

고속전철 슬레브궤도에서의 노반거동 특성에 관한 연구 A Study on the Behavior Character of Roadbed in High-Speed Railway Slab Track

조용권¹⁾, Yong-Kwon Cho, 이성혁²⁾, Sung-Hyeog Lee, 황선근³⁾, Seon-Keun Hwang

¹⁾ 한국철도기술연구원 연구원, Researcher, Korea Railroad Research Institute

²⁾ 한국철도기술연구원 선임연구원, Senior researcher, Korea Railroad Research Institute

³⁾ 한국철도기술연구원 책임연구원, Chief researcher, Korea Railroad Research Institute

SYNOPSIS : It is investigated character of the dynamic behavior at over excavation zone of roadbed using crushed stone instead of lean concrete. It is considered that behavior of roadbed using PENTAGON-3D and Baber's equation. Typical load of sine wave type using impact factor is compared to moving load system to examine relationship in using PENTAGON-3D case. Variations of this paper are material properties of roadbed, train velocity, subgrade bearing capacity. Using variations, safety of roadbed is estimated by dynamic behavior character.

Key words : moving load, roughness, slab, impact factor

1. 서 론

본 연구에서는 터널 노반부의 여굴개소에 대해 버림콘크리트 시공이 아닌 현장 발생 잡석으로 시공되었을 경우, 지지력 변화에 따른 노반의 동적 특성을 고찰하여 안전상 필요한 대안을 수립하는 기초자료를 확보하고자 하였다. 터널 내부 노반의 거동에 주안을 두어 상용프로그램인 PENTAGON-3D와 Baber의 2층계 탄성해석법을 이용하여 열차하중과 진동이 터널내부 노반의 거동에 주는 영향을 노반 채움재의 조건 변화와 열차의 동적 하중을 다각도로 변화시키면서 동적 거동특성을 고찰하였다. 또한 PENTAGON-3D에 의한 해석에서는 열차의 충격계수 만을 고려한 정현파 하중과 열차의 속도를 고려한 이동하중의 상관관계를 고찰하였다.

적용된 변수로는 노반 채움재의 특성과 열차의 주행속도 등이며, 이를 이용하여 노반의 동적변형을 파악하여 열차주행 안정성평가를 하였다.

2. 열차이동하중

2.1 이론적 모델

동적 해석을 위한 열차 하중을 분석하기 위하여 차량과 궤도의 개념적 모델을 그림 1과 같이 표현하였다. 이 모델의 특징을 살펴보면, 바퀴와 레일은 "접촉 강성"으로 연결되어 있으며, 차량은 차체와 차륜의 두 개의 질량으로 나누어 고려하고 있다. 차체와 차륜 사이에는 현가 장치가 있어 힘의 전달을 완전히 흡수한다고 가정하여 조도(roughness) 또는 조도의 불균일성으로 인한 차륜의 진동이 차체에는 전달되지 않는 것으로 간주한다.

따라서, 레일에 작용하는 열차의 하중은 시간에 관계없이 일정한 차체 하중(정적 하중)과 조도의 불균일성으로 인해 시간에 따라 변하는 차륜 하중(동적 하중)의 조합으로 표현할 수 있다.

