

경량기포혼합토공법의 적용성

Application of Light Weighted Foam Mixed Soil Method

임종철¹⁾, Jong-Chul Im, 장지건²⁾, Ji-Geun Jang, 이성우³⁾, Sung-Woo Lee

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University

²⁾ 광림엔지니어링 이사

³⁾ 동서화학 부장

1. 경량기포혼합토 공법의 개요

경량기포혼합토공법에 이용되는 기포혼합토는 건설발생토 등의 원료토에 물과 시멘트의 고화제와 기포를 혼합하여 제작한다(그림 1-6). 단위중량은 $0.6\sim 1.2\text{gf/cm}^3$ 이다. 기포혼합토는 제작 직후에는 유동성을 나타내나 고화제의 반응에 따라 최종적으로는 양질의 토양재료와 같거나 그 이상의 강도특성을 가지는 고화처리토가 된다.

보통의 토사에 비해 가벼워 지반이나 구조물 등에 미치는 하중을 경감할 수 있다. 또한 유동성이 높아 펌프압송에 의한 타설이 가능해 시공이 용이하다. 더욱이 진흙 등의 저품질 토양도 이용할 수 있어 건설폐기물을 줄일 수 있다. 본 재료의 일반적인 적용범위에 대한 특징은 표 1과 같다.

표 1. 시료의 물리적 특성 및 표준압밀 특성

항 목	특 징
밀 도	단위중량을 $0.6\sim 1.2\text{gf/cm}^3$ 의 사이에서 조절 가능 (경량화제의 혼합량에 의해 밀도를 조정한다)
강 도	일축 압축강도를 $1,000\text{kN/m}^2$ 정도까지 조절 가능 (고화제 첨가량으로 일축 압축강도(q_u)를 조정한다)
유동성	공동충진, 협소부 되메우기 등의 펌프압송에 의한 시공이 가능 (유동성이 커서 시공 평판성 확보가 용이하다)
시공성	전압, 조임 및 고정, 균일화 작업이 필요 없으므로 시공인력의 절감이 가능
환 경	진흙 등의 저품질 토양도 이용할 수 있어 건설폐기물을 줄일 수 있다

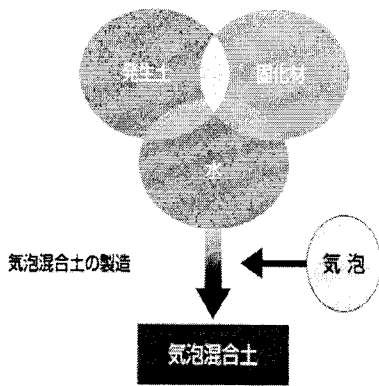


그림 1. 경량기포혼합토의 제조과정



그림 2. 기포 발생 상황

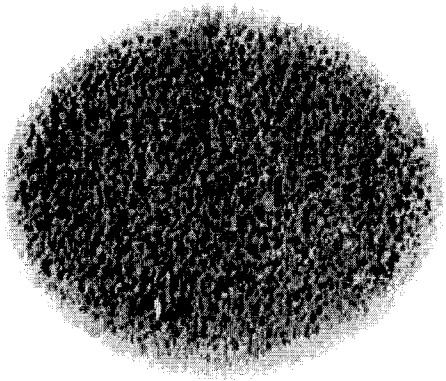


그림 3. 경량기포혼합토의 단면

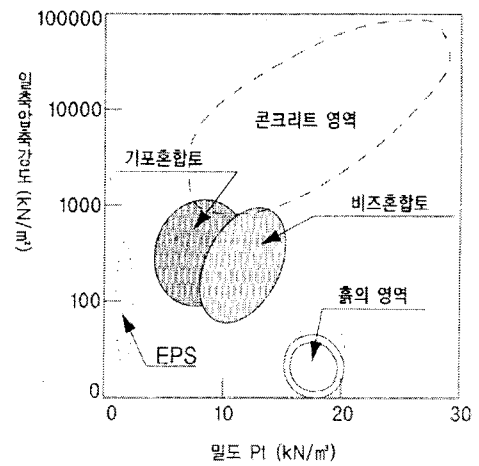


그림 4. 각 재료의 밀도에 따른 강도

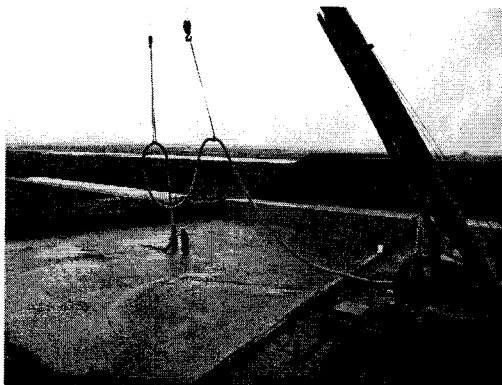


그림 5. 부산신항 배후도로 건설공사 2공구 현장의 시험시공 모습



그림 6. 시공완료된 경량기포혼합토의 모습

2. 경량기포혼합토의 역학적 특성

2.1 강도특성

경량기포 혼합토의 일축압축강도를 결정하는 요소는 원료토의 특성, 투입된 고화재 및 기포재량에 의해 지배된다. 그림 7, 8에 보듯이 원료토의 종류에 관계없이 고화재량이 증가할수록 경량기포혼합토의 일축강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 설계단위 중량이 높을수록 고화재량에 의한 일축압축강도의 증가비가 더 큰 것을 알 수 있다.

