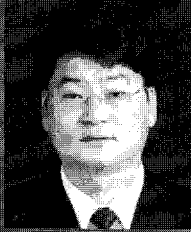
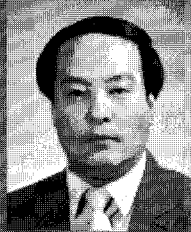


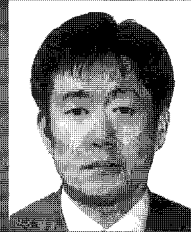
# 평판재하시험에서 탄성계수 간편 추정 방법



최 찬 응 |  
한국철도기술연구원  
선임연구원



이 성 혁 |  
한국철도기술연구원  
책임연구원



엄 기 영 |  
한국철도기술연구원  
책임연구원

## 1. 서론

흙 구조물의 성능을 적절하게 유지하기 위해서는 철저한 시공 품질관리가 선행되어야 한다. 현재 현장에서 실시하고 있는 품질관리 방법은 재하시험의 일종인 평판재하시험으로 구하는 지반반력계수( $k_{30}$ ) 또는 변형률계수( $E_{v2}$ )이다. 그러나 지반반력계수와 변형률계수는 재료의 물성이기 보다는 재하판의 형상이나 재하조건에 따라 다르기 때문에 경제성 문제로서 엄밀히 말해서는 흙의 탄성계수는 아니다. 일반적으로 흙의 탄성계수는 등방 탄성체의 측면이 구속되지 않는 상태에서 축 방향으로 압축 또는 인장을 받을 경우 응력-변형률 관계를 나타내는 비례정수를 말하며 초기 접선계수(탄성계수)와 할선 탄성계수로 정의된다(박용부 등,

2000). 따라서 본 고에서는 평판재하시험에서 구한 지반반력계수( $k_{30}$ )와 변형률계수( $E_{v2}$ )에 대하여 기존 탄성이론과 경험적인 상관관계를 바탕으로 탄성계수를 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

## 2. 철도에 적용되는 흙 구조물

### 2.1 국내 흙 구조물 품질관리기준

국내 흙 구조물의 품질관리 기준은 일반철도와 고속철도 다르게 적용하고 있다. 일반철도는 KS F 2339에 의거한 평판재하시험으로부터 지반반력계수( $k_{30}$ )으로 관리하고, 고속철도는 독일의 DIN 18 134에 의거한 변형률계수( $E_{v2}$ )로 관리하고 있다(< 표 1> 참조).

표 1. 일반철도와 고속철도 상·하부노반 품질기준<sup>6)</sup>

일반철도(자갈계도)		고속철도				비고
상부노반	하부노반	자갈도상		콘크리트도상		
		상부노반	하부노반	상부노반	하부노반	
$k_{30} > 11 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$	$k_{30} > 7 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$	$E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$	$E_{v2} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} < 2.7$	$E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$	$E_{v2} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} < 2.7$	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

2.2 지반반력계수와 탄성계수의 차이점

지반의 탄성계수는 응력과 변형의 관계를 직선으로 가정하였을 때의 구배를 의미하고 지반 재료요소로서의 물성치의 하나이다. 이에 반해 지반 반력계수는 기초의 지반 반력(단위면적당의 지반의 저항력)과 변위의 관계에서의 구배를 의미하고 물성 값이기 보다는 경계치 문제의 해이기 때문에 재하판의 형상이나 재하 조건에 따라서 다르다.

그림 1은 지반의 변형계수와 지반 반력계수에 대한 차이를 나타낸 것으로 일반적으로 탄성 거동으로서 취급되는 영역에 있어서도 엄밀히 말해서는 비선형 거동을 보이게 된다. 이와 같은 지반의 비선형성(nonlinear)을 일으키는 주된 요인으로서 크게 3가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로는 「변형 레벨 의존성」으로 변형레벨이 커질수록 변형계수가 저하하는 현상을 말한다. 두 번째로는 「하중이 작용되는 지속 시간」에 대한 영향이다. 열차 하중과 같이 단기 작용에 대한 지반반력계수에 비해 사하중 등의 장기 작용에 대해서는 크리프 변위 등의 영향에 크기 때문에 겉보기 지반 반력계수는 저하되게 된다. 세 번째 「재하 폭 의존성」으로 동일 지반 상이라도 재하 폭이 커질수록 지반 반력계수가 저하하는 특징이다.

