



도로 성토체의 다짐도 평가 방법

조 성 민*

1. 개요

다짐(compaction)은 흙의 밀도를 높여 전단강도를 증진시키고 압축성과 투수성을 감소시키기 위하여 실시하는 것으로 도로 건설공사에 있어 흙쌓기 구간의 필수 공정이다. 흙의 함수비와 입도분포는 다짐 전후에도 달라지지 않는다. 국내에서 다짐관리는 다짐작업 후 해당 흙 쌓기 층에서 소정의 “다짐도(degree of compaction)”가 발현되는지의 여부를 검사하는 과정이며, 국내 고속도로 현장의 경우 현장밀도측정시험, 평판재하시험, 방사성동위원소 측정법(RI법) 등을 주로 사용한다. 다짐도는 대상 흙의 현재 건조단위중량(dry unit weight, γ_d)와 최대건조밀도(γ_{dmax})의 비로 정의할 수 있는데, 실제 현장에서는 같은 흙을 대상으로 실내 다짐시험을 실시하여 구한 최대건조밀도에 대한 현장 측정 건조밀도의 비를 백분율로 나타낸 값을 의미하며, 다짐작업 중 밀도관리의 기준이 된다. 따라서, 현장 성토체의 단위중량을 측정하거나 추정하는 과정이 다짐관리의 핵심이 된다.

건조단위중량은 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며, 흙의 종류별로 다짐곡선의 대략적인 형상은 그림 1과 같다. 일반적으로, 입경이 커질수록 최대건조밀도가 증가하며, 다짐곡선의 기울기도 급

해진다. 다짐에너지가 클수록 최대건조단위중량은 증가하고, 최적함수비는 감소한다. 같은 다짐에너지일 때, 조립토가 세립토에 비해 최대건조단위중량이 크며, 최적함수비는 그 반대가 된다.

$$\gamma_d = \frac{G_s}{(1 + e)} \gamma_w = \frac{G_s}{1 + \frac{G_s \cdot w}{S \cdot \gamma_w}}$$

여기서, G_s : 흙의 비중
 e : 간극비
 w : 함수비
 γ_w : 물의 단위중량

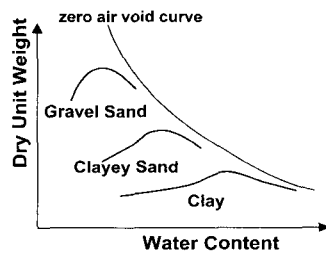
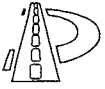


그림 1. 흙 종류별 다짐곡선 형상

2. 현장밀도 측정 시험

현장에서 다짐 성토한 흙의 건조밀도를 산정하

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 지반연구그룹 책임연구원, 공학박사 chosmin@freeway.co.kr



기 위한 현장 들밀도시험(field density test)으로는 KS F 2311에 정의된 “모래 치환법에 의한 흙의 단위중량 시험 방법”이 가장 일반적이다(사진 1). 이 방법은 시험의 절차와 원리가 간단하나 함수비 등의 측정에 많은 시간이 소요되고, 시험시 개인오차가 포함될 가능성이 많은 단점이 있다.

최근에는 모래치환법에 의한 현장 밀도시험의 대안으로 방사성 동위원소(radio isotope, RI)를 이용하여 흙의 밀도와 함수비를 측정하는 방법이 활용되고 있다(사진 2)



사진 1. 모래치환에 의한 들밀도 시험 모습

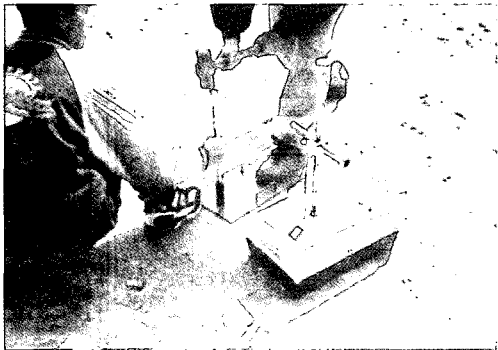


사진 2. RI 장비를 이용한 흙의 표층 밀도 측정

RI 장비에 의한 다짐밀도의 측정은 방사선원으로부터 방출된 감마선(gamma ray)과 대상 물질(흙)과의 상호작용(산란, 흡수, 투과 등)을 이용한 것으로, 흙의 밀도가 높아지면 이것을 통과

한 감마선의 수는 지수 함수(exponential function)적으로 감소하는 특성을 이용하는 것이다. 또, 함수비의 측정은 방사선원으로부터 방출된 속중성자가 흙 속을 투과하면서 토체에 포함된 물의 수소원자와 충돌하여 그 에너지를 잃고 열중성자로 감속되는 원리를 이용하는 것으로, 수분함량과 비례하여 토체 내에서 감속된 열중성자를 흡수체를 통해 제거하고 일정 수준 이상의 에너지를 가지는 속중성자는 감속재를 이용하여 열중성자로 감속시킨 후 이 감속된 열중성자의 수를 산출하여 수분함량을 측정하는 방법이다. 일반적으로 밀도와 함수비는 동시에 측정되며, 다짐도는 실내 다짐시험의 최대건조밀도를 이용하여 구한다.

