토공 품질관리 기준 DIN 18 134 규정의 이해

| 최 찬 용 |
한국철도기술연구원
선임연구원

| 이 성 혁 |
한국철도기술연구원
책임연구원

| 황 선 근 |
한국철도기술연구원
책임연구원

1. 서론

국내 흙 구조물에 대한 다짐 품질관리는 재하시험의 일종인 평판재하시험을 이용하여 변형률계수 또는 지지력계수로 평가하고 있다. 도로건설과 달리 철도는 지반 높이가 10m이상 되는 고성토로 시공되는 현장이 매우 많기 때문에 외부의 하중에 대하여 안정적이고 압축침하가 작게 발생하도록 충분히 다짐하여야 한다. 일반적으로 쌓기 구간의 압축침하와 지지력은 다짐도에 따라 좌우되기 때문에 철도에서는 지지력 평가와 상대밀도로서 품질관리를 하고 있다. 상부노반의 강화노반층이나 입도조정부순층과 같이 입자가 큰 경우에는 밀도 관리가 어렵기 때문에 현장에서는 주로 지지력 평가를 실시하고 있다. 특히 국내에서는 상부노반의 지지력에 따라 강화노반 두께를 결정하기 때문에 현장에서의 토공 품질관리는 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 토공노반의 품질관리는 고품격 노반을 조성하는데 있어서 매우 중요한 품질관리 기준이라고 말할 수 있다.

철도에서 토공 품질관리 방법은 평판재하시험(PBT)에서 구한 지지력계수 k_{30}과 반복평판재하시험(CPBT)으로 구한 첫 번째 재하단계 하중에서 구한 변형률계수 E_{v1}과 2번째 재하단계에서의 변형률계수 E_{v2}, 그리고 변형률계수 E_{v1}에 대한 두 번째 재하 시의 변형률계수 E_{v2}의 비인 E_{v2}/E_{v1}을 품질관리 기준으로 사용하고 있다.

철도에서 적용하고 있는 반복평판재하시험은 독일 DIN 18 134 규정을 준용하도록 되어 있다. 본고에서는 국내 도입된 DIN 규정의 정확한 실험절차에 대한 이해와 변형률계수의 산정방법 등을 이론적으로 검토하였다. 또한 동일한 계측자료를 근거로 DIN 규정에서 구한 변형률계수와 국내에서 구하고 있는 방법으로 변형률계수를 서로 비교하여 개선방향에 대하여 검토하였다.

2. 국내외 품질관리 설계기준

현재 토공노반의 다짐 품질관리기준은 일반철도와 고속철도 다르게 적용하고 있다. <표 1>에서와 같이 일반철도의 경우 k_{30}을 적용하고 있으며, 고속철도의 경우 E_{v2}값으로 기준을 정하고 있다.

2.1 평판재하시험에서의 변형률계수(Ev) 산정방법

도로 및 기초 설계에서 널리 사용되고 있는 평판재하시험은 시공된 현장 노반의 지지력을 평가하는 대표적인 시험방법으로 사용되고 있다.

<그림 1>와 같이 직경 30, 40, 또는 75cm의 강체원판(두께 22mm 이상)을 노반 표면에 놓고 하중을

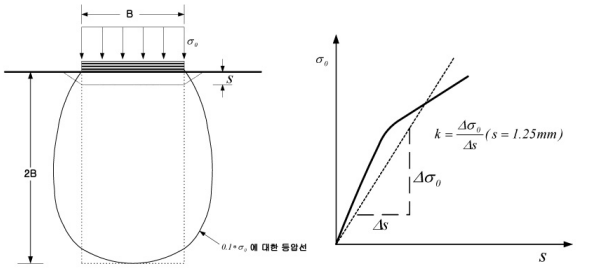

그림 1. 평판재하시험 모식도 및 평균수직응력-변위(김대상 등, 2008)

가하여 평균수직응력(σ_0)과 침하량(s)을 구하고, 침하량 1.25mm에 해당하는 평균수직응력의 비로 지지력을 평가한다. 이를 식으로 표현하면 지반반력계수는 식 (1)과 같이 정의할 수 있으며, 재하판 직경 2배까지의 기초 강성에 대한 정보를 제공하고 부분적인 시간효과를 고려할 수 있다고 알려져 있다(김대상, 2008).

$$k = \frac{\sigma_0}{s} \quad (s=1.25mm \ \text{일 때}) \qquad (1)$$

<그림 2>~<그림 3>은 독일의 고속선(자갈궤도, 슬래브궤도)에 대한 토공 표준단면이다. 관리를 병행하고 있으며, 자갈궤도의 경우 하부노반의 강성기준이 없고, 슬래브궤도만 45MPa으로 관리하고 있다. 또한 자갈궤도의 경우 상부노반의 높이를 2.5m로 국내 3.0m보다는 작은 높이를 사용하고 있는 것을 볼 수 있다.