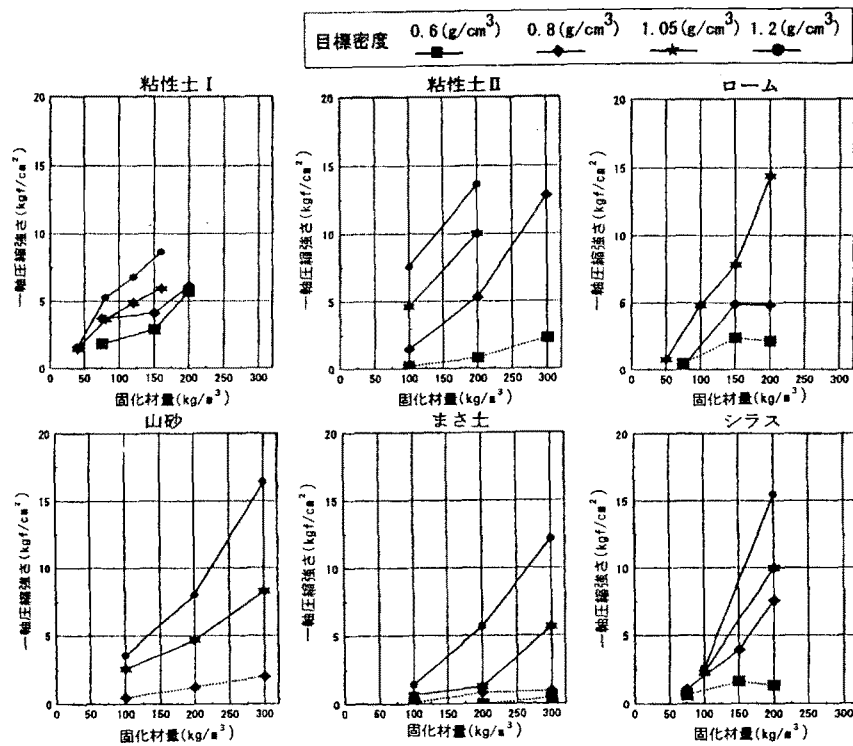


그림 7. 고화재(보통포틀랜드시멘트)량과 일축압축강도의 관계

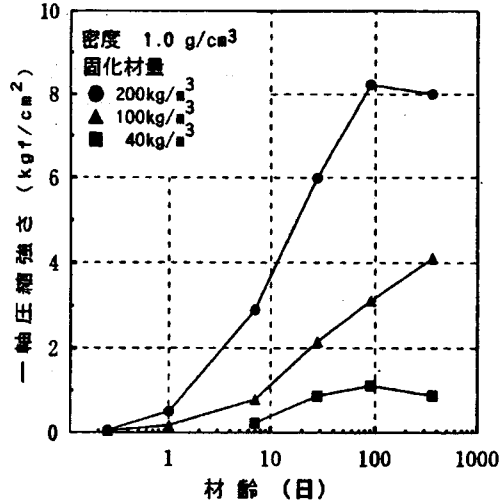


그림 8. 재량에 따른 강도증가(점성토, 보통포틀랜드시멘트 사용)

2.2 압축 특성

경량기포혼합토의 압축특성을 분석하기 위해 수행한 일차원압밀시험 결과 설계단위중량이 증가할수록 선형압밀응력이 증가하는 것으로 나타났으며(그림 9), 이는 설계단위중량의 조절을 통해 경량기포혼합토의 압축특성이 조절 가능함을 나타내고 있다.

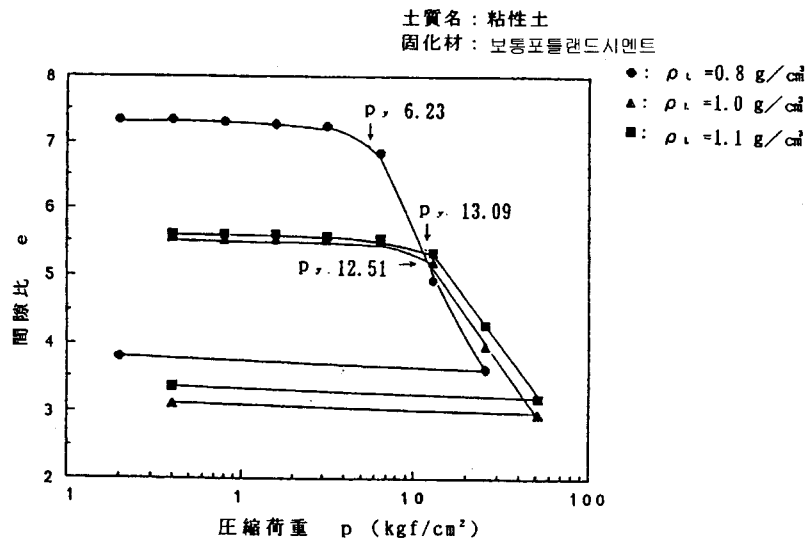


그림 9. 설정강도 5kgf/cm² 재료의 e-logp 곡선

2.3 삼축압축강도 특성

점성토를 원료토로 제조한 경량기포혼합토의 설계단위중량 및 설계목표강도의 변화에 따른 삼축압축시험(UU, CU)결과는 표 2 및 표 3과 같다.