이 방법은 1950년대 이후 미국과 일본을 중심으로 개발되어 보급되고 있으며, 지금은 국내에서도 저준위 장비가 개발되고, 우리 고속도로 건설 현장에서도 적용 중이다. RI 장비를 이용할 경우 시험속도를 크게 줄일 수 있고, 시험 중 인적 요인에 의한 측정 불확도를 최소화할 수 있다. 지층 전체의 밀도를 알고자 할 경우에는 시추공을 형성한 후 검출기(sonde)를 삽입하여 끌어올리면서 전 깊이에 대해 연속적으로 측정하는 방법을 사용한다(이를 v-vlogging, 또는 밀도검층이라 한다).

3. 기타 현장시험에 의한 다짐관리

앞의 방법들 외에도 평판재하시험(KS F 2310)이 다짐도 검사법으로 널리 활용되고 있다. 이 시험법은 지반 위에 원형, 또는 정사각형의 강철판(재하판)을 놓고 단계 재하를 통해 얻은 하중-침하 관계에서 해당 지반의 지반반력계수와 극한지지력을 구하는 시험으로, 노상, 노반 등의 지지력 계수를 구할 수 있다. 도로에 대한 평판재하시험은 두께가 22mm 이상인 재하판을 이용하여 1, 4, 8, 15, 30, 45 분, ... 간격으로 침하를 측정하여 15



분간 0.01mm이하의 침하가 생기거나 항복점이 나타나될 때까지 진행하여 다음 단계의 하중을 가한다.

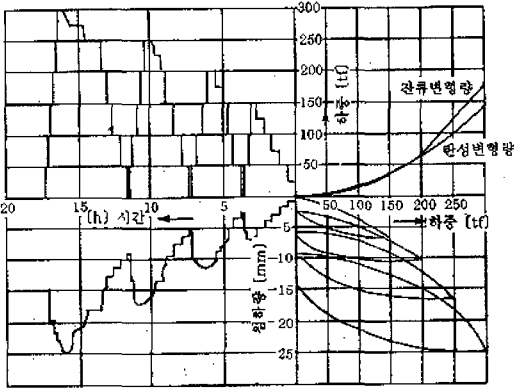


그림 2 평판재하시험 결과

재하판의 규격은 30×30×2.5cm, 45×45×2.5cm, 75×75×2.5cm로 구분하며, 책과 다이얼 게이지, 침하량 측정장치, 재하대, 하중 등이 필요하다.

시험 결과로 얻은 하중(P)-침하(s)관계를 통해 지지력계수(지반반력계수)를 다음과 같이 산정할 수 있다. 지지력계수는 재하판의 크기에 따라 달라진다.

$$k = \frac{P}{A \cdot s} = \frac{d}{s} \quad [\text{kN/m}^3]$$

여기서, P : 하중
A : 재하판의 단면적
p : 재하압력 (=P/A)
s : 침하량

다짐 작업 후 해당 토층에서 재하시험을 실시하여 주어진 침하량 범위 내에서 지지력계수가 기준값을 만족하는지의 여부로 다짐관리를 진행한다.

외국에서는 평판재하시험 외에도 일반적인 원위치 현장지반조사법인 표준관입시험(SPT), 정적콘관입시험(CPT), 시추공전단시험(BST), 공내재하시험(PMT), 밀라토미터시험(DMT) 등과 SASW, 탄성과 탐사, 탄성과 토모그래피, 시추공 음파검층 등 각종 물리탐사 기법을 이용하기도 한다. 연약지반 위에 준설매립을 한 싱가포르 창이공항

표 1. 싱가포르 창이 매립지 다짐관리 기준

시험법	관리 기준	
	CPT	qc ≥ 12MPa
PMT	한계압 ≥ 1.5MPa 프로세미터계수 ≥ 20MPa	한계압 ≥ 1.5MPa 프로세미터계수 ≥ 20MPa
다짐밀도기준	상대밀도 ≥ 65%	상대밀도 ≥ 73%

건설공사시에는 매립층의 다짐관리를 위하여 정적콘관입시험(CPT)을 주요 수단으로 활용하였으며, 공내재하시험과 표준관입시험을 보조적으로 이용하였다. CPT는 시험이 간편하고 신속하며, 시험 결과가 지층 조건에 대해 비교적 일관되게 나타나는 장점이 있다. 창이공항 공사시 적용한 다짐관리 기준은 표 1과 같다.