국내 평판재하시험은 2종류로서 평균수직응력(하중)증가량에 따라 도로의 평판재하시험(KS F 2310)과 확대기초 평판재하시험(KS F 2444)으로 구분하고 있다. 도로의 평판재하시험에서의 평균수직응력은 35kPa이며, 확대기초에서는 최대 98kPa 또는 설계 예상지지력의 1/5씩 6단계 이상

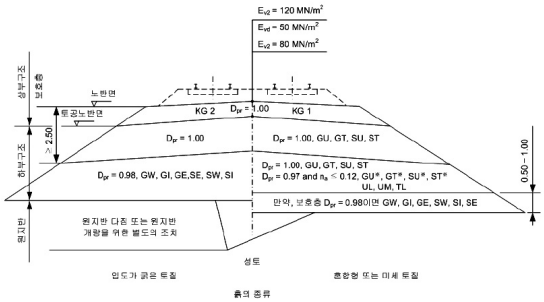

그림 2. 자갈궤도(신설본선, V=300km/h)

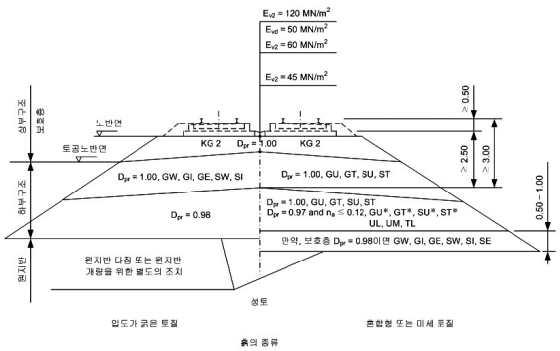

그림 3. 슬라브궤도(신설본선, V=300km/h)

의 하중단계에서의 침하량을 측정하도록 규정하고 있다. 일반적으로 시험 시 사용하는 최대하중의 크기 및 단계하중 증가량은 실제 구조물이 경험하는 하중단계를 고려하여 산정하는 것이 일반적이다.

독일 DIN 18 134 규정에서 평판재하시험의 경우 762mm직경의 재하판을 사용하고 초기 평균수직응력을 0.005MPa로 시작하여, 0.04MPa, 0.08MPa, 0.14MPa, 0.2MPa으로 5단계까지 단계별 하중을 증가시키도록 되어 있다. 이때 하중증가량은 약 40~60kPa으로 재하 각 단계

표 1. 일반철도와 고속철도 상 · 하부노반 품질기준

일반철도(자갈궤도)		고속철도				비고
		자갈도상		콘크리트도상		
상부노반	하부노반	상부노반	하부노반	상부노반	하부노반	
k_{30}〉11×10⁴kN/㎥	k_{30}〉7×10⁴kN/㎥	E_{V2}≥ 80MN/㎡ E_{V2}/E_{V1}〈2.3	E_{V2}≥ 60MN/㎡ E_{V2}/E_{V1}〈2.7	E_{V2}≥ 80MN/㎡ E_{V2}/E_{V1}〈2.3	E_{V2}≥ 60MN/㎡ E_{V2}/E_{V1}〈2.7	일반철도 KS F 2339 고속철도 DIN 18 134
최대건조 밀도의 95% 이상	최대건조 밀도의 90% 이상	최대건조 밀도의 95% 이상	최대건조 밀도의 90% 이상	최대건조 밀도의 95% 이상	최대건조 밀도의 90% 이상	KS F2311 D방법

에서의 침하량이 0.02mm/min보다 작아 질 때까지 유지하고 다음 단계 하중을 재하 하도록 되어 있다.

평판재하시험은 첫 번째 하중 재하 단계로부터 변형률계수를 구하기 때문에 상대적으로 큰 소성변형이 포함될 수 있다. 또한 평판재하시험은 특정 지점의 단기 지지력 특성만을 파악할 수 있기 때문에 시험한 지점의 층 구성 상태를 파악하는 것이 중요하다.

