

습식교반경화토포장의 거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Behavior of Wet-Mixing Solidified Soil Pavement

유지형* · 권용락** · 김대성***

Yoo, J: Hyeung · Kwon, Yong Lag · Kim, Dae Sung

1. 서 론

우리나라는 1970년대 이후로 지속적인 전설 산업의 성장을 통하여 도시의 포장화, 건물의 고층·고밀화가 가속화됨에 따라 최근 환경문제가 심각하게 대두되고 기존 건설재료의 유해한 성분들이 환경에 미치는 영향이 제기되면서 인체에 무해하고 환경친화적인 흙을 건설재료로 사용하는데 관심을 가지기 시작하였다. 이러한 문제점들을 해소하기 위하여 친환경적인 공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 중차량의 통행이 없는 공원 광장, 산책로, 농로, 자전거 전용도로, 주차장 등에 인체에 무해하고 친환경적인 흙을 주재료로 하는 교반경화토포장이 각광 받고 있다. 교반경화토포장은 시공방법에 따라 건식과 습식으로 분류되는데, 국내에서는 주로 건식교반경화토포장이 주를 이루고 있었다. 그러나 건식교반경화토를 이용한 포장방법은 모토배합의 난이성으로 인한 빈배합 발생으로 현장시공시 품질저하에 따른 부실시공 초래와 포장장소의 제한 등의 문제점이 제기되었다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 개발된 것이 습식교반경화토포장이다. 현재는 건식교반경화토포장을 대체하는 방법으로 전국에서 습식교반경화토를 이용한 도로포장이 시행되고 있지만, 현재 설계와 시공이 주로 경험에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 습식교반경화토포장에 대한 많은 실험과 연구를 통해서 도로포장설계 구성요소 등의 결정이 이론적으로 정립될 경우 체계적이고 경제적인 시공을 할 수 있게 되므로 습식교반경화토를 이용한 도로포장이 점진적으로 확대 보급될 것이다.

본 연구에서는 습식교반경화토의 배합비와 배합시간을 변화시켜 공학특성시험을 통해 최적 배합비 및 배합시간을 도출하고, 시험포장의 계측 및 실험을 통하여 습식교반경화토포장의 거동특성을 규명하여 습식교반경화토를 이용한 도로 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 습식교반경화토의 공학특성시험

2.1 배합재료 및 배합조건

습식교반경화토의 주재료인 흙은 우리나라에 널리 편재되어 있고 현장에서 손쉽게 얻을 수 있는 화강풍화토를 선정하였으며, 경북 왜관에 분포된 화강풍화토를 채취하여 노건조 시킨후 사용하였다. 시료의 물리적 성질을 파악하기 위해 시료의 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 에테베르그한계(KS F 2303) 시험을 수행하였으며 흙의 기본 물성은 표 1에서 보는 바와 같다. 입도분포곡선은 그림 1과 같으며 통일분류에 의하면 SP에 해당된다. 경화제는 국내에서 개발된 특수경화제 K-N.S.C(Korea New Soil Chemical)을 사용하였으며, 시멘트는 일반적으로 많이 사용되고 있는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

포장의 표층 재료로 습식교반경화토를 사용할 때, 많은 시공경험으로부터 얻은 자료에 의하면 습식교반경

* 정희원 · 경일대학교토목공학부교수 · 공학박사 · 053-850-7227(E-mail:jhyoo@kiu.ac.kr)
** 경일대학교토목공학부 · 공학석사 · 053-850-7235(E-mail:yonglag@kiu.ac.kr)
*** 경일대학교토목공학부 · 석사과정 · 053-850-7235(E-mail:kimds@kiu.ac.kr)

화토 1m³당 화강풍화토 1400kgf, 시멘트는 약 200kgf, 경화재는 약 18ℓ, 물은 경화재의 20배를 초과하지 않는 범위내에서 일반적으로 300ℓ를 사용하고 있다. 시멘트는 수화작용을 초래하므로 포장체에 악영향을 미치게 되어 시멘트량을 최소화하고 소요강도를 발현하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 공학적 특성을 고려한 최적의 시멘트량과 배합시간을 결정하기 위하여 시공경험을 토대로 표 2와 같이 화강풍화토, 경화재를 고정하고 워커빌리티를 고려하여 슬럼프치를 10cm로 하여 시멘트량과 배합시간을 변화시켜 공시체를 제작하였다. 그림 2는 성형된 공시체를 보여주고 있다.