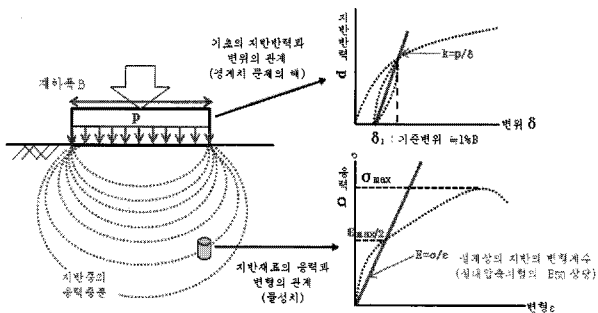


그림 1. 기초 구조물의 설계에 이용하는 지반의 변형계수와 지반반력계수의 모델화의 사고방식(3)

3. 평판재하시험에 의한 값으로부터 탄성계수를 구하는 방법

일본에서는 1970년 후반에 설계표준화 작업을 통해 평판재하시험의 지반반력계수(\$k\_{30}\$)값으로 탄성계수를 구하는 방법을 제안한바 있다. Boussinesq의 탄성론에 의거하여

Timochenko 등(1951)은 강성 원형판의 침하량을 계산하였으며 이는 식 (1)과 같다.

$$\delta = \frac{\pi qa(1-\nu^2)}{2E} \tag{1}$$

여기서, \$q\$: 재하응력(MPa), \$a\$: 재하판(m), \$\nu\$: 포아슨비(0.3), \$E\$: 지반의 탄성계수(MPa)이다.

이는 평판재하판의 직경이 75cm를 기본으로 되었으나 실제 현장에서는 직경 75cm의 재하판으로 재하할 경우 큰 반력대가 필요하기 때문에 직경 30cm 재하판을 이용하여 \$k\_{75}\$을 \$k\_{30}\$으로 변환하여 사용하여야 한다. 일반적으로 도로의 설계시 사용하고 있는 값을 고려하여 \$k\_{30} = 2.2k\_{75}\$으로 적용하였다. 평판재하시험의 지반에 발생하는 수직변형률(\$\epsilon\_v\$)은 Schemertamann 등(1978)의 변형률 영향계수(Strain influence factor, \$I\_z\$)를 이용하여 구할 수 있으며, 깊이비(\$z/D\$)에 대한 변형률 영향계수는 그림 2과 같다. 따라서 평판재하시험에 있어서의 변형레벨은 식(2)로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon_v = \frac{q}{E} I_z \tag{2}$$

여기서, \$q\$: 평판 작용응력(MPa), \$E\$: 지반탄성계수(MPa)

김동수 등(2005)은 동일한 지반에서 대표 깊이에 해당

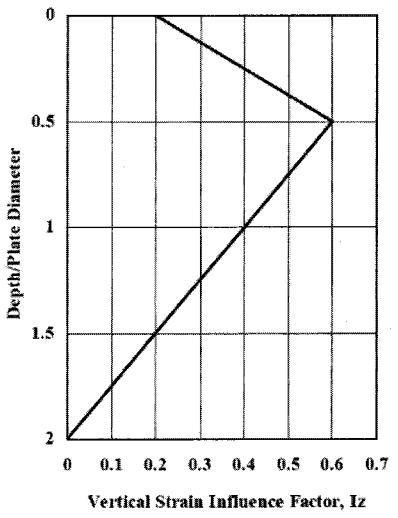


그림 2 수직변형률 영향계수

하는 변형률 영향계수를 적용하면 변형률 영향계수에 상관없이 거의 동일한 변형특성을 가진다고 보고한 바 있다. 따라서 지반 재료의 변형계수는 변형레벨에 의존하기 때문에 열차하중에 의해 노반에 작용하는 변형률 레벨과 평판재하시험의 변형률 레벨을 고려하여야 보다 합리적인 설계정수값을 도출할 수 있다. 또한 다양한 연구를 통하여 정적, 동적 또는 반복재하시험 중 어떠한 시험방법으로 시험이 실시되는가에 관계없이 탄성계수에 대한 영향요소를 합리적으로 고려한다면 동일한 탄성계수를 얻을 수 있다고 알려져 있다고 발표한 바 있다(권기철 등, 2000; 한국지반공학회, 2004; Burland, 1989; Goto 등, 1991).