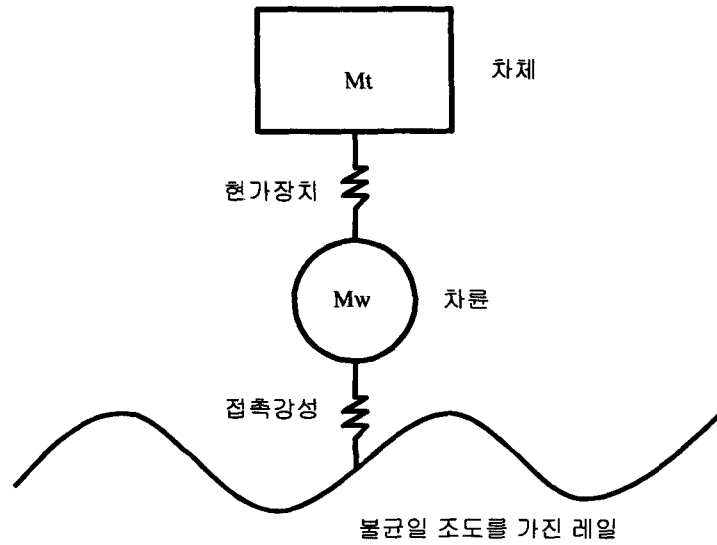


그림 1. 열차 하중 산정을 위한 열차 모델

2.2 시간에 따라 변하는 차륜 하중의 산정

불균일한 조도를 갖는 레일 위를 이동하는 차륜 하중의 시간에 따른 변화를 구하기 위해서 그림 2와 같이 차륜의 질량을 M , 차륜과 레일 사이의 댐퍼 및 스프링 강성을 각각 C , K 로 두고, 차륜의 변위를 Y_m , 불균일 조도에 의한 레일의 변화를 Y_r 로 두면, M 에 작용하는 힘의 평형으로부터 식 (1)이 성립한다.

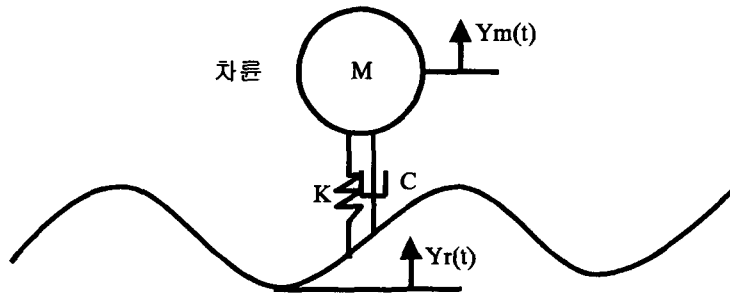


그림 2. 불균일 조도를 가진 레일 위를 움직이는 차륜의 모델링

$$M \ddot{Y}_m + C(\dot{Y}_m - \dot{Y}_r) + K(Y_m - Y_r) = 0 \quad (1)$$

따라서,

$$M \ddot{Y}_m + C \dot{Y}_m + K Y_m = C \dot{Y}_r + K \cdot Y_r \quad (2)$$

여기서 Y_m : 차륜의 상하방향 이동거리, \dot{Y}_m : 차륜의 상하방향 속도, \ddot{Y}_m : 차륜의 상하방향 가속도, Y_r : 레일 조도의 상하방향 거리, \dot{Y}_r : 레일조도의 상하방향 속도, C : 차륜과 열차를 연결하는 댐퍼의 댐핑계수, K : 차륜과 열차를 연결하는 스프링의 스프링계수

식 (2)의 우변을 $P(t)$ 로 두면, 수치 해석에 의해, $Y_m(t)$ 를 구할 수 있다. $P(t)$ 를 piecewise-linear interpolation에 기초하여 recurrence formulas를 유도하여 사용한다. 이 방법은 일반적으로 사용하는 Newmark- β 방법에 비하여 Δt 가 비교적 크더라도 상당히 정확한 값을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

여기서 사용한 recurrence formulas에 의하면 식 (3) 및 식 (4)이 각각 성립한다.

$$Y_m(t+\Delta t) = a \cdot P(t) + b \cdot P(t+\Delta t) + c \cdot Y_m(t) + d \cdot \dot{Y}_m(t) \quad (3)$$

$$\dot{Y}_m(t+\Delta t) = a' \cdot P(t) + b' \cdot P(t+\Delta t) + c' \cdot Y_m(t) + d' \cdot \dot{Y}_m(t) \quad (4)$$

위 식 (3)으로부터 $Y_m(t)$ 가 구해지면 레일에 작용하는 힘 $F_r(t)$ 는 식 (4)로부터 구해진다.

$$F_r(t) = K \cdot (Y_m(t) - Y_r(t)) + C \cdot (\dot{Y}_m - \dot{Y}_r) \quad (5)$$

여기서

$$a = \frac{1}{k\omega_d h} \left[e^{-\beta h} \left\{ \left(\frac{\omega_d^2 - \beta^2}{\omega_n^2} - \beta h \right) \sin \omega_d h - \left(\frac{2\omega_d \beta}{\omega_n^2} + \omega_d h \right) \cos \omega_d h \right\} + \frac{2\omega_d \beta}{\omega_n^2} \right]$$

$$b = \frac{1}{k\omega_d h} \left[e^{-\beta h} \left\{ - \left(\frac{\omega_d^2 - \beta^2}{\omega_n^2} \right) \sin \omega_d h + \left(\frac{2\omega_d \beta}{\omega_n^2} \right) \cos \omega_d h \right\} + \omega_d h - \frac{2\omega_d \beta}{\omega_n^2} \right]$$