표 1. 화강풍화토의 기본 물성

구분	시료의 물성
비중	2.54
#200 통과백분율(%)	3.50
에테베르그 한계	비소성
균등계수(Cu)	5.41
곡률계수(Cc)	1.22
통일분류	SP

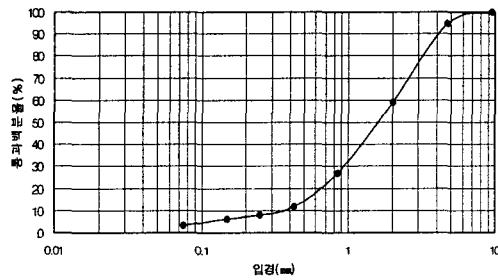


그림 1. 입도분포곡선

 표 2. 습식교반경화토 1m³에 따른 배합비

배합분류	화강풍화토(kgf)	슬럼프(cm)	물(ℓ)	경화재(ℓ)	시멘트(kgf)	배합시간(분)
A	1400	10	270	18	100	1, 3, 5, 7
B	1400	10	280	18	150	1, 3, 5, 7
C	1400	10	290	18	200	1, 3, 5, 7
D	1400	10	300	18	250	1, 3, 5, 7
E	1400	10	310	18	300	1, 3, 5, 7

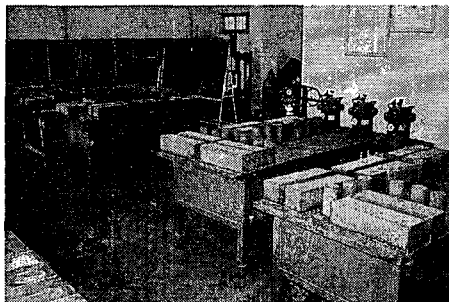


그림 2. 공시체 제작 전경



2.2 강도시험 및 특성

습식교반경화토의 강도특성을 파악하기 위하여 각각의 공시체(재령 28일)에 대하여 일축압축강도시험(KS F 2405)과 휨강도시험(KS F 2408)을 실시하였다.

2.2.1 배합비에 따른 강도특성

그림 3은 배합시간에 대하여 시멘트량에 따른 일축압축강도의 변화를 도시한 것이며, 그림 4는 시멘트량에 따른 휨강도의 변화를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시멘트량 250kg까지는 시멘트량이 증가함에 따라 일축압축강도가 비교적 급하게 증가하다가 시멘트량 250kg이상에서는 약간 완만하게 증가하고 있다.

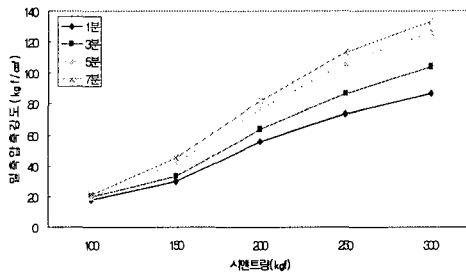


그림 3. 시멘트량에 따른 일축압축강도 변화

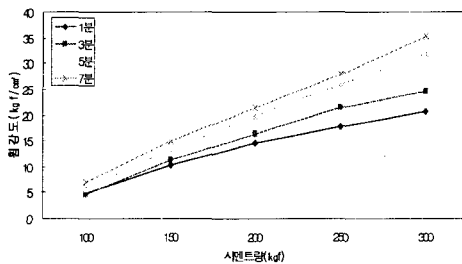


그림 4. 시멘트량에 따른 휨강도 변화

2.2.2 배합시간에 따른 강도특성

그림 5는 일정 시멘트량에 대하여 배합시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 것이며, 그림 6은 배합시간에 따른 휨강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 배합시간에 따른 일축압축강도와 휨강도는 점진적으로 증가하고 있다. 강도의 증가폭은 3분에서 5분 사이가 가장 크게 나타났으며, 5분 이후로는 크게 강도 증가를 보이지 않고 있다.