그림 3은 국내 보조기층재료의 정규화 탄성계수 감소곡선으로 권기철 (2004)은 국내 도로용 보조기층재료에 대하여 변형특성에 대한 영향요소를 고려하여 보조기층재료의 탄성계수는 변형률 크기 및 구속응력의 영향을 매우 크게 받고 있다고 하였다.

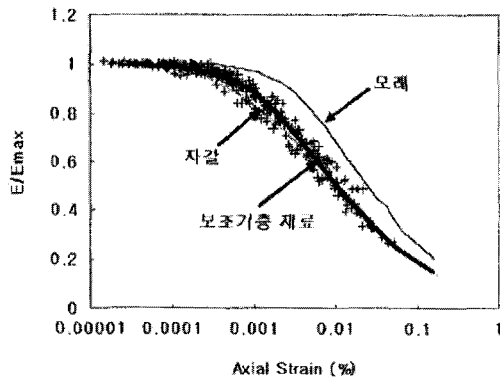


그림 3. 보조기층재료의 정규화탄성계수 감소곡선<sup>3)</sup>

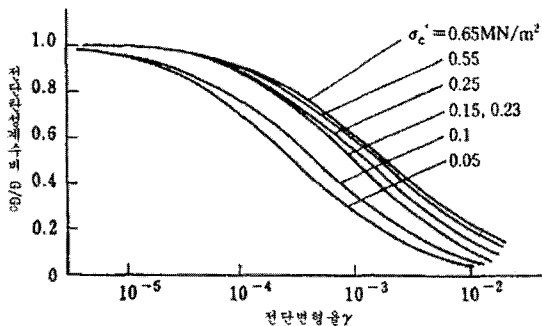


그림 4. 사질토재료의 정규화전단탄성계수 곡선<sup>4)</sup>

권기철 (2004)은 포장체의 시공이 완료된 후 보조기층이 경험하는 변형률의 크기는  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  정도로 발생한다고 하였다. 일반적으로 평판재하시험의 변형레벨은  $10^{-3}$  정도가 되고, 열차하중에 의해 노반이 경험하는 변형레벨은  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  정도로 평판재하시험의 변형레벨과 차이가 있기 때문에 이를 보정하여야 한다. 桃谷尙嗣 (2004)는 일반적으로 변형률 레벨  $10^{-3}$ 과  $10^{-4}$ 의 경우에 전단탄성계수는 약 2배 정도 차이가 난다고 가정하여 이러한 변형률 레벨의 차이를 고려하여 약 2배 할증하여 탄성계수를 계산하는 것이 보다 경제적인 설계방안이라고 볼 수 있다고 하였다 (그림 4 참조). 따라서 식 (1)의 탄성이론을 식 (3), (4)로 변환하여 추정탄성계수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{q}{\delta} = k_{75} = \frac{2E}{\pi a(1-\nu^2)} \quad (3)$$

$$E = 2 \left\{ \frac{\pi a(1-\nu^2)}{2 \times 2.2} \right\} k_{30} = 0.487k_{30} \quad (4)$$

여기서,  $\delta$ : 강성 원형판에 의한 지표면 침하량(cm),  $q$ : 재하응력(MPa),  $a$ : 재하판의 직경(m),  $k_{75}$ : 직경 75cm의 재하판에 의한 k값(MN/m<sup>3</sup>),  $k_{30}$ : 직경 30cm의 재하판에 의한 k값(MN/m<sup>3</sup>)

그림 5는 식 (4)로부터 구한 지반반력계수에 따른 탄성계수의 변화이다. 그림에서 일반철도에서의 상부노반과 하부노반의 요구되는 지반반력계수( $k_{30}$ ) 70MN/m<sup>3</sup>,

