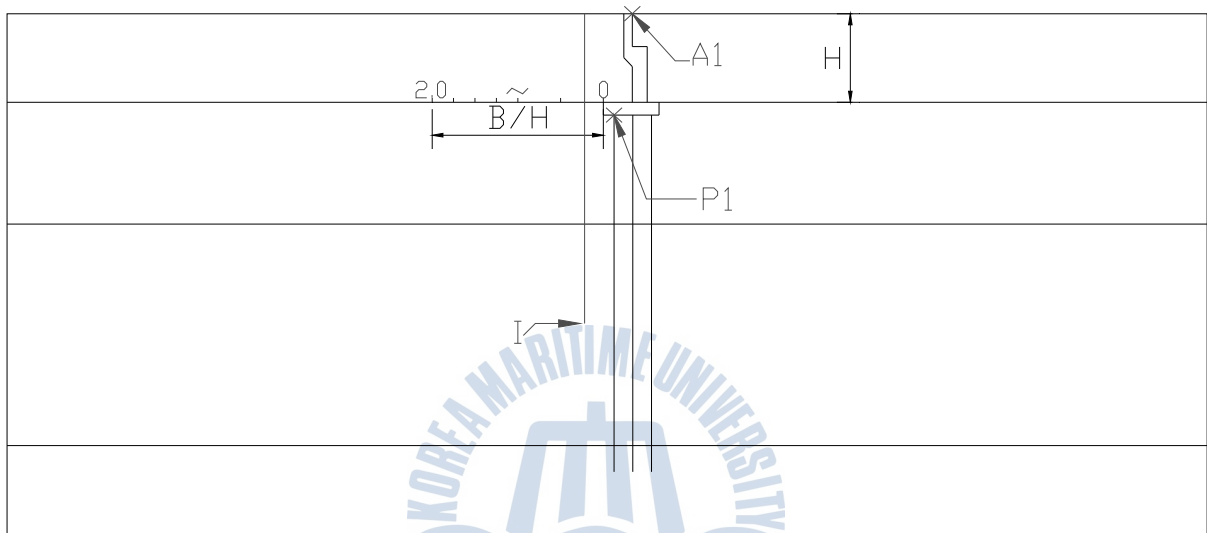


Fig. 3.12 타설거리(B/H) 도면

가. 수평변위

타설거리(B/H)에 따른 교대상부(A1) 및 말뚝두부(P1)에서의 수평변위에 대한 해석결과를 Fig. 3.13과 Fig. 3.14에 나타내었다.

교대상부(A1)에서의 수평변위는 타설거리 B/H=0.5 이후부터 선형적으로 감소하다 타설경사 S=2일 때 B/H=1.75에서부터 성토체 쪽으로 변위가 발생하기 시작하면서 B/H=2일 때 모든 타설경사가 같은 현상이 발생하였다. S=2일 때 B/H= 1.5에서 최소 변위 값이 나타났고, S=0.5, 1.0에서 타설거리 변화에 따른 수평변위 값은 서로 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다(Fig. 3.13). Fig. 3.14와 같이 말뚝두부(P1)에서의 수평변위는 타설경사와 관계없이 타설거리 B/H=1.5 이후로 수평변위 값들이 비슷하게 나타났다. B/H=0, 0.5에서 S=2일 때 최소수평변위가 나타났지만, B/H=1 이후로 S=1.5일 때 최소 변위가 나타나는 것을 알 수 있다.