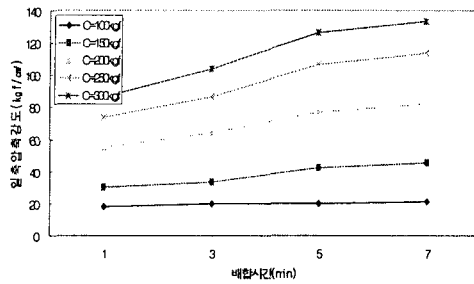


그림 5. 배합시간에 따른 일축압축강도 변화

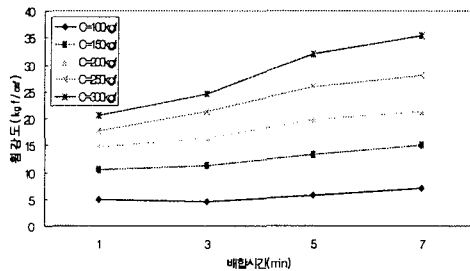


그림 6. 배합시간에 따른 휨강도 변화

3. 습식교반경화토의 공학특성

3.1 최적 배합비 및 배합시간

공학특성시험을 분석한 결과, 전반적으로 시멘트량이 증가하고 배합시간이 길어질수록 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 시멘트량이 250kgf까지는 공학특성이 비교적 크게 증가하지만 이후부터는 증가율이 둔화되는 것으로 나타나고 있어 시멘트량 250kgf를 사용하는 것이 적합한 것으로 판단된다. 또한 배합시간이 길어지게 되면 화강풍화토가 부서짐으로써 경화재의 피복표면적이 커져 강도가 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 배합시간 5분 이상에서는 공학적 특성의 증가가 둔화되고 있어 배합시간을 5분으로 하는 것이 바람직한 것으로 평가된다.

3.2 탄성계수

최적 배합비와 배합시간에 대한 일축압축강도 시험자료로부터 할선탄성계수(secant modulus of elasticity)를 구하였으며, 탄성계수는 약 150,000kgf/cm²이다. 그림 7은 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다.

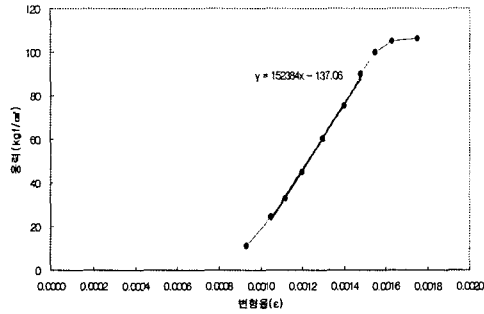


그림 7. 응력-변형을 곡선

4. 시험포장 및 재하시험

4.1 시험포장

본 연구에서는 공학특성시험을 통하여 제시된 최적 배합비와 배합시간을 이용하여 경일대학교 교정내에 습식교반경화토 시험포장을 실시하였다. 시험포장의 크기는 시공경험과 정적하중재하시험시 최대 접지압 4.5 kgf/cm²를 고려하여 3m×3m×15cm로 포설하였다. 타설과 동시에 단자함 설치 및 토압계(Encardio EPS-30) 1개, LVDT(LP -20FB) 1개, 변형율계(EGP-5-120) 14개를 매설하고 측정케이블로 Geologger DT 515에 연결하여 측정할 수 있도록 하였다. 그림 8은 계측기 매설 위치를 나타내고 있으며, 그림 9는 본 연구를 위해 포설된 시험포장의 전경을 보여주고 있다.