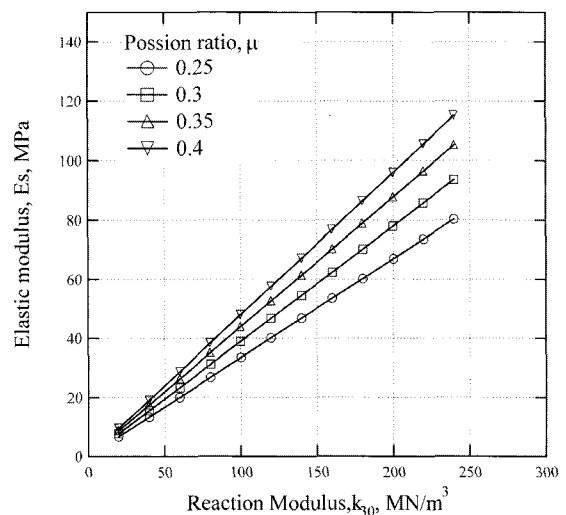


그림 5. 탄성이론을 고려한 지반반력계수에 따른 탄성계수 추정곡선

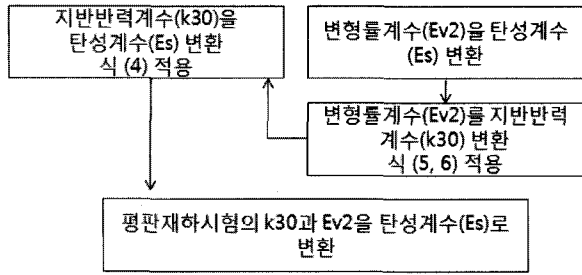


그림 6. 평판재하시험에서 구한 지반반력계수( $k_{30}$ )와 변형률계수( $E_{v2}$ )를 탄성계수( $E_s$ )로 추정하는 흐름도

110MN/m<sup>3</sup>을 만족하는 탄성계수를 추정하여 보면 각각 약 34.1MPa와 53.6MPa임을 알 수 있다.

앞서 언급하였듯이 고속철도는 지반반력계수( $k_{30}$ )을 사용하지 않고 반복평판재하시험(DIN 18 134)에서 구한 변형률계수( $E_{v2}$ )를 사용하도록 되어 있다. 변형률계수( $E_{v2}$ )도 지반반력계수와 마찬가지로 지반과 접촉하는 경계치의 해이기 때문에 이를 탄성계수로 보정하여야 한다.

그림 6은 변형률계수( $E_{v2}$ )를 탄성계수( $E_s$ ) 추정방법에 대한 흐름도이다. 그림에서와 같이 변형률계수( $E_{v2}$ )를 상관관계로부터 지반반력계수( $k_{30}$ )를 구하고 이를 앞서 언급한 탄성이론으로 탄성계수( $E_s$ )를 추정하는 방법을 제안하

표 2. 지반반력계수와 변형률계수의 상관관계<sup>3)</sup>

지반종류	$k_{30}$	$E_{v2}$ (MPa)		
		하한	평균	상한
원지반	69	25.5	28.6	31.8
	108	40.0	44.8	49.8
쌓기지반	69	21.5	33.0	44.1
	108	33.7	51.7	69.1

표 3. 다짐품질관리 기준에 대한 탄성계수( $E_s$ )

품질관리	노반	최소 요구기준값	$k_{30}$ (MN/m <sup>3</sup> )	탄성계수( $E_s$ )	비고
지반반력계수 ( $k_{30}$ )	하부노반	70MN/m <sup>3</sup>	-	34.1MPa	$\nu=0.3$
	상부노반	110MN/m <sup>3</sup>	-	53.6MPa	$\nu=0.3$
변형률계수 ( $E_{v2}$ )	원지반	45MPa	94.6	45.7MPa	$\nu=0.3$ $\sigma'_m=40\text{kPa}$
	하부노반	60MPa	126.1	61.4MPa	$\nu=0.3$ $\sigma'_m=40\text{kPa}$
	상부노반	80MPa	168.1	81.3MPa	$\nu=0.3$ $\sigma'_m=40\text{kPa}$
	보조도상	120MPa	250.5	122.0MPa	$\nu=0.3$ $\sigma'_m=40\text{kPa}$

였다.

여러 연구자들은 평판재하시험의 지반반력계수( $k_{30}$ )과 변형률계수( $E_{v2}$ )의 상관관계에 대하여 연구를 수행한 바 있다. 국내에서는 김대상 등(2008)에 의하면 원지반과 쌓기 지반의 지반반력계수( $k_{30}$ )과 변형률계수( $E_{v2}$ )의 상관관계를 식 (5), (6)과 같이 제시한 바 있다.

$$\text{(원지반)} \quad E_{v2} = \alpha' k_{30} (1 - \nu^2) \left( \frac{40}{\sigma'_m} \right)^{0.3} \quad (\alpha' = 0.358 \sim 0.446) \quad (5)$$

$$\text{(쌓기지반)} \quad E_{v2} = \beta' k_{30} (1 - \nu^2) \left( \frac{40}{\sigma'_m} \right)^{0.3} \quad (\beta' = 0.343 \sim 0.703) \quad (6)$$

여기서,  $\nu$ : 포아송비,  $\sigma'_m$ : 평균유효응력(kPa),  $\alpha'$ ,  $\beta'$ : 무차원 계수이다.

