시멘트 혼합 노상토의 강도특성

Strength Properties of Subgrade Soil Modified by Cement

이관호* · 장태영** · 황택진*** · 송용선****

Lee, Kwan Ho · Jang, Tae Young · Hwang, Tak Jin · Song, Young Sun

Abstract

In this research, unconfined compressive strength and stiffness of modified subgrade soil by cement or fly ash were evaluated. Gyratory compactor, which could simulate the field compaction, was adopted to make the test specimen. The testing soil from Cheonan area was used and its classification was SP. The optimum moisture content and maximum dry unit weight of soil were determined, and cement or fly ash was added, 4%, 8% and 12%. Curing times, such as 7, 14 and 28 day were adopted. An unconfined compressive test, an impact resonant test and an LFWD(Lightweight Falling Weight Deflectometer) were carried out to evaluate the strength or stiffness of modified soil. The strength of modified soil increased as the amount of cement and its curing time were increased. However, the strength or stiffness of fly ash modified soil was not significant. The correlation of unconfined compressive test and impact resonant test was relatively good.

Key words : Cement, Subgrade, Gyratory Compactor, Unconfined Compressive Strength, Stiffness

요 지

본 연구에서는 플라이애쉬 및 시멘트를 이용하여 강화된 하부노상의 압축강도와 탄성계수를 평가하였다. 실내실험용 시편 제작은 현장 다짐조건을 가장 잘 모사할 수 있는 선회다짐기를 이용하였다. 실험에 사용된 흙은 천안(제4지방산업단지 진입도로 확장공사)공사 현장에서 채취한 흙으로 공학적 분류는 SP에 속한다. 소일시멘트의 배합은 미리 시행된 다짐시험을 통해 측정된 최적함수비상태의 흙에 시멘트, fly ash를 각각 4%, 8%, 12%를 혼합하였고 7일, 14일, 28일 양생하여 실험을 실시하였다. 압축강도 및 탄성계수 평가를 위해 일축압축시험, 자유단 공진주 시험, LFWD(Lightweight Falling Weight Deflectometer)를 수행하였다. 실험결과, 시멘트의 함량이 높을수록 높은 강도를 보이며, 양생시간이 길수록 압축강도의 증가폭이 큰 것으로 나타났고, Fly ash의 경우 큰 폭의 강도증가는 보이지 않았으나, 28일 이후의 강도가 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다. 탄성계수 역시 시멘트 함량이 높을수록 증가폭이 큰 것으로 나타났다. 1축 압축시험에 의한 탄성계수와 자유단 공진주시험에 의한 탄성계수를 비교한 결과 두 결과 값은 유사한 패턴의 그래프를 보였고, Fly ash는 단기적으로는 큰 영향은 없지만, 28일 양생으로 증가추세를 보였다.

핵심용어 : 시멘트, 노상, 선회다짐기, 일축압축강도, 탄성계수

1. 서 론

국내 도로는 1960년대 이후 급속한 산업화과정을 거치면서 노선연장 및 노선 수에 있어 비약적인 발전이 있어왔다. 그러나 산업발전 속도에 따른 도로의 시급한 건설에 몰입한 결과 도로의 품질규격을 정량화하고 이를 개선하고자 하는 본격적인 시도는 최근에 이르러서야 가시화되었다(장태영, 2011).

지속적인 도로 건설기술의 발전에 의한 포장설계 및 유지관리 합리화 일환으로 역학적 특성인 지반 및 포장재료의 강

성 개념에 기초한 역학적인 포장설계 기법이 도입되고 있으나, 국내에서는 토공의 시공관리에 있어 경험적인 방법에 기초한 평판재하시험 및 들밀도 시험을 사용하고 있으며 그 결과, 역학적 포장 해석, 포장단면 설계, 토공, 포장시공 및 유지관리단계에서 각각 다른 기준을 적용하고 있는 등, 비효율성이 내재되어 있기 때문에 합리적인 관리기법이 필요한 현실이다. 현재 도로의 설계와 유지관리는 탄성계수와 같은 흙의 역학적 특성을 이용하여 수행하는 반면 시공시에는 현장에서의 단위중량을 측정하여 이를 실내다짐시험으로부터 구한 최대건조단위중량과 비교하는 방법으로 시공관리를 하고