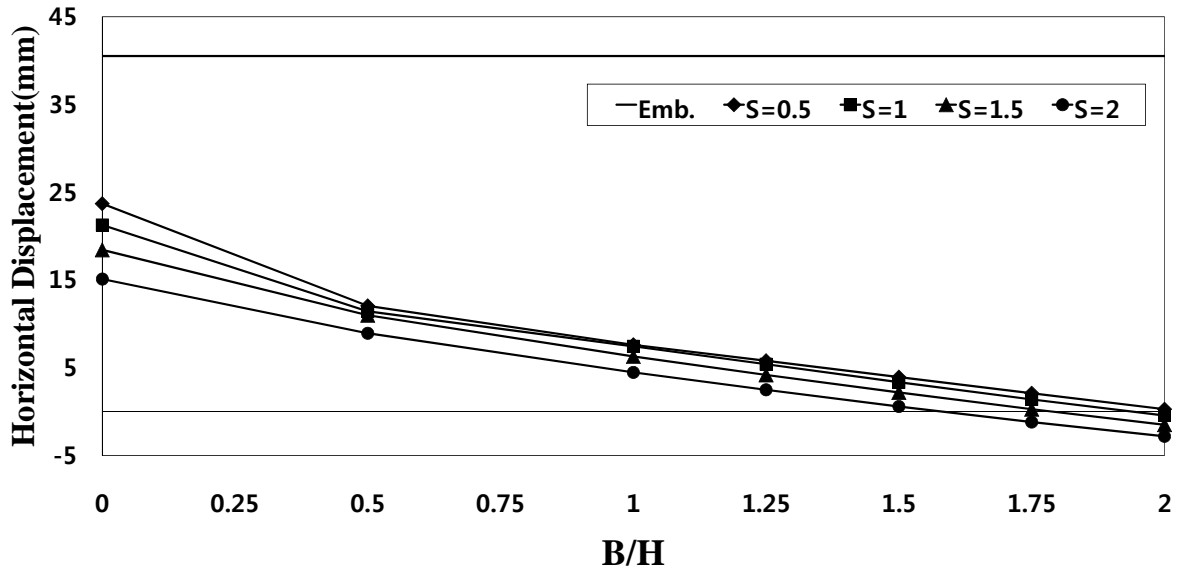


Fig. 3.13 타설거리 변화에 따른 교대상부(A1) 수평변위

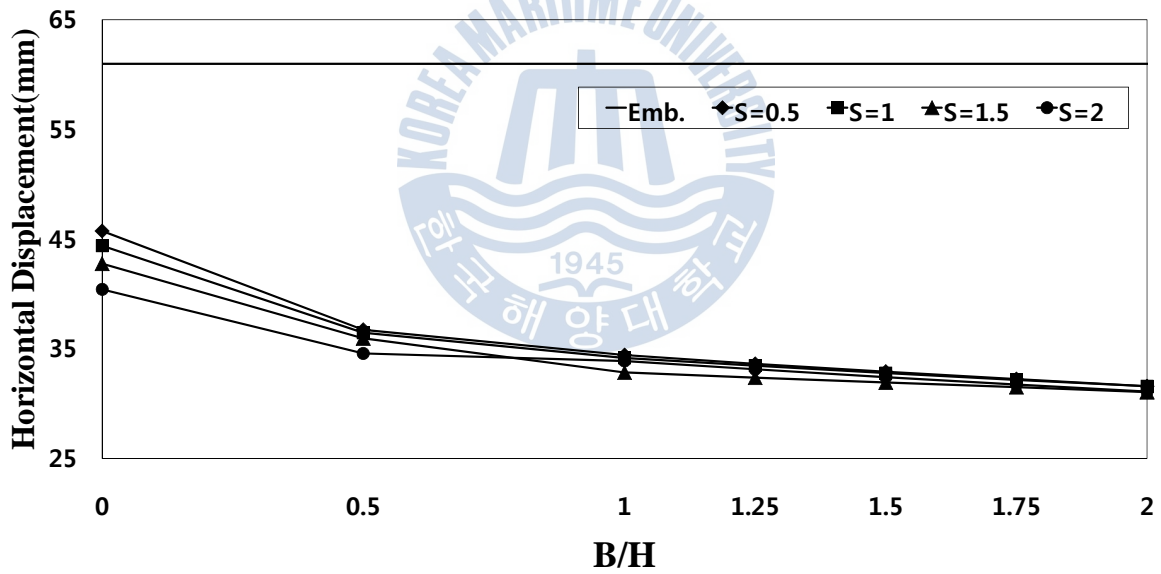


Fig. 3.14 타설거리 변화에 따른 말뚝두부(P1) 수평변위

토사성토 시 발생하는 수평변위와 타설거리 변화에 따라 발생하는 교대상부(A1) 및 말뚝두부(P1)에서의 수평변위를 비교하여 감소비율로 정리하여 Fig. 3.15와 Fig. 3.16으로 나타내었으며, Table 3.5는 교대상부(A1) 및 말뚝두부(P1) 감소비율 값을 정리하였다. 교대상부(A1)에서의 감소비율은 $B/H=0.5$ 이후에서 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, $S=0.5, 1.0$ 은 $B/H=1$ 이후부터 감소비율이 비슷하게 발생하는 것을 알

수 있다(Fig. 3.15).

말뚝두부(P1)에서 B/H=0, 0.5에서 감소비율이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 반면에 S=2일 때 B/H=0.5~1.0에서 감소 비율이 비슷하게 나타났으며, S=1.5일 때보다 낮은 감소비율이 나타났다(Fig. 3.16). 타설경사의 변화에 따른 감소비율과 마찬가지로 교대상부에서의 감소비율이 40~100%으로 범위가 큰 반면에, 말뚝두부에서의 감소비율은 20~50%로 작은 범위로 나타났다.

해석결과를 통해 타설거리가 증가함에 따라 경량기포토가 수평변위가 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 교대 뒷채움재로 경량기포토를 적용할 경우, 교대의 측방이동을 방지하는데 효과적으로 작용하는 것을 알 수 있다. 또한, 타설경사와 마찬가지로 타설거리에 따라 수평변위가 감소하는 경향이 나타나기 때문에 현장에서 적용할 경우 이를 고려하여 시공이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Table 3.5 토사성토에 따른 타설거리 수평변위 감소비율 (단위 : %)

타설경사(1:S) 타설거리(B/H)	교대상부(A1)				말뚝두부(B1)			
	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2
0	41.5	47.5	54.5	62.7	25.0	27.2	29.9	33.7
0.5	70.3	71.8	72.9	78.0	39.8	40.2	41.0	43.3
1	81.2	81.6	84.5	89.0	43.5	44.0	46.2	44.4
1.25	85.7	86.7	89.7	93.9	44.9	45.1	46.9	45.7
1.5	90.3	91.7	94.6	98.6	46.0	46.2	47.6	46.9
1.75	94.8	96.6	99.3	102.9	47.2	47.3	48.3	48.0
2	99.3	101.1	103.7	107.0	48.2	48.2	49.1	49.0