평판재하시험으로부터 구한 k_{30} 값으로부터 변형률계수는 Vesic(1961)이 제안한 식 (2)을 식 (3)과 같이 간단하게 구할 수 있다.

$$k = 0.65\sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_f I_f}}\,\frac{E_s}{B(1-\mu^2)} \qquad (2)$$

$$k = \frac{E_s}{B(1-\mu^2)} \qquad (3)$$

여기서, E_s : 지반의 탄성계수, B : 기초의 폭(평판의 지름), E_f : 기초의 탄성계수, I_f : 기초의 단면 2차 모멘트, μ : 지반의 포아송 비이다.

2.2 반복평판재하시험(DIN 18 134규정)

2.2.1 시험방법

경부고속철도 2단계와 호남고속철도의 토공노반의 품질관리기준은 반복평판재하시험으로 관리하고 있다. 반복평판재하시험은 기존 평판재하시험과 달리 최대하중, 단계별 하중증가량, 그리고 하중재하단계 수, 단계별 하중재하시간 등이 다르다. 특히 재하하중은 재하(load) → 제하(unload) → 제재하(reload)로 하중을 반복적으로 재하하여 초기 소성침하량을 제거하고 단계별 하중재하 시간이 빠른 특징을 가지고 있다. 따라서 기존 평판재하시험보다 현장에서 빠르게 다짐 강성을 평가할 수 있으며, 큰 소성변형을 제거할 수 있기 때문에 보다 장점이 많은 시험방법으로 알려져 있다.

반복평판재하시험에서 재하하중은 최소 6단계 이상으로 규정하고 있으며, 각 하중단계별로 1~2분 동안 하중을 일정하게 유지하고 다음 하중단계로의 1분 이내에 완료하도록 되어 있다.

하중재하판은 300mm를 사용하고 하중재하는 0, 0.08MPa, 0.16MPa, 0.25MPa, 0.33MPa, 0.42MPa, 0.50MPa으로 총 6단계 하중을 재하 시키고, 다시 단계별로 하중을 0.25MPa, 0.125MPa, 0으로 제거한다. 그리고 다시 초기 하중단계와 마찬가지로 최대수직응력 0.5MPa까지 재하 시켜 지지력을 평가하는 것이다. 이때 평균수직응력 증가량은 약 80~90kPa으로 평판재하시험에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 고속철도 및 일반철도의 상부노반에서 발생하는 수직응력이 0.196MPa의 범위에 있으므로 독일 DIN 18 134규정에서의 최대수직응력($\sigma_{0,max}$) 0.5MPa은 철도 재하시험에서 최대수직응력으로 충분한 수준이라고 볼 수 있다.

<그림 4>는 DIN 18 134에 보이고 있는 변위계 측정용 지그이다. 그림에서와 같이 국내에서 측정하는 변위 계측 방법과는 다르다는 것을 알 수 있다. 국내에서는 하중이 재하되는 지점에서 변위 측정센서를 설치하기 어렵기 때문에 원형 평판에 3개 지점에 측정센서를 설치하고 이를 평균하여 평판의 침하량으로 계산하고 있다. 그러나 DIN 18 134에서는 하중이 직하되는 지점에서 변위를 측정하기 위하여 <그림 4>와 같은 별도의 변위측정용 지그를 설치하여 측점 위치에 대한 거리 보정을 하여 원형 평판 중심부 변위를 정확하게 측정하고 있다.

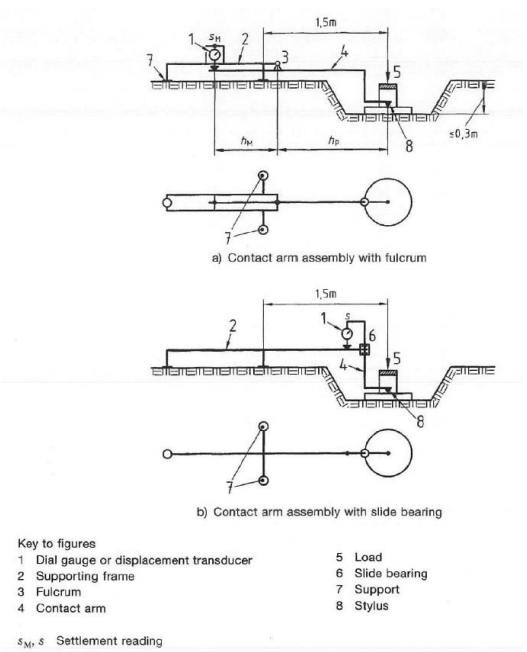

그림 4. 평판-침하게이지의 측정 및 설치 예 (DIN 18 134)