표 2. 삼축압축(UU)시험 결과(점성토, 보통포틀랜드시멘트 사용)

구분		포화도 (%)	B값	점착력 c_u (kgf/cm^2)	내부마찰각 ϕ_u ($^\circ$)	극한강도 q_u (kgf/cm^2)
설정강도 (kgf/cm^2)	설정밀도 (gf/cm^3)					
2.0	1.0	80.0	- (불포화)	1.20	3.8	2.49
		-	1.0 (포화)	1.52	0.5	2.85
5.0	1.0	72.9	- (불포화)	3.62	0.7	7.33
		92.0	0.95 (포화)	4.58	4.5	10.36

표 3. 삼축압축(CU)시험 결과(점성토, 보통포틀랜드시멘트 사용)

구분		포화도 (%)	B값	전응력		유효응력		극한강도 q_u (kgf/cm^2)
설정강도 (kgf/cm^2)	설정밀도 (gf/cm^3)			점착력 c (kgf/cm^2)	내부마찰각 ϕ ($^\circ$)	점착력 c' (kgf/cm^2)	내부마찰각 ϕ' ($^\circ$)	
2.0	1.0	87.6	0.70	1.11	1.0	1.09	1.9	2.85
		-	0.98	1.46	2.8	1.45	4.5	2.85
5.0	1.0	77.9	0.60	2.98	4.2	2.91	5.8	6.66
		-	0.94	4.81	0.2	4.77	0.6	10.36

2.4 CBR 특성

노상토지지력 시험인 CBR 시험결과, 그림 10과 같이 고화재량과 설계단위중량의 조절을 통해 원하는 CBR값을 가지는 노상토를 제조 가능하며, 그림 11과 같이 수침과 비수침에 따른 CBR값의 차이를 나타내고 있다.

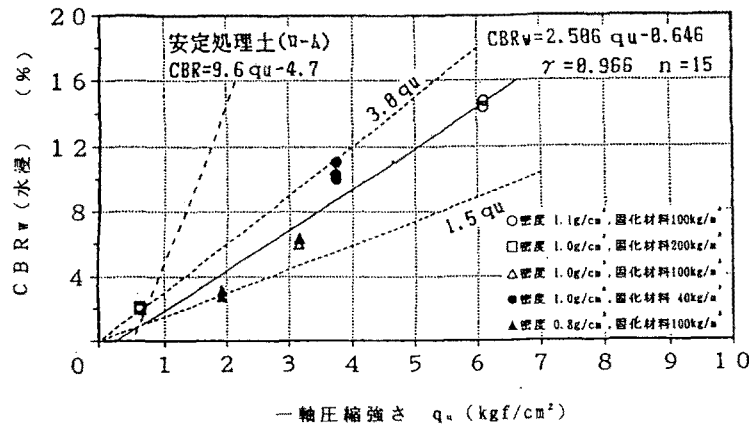


그림 10. CBR(수침)과 재령 28일 일축압축강도의 관계
(함수비 400% 점성토, 보통포틀랜드시멘트 사용)

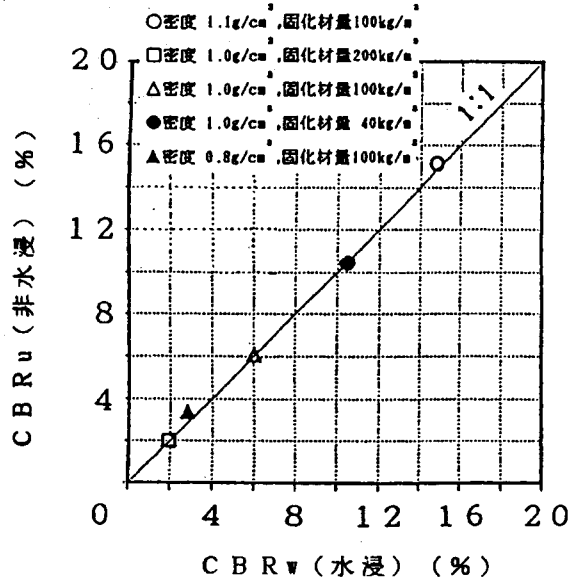


그림 11. 수침과 비수침의 CBR 관계

2.5 변형계수

그림 12에 경량기포혼합토의 일축압축강도와 변형계수와와의 관계가 도시되어 있다. 시험결과 변형계수의 분포범위는 $100q_u \sim 200q_u$ 사이에 분포하는 것으로 나타났다.

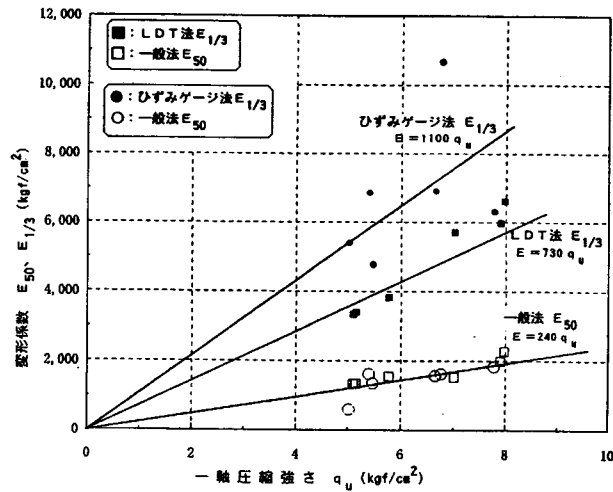
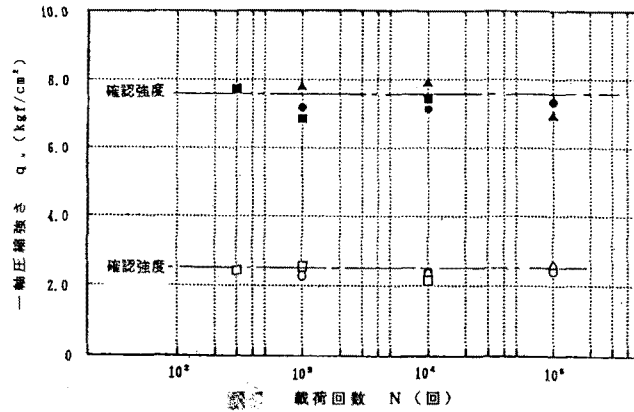