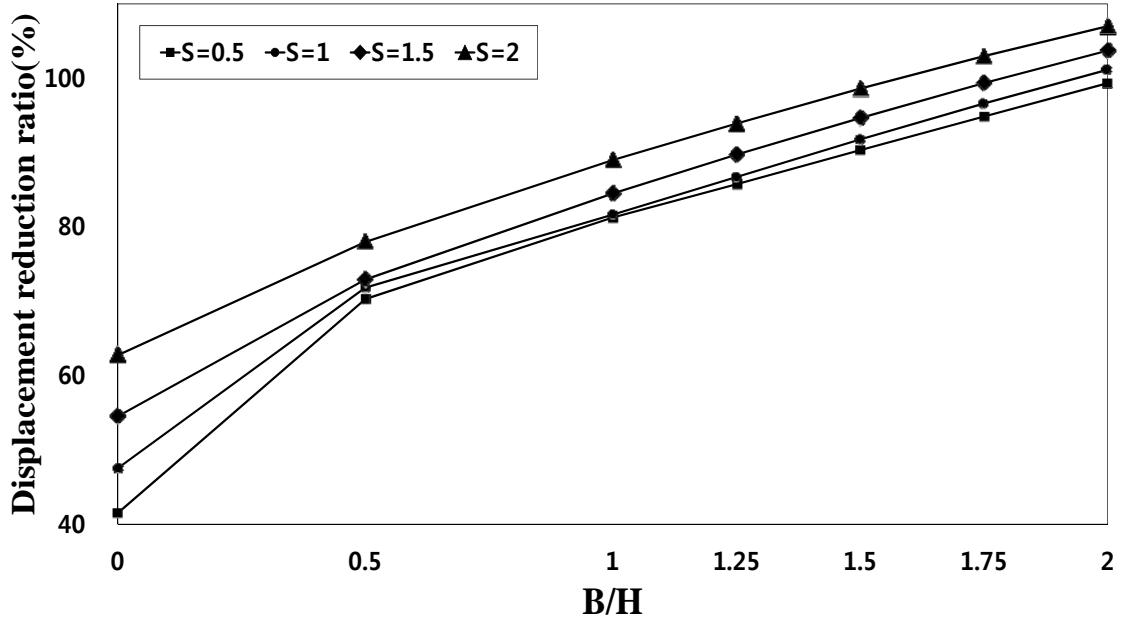


Fig. 3.15 토사성토에 따른 타설거리 교대상부(A1) 감소비율

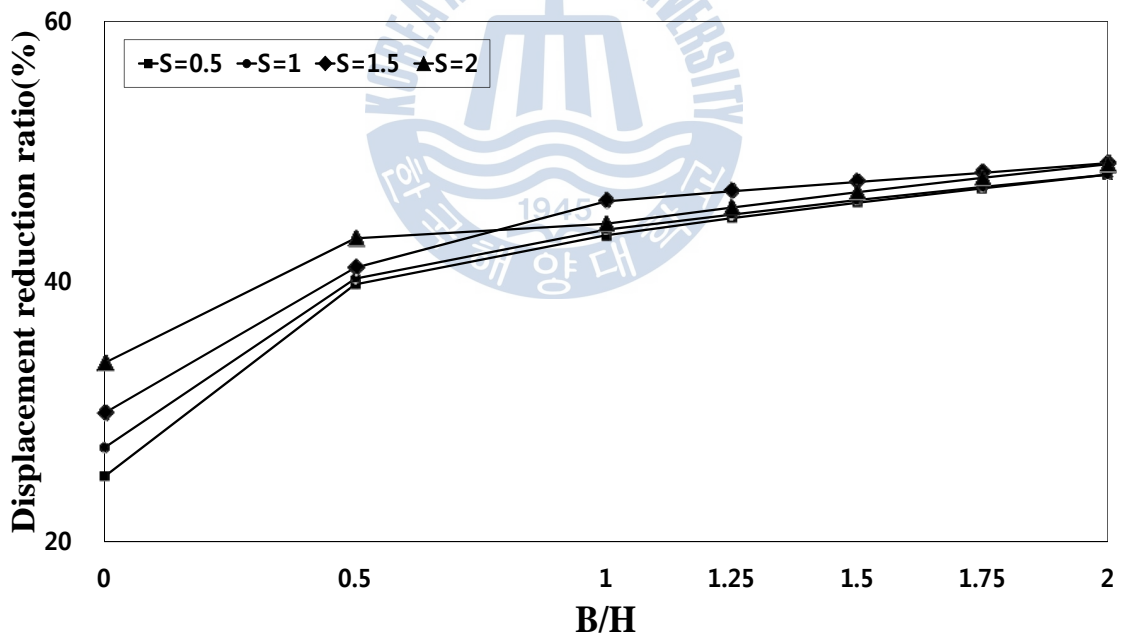
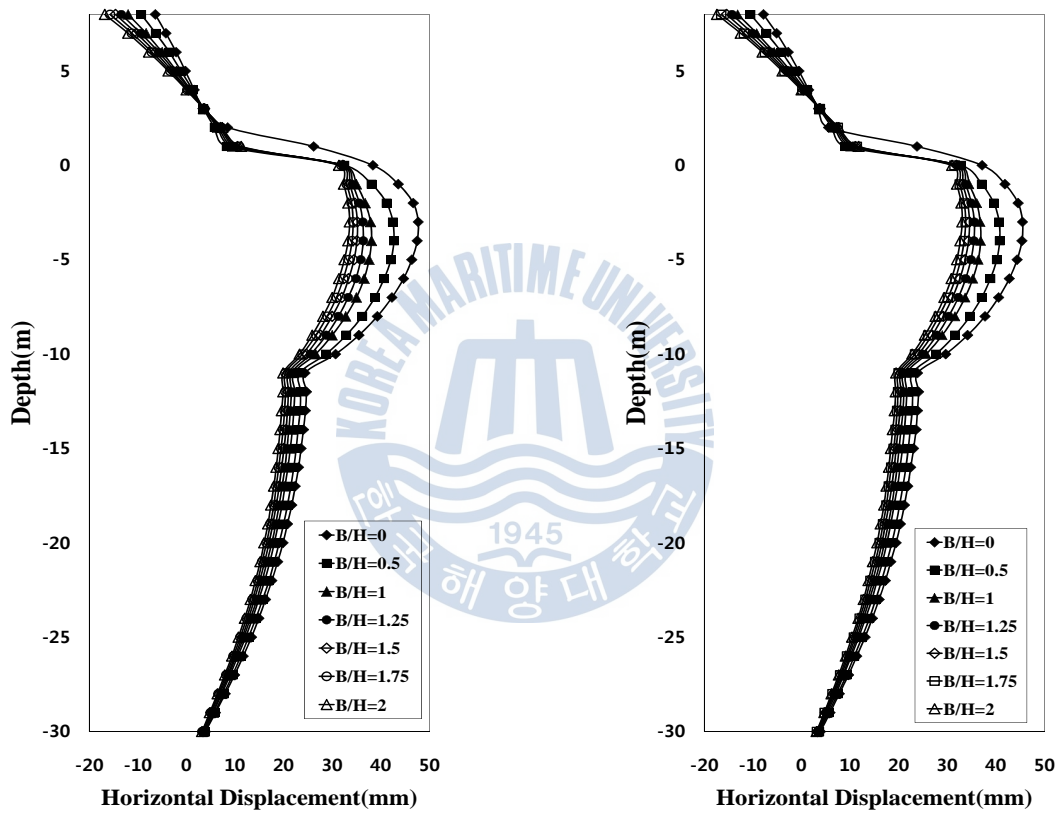