$$c = e^{-\beta h} \left\{ \cos \omega_d h + \left(\frac{\beta}{\omega_d} \right) \sin \omega_d h \right\}$$

$$d = \left(\frac{1}{\omega_d} \right) e^{-\beta h} \sin \omega_d h$$

a', b', c', d' : a, b, c, d 의 미분값

$\beta \equiv \zeta \omega_n$, and $h \equiv \Delta t$

$$\omega_n^2 = \frac{K}{M}$$

ω_d : 감쇠된 고유 각속도

$$\zeta = \frac{C}{C_{cr}}$$

$$C_{cr} = 2M \omega_n = \frac{2K}{\omega_n} = 2\sqrt{KM}$$

3. 해석에 사용된 동적하중

본 해석에서 사용된 하중은 한국형 고속전철을 기준으로 열차모델과 동일한 축중간격을 가지는 이동하중과 축중에 충격계수를 포함한 정현파 하중을 이용하였는데 이는 이동하중과 정현파 하중과의 상관성을 고찰하기 위해서이다.

3.1 이동하중에서 고려된 연직하중

본 해석에서 이동하중 고려시 사용된 하중은 다음과 같다. 축중은 한국형 K-TGV를 기본으로 하였으며 차량은 그림 3과 같이 기관차와 객차의 조합으로 1기관차와 5개의 객차가 연결되어 있는 6량 편성으로 하였다.

하중	축간거리
(a) : 8.35tf	(1) : 3m
(b) : 8.4tf	(2) : 11m
(c) : 8.1tf	(3) : 3.25m
(d) : 7.6tf	(4) : 15.7m
(e) : 7.35tf	
(f) : 7.1tf	

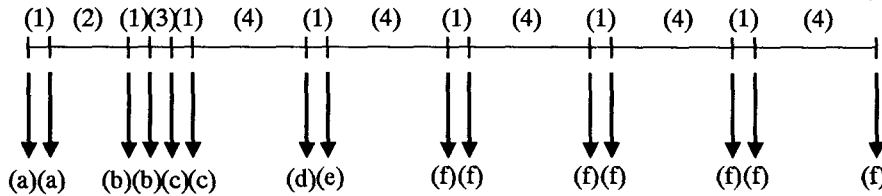


그림 3. 이동하중을 고려한 해석에 사용된 차량유형

3.2 실대형 실험과 동일한 동적연직하중

주행하는 차량의 재하에 의해 발생하는 동역학적 효과 중에서 연직방향 성분의 작용을 일괄해서 충격이라 하고 처짐, 또는 응력의 동적인 최대치가 정적인 최대치에 대해 어느 정도 만큼 증가하는가의 비율을 충격계수라 한다.

$$i = \frac{d-s}{s} \tag{6}$$

여기서, d : 동적인 응력 또는 처짐의 최대값

s : 정적인 응력 또는 처짐의 최대값

윤중 변동은 속도의 증가에 따라서 비례적으로 증대하는 것으로 알려져 있다. 기존의 시험결과에 의하면, 속도 충격을 i 는 다음 식과 같이 나타내며, 본 연구에서는 다음 식에서 이음레일의 경우에 대한 속도 충격을 채택하였다.

$$i = 1.0 + 0.3 \left(\frac{V}{100} \right) \quad : \text{장대레일}$$

$$i = 1.0 + 0.5 \left(\frac{v}{100} \right) \quad : \text{이음레일}$$

4. 결과 및 고찰

4.1 PENTAGON-3D를 이용한 동해석 결과

4.1.1 노상의 지지력에 따른 탄성변형특성

노상의 지지력에 따른 최대 탄성변형은 그림 4와 같다. 그림에 보인 바와 같이 슬래브노반 하단 지지력의 변화에 따라서 거의 선형적인 탄성변형을 보인다. 그 변형량의 변화는 $2.692 \times 10^{-3} \text{mm} \sim 4.224 \times 10^{-3} \text{mm}$ 로 미소하다.