*정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 (Email : kholee@kongju.ac.kr)

**공주대학교 건설환경공학과 석사과정

***동의대학교 토목공학과 부교수

****공주대학교 건설환경공학과 교수 (교신저자)

있다. 이러한 설계, 시공관리 그리고 유지관리 간의 개념적 차이는 전체 건설공정의 일관성을 떨어뜨리고 있으며 기술자의 경험적 판단에 크게 의지하는 불합리한 면을 지니고 있다 (Lee et al., 2007). 따라서 본 논문에서는 시멘트, 플라이애시의 혼합으로 인한 노상토의 안정성 향상 여부와 시공시 현장다짐관리에 있어서 단위중량을 이용하는 기존의 방법 대신 강도특성 및 탄성계수를 이용하기 위한 시험방법별(일축압축시험, 공진주시험 및 LFWD시험 등) 강도 및 탄성계수의 평가 및 비교하여 상관관계를 제시하는 것이다. 이러한 상관관계를 이용할 경우 현장에서 간편한 실험을 통하여 노상토의 특성을 평가할 수 있어 시공 시 용이하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 국내외 문헌고찰

2.1 국내 노상토의 설계기준

노상은 포장 밑에 위치하는 흙쌓기 또는 땅깍기의 최상부 100 cm 부분으로 포장과 일체로 구성되어 포장체에 작용하는 하중을 최종적으로 지지하는 층이다. 따라서, 노상은 포장체의 거동 및 내하력 특성에 매우 큰 영향을 미친다. 포장체의 공용성 확보를 위하여 노상은 균등한 지지력과 균일한 강성도를 갖도록 설계·시공하여야 한다. 또한 균일한 노상토 재료를 선정하여 사용하고, 얇고 균일하게 포설하여 다지는 것이 중요하다. 그리고 노상 마무리면의 평탄성은 포장체 최상부의 평탄성에도 영향을 미치므로 표면마무리를 평탄하게 하여야 한다. 노상층 가운데 두께 100 cm 중 상부 40 cm 층을 상부노상, 그 이하 부분(60)을 하부노상이라 하며, 땅깍기부의 원지반이 암반이거나 상부노상 재료로서 합당한 재료인

경우에는 원지반을 노상으로 취급한다. 노상재료의 품질다짐 규정은 최소 관리이므로 각층의 모든 부위가 소정의 다짐도를 만족시켜야 한다. 또한 균일한 지지력과 강성도를 갖도록 얇고 균일하게 포설하여 다진다 (건설교통부, 2000; 이관호 등, 2005). 노상재료의 품질은 표 1에 나타난 것과 같다. 다짐규정은 최소 관리이므로 각층의 모든 부위가 소정의 다짐도를 만족시켜야 한다. 또한 균일한 지지력과 강성도를 갖도록 얇고 균일하게 포설하여 다진다. 노상의 다짐 조건을 표 2에 나타내었다(박승목 등, 2003; 이관호 등 2009).

2.2 소일-시멘트

소일-시멘트(Soil-Cement)는 단순히 흙과 물, 그리고 시멘트계 고화제를 사용재료로 하고 중다짐에 의하여 성형이 되는 구조용 재료로 정의되며, 시멘트의 수화반응으로 혼합물이 경화되어 내구성능을 갖는 포장 재료이다. 소일-시멘트의 효과는 점착성이 있는 흙의 경우 점착력을 영구히 보존하게 하고 점착력이 없는 사질토에 있어서는 점착력을 갖게 하는 역할을 하며 이런 이유로 물이나 동결작용 및 교통하중에 대한 안정성이 확보되는 것이다. 원래 소일-시멘트는 독일에서 콘크리트 공학적으로 고찰하여 빈배합의 콘크리트로 미국에서는 토질 공학적으로 그 이론이 발달되어 왔다. 소일-시멘트의 강성 또는 연성에 상관없이 도로포장의 설계에 있어서는 때때로 강성계수와 포와송비가 필요하다.