Fig. 3.16 토사성토에 따른 타설거리 말뚝두부(P1) 감소비율

경량기포토가 교대 배면 및 하부지반 수평변위에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 3.12와 같이 교대 배면의 경량기포토가 포함된 한 지점을 지정하여 지표로부터 S.L-2까지의 수평변위를 확인하였다. Fig. 3.17은 타설거리의 변화에 따른 수평변위

해석결과이다. 전체적으로 교대배면, S.L-1, S.L-2인 각 층의 경계로부터 수평변위가 비슷한 현상으로 변화하는 경향이 나타났다. 또한, 연약지반인 S.L-1에서 수평변위의 변화가 크게 발생하는 현상이 나타났고, 타설거리가 증가할수록 수평변위가 감소하였다. 특히, 타설거리 $B/H=0, 0.5$ 인 경우 나머지 경우 보다 수평변위 차이가 크게 일어나는 현상을 볼 수 있다. 최대수평변위는 S.L-1의 심도 약 1/3 지점에서 대부분 발생했으며, 그 값들은 Fig. 3.18과 같다. $B/H=0, 0.5, 1$ 에서 각 경사의 최대수평변위가 급속하게 감소하다 그 이후엔 선형적으로 감소하면서 비슷한 값으로 수평변위가 발생하였다.



(a) $S=1.5$

(b) $S=2.0$

Fig. 3.17 타설거리 변화에 따른 지중경사계

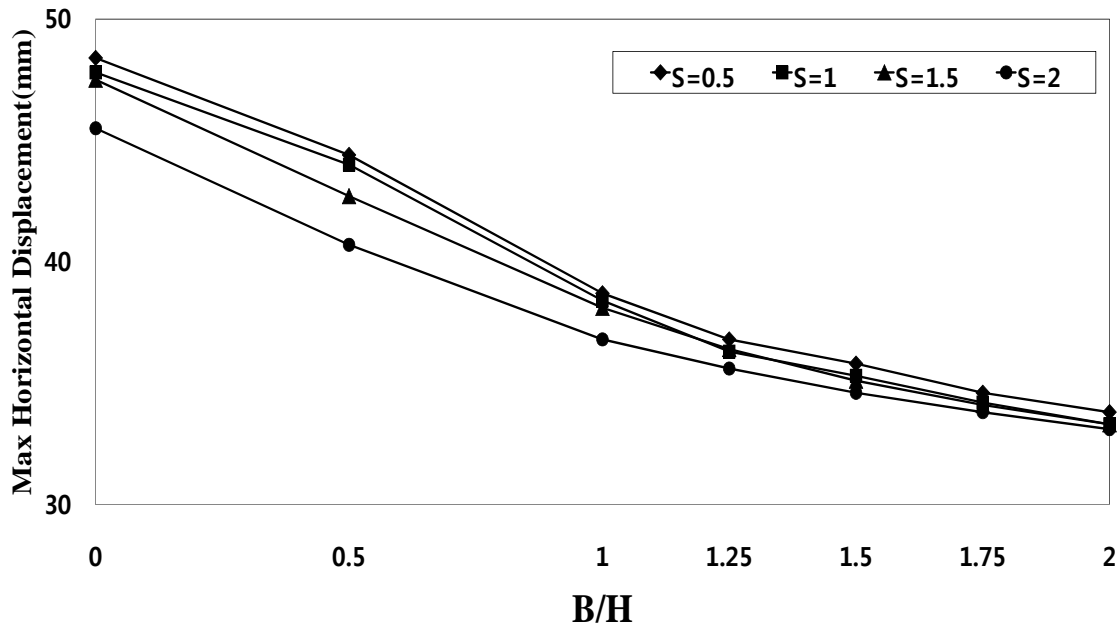
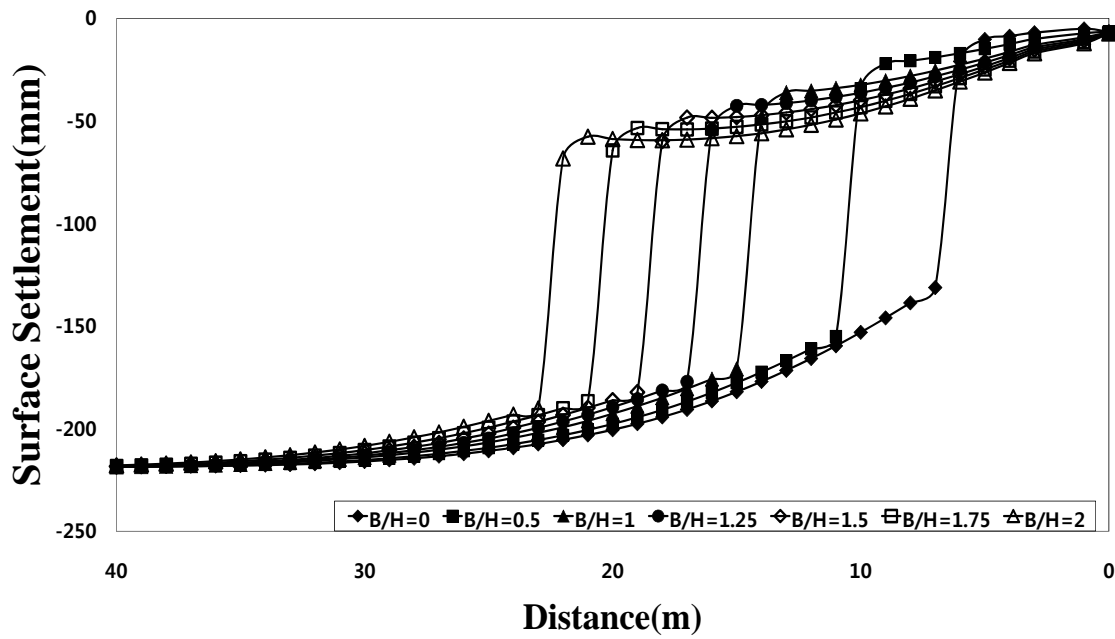