식 (5), (6)의 범위에서 김대상 등(2008)이 제안한 상관계수 중간값(Mean value)을 사용하여서는  $\alpha'$ 는 0.402,  $\beta'$ 는 0.523로 적용하였다.

표 3은 일반철도와 고속철도의 품질관리 기준에 해당하는 탄성계수( $E_s$ ) 추정된 결과표이다. 표에서와 같이 최소요구 품질관리 기준에 대한 탄성계수( $E_s$ )는 지반반력계수의 경우 약 0.5배, 변형률계수는 1배로 추정되는 것을 볼 수 있다. 따라서 평판재하시험에서 구한 계수로부터 설계에 적용하기 위한 탄성계수는 표 4와 같이 간편하게 설계 정수값을 추정할 수 있다.

표 4. 평판재하시험으로부터 탄성계수의 간편 추정방법

시험	탄성계수( $E_s$ )	비고
지반반력계수( $k_{30}$ )	2:1	-
변형률계수( $E_{v2}$ )	1:1	-

#### 4. 결론

현재 국내에 가장 보편적으로 사용하고 있는 평판재하시험의 결과인 지반반력계수( $k_{30}$ )과 변형률계수( $E_{v2}$ )를 탄성이론과 경험식을 이용하여 간략하게 탄성계수( $E_s$ )를 산정하는 방법에 대하여 제안하였다. 이를 통해 수치해석의 설계 값으로 적용하였을 경우 보다 정확한 현장 예측을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 본 고에서 제안하는 방법은 경험적인 방법과 탄성이론에 근거한 간편한 방법으로 보다 정확하게 산정하기 삼축압축시험의 결과 또는 응력-변형특성을 고려한 탄성계수( $E_{50}$ ) 등으로 예측 식을 개발하여야 할 것으로 판단된다. ☺

#### ♣ 참고 문헌

1. 권기철, 김동수(2000), "다양한 실내시험을 이용한 지반의 탄성계수 평가", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 345~352.
2. 권기철(2004), "국내 보조기층 재료의 변형특성을 고려한 전체변형률 영역의 구성모델 개발", 한국도로학회 논문집 제6권 제3호, pp. 65~77.
3. 김대상, 박성용, 김수일(2008), "평판재하시험을 이용한 지반반력계수와 변형률계수의 상관관계 평가", 한국지반공학회논문집 제24권 6호, pp. 57~67.
4. 김동수, 서원석, 권기철(2005), "반복식 평판재하시험을 이용한 노상토의 현장 변형계수 평가", 한국지반공학회논문집, 제21권, 6호, pp.67~79.
5. 박양부, 정형식(2003), "중평판 재하시험을 이용한 정적 및 동적변형계수 비교", 제19권 제5호, 한국지반공학회논문집, pp. 335~342.
6. 최찬용, 이성현, 황선근(2010), "토공 품질관리 기준 DIN 18 134 규정의 이해", 철도지널 제 13권 제3호, pp. 28~34
7. 한국지반공학회(2004), "지반구조물 내진설계", 제 13회 기술강습회 자료
8. Buland, J.B.(1989), "Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture: Small is Beautiful-The stiffness of Soils at Small Strains," Canadian Geotechnical Journal 26, pp. 52 ~ 65.
9. Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S., and Sato, T.(1991), "A simple Gague for Local Small Strain Measurement in the Laboratory," Soil and Foundations, Vol. 31, No. 1, pp. 169~180.
10. Schmertmann, J. H., Hartmann, J.P., and Brown, P. R(1978), "Improved Strain Influence Factor Diagrams," Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 04, No. GT8, pp.1131~1135.
11. Timoshenko, S. and Goodier, J. N.(1951), "Theory of elasticity," New York, McGraw-Hill Book Co., Inc., pp. 368~372
12. 桃谷尚嗣 (2004), 移動荷重の影響を考慮した鐵道路盤の變形特性に関する研究, 東京大學校 博士學位論文 東京大學校
13. 西岡 英俊, 安西 綾子, 神田 政幸, 館山 勝, 地盤調査法に応じた地盤変形係数および地盤反力係数の算定法, 鉄道総研報告, 特集 基礎構造物の設計技術, RTRI REPORT Vol. 24, No. 7, 2010, 7.