소일-시멘트의 탄성계수는 밀도, 시멘트 사용량, 수량 및 배합도량에 의해 영향을 받는다. 소일-시멘트의 탄성계수로서는 압축에 의한 것(E_{sc}), 휨에 의한 정적계수(E_{sf}), 그리고 동적계수(E_d)의 세 종류의 것이 고찰되어 있으며 이들 중 근사적으로는 $E_{sf} = E_d$ 이지만 E_{sc} 는 E_{sf} 의 60%보다 약간 큰

표 1. 노상재료의 품질기준(건설교통부, 2000)

구 분	상부노상		하부노상		시험법
최대치수	100 mm 이하		150 mm 이하		
4.75 mm 통과량	25~100%		-		
0.074 mm 통과량	0~25%		50%이하		
0.425 mm 통과분에 대한 소성지수 (PI, %)	10 이하		20 이하		
다짐도 (%)	95 % 이상		90 % 이상		KS F 2312
시공시의 함수비 (%)	다짐도 및 수정 CBR 10 이상을 얻을 수 있는 함수비, 최적함수비 ± 2%		다짐도 및 수정 CBR 5 이상을 얻을 수 있는 함수비		KS F 2306 KS F 2312
시공층 두께	20 cm 이하		20 cm 이하		층 당 마무리두께
수침 CBR	일반노상	안정처리노상	일반노상	안정처리노상	
	10 이하	20 이상	5 이상	10 이상	

표 2. 노상의 다짐 조건(건설교통부, 2000)

구 분		상부노상	하부노상	비 고
시공 조건	시공층 두께	20cm 이하		층 당 마무리 두께
	함수비	다짐도 및 수정 CBR 10 이상을 얻을 수 있는 함수비	다짐도, 수정 CBR 5 이상을 얻을 수 있는 함수비	
다짐 후의 조건	다짐도	95% 이상	90% 이상	KS F 2312상의 C, D 또는 E 방법
	허용 처짐량	5 mm 이하	-	타이어 로울러의 복륜하중 5톤 이상, 접지압 5.6 kg/cm ³ 에 의한 프루프 로울링

값을 가지고 있다. 탄성계수는 압축강도에 대해서 직선적인 관계를 보인다(김병일 등, 2003)

즉, 소일-시멘트는 보통의 시멘트 콘크리트와 비교할 때 휨강도가 매우 높아 소일-시멘트와 시멘트 콘크리트의 압축강도가 같다면 휨강도는 소일-시멘트가 시멘트 콘크리트의 약 2배가 되는 셈이다. 이 결과로 인하여 독일에서는 주로 휨응력을 받는 포장의 노반 또는 기층에 휨강도가 비교적 강한 소일-시멘트를 이용하는 것이 유효하다고 한다. 그 후 이 실험 결과는 영국의 도로연구소에서도 실험을 통하여 입증되었다(Lovencin, 2005). 이로 인하여 비교적 휨강도가 높은 소일-시멘트의 특성이 기층, 노반의 재료로서 대단히 유효할 것으로 기대된다(장태영, 2011).

연약한 흙 뿐만 아니라 초연약 해성 점성토, 고유기질토 및 산업폐기물 등을 고화시킬 경우 포틀랜드 시멘트의 개량 원리는 석회와 비슷하다. 시멘트계는 이산화규소(SiO_2), 산화알루미늄(Al_2O_3) 및 산화칼슘(CaO)을 주원료로 하며, 일반포틀랜드 시멘트의 구성광물은 다음과 같다.