<그림 4>에서와 같이 변위 측정위치가 다르기 때문에 변위 측정위치와 평판 중심거리와의 차이에 대한 거리를 식 (4)과 같이 보정하여야 한다. 이 때 거리 비(*s*)는 2이상이 되지 않도록 규정하고 있다.

$$s = s_M \cdot \frac{h_p}{h_M} \tag{4}$$

여기서, h_p, h_M 은 〈그림 4〉에서 정의된 거리이다.

반복평판재하시험으로부터 얻은 측정값을 가지고 최종적으로 변형률계수 E_{v1}과 E_{v2}값을 구하여야 한다. E_{v1}과 E_{v2}를 구하는 방법은 2가지 방법이 제시되어 있다. 첫 번째 방법은 반복평판재하시험으로부터 얻은 평균수직응력과 변위 관계 곡선으로부터 2차 함수의 회귀곡선으로 각 계수를 식 (5)과 같이 구하여 변형률계수를 산정하는 방법이 있다. 두 번째 방법은 최대수직응력(σ_{0max})의 0.3배($0.3\sigma_{0max}$)와 0.7배($0.7\sigma_{0max}$)사이의 할선구배(gradient of secant)로 변형률계수를 구하는 방법이다.

첫 번째 방법은 하중 단계를 모두 고려하여 2차 함수 곡선으로 회귀 분석하여 각 계수를 추정하기 때문에 두 번째 방법보다 더 합리적이라고 볼 수 있다.

$$s = a_0 + a_1 \cdot \sigma_0 + a_2 \cdot \sigma_0^2 \tag{5}$$

여기서, σ_0 : 평판아래에서의 평균수직응력(MPa), a_0, a_1, a_2는 회귀곡선에서 구한 계수(mm/MN²/m⁴)이다.

변형률계수 산정은 앞서 Vesic(1961)이 제안한 식으로부터 포아송비(*v*)를 0.5로 가정하여 식 (7), (8)과 같이 구할 수 있다.

$$k_s = \frac{\sigma}{s} = \frac{E_s}{B(1-\nu^2)} \tag{6}$$

$$\frac{\sigma_0}{s} = \frac{E_s}{0.75B} \tag{7}$$

$$E_s = 0.75B \times \frac{\sigma_0}{s} \tag{8}$$

여기서, B는 평판의 직경(mm)이다.

식 (8)의 변형률계수를 식 (5)을 대입하면 식 (9)과 같이 표현되며 이를 간략히 표현하면 식 (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$E_s = 1.5 \times r \times \frac{\sigma_0}{a_0 + a_1\sigma_0 + a_2\sigma_0^2} \tag{9}$$

$$E_v = \frac{1.5r}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{0\max}} \tag{10}$$

여기서, γ: 재하판의 반경(mm), σ_{0max} : 최대평균수직응력(MPa)이다.

두 번째 변형률계수 산정방법은 식 (7)을 식 (11)와 같이 변형시켜 구할 수 있다. 식 (11)을 다시 변형시켜 식 (12)과 같이 변형률계수를 산정하고 있다. 따라서 철도의 경우 철도하중이 경험하는 수직응력범위를 고려하여 최대평균수직응력의 $0.3\sigma_{max}$와 $0.7\sigma_{max}$의 할선기울기로 구하는 것이다.

$$E_v = 0.75 \times D \times \frac{\sigma_0}{s} \tag{11}$$

$$E_v = 0.75 \times D \times \frac{\Delta\sigma_0}{\Delta s} \tag{12}$$

여기서, D는 평판재하 직경, $\Delta\sigma$은 최대수직응력(σ_{0max})의 0.3배($0.3\sigma_{0max}$)와 0.7배($0.7\sigma_{0max}$)에서 구한 응력의 차이이며, Δs는 하중단계에서 발생된 변위이다.