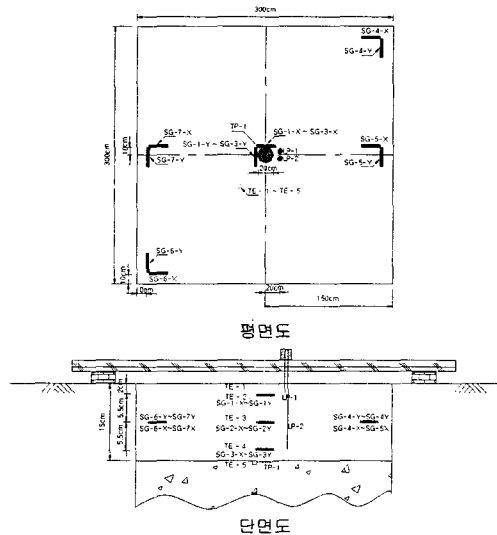


그림 8. 계측기 매설 위치도



그림 9. 시험포장 전경

4.2 정적하중재하시험

습식교반경화토포장의 거동특성을 파악하기 위하여 2004년 10월 19일 19시부터 익일 10시까지 15시간에 걸쳐 재하시험을 실시하였다. 재하하중조건을 표 3에서 보는 바와 같이 경교통로를 통행하는 하중을 대상으로 모델화하였으며, 재하시험간 매 1분 간격으로 자동계측을 실시하였다. 그림 10은 재하 최고하중인 796.5kgf를 재하하여 시험하는 광경을 보여주고 있다.

표 3. 재하하중 조건

유형	접지면적 (cm ²)	중량 (kgf)	접지압 (kgf/cm ²)	비고
성인 남자	177	88.5	0.5	한쪽발 A = 160cm ² 몸무게 = 80kgf
이륜 자동차		265.5	1.5	소형오토바이
소형 자동차		442.5	2.5	소형승용차(아반떼XD) 제공:금호타이어광주연구소
중형 자동차		619.5	3.5	중형승용차(그랜저XG) 제공:금호타이어광주연구소
소형 화물차		796.5	4.5	소형화물차(포터 2.5tonf) 제공:한국타이어대전연구소

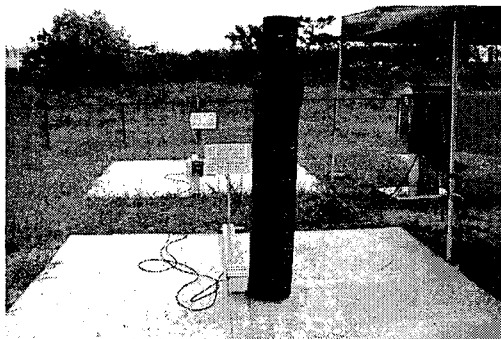


그림 10. 정적하중재하시험 전경



5. 습식교반경화토포장의 거동특성

5.1 재하시험 결과

습식교반경화토 포장체에 대하여 각 하중조건에 따라 정적하중재하시험을 실시한 결과, 계측된 토압과 변위는 표 4와 같다. 그림 11과 그림 12는 재하접지압에 따른 토압 및 변위 계측값을 도시한 것이다.

표 4. 습식교반경화토포장의 재하시험 결과

재하접지압 (kgf/cm ²)	토 압 (kgf/cm ²)	변 위 (mm)
0.5	0.00455	0.01060
1.5	0.01335	0.02719
2.5	0.02232	0.04475
3.5	0.02934	0.06930
4.5	0.03640	0.08390

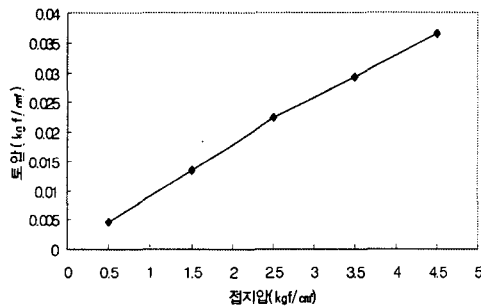


그림 11. 재하접지압에 따른 토압 계측값

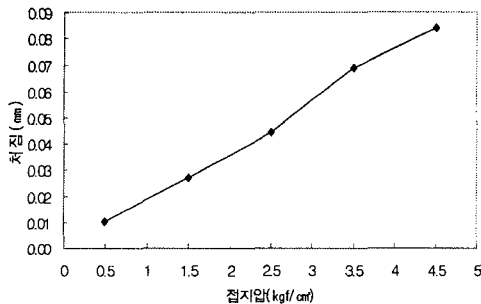


그림 12. 재하접지압에 따른 처짐 계측값

5.2 수치해석

포장구조체의 수치해석은 포장체의 거동특성에 따라 시멘트콘크리트포장과 같은 강성포장체에 대해서는 강성판해석을, 아스팔트콘크리트포장과 같은 연성포장체에 대해서는 다층탄성해석을 적용하는 것이 일반적이다. 습식교반경화토포장에 대해서는 거동특성이 정확하게 규명되어 있지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 시험포장에서 수행한 재하시험을 모형화한 해석모델에 대하여 KENPAVE를 이용하여 강성판해석과 다층



탄성해석을 실시하여 실측값과 비교함으로써 습식교반경화토포장의 거동특성을 규명하였다.