규산 3석회: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)

규산 석회: $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)

알루미나산3석회 : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)

철알루미나산3석회: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

(1) 수화반응

시멘트의 수화반응에 의해 규산석회수화물($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), 알루미나산 유산석회 수화물(Ettringite: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)의 생성이 활발하게 일어나는 것이 주요 특징이다. 에트링자이트는 시멘트의 산화, 석회 등의 결정의 간극을 충전하도록 결정화가 이루어지며 함수비의 저하를 가져온다.

(2) 이온교환반응

많은 수분의 함유한 점성토에 시멘트가 섞이면 소석회성분($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 자유칼슘이온(Ca^{2+})이 점토광물의 이온을 교환하게 된다. 이는 양이온 교환능이 $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+}$ 의 순서대로 크기 때문에 점토광물의 이온과 교환반응이 일어나는 것이다. 이에 따라 지반내 수분의 pH값이 증가(알칼리성증가)하기에 이 반응은 더욱 가속화된다. 고화재 혼합 후 입자간의 전기적 반발력, 흡입자의 양의 전기력으로 흡입자는 면모구조를 갖는 단위결합체를 형성한다. 이는 점토입자에 비해 큰 입자이며 내부적으로 대단히 느슨한 배열을 갖게 되어 물성이 변하고 따라서 성토작업의 작업성이 증진된다.

(3) 포졸란 반응

점토를 구성하는 석영, 장석, 운모 등의 광물들로부터 결정체 또는 비결정체의 실리카(SiO_2)와 알루미네이트(Al_2O_3)가 분리되어 시멘트의 수화물과 반응하여 이루어지는 것으로서 장기간에 걸쳐 다양한 접착성 물질을 생성한다. 이는 pH값에 큰 영향을 받는데 수화반응으로 수분내 pH값이 증가하여 실리카와 알루미네이트의 분리 및 자유칼슘이온(Ca^{2+})과의 결합이 용이하게 된다.

시멘트 혼합 노상토의 강도특성

3. 실험재료 특성

3.1 실험재료

천안(제4 지방산업단지 진입도로 확장공사)지역과 평택(서수원-평택 고속도로 건설공사 제 5공구)지역의 도로건설현장에서 사용된 노상토를 채취하여 시험에 이용하였다. 한국 공업규격(KS F 2324)의 통일분류법을 적용할 경우 천안노상토는 SP, 평택 노상토는 SM으로 판정되었다. 액성한계 및 소성한계는 한국 공업규격(KS F 2303 & 2304) 규정에 따라 수행하였고, 그 결과 값은 표 3에 나타내었고, 그림 1은입도분포곡선을 나타내고 있다.

시멘트는 범용적으로 많이 사용하는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용 하였고, Fly ash는 보령화력발전소에서 발생한 제품으로 정제된 플라이애시 1종을 사용 하였다. 플라이 애시의 품질 규격은 표 4에 나타내었다.

3.2 배합설계 및 시편제작

소일시멘트는 재료들의 배합비율에 따라 강도가 좌우되므로 이 연구에서는 종류가 서로 다른 2가지 종류의 최적함(?) 수비 상태의 흙에 대하여 중량비에 따라 시멘트량을 변화시키거나 플라이애시 사용량을 변화시켜 공시체를 제작하였다. 시멘트 및 플라이애시 사용량은 기존의 연구결과들(이관호 등, 2005, 이관호 등 2009)을 검토하여 결정하였다. 실험의 정확성을 높이기 위해 각각 3개의 시편을 제작, 실험하여 평균값

표 3. 노상토의 기본물성 시험결과

시험구분	분석항목	천안	평택
액소성 시험	액성한계	16%	28%
	소성한계	-	23%
	소성지수	N.P	5%
입도분석	D_{10}	0.208	0.21
	D_{30}	0.476	0.39
	D_{60}	1.07	0.66
	균등계수, D_u	5.14	3.14
	곡률계수, C_g	1.02	1.10
통일 분류 판정		SP	SM
다짐 시험	OMC(%)	11.4	13.5
	r_{dmax} (t/m ³)	1.975	1.869