고속도로 건설공사에 적용 중인 각종 성토재료 및 다짐관리 기준은 표 2와 같다(한국도로공사, 2000).

4. 새로운 다짐관리 기법

이들 다짐도 검사기법들은 오랜 동안의 토질역학적인 검증과 충분한 현장 적용 사례를 통하여 다짐관리상 효용성이 입증되었다고 볼 수 있으나, 일정 횟수 이상의 로울러 주행과 검사의 반복을 통해 다짐도를 확인하므로 많은 시간과 노력이 소요되며, 위치별 다짐 정도의 편차 극복이 어렵고 과다짐(over-compaction)을 유발할 가능성이 있어, 실제 시공 현장에서는 공사관리상 애로 요인이 되기도 한다. 이에 따라 역학적 원리가 분명하면서 보다 신속하고 간편하게 다짐 정도를 평가할 수 있는 새로운 다짐관리 방법에 대한 필요성이 제기되고 있다. 최근 해머나 추를 낙하시켜 하중, 변위, 또는 가속도 등을 측정하여 다짐도를 평가하고자 하는 기법, 장비들이 개발되어 선보이고 있는데, 그 중 현장다짐을 위해 사용하는 진동 로울러의 주행시 다짐층의 반발력 크기



표 2. 성토 종류별 쌓기 재료와 다짐관리 기준(한국도로공사, 2000)

구분		노체		노상	보조기층	구조물 뒷채움부	
		압성토	일반성토				
최대입경		≤ 60cm	≤ 30cm	≤ 10cm	≤ 75cm	≤ 10cm	
수정 CBR		-	≥ 2.5%	≥ 10%	≥ 30%	≥ 10%	
#4체 통과율		-	-	≥ 25%	30~65%	≥ 25%	
#200체 통과율		-	-	≤ 25%	2~10%	≤ 15%	
소성지수		-	-	≤ 10	≤ 6	≤ 10	
다짐 후 1층 두께		≤ 60cm	≤ 30cm	≤ 20cm	≤ 20cm	≤ 20cm	
실내다짐시험법		-	A, B	C, D, E	E	C, D, E	
다짐도		-	≥ 90%	≥ 95%	≥ 95%	≥ 95%	
평판 재하 시험	아스팔트 포장	침하량	0.125cm	0.25cm	0.25cm	0.25cm	-
		지지력계수	20kgf/cm ²	15kgf/cm ²	20kgf/cm ²	30kgf/cm ²	30kgf/cm ²
	시멘트 포장	침하량	0.125cm	0.125cm	0.125cm	0.125cm	-
		지지력계수	20kgf/cm ²	10kgf/cm ²	15kgf/cm ²	20kgf/cm ²	20kgf/cm ²
방사성 동위원소 이용법 (RI 방법)		<ul style="list-style-type: none"> 원자력법 및 방사선 피폭관리 업무규정에 적합한 인원, 시설에 관련된 서류 제출 시험방법에 따른 보정값 확인 					
KS F 2312 흙의 다짐 시험법 KS F 2310 도로의 평판 재하 시험 방법 KS F 2311 현장에서 모래 치환법에 의한 흙의 단위중량 시험 방법 KS F 2320 노상도 지지력비(CBR) 시험 방법							

를 측정, 정수화하여 다짐 정도를 평가하는 기법에 대해서 간략히 소개한다(한국도로공사, 2000; 조성민, 2002).

흙은 다져질수록 간극 속의 공기가 계속 빠져나가 입자간의 간격이 줄게 되고, 단위중량과 강도는 증가하며, 이에 따라 강성이 커지게 된다. 한편, 강성이 큰 물질일수록 외부에서 가해지는 동일한 진동, 또는 충격 하중에 대한 반발 정도가 커지게 된다. 따라서, 이러한 관계를 적절하게 이용한다면 다짐 횟수별로 토층의 반발력 차이를 관찰하여 흙의 강성 변화를 정량적으로 파악할 수 있으며, 이를 통해 궁극적으로는 밀도의 변화를 평가할 수 있을 것이다(Forsblad, 1980;

Turner, 1980).