2.3.2 변형률계수 산정방법(DIN 18 134)

<표 2>과 <표 3>은 DIN 18 134규정에 있는 변형률계수 구하는 예제를 그대로 준용하였다. 먼저 측정 위치를 식 (13)과 같이 보정하여 거리 보정계수를 1.33으로 구하였다.

$$h_p = 1.26m,\ h_M = 0.945m,\ \frac{h_p}{h_M} = 1.33 \tag{13}$$

<그림 5>는 <표 2>와 <표 3>의 계측결과를 바탕으로 하중-변위곡선을 구한 그림이다.

<표 4>는 <그림 5>의 각 하중단계별 변위 곡선으로부터 1차 하중 단계, 2차 하중단계의 2차 함수 곡선을 각각 회귀

표 2. 첫 번째 하중재하–제하시 응력–변위 결과표

하중단계	하중(kN)	수직응력, σ_0 (MN/㎡)	침하량, S_M (㎜)	보정침하량, s (㎜)
0	0	0	0	0
1	5.65	0.080	0.86	1.15
2	11.31	0.160	1.57	2.09
3	17.67	0.250	2.15	2.87
4	23.33	0.330	2.44	3.25
5	29.69	0.420	2.85	3.80
6	35.34	0.500	3.16	4.21
7	17.67	0.250	2.97	3.95
8	8.84	0.125	2.78	3.70
9	0	0	1.94	2.59

표 3. 두 번째 재하시 하중–변위 결과표

하중단계	하중(kN)	수직응력, σ_0 (MN/㎡)	침하량, S_M (㎜)	보정침하량, s (㎜)
10	0	0	1.94	2.59
11	5.65	0.080	2.42	3.22
12	11.31	0.160	2.65	3.53
13	17.67	0.250	2.84	3.78
14	23.33	0.330	2.99	3.98
15	29.69	0.420	3.10	4.13

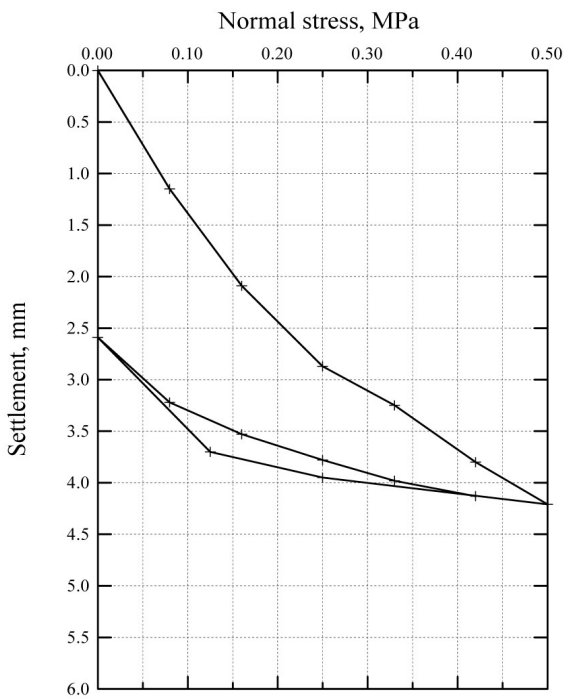

그림 5. 하중-변위 곡선

표 4. 반복평판재하시험결과

계수	1st 하중재하	2nd 하중재하
τ_{0max}(MN/m²)	0.50	0.420
a_0(mm)	0.285	2.646
a_1(mm/(MN/m²)	12.270	6.637
a_2(mm/(MN²/m⁴)	−9.034	−7.574
Ev*1 (MN/㎡)	29.0	78.9
$\frac{Ev_2}{Ev_1}$	2.72	

※*1: 식 (10)에 의해서 구함

예) $E_v = \frac{1.5 \times 150}{12.27 - 9.034 \times 0.5} = 29.0MPa$

분석하여 계수 a_0, a_1, a_2를 구하여 변형률계수 E_{v1}과 E_{v2}를 구한 것이다. 표에서와 같이 변형률계수 E_{v1}과 E_{v2}는 29MPa와 78.9MPa으로 나타났으며, E_{v2}/E_{v1}비는 2.72로 계산되었다.

2.2.2 할선기울기로 구하는 방법

할선기울기로 구하는 방법은 국내에서 현재 적용하고 있는 방법으로 재하하중이 약 0.15MPa~0.35MPa에 해당하는 할선 기울기로서 이는 열차하중에 의해 노반 상부에서 경험하는 충분한 응력범위로 볼 수 있다.