그림 1. 노상토 입도분포곡선

표 4. Fly ash 품질 규격

항목	종류	Fly ash 1종
이산화 규소 (%)		45.0 이상
수분 (%)		1.0 이하
감열감량 (%)		3.0 이하
밀도(g/cm ³)		1.95 이상
분말도	45 μ m체 체잔분 (망체방법, %)	10 이하
	비표면적 (브레인 방법, cm ² /g)	4,500 이상
플로값비(%)		105 이상
활성도 지수 (%)	재령 28일	90 이상
	재령 91일	100 이상

표 5. 선회다짐기의 노상토 다짐조건

다짐속도	다짐각	다짐압력	다짐횟수
30회/min	1.25°	600 KPa	300회

그림 2. 선회다짐기

표 6. 공시체 제작 배합표

흙 종류	시멘트	배합분류	Fly ash	배합분류
SM (OMC=15 %)	0 %	SM	0 %	-
	4 %	SM_C4%	4 %	SM_F4%
	8 %	SM_C8%	8 %	SM_F8%
	12 %	SM_C12%	12 %	SM_F12%
SP (OMC=9 %)	0 %	SP	0 %	-
	4 %	SP_C4%	4 %	SP_F4%
	8 %	SP_C8%	8 %	SP_F8%
	12 %	SP_C12%	12 %	SP_F12%

을 사용하였다. 재료의 다짐은 선회다짐기를 사용하였고, 다짐조건은 표 5와 같다. 선회다짐기의 다짐방법은 그림 2와 같이 몰드안의 시료에 압축력과 전단력을 작용시켜 다짐을 수행한다. 다짐과정은 컴퓨터와 연결되어 제어되며, 다짐 중의 시편의 높이, 다짐횟수, 다짐압력, 다짐밀도 등이 실시간으로 표시된다. 시편은 지름 10 cm, 높이 17~18 cm 크기의 원통형으로 제작되었고, 재료의 혼합량은 표 6에 나타내었고, 제작 과정은 그림 3에 나타내었다. 선회다짐기로 다짐한 각 시편을 약 12~17에서 7, 14, 28일 양생하였다.

그림 3. 시편의 제작과정

4. 재료특성 평가 시험

4.1 CBR시험

흡수팽창시험 결과는 표 7과 같다. 입자가 작은 SM시편이 SP시편보다 팽창량이 큰 것으로 나타났다. 시멘트가 첨가되면서 팽창량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 플라이 애시가 첨가된 시편은 SP, SM 모두 팽창량이 증가하는 것으로 나타났다. 표 8와 같이 SM시편은 10%이하로 노상토의 지지력 조건에 만족하지 못하는 것으로 나왔다. 하지만 시멘트 첨가 후 10배 이상의 지지력 증가를 보였고 공시체 제작 후 수침시키는 과정에서 수중양생과 같은 효과로 인해 급격한 지지력 상승효과가 발생하였다.

4.2 일축압축시험

표 9는 SP, SM 흙에 대한 시멘트, 플라이애시 함유량이 각각 4%, 8%, 12% 상태의 양생일수에 따른 일축압축강도 (q_u)를 나타내고 있다. 시멘트 함유량이 증가할수록 6~8배의 강도가 증가함을 알 수 있었다. 시멘트의 첨가량에 따라 강도 증가폭이 큰 것에 반해 플라이애시의 경우 28일 양생기간 안

표 7. 각 공시체의 흡수 팽창비 (%)

Type	Cement				Fly Ash		
	0%	4%	8%	12%	4%	8%	12%
SP	0.04	0.04	0.03	0.02	0.10	0.20	0.20
SM	0.74	0.15	0.20	0.16	1.04	0.88	0.85

표 8. 각 공시체의 CBR값 (%)