그림 3에서 로울러 주행 횟수가 많을수록 다짐 정도가 커지며, 토층의 밀도와 반발력이 증가함을 보여준다. 과다짐시에는 흙 입자 파쇄로 오히려 강성이 저하되어 반발력이 감소할 수 있다. 따라서, 로울러의 주행과 함께 수시로 변화하는 지반의 외부 진동에 대한 반발력 변화를 측정할 경우 신속하고 효과적인 다짐관리를 기대할 수 있으며, 과다짐을 방지할 수도 있을 것이다. 이러한 시도는 이미 스웨덴을 비롯한 유럽, 일본, 미국 등지에서 시작되었으며, 현재는 관련 장비들이 다양한 형태로 제품화되어 판매되고 있다(이러한 다짐도 측정기를 compactometer라고 함).

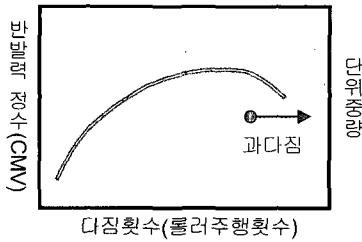


그림 3. 다짐시 밀도, 반발력 변화

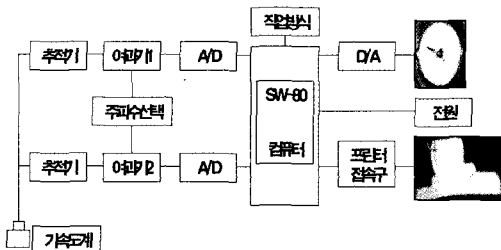


그림 4. 가속도 측정 후 CMV 출력 단계

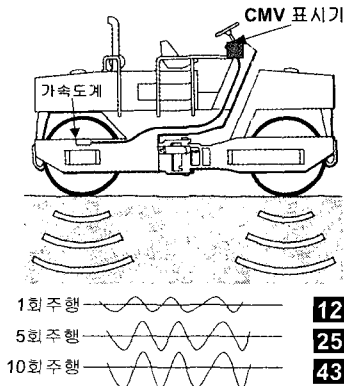


그림 5. 로울러 주행과 CMV

표 3. 성토재별 CMV (Geodynamik, 2000)

재료	CMV
암석(암편)	60~100
자갈	30~80
모래	20~50
점토, 실트	5~30

다짐 로울러의 진동은 일정한 주파수를 가지는데, 이 진동에 대한 반발력의 크기는 가속도계를

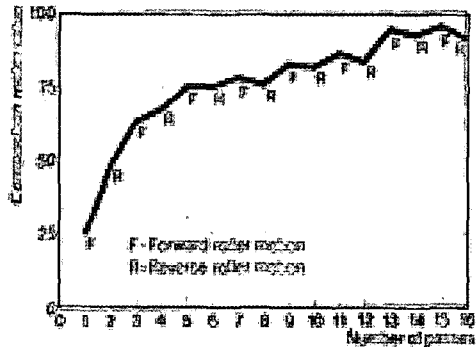


그림 6. 로울러 다짐횟수에 따른 CMV

이용하여 토층을 다지는 로울러 드럼의 연직 진동을 측정하는 방법으로 정량화할 수 있다. 측정된 지층의 가속도는 그림 4의 과정에 따라 전기적인 신호인 반발력 정수로 변환된다.

가속도계 측정값은 로울러의 진동과 지반의 반발력에 의한 신호를 포함하는데, 이 신호를 주파수 대역으로 변환하여 진동롤러의 기본주파수와 지반의 영향을 받은 파에 해당하는 첫 번째 조화주파수만이 기록되도록 2개의 주파수 대역 필터를 통과시킨다. 조화 주파수 대역에서 가속도 크기를 드럼 진동에 의한 기본주파수 대역의 가속도 크기로 나눈 몫을 CMV(CompactMeter Value)라 한다. 이러한 원리에 따라, 반발력 정수인 CMV는 토층이 단단해질수록 증가하게 된다. 이 값은 반발력의 크기를 상대적으로 반영하므로 장비에 따라 절대적인 기준이 달라질 수 있는데, 임의의 특정 장비를 대상으로 할 때 성토 재료별로 얻어지는 값의 대략적인 범위는 표 3과 같다. 그림 5는 이러한 원리를 이용하여 CMV를 측정하는 모식도이며, 그림 6에서 로울러의 주행 횟수(주행속도=3km/h)가 늘어남에 따라 반발력 정수인 CMV 값이 증가함을 알 수 있다. 또한 이러한 방식의 다짐관리를 통해서 로울러 주행 중 즉시 다짐도 확인이 가능하며, 또한 로울러의 주행 횟수에 따른 다짐도 변화 기록을 얻을 수 있어 다짐 구간 전체에 대한 현황 파악이 가능하다.