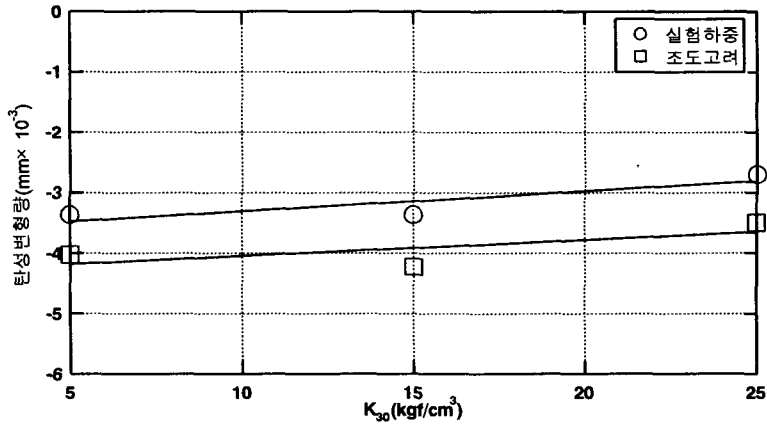


그림 4. 노상의 지지력에 따른 탄성변형

4.1.2 열차 속도에 따른 탄성변형의 특성

열차의 속도에 따른 탄성변형의 특성은 그림 5와 표 1과 같다. 레일하단의 경우 열차의 속도가 증가함에 따라 탄성변형량이 증가하는 양상을 보이고 있으나 콘크리트 노반 하단의 경우는 열차의 속도가 증가하여도 탄성변형이 거의 일정하고 있어 이는 대부분의 이동하중을 콘크리트 노반의 접지면적 증가에 따른 하중 분산효과로 변형이 억제되고 있는 것으로 판단된다. 속도가 100km/h에서 280km/h로 증가할 때 레일직하부 침목면에서의 탄성변형의 변화량은 약 32% 증가된다.

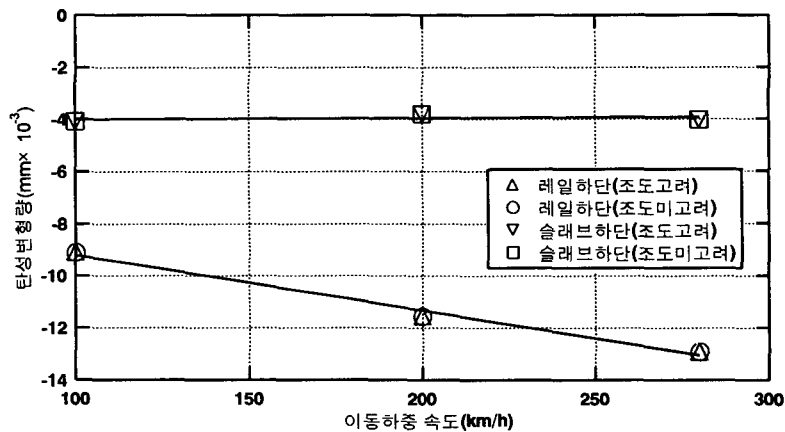


그림 5. 열차속도에 따른 탄성변형특성

표 1 열차속도에 따른 탄성변형량

(단위 : 10⁻³mm)

위치	이동속도		
	100km/h	200km/h	280km/h
레일하단(조도고려)	-9.100	-11.551	-12.905
레일하단(조도미고려)	-9.099	-11.552	-12.905
슬래브노반하단(조도고려)	-4.086	-3.796	-4.023
슬래브노반하단(조도미고려)	-4.085	-3.798	-4.021

4.1.3 버림 콘크리트 시공시의 탄성변형특성

동일한 지반조건에서의 노반을 현장발생 잡석으로 시공하였을 경우와 버림콘크리트를 시공하였을 경우에 대한 탄성변형특성은 표 2와 같다. 버림콘크리트에 의한 시공의 경우가 현장발생 잡석으로 시공하였을 경우 보다 탄성변형의 감소효과가 있었으나, 변동량은 1~2%로 매우 미소하다.

표 2 노반 채움재의 변화에 따른 탄성변형특성

(단위 : 10^{-3} mm)

	레일하단	침목하단	궤도슬래브상단	슬래브노반상단	슬래브노반하단
Con'c 채움	-13.691	-6.138	-4.879	-3.333	-3.183
쇄석 채움	-13.7	-6.154	-4.911	-3.37	-3.191
변동율(%)	1.53	0.26	0.66	1.11	0.25

4.2 Baber의 2층계 탄성해석 결과

4.2.1 지지력변화에 따른 탄성변형특성

Baber의 2층계 탄성해석식에 의한 지지력 변화에 따른 탄성변형 특성은 그림 6과 같다. 노반 채움재의 지지력이 증가함에 따라 탄성변형량은 감소하는 것으로 나타났다. 그 변형량은 지지력의 증가에 따라 탄성변형량이 40~66%정도 감소하는 것으로 나타났다.