시편종류 \ 관입량 (mm)	2.5	5.0	7.5	10.0
SP	40.9	44.2	40.7	35.5
SP_C4%	138.1	195.8	-	-
SP_C8%	178.5	248.6	-	-
SP_C12%	261.7	303.8	-	-
SP_F4%	39.4	44.7	40.9	34.9
SP_F8%	34.9	41.6	39.5	36.5
SP_F12%	37.2	41.1	38.3	34.3
SM	4.3	5.3	5.6	5.7
SM_C4%	43.1	53.2	55.5	56.1
SM_C8%	94.7	105.8	104.0	99.3
SM_C12%	66.6	86.3	100.8	106.4
SM_F4%	3.9	4.0	4.1	4.3
SM_F8%	3.0	2.9	2.9	2.9
SM_F12%	3.0	3.2	3.3	3.4

표 9. 일축 압축강도(qu) 시험 결과 (Mpa)

양생기간	28일	14일	7일	양생기간	28일	14일	7일
배합종류				배합종류			
SP	0.80	0.54	0.48	SM	0.69	0.49	0.28
SP_C4%	3.62	1.75	1.52	SM_C4%	2.28	1.91	0.99
SP_C8%	5.68	3.05	2.47	SM_C8%	3.16	2.53	1.83
SP_C12%	6.93	4.12	3.01	SM_C12%	4.25	3.02	2.64
SP_F4%	0.89	0.49	0.39	SM_F4%	0.89	0.39	0.17
SP_F8%	0.72	0.35	0.47	SM_F8%	0.71	0.49	0.38
SP_F12%	0.71	0.35	0.57	SM_F12%	0.58	0.50	0.38

표 10. 일축 압축시험에 의한 탄성계수(E₅₀) (Mpa)

양생기간	28일	14일	7일	양생기간	28일	14일	7일
배합종류				배합종류			
SP	47.0	29.4	7.1	SM	28.8	25.0	8.8
SP_C4%	187.5	87.0	83.7	SM_C4%	89.3	89.3	30.8
SP_C8%	304.3	184.2	139.5	SM_C8%	97.2	95.9	60.6
SP_C12%	363.6	350.0	221.5	SM_C12%	200.0	175.0	122.0
SP_F4%	55.6	36.4	29.0	SM_F4%	55.6	15.5	3.2
SP_F8%	47.4	32.8	36.4	SM_F8%	47.4	15.8	9.7
SP_F12%	51.4	29.9	45.5	SM_F12%	48.3	21.4	10.5

에 강도증가는 기대하기 어려웠다.

일축압축시험 결과를 이용하여 표 10과 같이탄성계수(E₅₀) 산정하여 일축압축강도(q_u)와 비교해보면, 강도가 증가함에 따라 탄성계수도 대체적으로 증가함을 알 수 있다. 하지만, SM시편의 경우 강도는 증가했지만, 14일 이후로는 탄성계수의 증가가 미비한 것으로 나타났다.

4.3 자유단 공진주시험

자유단 공진주 시험은 그림 4와 같이 직경 10 mm 쇠구슬을 시편의 중심부에 타격하여 응력파를 발생시키고 발생되는 탄성파를 동적신호분석기를 이용하여 Voltage 신호를 획득하고, Matlab프로그램을 이용해 탄성계수를 산정하는 시험이다 (목영진 등, 1999).

(a) IR-Test 개요도

(c) 공진주파수

그림 4. 비구속 압축파의 자유단 공진주 시험

표 11. IR-Test에 의한 탄성계수 (Mpa)

양생기간	28일	14일	7일	양생기간	28일	14일	7일
배합종류				배합종류			
SP	1474	1261	649	SM	746	392	213
SP_C4%	3642	2059	1431	SM_C4%	879	709	649
SP_C8%	5556	3847	2326	SM_C8%	1856	1497	1101
SP_C12%	6866	6201	3166	SM_C12%	3171	2271	1843
SP_F4%	1653	1102	299	SM_F4%	856	439	101
SP_F8%	1456	733	450	SM_F8%	1048	376	53
SP_F12%	1238	599	953	SM_F12%	692	117	34

자유단 공진주 시험을 통한 탄성계수 측정시 양생기간동안 표면에 균열이 생긴 시편은 압축파가 전달되지 않아 측정오차가 증가해 정확한 측정이 어려웠다. 표 11에 나타난 결과 값을 보면 일축 압축 시험에 의한 탄성계수(E₅₀)와 유사한 모양의 곡선이 나타나는 것을 알 수 있다. 시멘트 첨가 후 약 4~6배의 탄성계수 증가 추세를 보이고 있으며, 플라이애시는 혼합전 시편과 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었다.