그림 12. 일축압축강도와 변형계수의 관계

2.6 내구성

내구성 시험결과, 그림 13과 같이 반복재하회수에 따라 일축압축강도의 변화가 미미한 것으로 나타나 경량기포혼합토의 내구성이 매우 우수한 것으로 나타났다.



確認強度：繰返し載荷してない供試体での一軸圧縮強さ

그림 13. 반복재하회수와 반복재하 후의 일축압축강도의 관계

2.7 크리이프 특성

2.7.1 전단크리이프 시험

그림 14는 일면전단시험의 결과로서, 최대전단강도의 70% 및 80%의 전단응력을 일주일동안 계속해서 재하해서 크리이프변위량을 측정된 결과를 나타낸다. 여기서 수직응력은 일축압축강도의 50%로 했다. 이 그림에서 재하초기의 변위량이 대부분이고, 시간경과에 따른 변위는 대단히 작다는 것을 알 수 있다.

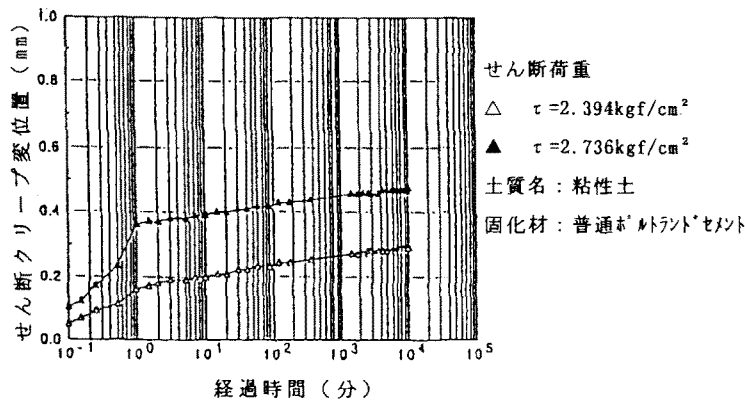


그림 14. 경과시간과 전단크리이프 변위량의 관계

(설정강도 5kgf/cm^2 , 설정밀도 1.0g/cm^3 의 결과)

3. 장기압축시험

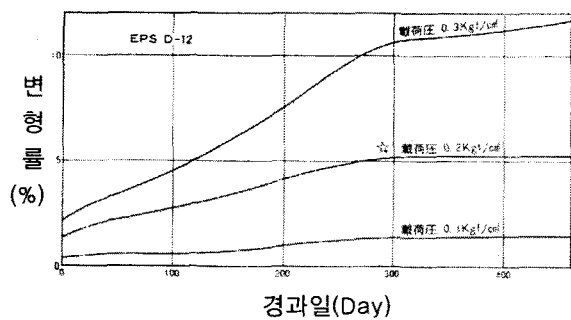
일차원압밀시험에서의 압축하중을 장기간 받았을 때의 영향을 조사하기 위해서, 장기압축시험을 실시했다. 장기의 압축하중으로서는 항복하중의 0.5배 및 1.5배를 사용했다. 시험결과는 표 4에 나타낸다. 압축하중이 압축항복응력의 0.5배에서는 최종압축변형률은 약3.0%~5.0% 이내이고, 크리이프계수도 상당히 작은 결과가 나왔다. 이것으로부터 항복응력 이하의 응력에서의 장기적인 침하량에 대해서는 거의 문제가 없다고 말할 수 있다.

표 4. 크리이프 계수 및 최종압축변형률(점성도, 보통포틀랜드시멘트 사용)

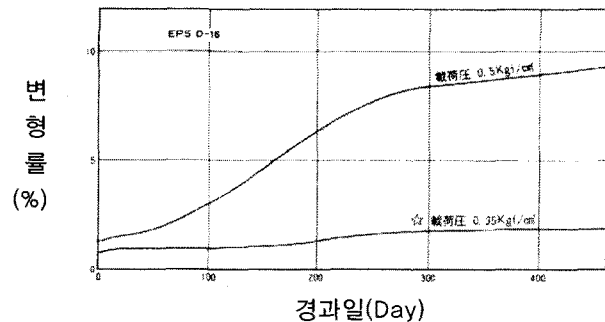
구분		장기압축하중 0.5P		장기압축하중 1.5P	
설정강도 (kgf/cm ²)	설정단위중량 (gf/cm ³)	최종압축 변형률 ε(%)	크리이프계수 C _{ac} (%)	최종압축 변형률 ε(%)	크리이프계수 C _{ac} (%)
2.0	1.0	2.8	1.87×10 ⁻¹	16.1	7.43×10 ⁻¹
	1.1	4.9	3.06×10 ⁻¹	25.4	7.95×10 ⁻¹
5.0	1.0	4.6	1.92×10 ⁻¹	23.3	7.59×10 ⁻¹
	1.1	4.4	1.96×10 ⁻¹	23.3	7.74×10 ⁻¹