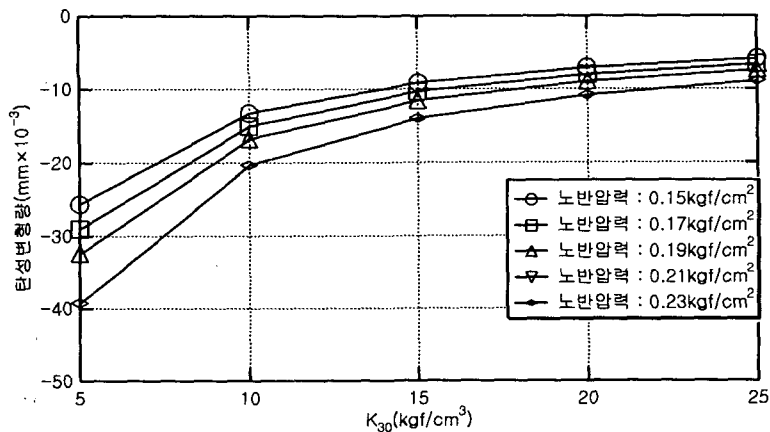


그림 6. 지지력에 따른 슬래브노반하단의 탄성변형량

4.2.2 속도변화에 따른 탄성변형특성

Baber의 2층계 탄성해석 시에 속도 변화에 따른 탄성변형량의 변화는 그림 7과 같다. 그림 7은 노반 압력으로 나타나 있다. 이는 2층계 탄성해석은 속도에 대한 영향이 포함되지 않기 때문에 노반의 압력을 구할 때 속도에 대한 영향을 충격계수를 이용하여 하중으로 변환하였으며 이 하중이 슬래브 궤도의 전체 면적에 동일하게 작용하고 있다고 가정하여 노반의 압력을 산정하였다. 노반압력이 증가함에 따라 탄성변형량의 변화량은 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며 지반의 지지력이 높을수록 선형적으로 증가하는 탄성변형량의 변화되는 기울기가 작아짐을 알 수 있다.

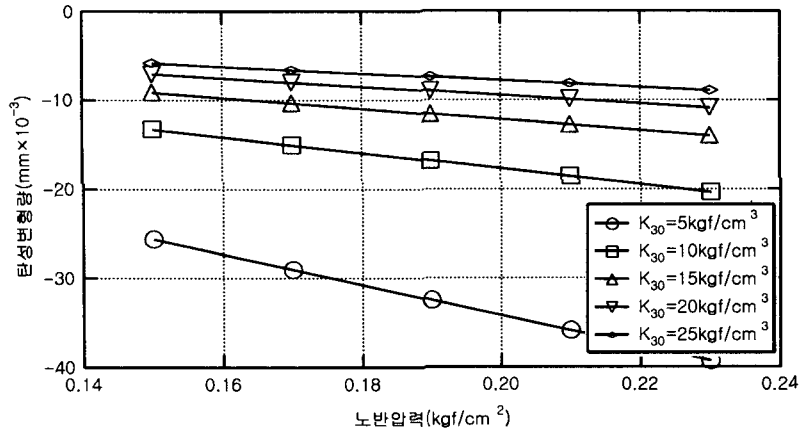


그림 7. 노반압력변화에 따른 슬래브노반하단의 탄성변형량

4.2.3 탄성변형량과 노반압력/지지력의 비

Baber의 2층계 탄성해석을 이용한 탄성변형량과 노반압력/지지력 비에 대한 특성은 그림 8와 같이 나타났다. 노반 채움재의 두께 증가에 따라 탄성변형량의 변화는 다소 감소하는 것으로 나타났으며 탄성 변형량은 노반압력/지지력이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