Fig. 3.18 타설거리 변화에 따른 최대수평변위

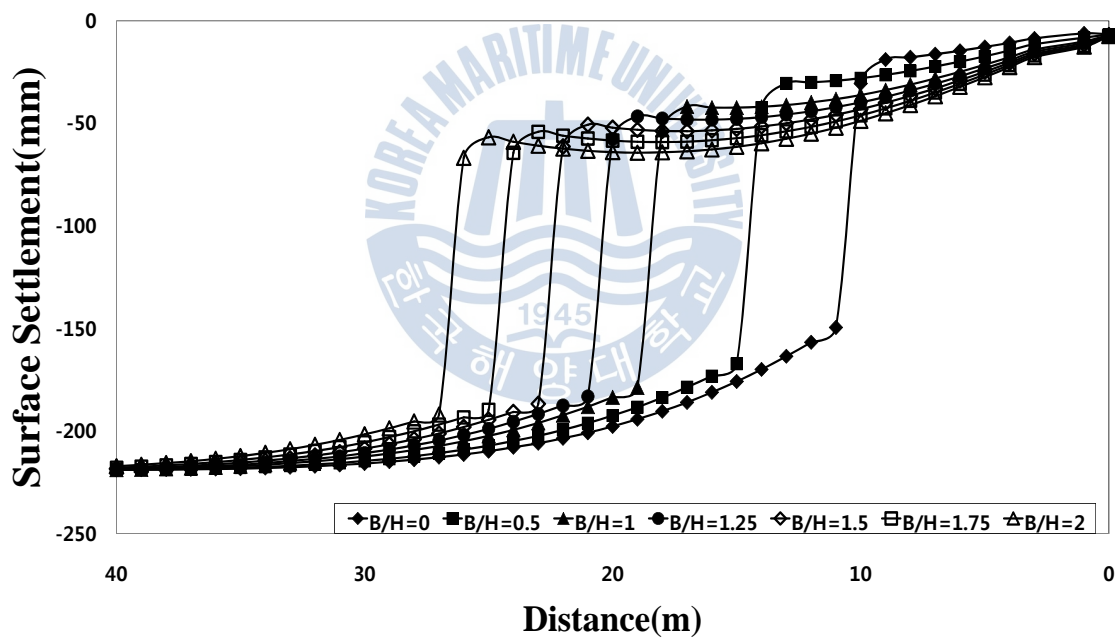
나. 침하량

Fig. 3.19는 교대 뒷채움재로 경량기포토를 타설거리 변화에 따라 적용했을 경우 발생하는 지표침하량 해석결과이다. 토사성토구간에서 발생하는 침하량이 경량기포토를 적용한 구간에서 보다 많은 침하량을 발생하는 것을 알 수 있다. 이로 인해 경량기포토가 침하량을 최소화 하는데 효과적으로 작용할 것이라 판단된다. 또한, 타설거리가 증가할수록 급격하게 침하가 발생하는 지점이 교대 배면쪽에서 성토체 쪽으로 거리가 이동하는 모습을 확인할 수 있다. 이는 토사성토 구간과 경량기포토 구간의 경계구간으로써 큰 침하량 차이가 발생하기 때문에 단차방지를 위해 현장 시공 시 이를 최소화하여 안정이 될 수 있도록 시공이 이루어져야 할 것이다.

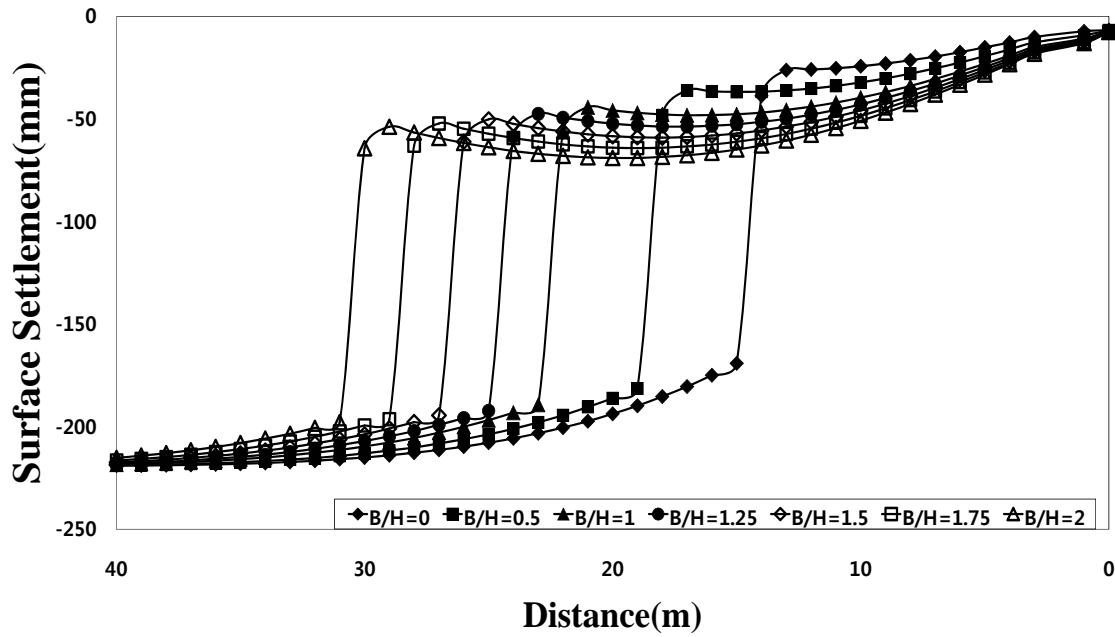
최대 침하가 발생하는 지점에 대한 침하각 정리를 Fig. 3.20에 나타내었다. 침하각은 타설경사 $S=0.5, 1.0$ 일 때 타설거리 $B/H=1$ 때까지 증가하다가 감소하는 현상이 나타났고, $S=1.5, 2.0$ 인 경우 타설거리가 증가함에 따라 침하각이 감소되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 침하각이 감소함으로써 도로의 주행성을 안정화 시킬 수 있을 것이라 판단된다.