수치해석 모델링을 위하여 지반조사 자료를 바탕으로 그림 13과 같이 수치해석 모델을 선정하였다. 표 5는 수치해석을 위해 지반조사로부터 얻은 자료이다. KENPAVE를 이용하여 수치해석을 수행한 결과, 계측기가 매설된 각 위치에서의 토압, 변위는 표 6, 표 7과 같다.

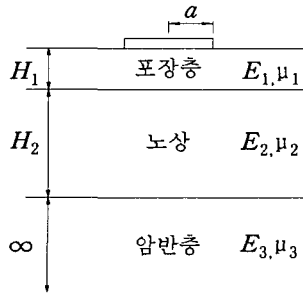


그림 13. 수치해석모델

표 5. 수치해석모델의 물성

층구분	두께, H (cm)	탄성계수 E(kgf/cm ²)	포아송비 μ
포장층	15	150,000	0.25
노상	200	300	0.4
암반층	∞	300,000	0.2

표 6. 다층탄성해석 결과

접지압 (kgf/cm ²)	토압 (kgf/cm ²)	변위(mm)	
		상부	하부
0.5	0.00442	0.0094	0.0094
1.5	0.01327	0.0283	0.0283
2.5	0.02210	0.0471	0.0471
3.5	0.03095	0.0660	0.0660
4.5	0.03979	0.0848	0.0848

표 7. 강성판해석 결과

접지압 (kgf/cm ²)	토압 (kgf/cm ²)	변위 (mm)
0.5	0.00433	0.0152
1.5	0.01297	0.0456
2.5	0.02161	0.0760
3.5	0.03027	0.1064
4.5	0.03891	0.1368

5.3 비교분석

표 8은 재하접지압에 따라 실측된 값과 수치해석에 의해 구한 값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 14와 그림 15는 재하접지압에 따른 해석값과 실측값을 비교하여 도시한 것이다. 그림 14에서 보는 바와 같이 재하접



지압이 3.5kgf/cm² 이상에서는 수치해석이 실측값보다 크며, 재하접지압이 증가할수록 그 오차는 증가하는 것으로 나타났다. 처짐은 그림 15와 같이 강성판해석에 의해 산정된 처짐이 실측값보다 평균 30% 크게 산정되는 반면, 다층탄성해석에 의하면 실측값과 5% 이내의 오차로 매우 근접하게 산정되고 있다. 따라서 습식교반 경화토폰장의 설계 또는 해석을 위해서는 연성거동을 하는 것으로 가정하여 다층탄성체에 대한 측대칭으로 해석하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

표 8. 하중단계에 따른 실측값과 이론값

재하 하중 (kgf)	재하 접지압 (kgf/cm ²)	실측토압 (kgf/cm ²)	강성판해석		층탄성해석		실측 처짐 (mm)	강성판해석		층탄성해석	
			토압(kgf/cm ²)	오차(%)	토압(kgf/cm ²)	오차(%)		처짐(mm)	오차(%)	처짐(mm)	오차(%)
88.5	0.5	0.0045	0.0043	4.01	0.0044	1.85	0.0106	0.0152	-30.26	0.0094	-11.32
265.5	1.5	0.0134	0.0130	3.32	0.0133	1.02	0.0272	0.0456	-40.35	0.0283	-3.89
442.5	2.5	0.0223	0.0216	3.18	0.0221	0.90	0.0448	0.0760	-41.05	0.0471	-4.88
619.5	3.5	0.0293	0.0303	-3.19	0.0309	-5.33	0.0693	0.1064	-34.87	0.0660	-5.00
796.5	4.5	0.0364	0.0389	-6.43	0.0398	-8.54	0.0839	0.1368	-38.67	0.0848	1.06