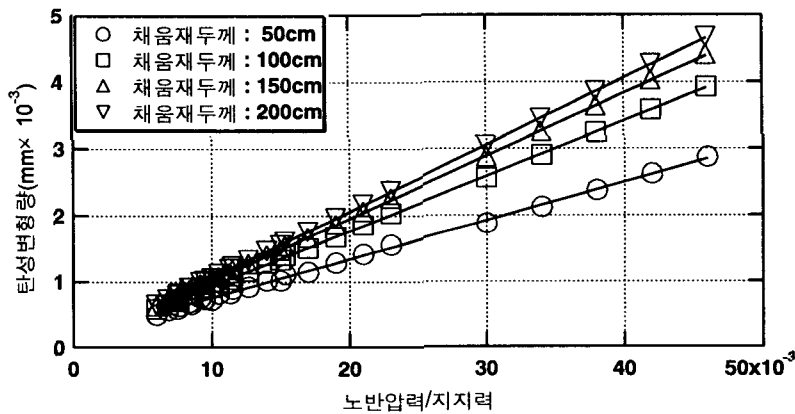


그림 8. 탄성변형량과 노반압력/지지력비

5. 결론

1. 하중의 형태에 따라 정현파 하중일 때 보다 이동하중의 경우가 다소 큰 탄성변형을 보이고 있는데 이는 하중의 중첩에 의한 영향으로 판단된다.
2. 노반 채움재를 버림 콘크리트로 시공한 경우 탄성변형의 감소효과가 약 1~2%정도 나타났다. 이는 슬래브 웨도 아래의 지반의 지지력이 쇄석으로 채웠을 경우의 지지력 이상이면 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다.
3. Baber의 2층계탄성해석을 이용한 경우 속도증가에 따른 탄성변형량의 변화량은 PENTAGON-3D의 해석경우와 마찬가지로 선형적인 형태이다. 그리고 속도가 증가함에 따라 탄성변형량이 증가하는 양상을 보이고 있으며 그 변화량은 약 20%가 된다.

4. Baber의 2층계탄성해석을 이용한 경우와 PENTAGON-3D를 이용한 경우를 비교하였을 경우 콘크리트노반하단에서의 탄성변형량의 차이는 $K_{30}=5\text{kgf/cm}^3 \sim 25\text{kgf/cm}^3$ 으로 순차적으로 증가시켰을 경우 실험하중, 조도를 고려하지 않은 이동하중 및 조도를 고려한 이동하중에 대해서 5kgf/cm^3 에서는 Baber의 식으로 구한 값이 약 61~68%정도 많은 탄성변형량을 나타내고 있으며 15kgf/cm^3 의 경우는 약 5~20%정도 적은 탄성변형량을 나타내고 있으며 25kgf/cm^3 의 경우 약 19~50%정도 적은 탄성변형량을 나타내고 있다.

5. 해석결과 궤도슬래브 및 콘크리트 노반의 하중 분산효과로 인해 궤도 슬래브의 슬래브 하단의 잠정 탄성변형 기준치인 1mm를 모두 만족하고 있는 것으로 사료되나, 향후 잠석채움층 노반부에 지하수의 유입 또는 배수 불량으로 세립분의 유실이 초래될 경우 분니, 동상 또는 부등변형이 발생할 소지가 있으므로 궤도 슬래브의 시공시 원활한 배수가 될 수 있도록 하고 잠석채움층의 상층부의 치환 등에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 금호산업(주)에서 시행한 “경부고속전철 제1-2공구 터널내 노반 안정성 확보방안에 관한 연구”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bathe "Finite Element Procedures in Engineering Analysis"
2. ROY R. CRAIG, Jr., John Wiley & Sons, "STRUCTURAL DYNAMICS, An Introduction to Computer Method" 1981, pp139~142.
3. F. E. Richart, Jr., R. D. Woods, J. R. Hall, Jr. " VIBRATION OF SOILS AND FOUNDATIONS" 1970
4. 鐵道總合技術研究所, “鐵道構造物等設計標準・同解説 省力化軌道用土構造物”, 運輸省鐵道局監修, 1999. 11.
5. 鐵道總合技術研究所, “鐵道構造物等設計標準・同解説 軌道構造[有途上軌道](案)”, 運輸省鐵道局監修, 1997. 3.
6. 須長誠, 關根悅夫, “FEM解析による鐵道強化路盤厚さの検討, 土木學會論文集, No. 510/VI-26, pp. 43~48, 1995. 3.
7. 고속전철사업기획단, “ 고속철도 홈구조물 설계표준시방서 해설(안)”, 고속전철사업기획단, 1991.9.21.
8. 고속전철사업기획단, “ 고속철도 터널표준시방서 해설(안)”, 고속전철사업기획단, 1991.9.21.
9. 이종득, “철도공학”, 노해 출판사, 1997.3.