<그림 4>의 하중-변위 곡선으로부터 식 (13)으로부터 변형률계수 E_{v1}와 E_{v2}값을 구하면 <표 5>과 같다. 표에서와 같이 할선기울기를 통해 구한 변형률계수 E_{v1}과 E_{v2}는 31MPa, 97.8MPa 산정되었다.

첫 번째 방법과 두 번째 방법의 가장 큰 차이점은 첫 번째 방법은 하중재하 단계를 모두 반영한 2차 함수 곡선을 회귀 분석하여 각 계수를 구하는 것이고, 두 번째 방법은 철도하중에 의해 노반에서 경험하는 응력범위로서 2개의 하중단계를 할선 기울기로 평가하는 방법의 차이이다.

표 5. 국내 변형률계수 산정방식으로 구한 변형률계수

하중단계	수직응력(MPa)		침하량(mm)		$\Delta\sigma$ (MPa)	Δs (mm)
	σ_1	σ_2	s_1	s_1		
1st 하중	0.15	0.35	2.0	3.45	0.2	1.45
2nd 하중	0.15	0.35	3.54	4.0	0.2	0.46
변형률계수	$E_{v1} = 0.75 \times 0.3 \times \frac{0.2}{0.00145} = 31MPa$ $E_{v2} = 0.75 \times 0.3 \times \frac{0.2}{0.00046} = 97.8MPa$					

표 6. DIN 규정과 국내에서 산출된 변형률계수의 차이

구분	DIN 규정	국내	차이
E_{v1}	29MPa	31MPa	2MPa
E_{v2}	78.9MPa	97.8MPa	18.9MPa
E_{v1}/E_{v2}	2.72	3.15	–

DIN 13 184규정에서는 첫 번째 방식을 사용하고 있으며, 2차 함수로 회귀 분석하여 각 계수를 구하고 이를 탄성 이론에 의해 변형률계수를 산정하는 방법을 추천하고 있다.

<표 6>은 DIN 13 184규정에 있는 예제를 가지고 첫 번째 방법과 두 번째 방법으로 구한 변형률계수를 비교하였다. 표에서와 같이 변형률계수 E_{v2}값은 구하는 방법에 따라 약 18.9MPa 정도 차이가 발생하고 있으며, 이는 동일한 계측자료로 구한 결과로 볼 때 큰 차이라고 할 수 있다. 따라서 이러한 분석방법의 차이로 인해 품질이 요구하는 성능을 만족하지 못할 수 있기 때문에 면밀한 분석이 요구된다고 판단된다. 또한, 현재 변형률계수 E_{v2}는 토공 다짐품질 관리에 매우 중요한 기준 값으로 활용되고 있기 때문에 더욱 더 주의를 기울여 평가하여야 할 것으로 판단된다.

국내 강화노반의 보조도상 두께는 상부노반의 지지력이 소정의 다짐도를 가지고 있다고 가정하여 최소두께 20cm로 설계하고 있다. 반면 외국의 경우 상부노반의 지지력에 따라 보조도상 두께를 다르게 적용하고 있기 때문에 국내에 적용하고 있는 보조도상 두께가 적절하기 위해서는 상부노반의 지지력 기준 조건이 만족한다는 전제조건이 있어야 한다.

2.3 DIN 18 134 규정과 국내 적용상의 차이

토공구간의 다짐품질관리 기준인 변형률계수(E_{v2})는 매우 중요한 기준으로 상 · 하부노반의 품질뿐만 아니라 강화노반, 원지반, 접속부 구간 등에서 지지력 만족여부를 판단하는 중요한 설계 및 품질기준이다.

국내 품질시험의 적용 상황과 DIN 18 134규정과 다른 점을 살펴보면, 먼저 변위측정방법의 차이이다. DIN 18 134규정에서는 원칙적으로 하중이 재하된 지점에서의 변위를 측정하여야 한다는 기본 개념을 충실히 충족시키고 있는 것으로 판단된다. 따라서 DIN 18 134의 규정을 만족할 수 있도록 독일에서는 <사진 1>과 같은 방법으로 3점 지지방식의 지그와 평판재하시험 장비를 제작하여 평가하고 있다.