4. EPS블록의 장기크리이프 특성

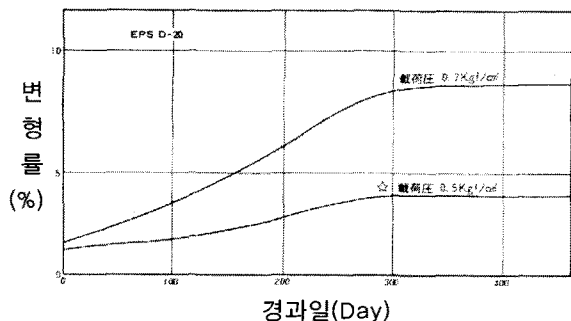
EPS블록은 재하압과 단위중량에 따라 약2%~12%정도의 크리이프가 발생하여(그림 15), 침하가 증가하게 되며, 따라서 단차도 시간에 따라 증가하게 된다.



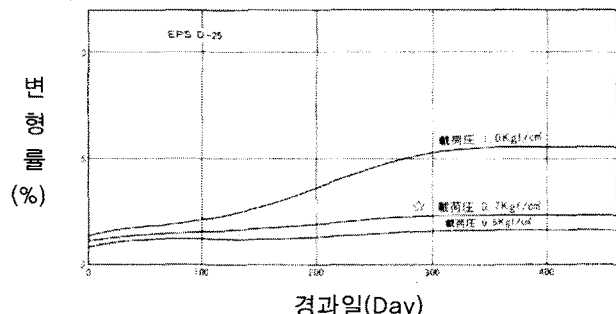
(a) 압축크리이프 특성(D-12)



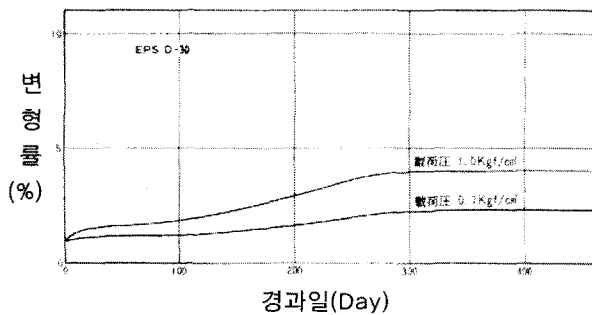
(b) 압축크리이프 특성(D-12)



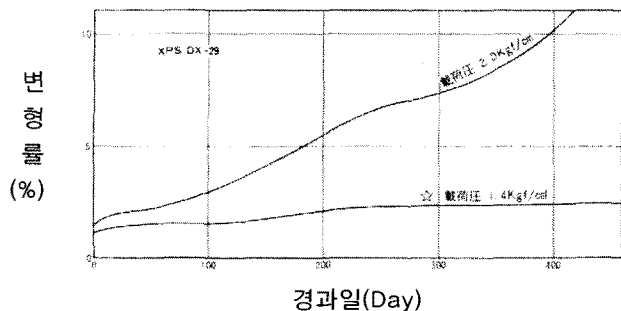
(c) 압축크리이프 특성(D-12)



(d) 압축크리이프 특성(D-12)



(e) 압축크리이프 특성(D-12)

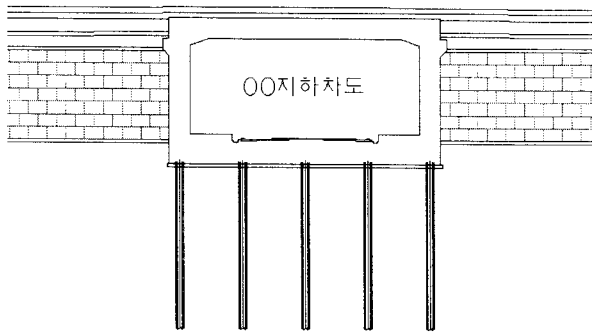


(f) 압축크리이프 특성(D-12)

그림 15. EPS블록의 강도에 따른 압축크리이프 특성

3.1 EPS공법의 적용 사례

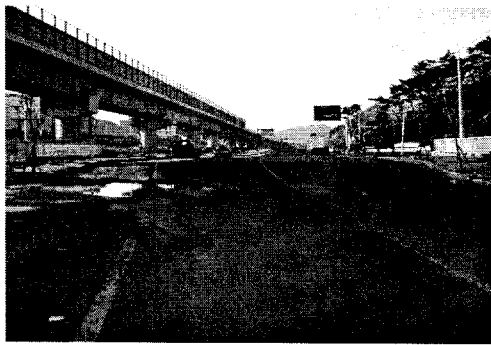
지하차도 측면에 EPS를 적용한 예로서, 장기적으로 침하에 의한 단차가 발생하여 주행에 어려움을 야기하고 있다.(그림 16)