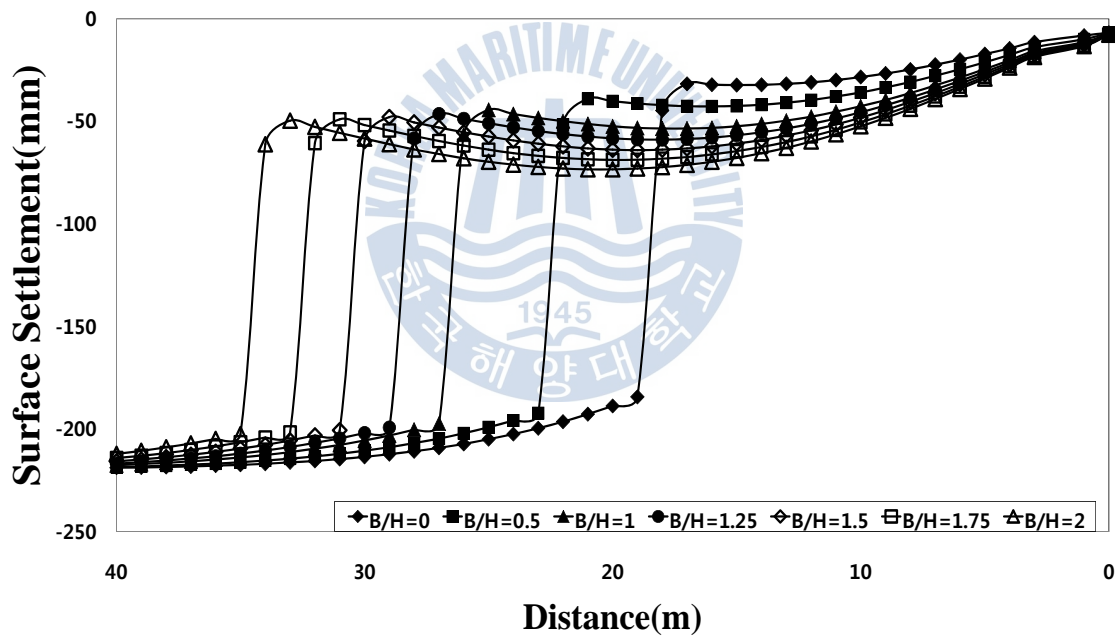
(a) $S=0.5$



(b) $S=1.0$



(a) $S=1.5$



(b) $S=2.0$

Fig. 3.19 타설거리 변화에 따른 지표침하량

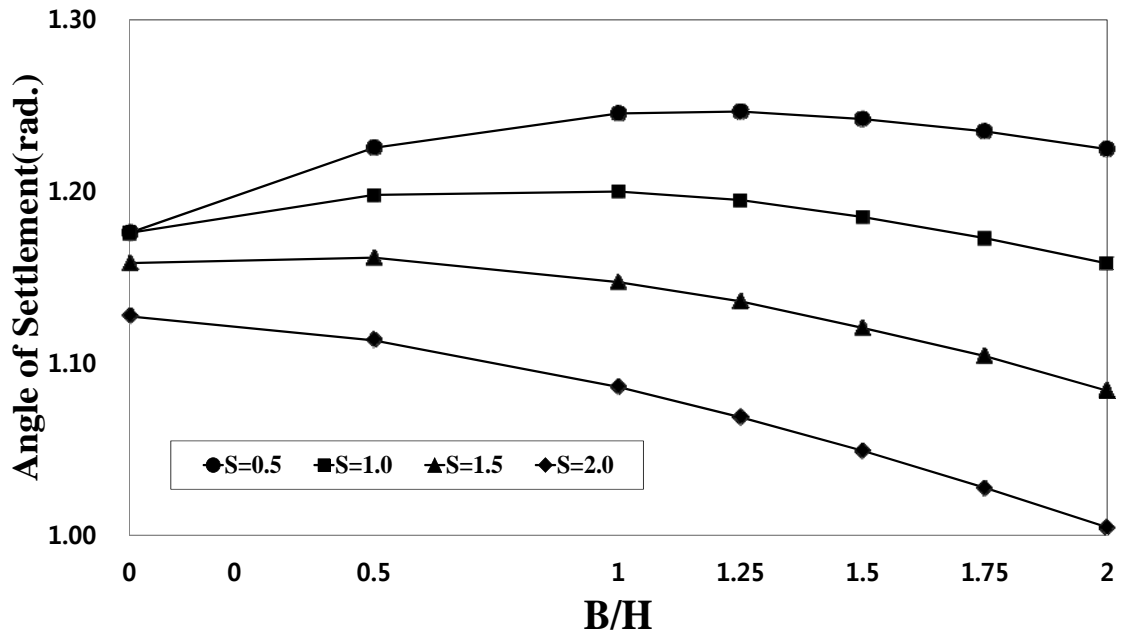


Fig. 3.20 타설거리 변화에 따른 지표침하각



제 4 장 결론

교대배면의 뒷채움재로 경량기포토를 적용시 적정성을 확인하고자 수치해석을 수행하였다. 이를 위해 타설경사 및 타설거리에 따른 교대상부, 말뚝두부 변위 및 심도별 변위와 침하량을 확인하였다.