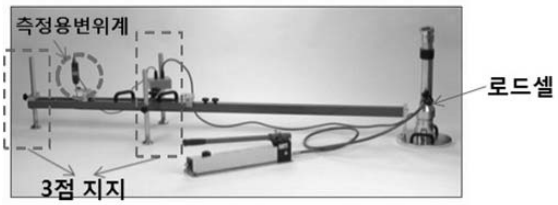

사진 1. 3점 지지 방식의 지그

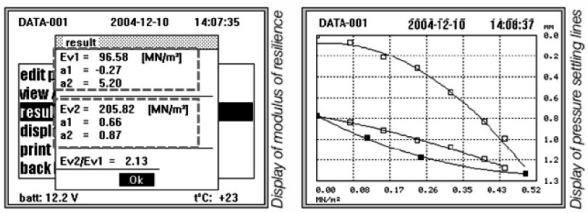

사진 2. 독일의 평판재하 자동 추출 프로그램 예시

두 번째 차이점은 변형률계수의 산정방식이다. 할선기울기로 구하는 방법은 변형률계수를 구하는데 첫 번째 방법보다 간편한 방법은 사실이다. 그러나 앞서 언급하였듯이 할선기울기로 구하는 방법은 간접적으로 평가하는 방법으로 전체 하중단계를 고려한 첫 번째 방법보다는 정확성 측면에서 차이가 있을 수 있다. DIN 18 134규정을 만든 독일의 경우에도 <사진 2>와 같이 현장에서 계측 결과를 바로 입력하여 하중-침하 곡선을 전산화된 장비를 이용하여 2차 함수로 회귀 분석하여 각 계수를 구하고 이를 현장에서 바로 품질을 확인할 수 있도록 하고 있다. 따라서 국내에서 사용하고 있는 할선기울기 방법보다 2차 함수곡선으로 산정하는 변형률계수 산정방법으로 토공품질관리를 실시하여야 할 것으로 판단된다.

국내에 도입된 DIN 18 134규정은 기존 평판재하시험방법의 현장 적용상의 단점을 보완할 수 있는 시험방법으로 도로보다 철도에서 우선적으로 적용하게 되었다. 따라서 외국에서 도입된 기준을 국내에 반영할 때에는 보다 정확한 이해가 필요할 것으로 판단된다. 또한 국내 건설 환경은 외국과 다르기 때문에 부분적으로 개정하기 위해서는 시험시공 또는 연구 결과를 바탕으로 원래 시험목적을 저해하지 않는 수준에서 개선하여 시험규정이 요구하는 결과에 대한 신뢰성을 확보하여야 한다고 생각된다.

3. 결론

토공부의 다짐 품질관리 기준은 매우 중요한 인자로서 특히 국내에 시공되는 콘크리트궤도의 경우 10m 이상의 고성토로 조성되기 때문에 성토체의 다짐관리는 사용성 측면에서 가장 중요한 항목이라고 볼 수 있다. 이에 본 고에서는 DIN 18 134에 대하여 규정을 검토하여 현행 국내에서 적용하는 방법과의 차이를 비교하였다.

변형률계수 산정방식은 DIN 18 134규정에서 제시하고 있는 첫 번째 산정 방법으로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 이를 위해 하중-변위 2차 함수 곡선으로 최적화 시킬 수 있는 프로그램을 활용하여야 할 것으로 판단된다. 또한 기존에 침하 데이터의 페이퍼 또는 엑셀 파일로 관리되어오던 평판재하시험 데이터 및 관련 정보를 데이터베이스화함으로써 시험 시에 얻은 데이터를 언제든 저장 및 불러들일 수 있는 장치개발이 요구되어야 할 것으로 판단된다.

♣ 참고 문헌

1. 김대상, 이수형, 최찬용(2005), "철도노반공사 다짐관리기준에 관하여", 철도시설기술지, No. 98. pp.38~44.
2. 김대상, 박성용, 김수일(2008), " 평판재하시험을 이용한 지반반력계수와 변형률계수의 상관관계 평가", 한국지반공학회 논문집, 제 24권 제6호, pp.57~67.
3. 배재훈(2010), "응력상태를 고려한 기존 다짐품질관리 시험법과 LFWD 시험법의 상관성 연구", 한양대학교 석사학위논문.
4. 한국철도기술연구원, "토공노반 최적두께 산정을 위한 설계표준기술연구", 연구보고서.
5. DIN 18 134(2001), "Determining the deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test"
6. Vesic, A.S.(1961). "Beams on elastic subgrade and the Winkler's hypothesis", Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, (ISMFE'61), Paris, France, pp.845~850.