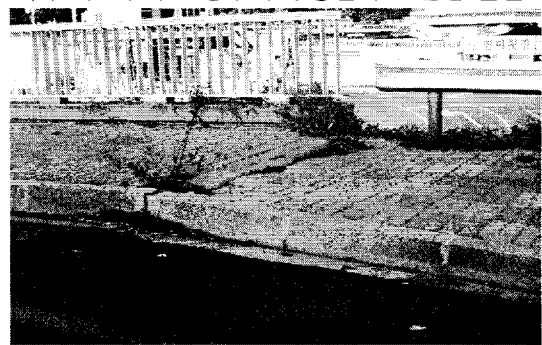
(a) EPS 시공종단면도



(b) 박스부와 토공부의 부등침하로 인한 균열

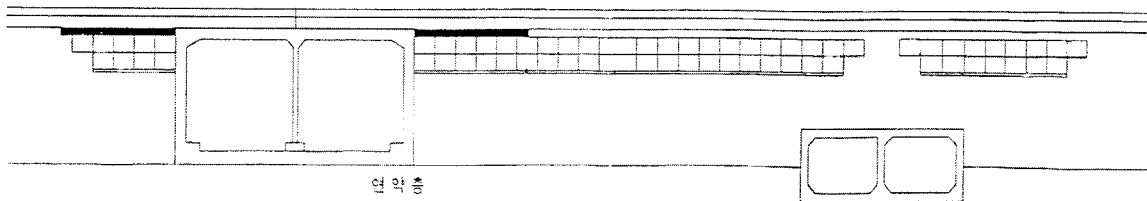


(c) 박스부와 토공부의 부등침하(도로부)

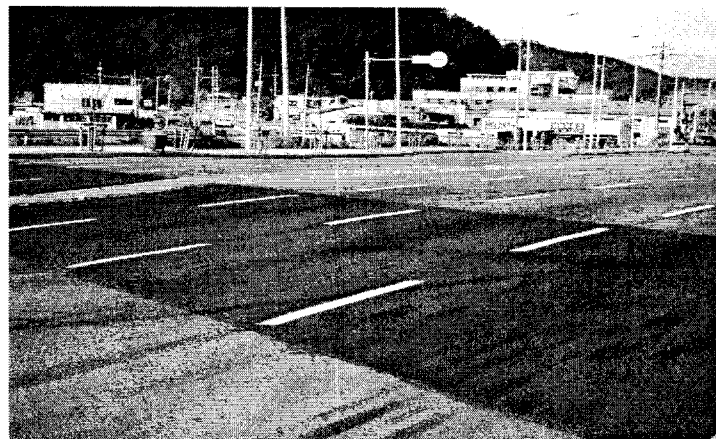


(d) 박스부와 토공부의 부등침하(보도측)

그림 16. 박스부와 토공부의 시공단차 및 균열(현장사례 1)



(a) EPS 시공종단면도

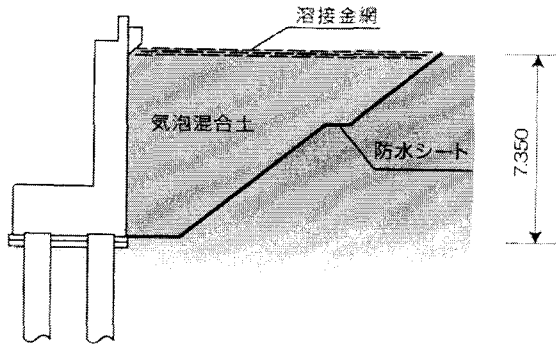


(b) 박스부와 토공부의 부등침하

그림 17. 박스부와 토공부의 시공단차 및 균열(현장사례 2)

5. 경량기포혼합토의 현장적용 사례(일본)

교대배면 되메움과 기존도로 접속부에 적용한 사례이다(그림 18~그림 19).



(a) 종단면도

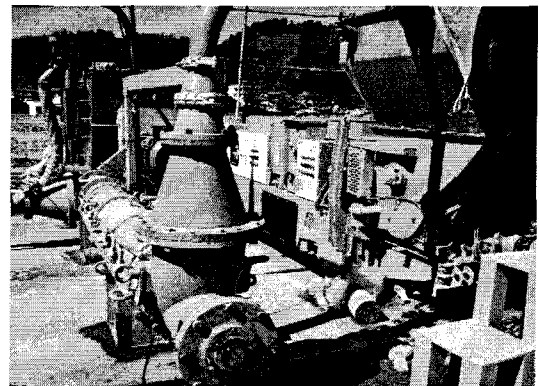


(b) 경량기포혼합토 타설전경

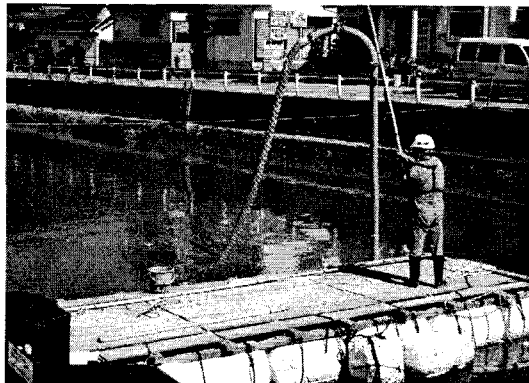
그림 18. 교대배면 시공사례(현장사례1)