- (1) 교대 뒷채움재를 경량기포토로 적용 시 토사성토를 적용했을 경우 보다 교대상부(A1) 및 말뚝두부(P1)에서의 수평변위가 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다.
- (2) 타설경사가 증가할수록 교대상부(A1) 및 말뚝두부(P1) 수평변위는 선형적으로 감소하였다. 또한 $S=5$ 일 때까지 경사가 증가 할수록 수평변위가 감소하는 영향으로 효과적이지만 그 이후 경사에서는 변위가 반대로 발생하기 때문에 주의가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 교대상부(A1)에서의 수평변위는 타설거리 $B/H=0.5$ 이후부터 선형적으로 감소하다 $S=2$ 일 때 $B/H=1.75$ 에서부터 성토체 쪽으로 변위가 발생하기 시작하면서 $B/H=2$ 일 때 모든 타설경사가 같은 현상이 발생하였다. $S=2$ 일 때 $B/H=1.5$ 에서 최소 변위 값이 나타났으며, $S=0.5, 1.0$ 에서 타설거리 변화에 따른 수평변위 값은 서로 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 말뚝두부(P1)에서의 수평변위는 타설경사와 관계 없이 $B/H=1.5$ 이후로 수평변위 값들이 비슷하게 나타났다. 따라서 $B/H=1.5$ 이상으로 경량기포토를 적용 시 효율성이 떨어질 것으로 판단된다.
- (4) 지중경사계 해석결과로 교대배면에서의 수평변위는 토사성토 적용시보다 경량기포토 적용 시 작게 발생하며, 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 연약지반인 S.L-1에서 변위의 변화가 가장 크게 나타났으며, 심도 약 1/3 지점에서 최대 수평변위가 발생하였다.
- (5) 타설경사 $S=0.5\sim 1.5$ 에서 최대 수평변위가 비슷하게 발생하다가 그 이후 경사에서는 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 타설거리 $B/H=0\sim 1.0$ 에서 최대수평변위가 급속하게 감소하다 그 이후엔 선형적으로 감소하면서 비슷한 값으로 수평변위가 발생하였다.

(6) 지표침하량 해석결과에서 토사성토 시 교대 접속부에서부터 침하가 급격하게 발생하지만 경량기포토 적용 구간에서는 침하가 완만하게 발생하며 전체적인 침하경향도 유사하게 나타났다. 또한 토사성토 구간에서 발생하는 침하량이 경량기포토를 적용한 구간에서 보다 많은 침하량이 발생하는 것을 알 수 있다. 타설경사 및 타설거리가 증가할수록 급격하게 침하가 발생하는 지점이 교대 배면쪽에서 성토체 쪽으로 거리가 이동하는 모습이 나타났다. 이는 토사성토 구간과 경량기포토 구간의 경계구간으로 큰 침하량 차이가 발생하기 때문에 단차방지를 위해 현장 시공 시 이를 최소화하여 안정이 될 수 있도록 시공이 이루어져야 할 것이다.

위와 같은 해석결과를 통해 교대 뒷채움을 경량기포토로 적용했을 경우 교대의 측방이동을 억제시키고, 침하를 최소화 하는데 효과적이라 판단된다. 또한, 경량기포토 적용 구간은 교대와의 접속부에서 주행성이 토사성토 때보다 양호할 것으로 기대된다. 경량기포토 적용 시, 타설경사 및 타설거리에 따라 교대 및 하부지반에 미치는 영향이 다르기 때문에 현장에서 적용할 경우 시공성 및 경제성 등에 따라 두 가지 요소를 고려하여 적용해야 할 것이다.

본 논문에서는 이론적인 해석조건으로 실시한 수치해석 결과를 통하여 교대 뒷채움재로 경량기포토를 적용했을 경우 교대 및 하부지반에 효과적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 따라서 이와 같은 해석결과를 바탕으로 추후 실내시험 및 현장시험을 실시하여 실제 현장 적용 시 경량기포토의 적정규모를 위한 설계적용기준을 제시할 필요가 있다.

참고문헌

1. 강희준(2003), “연약지반에서의 교대변위를 고려한 EPS공법의 적용사례 연구”, 석사학위논문, 수원대학교.
2. 김성원(2011), “온도가 경량기포토의 강도특성에 미치는 영향”, 석사학위논문, 한국해양대학교.
3. 김주철, 이종규(2002), “준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구” 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제18권, 4호, pp.309-317.
4. 송준호(2009), “원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석”, 석사학위논문, 부산대학교.
5. 윤길림, 김병탁(2004), 경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구. 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제20권, 4호, pp.5-13.
6. 일본도로공단(1996), “기포혼합경량토를 이용한 경량 성토공법의 설계·시공 지침서”.
7. 윤길림, 유승경(2004), “현장발생토를 활용한 경량기포혼합토의 강도 및 변형특성”. 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제20권, 9호, pp.125-131.
8. 임종철, 장지건, 이성우(2007), 경량기포혼합토공법의 적용성. 2007년 한국지반공학회 가을학술발표회.
9. 최용식(2003), “EPS로 뒷채움된 옹벽측압에 관한 수치해석적 연구”, 석사학위논문, 서울산업대학교.
10. 하이그레이트소일 연구컨소시엄(2005), “기포혼합토공법 기술자료”
11. 한국건설기술연구원(1996), EPS 성토공법을 적용한 도로확장용 성토체의 설계·시공 및 계측 연구.
12. 황중호(2010), “경량기포토의 역학적 특성”, 석사학위논문, 한국해양대학교.
13. 황중호, 안영균, 김태형(2010), “도로성토체로 사용된 실트질 계열의 경량기포혼합토에 대한 물의 영향”, 한국지반공학회논문집, 제 26권, 2호, pp.23-32.
14. ㈜마이다스 아이티, “MIDAS/GTS Analysis Reference”, pp 166~169”, 2006.
15. 古谷俊明, 山内豊聰, 浜田英治 : 氣泡シメントモルタルの力學特性(기포시멘트모르타의 역학특성) : 土木學會西部支部研究發表會講演概要集, P. 406~407, 1988. 3.
16. 土田孝, 長井興治, 湯川雅之, 岸田滄夫(1996), “山本實:岸壁の裏込め材として打設されそ輕量混合處理土の土質特性”, 港灣技研ユ資料, No.833.