4.4 LFWD 시험

LFWD(Light Falling Weight Deflectometer)는 원위치 시험장치인 평판재하시험의 대안으로 FWD를 독일에서 휴대용으로 개발한 것이다. LFWD는 German Dynamic Plate (GDP), Transport Research Laboratory(prototype) Foundation (TFT), the Prima100(LFWD)등이 있으며, 각 시험기 종류에 따라 디자인과 작동 모드가 다양하나 작동원리는 매우 비슷하다(강복희 등, 2007). 일반적으로 LFWD는 그림 5와 같이 재하장치와, 재하 판, 그리고 중앙부의 침하량을 측정하는 지오폰(Geophone) 센서로 구성되어 있다.

LFWD는 자유낙하 시킨 추가 포장면에 충격을 가하여 발생된 처짐값으로 탄성계수를 역계산하는 장비이다. 운반이 용이하고 시험이 간편하기 때문에 여러 구간을 손쉽게 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. LFWD는 시간, 온도 변화에

1. 고정손잡이 2. 낙하추, 3. 고무완충기(rubber buffer), 4. 데이터 로거, 5. 하중판, 6. 센서부(geophone)

그림 5. LFWD시험 장비 사진

그림 6. 모형토조 제작 순서

표 12. LFWD 실험결과

양생기간	28일		14일		7일	
배합종류	D (μm)	E (MPa)	D (μm)	E (MPa)	D (μm)	E (MPa)
SP	1047	23	1110	22	1783	15
SP_C4%	211	119	196	127	236	124
SP_C8%	154	165	210	123	213	131
SP_C12%	261	97	324	76	376	81
SP_F4%	1159	21	1363	17	1908	12
SP_F8%	988	24	1229	19	1804	14
SP_F12%	816	29	1039	23	1333	20
SM	954	26	941	26	1265	19
SM_C4%	140	184	204	124	238	100
SM_C8%	143	176	187	137	174	143
SM_C12%	213	118	384	65	382	66
SM_F4%	840	29	1103	22	1224	19
SM_F8%	866	28	959	25	1094	22
SM_F12%	905	27	1034	24	1214	20

의한 물성 변화와 치짐 평가지수들의 기초자료 및 관리자의 경험, 통계 처리결과를 바탕으로 다음과 같은 목적에 사용된다.

- 포장도로 시스템 각 층의 탄성계수와 치짐을 통한 응력 및 변형률 계산에 의한 역해석 설계의 기초자료·도로포장의 지지력 확인
- 보수시기 결정을 위한 유지관리시스템의 인자 결정
- 하중분산 효과에 대한 아스팔트 층, 콘크리트 층, 입상재료의 상대적인 강도평가 및 동질구간 결정
- 계산된 포장의 수명과 가까운 장래의 교통예측을 통한 잔존수명 예측

LFWD를 이용하여 변형 및 탄성계수 측정을 위하여 모형토조를 제작하였다. 모형토조 제작은 그림 6과 같으며 그에 따른 결과 값은 표 12와 같다. 앞서 시험과 유사하게 시멘트 함유량이 12%의 시료가 가장 큰 탄성계수 값을 보인 것에

그림 7. SP 시편의 일축압축시험-IR-Test 결과값의 상관도

그림 8. SM 시편의 일축압축시험-IR-Test 결과값의 상관도

반해 LFWD시험에서는 8%보다 다소 적게 나온 것을 확인할 수 있었다. 이는 실험상 모형벽면에 다짐불균형으로 생긴 오차로 생각된다.