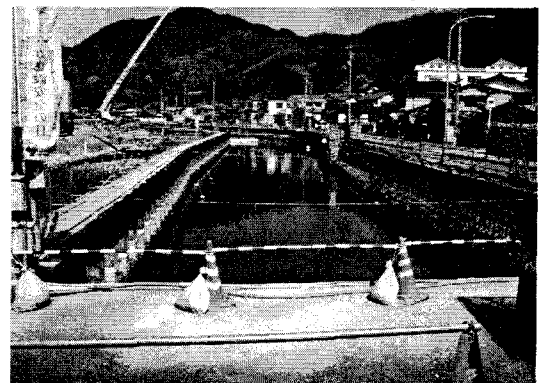
(a) 준설토 및 고화제 혼합과정



(b) 혼합토에 기포생성과정



(c) 기존 도로 확장부 수중 경량기포혼합토 타설



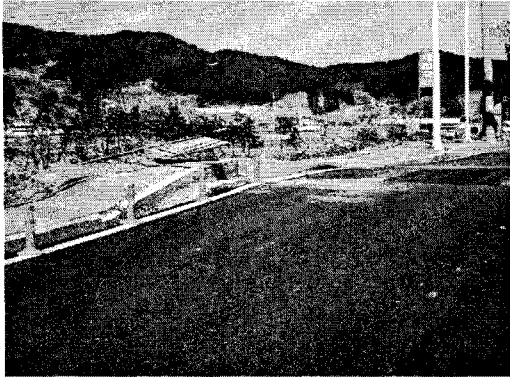
(d) 경량기포혼합토 기시공공간 접속부

그림 19. 기존 도로 확장부 시공사례(현장사례2)

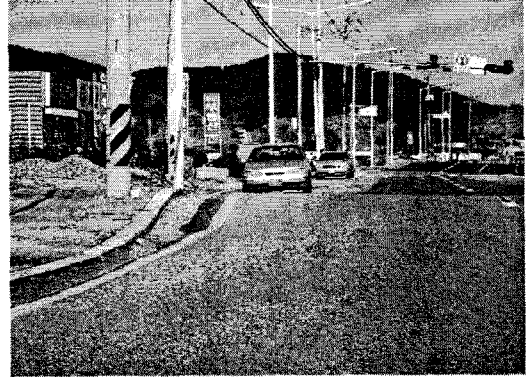
6. 부산신항 배후도로 2공구 현장의 통로 및 수로박스 단차방지 시험시공

6.1 단차발생 사례(경마장 주변 도로)

연약지반 도로성토시 박스부와 토공부사이의 시공단차 발생을 그림 20에 나타낸다.



(a) 경마장 앞 도로(사진1)



(b) 경마장 앞 도로(사진2)

그림 20. 박스와 토공부의 시공단차 발생 사례(경마장 앞 도로)

6.2 침하계측 결과 분석

일반적으로 연약지반의 장래침하예측시 현장에서는 최종성토고에 대한 단기 침하 data로 장래 침하를 예측한다. 그러나 단기자료로 예측한 장래침하보다는 성토기간중에 계측한 장기 data를 이용한 침하해석이 더 합리적일 것이다. 본 연구에서는 장기 data의 역해석과 압밀이론에 의해 침하해석 기초자료를 확보하여 장래침하를 예측하였다.

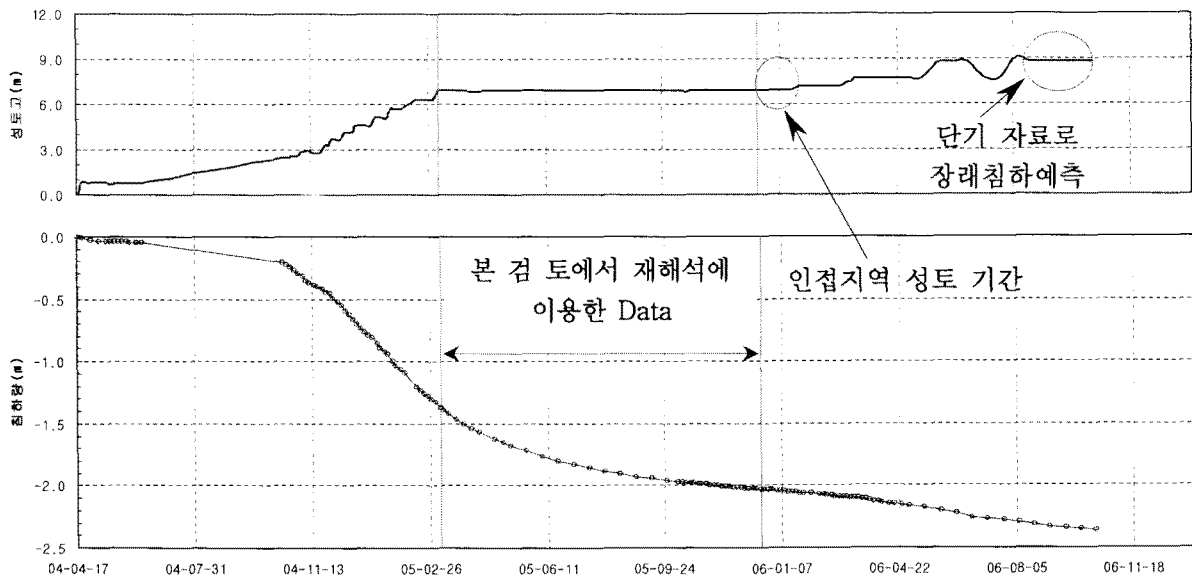


그림 21. 침하해석 기초자료

6.3 경량기포혼합토 공법 적용 시의 침하 예측 및 단차 경감

경량기포혼합토공법의 시공 범위에 따른 검토는 그림 22와 같이 박스 좌우로 25m 시공하는 것으로 하고 횡단방향 시공 폭은 그림 23과 같다. 경량기포혼합토를 사용할 경우에 대한 단차저감효과는 그림 24와 같다.