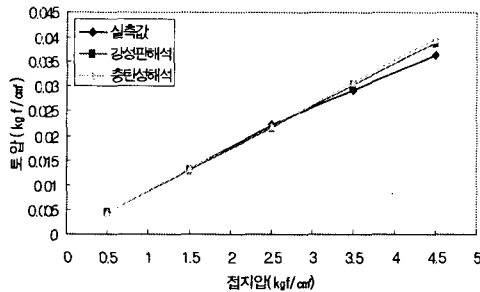


그림 14. 재하접지압에 따른 노체 상부에서의 토압

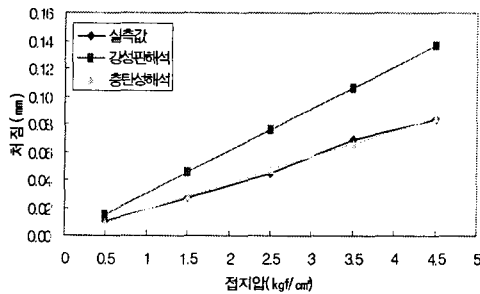


그림 15. 재하접지압에 따른 처짐



6. 결 론

본 연구에서는 습식교반경화토의 최적 배합비와 배합시간을 도출하기 위하여 배합비와 배합시간을 달리 하여 공시체를 제작, 공학특성시험을 수행하였으며, 이를 토대로 시험포장을 실시하였다. 시험포장체 표면에 예상 통행하중을 모델화하였으며, 각 하중 단계별로 정적하중재하시험을 수행하여 얻은 계측결과를 수치해석의 이론값과 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

습식교반경화토의 최적 배합비로서 배합재료 중 시멘트량은 1m³당 250kgf를 사용하고, 배합시간은 5분으로 하는 것이 습식교반경화토포장의 내구성과 내마모성을 고려하여 가장 적합한 것으로 나타났다.

습식교반경화토 시험포장에서 예상 통행하중에 대하여 재하시험을 실시하여 계측된 노상 상단에서의 토압은 재하접지압 3.5kgf/cm² 이하에서는 수치해석 결과가 약 4% 이내로 작게 산정되지만, 그 이상에서는 오차가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 하중재하로 인한 습식교반경화토포장의 처짐은 강성판해석에 의한 수치해석 결과가 실측값보다 평균 37% 크게 산정되고 있으며, 다층탄성해석에 의한 결과는 약 5% 이내의 오차로 산정되고 있다.

따라서 습식교반경화토포장을 설계하고 처짐과 노상지지력을 해석하기 위해서는 시멘트콘크리트포장과 같이 강성판해석을 적용하기 보다는 아스팔트콘크리트포장과 같이 연성거동을 하는 것으로 가정하여 다층탄성해석에 의한 축대칭으로 해석하는 것이 적합한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Chadda, L. R. (1970). Phenomenon of aggregation in the stabilization of soil with cement, Indian Conc. J. 44(5).
2. Clare, K. E. and A. E. Ollard (1954). The effect of curing temperature on the compressive strength of soil cement mixtures, Geotechnique 4, 97-103.
3. Filsofov, A. V. (1981). Effect of portland cement of properties of clays, J. Appl. Che., 4, 773-776.
4. AASHTO (1993). AASHTO Guide for design of pavement structures, published by the American Association of State Highway and Transportation Officials.
5. Yang H. Huang, (1993), Pavement analysis and design, Prentice Hall.
6. 강신업 등 (1977). 함수비, 양생온도 및 흙의 입도가 Soil-Cement의 압축강도에 미치는 영향에 관한 연구. 한국농공학회지. 19권. 2호. 61-74.
7. 강예묵 등 (1975). 시멘트함량 및 다짐함수비가 Soil-Cement의 압축강도에 미치는 영향에 관한 연구. 한국농공학회지. 17권. 1호. 59-75.
8. 공길용 (1997). 시멘트계 고화재를 이용한 농로의 보조기층 안정처리공법 연구. 건국대 박사학위논문.
9. 유지형. (1989). 처짐 곡선에 의한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 층별 탄성계수 추정에 관한 연구. 연세대학교 박사학위논문.
10. 유지형 등 (2004). 습식경화교반토 포장의 공학적 특성. 한국도로학회논문집. 6권. 3호. 한국도로학회. 1-7.
11. 이승원 (1990). 유한요소해석에 의한 시멘트 콘크리트 포장체의 구조적 평가에 관한 연구. 연세대학교 박사학위논문.
12. 조진구 (1975). Soil-Cement의 물리적 성질에 관한 연구. 한국농공학회지. 16권. 3호. 69-74.