4.5 시험방법에 따른 탄성계수 상관관계

각 시편에 대한 일축압축시험과 자유단공진주시험에 의한 탄성계수를 그림 7 및 8에 나타내었다. SP는 상관관계 R^2 이 96%, SM은 82%로 높게 나타났다. 비파괴시험인 자유단 공진주 시험과 일축압축시험과의 결과값으로 탄성계수(E_{50})와 일축압축강도를 유추할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 LFWD시험의 결과는 다소 신뢰하기 어려운 결과로서 다른 시험들의 탄성계수와의 상관관계는 찾기 어려웠다.

5. 결 론

본 연구에서는 시멘트, 플라이애시를 첨가하여 강화된 노상토의 탄성계수 측정방법에 따른 결과값 및 상관관계를 평가하였다. 시편의 제작은 현장다짐에서 얻어지는 골재입자의 배열과 유사하게 다짐을 수행할 수 있는 선화다짐기를 사용하였다. 각 혼합물의 함수량별 지지력, 압축강도 시험을 통해 현장에서의 적용성을 파악하고, LFWD를 이용하여 다짐관리를 하기위한 기초연구를 수행하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 세립분이 많이 포함된 SM시편이 SP시편보다 팽창량이 큰 것으로 나타났다. 시멘트가 첨가되면서 팽창량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 플라이 애시가 첨가된 시편은 SP, SM 모두 팽창량이 증가하는 것으로 나타났다.
- 일축압축시험 결과를 이용하여 탄성계수(E_{50}) 산정하여 일축압축강도(q_u)와 비교해보면, 강도가 증가함에 따라 탄성계수도 대체적으로 증가함을 알 수 있다. 각 시편에 대한 일축압축시험과 자유단공진주시험에 의한 탄성계수의 경우, SP는 상관관계 R^2 이 96%, SM은 82%로 높게 나타났다. 비파괴시험인 자유단 공진주 시험과 일축압축시험과의 결과값으로 탄성계수(E_{50})와 일축압축강도를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 2009년 스마트하이웨이 사업단 연구 지원에 의해 수행되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

강복희, 김교준, 강진태, 김종렬 (2007) 소형 FWD를 이용한 노상토의 다짐도 추정에 관한 연구, **한국구조물진단학회지**, 제11권, 제6호, pp. 213-219.

- 건설교통부 (2000) **도로설계편람(II)**, pp. 405.1-405.9
- 김병일, 위성혁, 이승현, 김영욱 (2003) 무기질 고화제를 첨가한 소일시멘트의 강도 특성, **대한토목학회** 제23권, 제3C호, pp. 135-141.
- 목영진 (1999) 자유단 공진시험을 이용한 암석의 탄성계수 측정, **한국지진공학회 논문집**, 제3권, 제12호, pp. 95-100.
- 박승목, 이관호 (2003) 다짐방법에 따른 노상토의 설계입력변수 특성 연구, **대한토목학회**, 제23권, 제4D호, pp. 439-448.
- 이관호, 차민경, 임유진 (2009) 선화다짐곡선특성을 이용한 노상토의 다짐도 평가, **한국방재학회**, 제9권, 제1호, pp. 31-38.
- 이관호, 차민경, 김준기 (2005) 선화다짐기를 이용한 현장발생토사의 다짐특성평가, **한국폐기물학회**, 제22권, 제6호, pp. 563-568.
- 장태영 (2011) 시멘트를 첨가한 강화노상토의 탄성계수 평가법 비교 연구, 석사학위논문, 국립공주대학교, pp. 69.
- Lee, K., Prezzi, M. and Kim, N. (2007) Subgrade Design Parameters from Samples Prepared with Different Compaction Methods, **ASCE Journal of Transportation Division (SCI)**, Vol. 133, No. 2, pp. 82-90.
- Lovencin, W., Najafi, F.T. and Chaudhry, H. (2005) Assessment of Flowable Fill Strength in Pavement Construction, **TRB Conference**.

- ◎ 논문접수일 : 11년 05월 09일
- ◎ 심사의뢰일 : 11년 05월 17일
- ◎ 심사완료일 : 11년 08월 22일