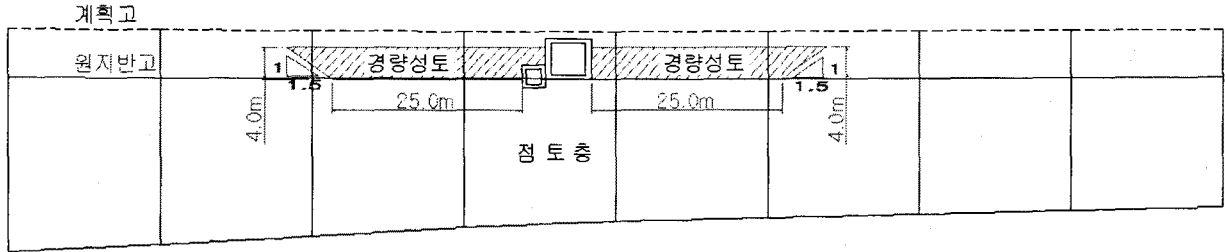


그림 22. 경량기포혼합토 시공 종단면도

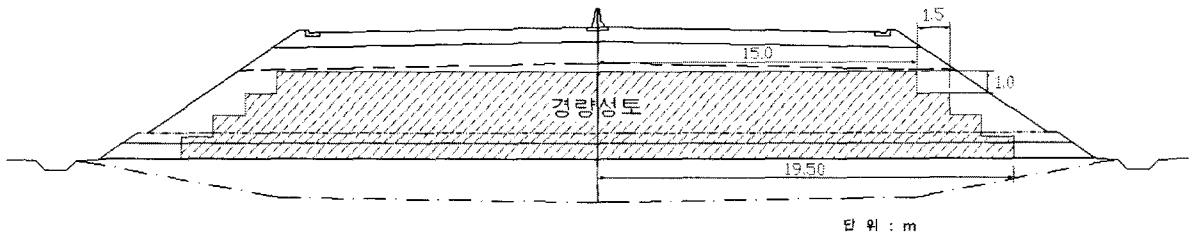


그림 23. 경량성토 대표 횡단면도(Sta.No.3K+220)

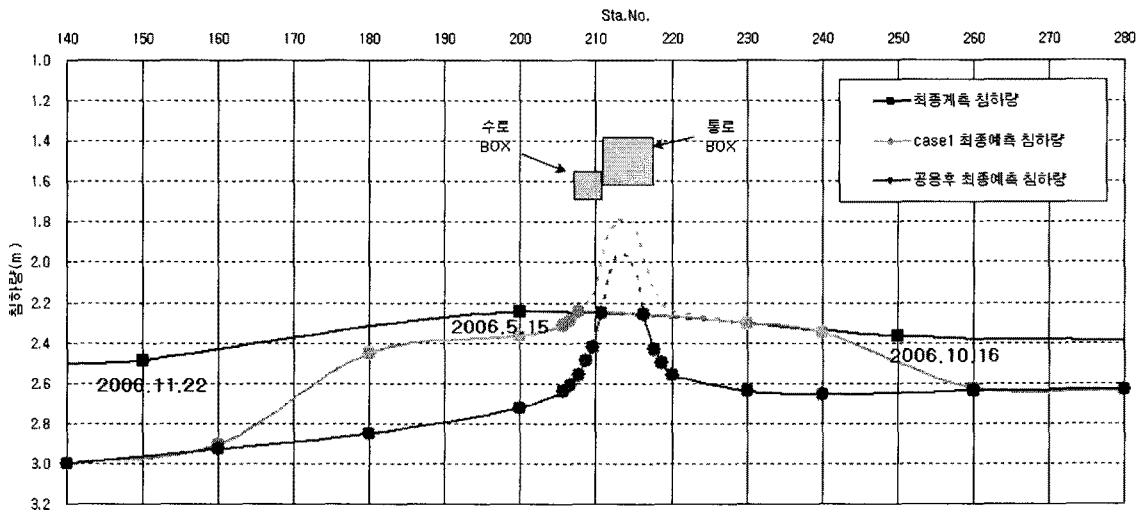


그림 24. 종단방향 최종예측침하량 및 최종계측 침하량

6.4 맺음말 및 경량기포혼합토 공법 장래 적용성

본 연구결과 경량기포혼합토의 역학적특성은 EPS경량블럭에 비해 크리이프 특성에 있어서 매우 우수한 것으로 나타났으며, 현장 여건에 맞게 단위중량 및 강도 등을 조절하여 시공할 수 있는 특징이 있다. 또한 현장에서 발생하는 저품질의 토사를 이용하기 때문에 이를 처분하기 위한 대규모 부지확보 및 주

변환경오염을 유발하지 않으며 폐기처분되는 저품질의 토사를 경량기포혼합토의 원료토로 이용하므로 재활용측면에서도 이점이 있다 할 수 있다.

향후 경량기포혼합토 공법의 장래 적용성은 다음과 같다.

1. 상하수슬러지와 같은 유기질토의 처리와 재활용의 용도에 가능(강열감량 20%인 관동흙에 대한 시험에서적용성이 입증되었음).
2. 지중연속벽 등에서 발생하는 슬라임의 처리와 재활용의 용도에 가능.
3. 연약점토지반의 주행성 확보를 위한 표층처리(고결)공법으로 적용 가능.