17. 土田孝(1999), “港灣空港事業としての軽量混合処理土工法の開発と適用事例”, 運輸省港灣技術研究所 港灣技研資料 第38巻 第2号.
18. 青山憲明, 黒山英伸, 千田昌平, 安在六男, 草刈太一, 新坂孝志, 入島文雄, 古原正博 (1992), “気泡混合補強土の特性についてその1, 配合試験”, 第27回土質工學研究発表会, pp.2483-2484.
19. 湯怡新, 土田孝, 竹内大輔, 鏡田昌孝(1996), "西田登:軽量混合処理土の三軸試験結果と考察", 港灣技研資料, No.845
20. 湯怡新, 土田孝, 竹内大輔, 鏡田昌孝, 主田登(1996), “軽量混合処理土の三軸試験結果と考察”, 運輸省港灣技術研究所 港灣技研資料 No. 835
21. 横田聖哉, 三嶋信雄(1996), “気泡混合 軽量土工法”, 土木技術 第4巻 第6号 pp 45~54
22. Tsuchida, T., Takeuchi, D., Okamura T. and Kishida, T. (1996) Development of light-weight fill from dredgings, Environmental Geotechnics, Proc. of the Second Int. Congress on Environmental Geotechnics, Balkema pp 415-420



감사의 글

토목인을 꿈꾸며 대학을 입학하여 대학원까지 7년이란 시간이 짧게도 지나갔습니다. 이 기간 동안 제 자신을 더 성장 시킬 수 있는 인생에서 가장 소중한 시간이었습니다. 부족하게나마 논문을 마무리하며 주위에 도움을 주신 분들에게 고마움을 전하고자 합니다.

아무것도 모르고 부족함도 많은 저를 대학원 진학의 기회를 주신 지도교수님 김태형 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 교수님께서 주신 무한한 가르침과 애정을 밑거름으로 발전할 수 있도록 노력하고 항상 마음 속 깊이 새기도록 하겠습니다. 토목공학과란 울타리 안에서 많은 학문적 지식뿐만 아니라 연구에 대한 끝없는 열정을 몸소 보여주신 김태곤 교수님, 이중우 교수님, 김도삼 교수님, 경갑수 교수님, 이재하 교수님께 감사드립니다. 그리고 무지한 저를 이끌어주시고 채찍질 해주시며 석사학위논문이 나올 수 있도록 가르침을 주신 박이근 박사님께 감사의 마음을 전합니다. 또한 부족한 논문을 심사해주시고 관심을 주신 서영교 교수님께 감사드립니다.

끊임없는 노력과 어느 누구도 따라갈 수 없는 연구에 대한 열정을 갖고 있는 웅기오빠, 항상 긍정적이고 말 안 듣지만 늘 웃어주고 말 많은 내 이야기 다 들어준 성규오빠, 두 분 덕분에 연구실 생활 즐겁고 무사히 끝낼 수 있었습니다. 졸업 후 바쁜 사회생활에도 연구실에 많은 관심과 언제든지 도움을 주시는 기천·정현·수정·중호·용수·남우·영준 선배님, 항상 마음속으로 응원하고 있습니다. 그리고 대학원에 진학하게 된 성웅아, 많은 도움 못주고 나가서 미안하고 연구실 마지막 생활 덕분에 잘 마무리 할 수 있었다. 그 외 지반연구실에서 만난 모든 토목 선배님들 모두에게 감사드립니다.

열일곱 소녀 때 만나 십년이 지나 모두 사회인이 됐지만 같이 있을 때만큼은 수줍은 늘 여고생인 나의 반쪽들 윤썰·수탈·맹·지대·은혜 그리고 영어로 인해 어려울 때마다 자기 일처럼 도와준 영대, 20대 학창시절 모든 시간에 존재하고 잊지 못할 추억을 선물해준, 변덕스럽고 제멋대로인 나와 함께해준 밋지만 사랑하는 06동기 혜지·경석·전재·배성·동환·신철·병근, 모두들 어느 자리에서든 빛날 수 있는 사람이 됐으면 좋겠다. 그리고 저에게 진심으로 예쁨 주시고 항상 응원해주신 사랑스러운 건설공학과 조교선생님 지향언니, 늘 감사한 마음뿐이고 언니 덕분에 2년 잘 이겨냈습니다.

마지막으로 이 하늘아래서 어느 누구도 줄 수 없는 사랑을 저에게 주시고 철없고 청개구리 같은 막내딸을 늘 묵묵히 받아주시고 버팀목이 되어주신 늘 감사하고 미안한 우리가족, 아낌없는 후원과 믿음으로 제가 이 자리까지 올 수 있었습니다. 앞으로 제게

주신 그 사랑만큼 가족뿐만 아니라, 타인에게도 베풀며 살 수 있는 현명한 사람이 되겠습니다. 아빠·엄마 딸이라서, 오빠 동생이여서 감사하고 행복합니다.

졸업이 끝이 아닌 늘 시작이라는 마음으로 늦었다고 생각하기보다는 도전하는 정신을 가지며, 항상 배움의 자세로 어느 자리에서든 딸로서, 제자로서, 토목인 선·후배로서 부끄럽지 않도록 노력하겠습니다. 감사합니다.

2013년 02월
이민아 드림

