

설계지표를 이용한 철도강화노반 두께 산정에 관한 연구

Determination Method of Reinforced Roadbed Thickness based on Design Chart

유충현
Yoo, Chung-Hyun

최찬용
Choi, Chan-Yong

김대상
Kim, Dae-Sang

ABSTRACT

The purpose of a railway track is to provide a smooth surface for safe and economical train transportation. The performance of the track results from a complex interaction of the track and subgrade components in response to train loading and environmental actions. In the past, the role of subgrade as the track foundation were not recognized adequately. There are insufficient information and inadequate methods for subgrade design, assessment and improvement. This situation has survived for a long time largely because a subgrade defect can often be adjusted by adding more ballast under the ties or applying more frequent track maintenance. Therefore, the application of reinforced roadbed technology will be expected to increase in the future. The reinforced roadbed thickness is set depending on subgrade reaction modulus(K_{30}) in the condition of upper subgrade through PBT in both conventional railroad and KTX railroads. As train velocity (V), train passing tonnage (N), and train axial load (P) are not considered in design, the roadbed thickness could be overestimated (or underestimated). Therefore, in this study has proposed a determination method of reinforced roadbed thickness using design chart made by resilience modulus and properties of earthwork materials.

1. 서론

철도노반 설계시 변형특성이나 해석 목적에 따라서 탄성 또는 소성해석을 적용하는데 주행하중에 대한 장기거동 특성을 분석할 경우 소성해석이 적용되어야 한다. 그러나, 대부분의 노반의 설계방법은 탄성해석을 기본으로 적용하고 있다. 이는 다층구조이며 장기적인 반복하중에 대한 변형특성을 파악해야 하는 노반에서 소성변형을 해석하기가 어렵기 때문에 탄성해석법이 소성해석법의 간편법으로 대처하고 있다. 그러나, 반복되는 열차하중에 의해 발생하는 소성변형의 축적에 의한 장기 침하를 예측하는 것은 노반의 합리적인 설계와 유지관리를 위해서는 필수적이다.

국내에서 강화노반 두께 산정 방식은 노상의 지지력 조건에 따라 일률적인 두께로 시공하고 있다. 노상의 지지력 판정은 재하시험의 일종인 평판재하시험과 반복평판재하시험을 통해 강화노반 두께를 산정하는 방식이다. 재하시험의 일종인 평판재하시험으로부터 결정되는 지지력계수(k_{30})와 변형율계수(E_v)는 실제 설계 시점에서는 토공재료의 역학적 특징이 반영되지 않는다. 즉, 설계의 기준으로 사용되는 물성치인 지지력계수와 독일에서 적용하고 있는 E_v 는 평판재하시험 또는 반복평판재하시험의 결과인 응력-변위(침하량)의 관계로부터 계산되지만, 정적하중하의 결과로서 반복적으로 열차하중을 받는 철도노반의 거동을 반영하기 어려울뿐 만아니라 실질적으로 노반의 탄성해석에 필요한 입력 물성치가 되지 못하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 설계시점에서 노반재료의 역학적 특징과 반복재하횟수를 고려하여 강화노반 두께를 산정할 수 있는 소성설계방법을 소개하고자 한다.

* 저자1 건설교통부, 기반시설본부, 철도건설팀 회원

E-mail : yoo1582@hanmail.net

TEL : (02)2110-8352 FAX : (02)504-0485

** 저자2 한국철도기술연구원, 선임연구원 정회원

E-mail : kds@krri.re.kr

TEL : (031)460-5305 FAX : (031)460-5319

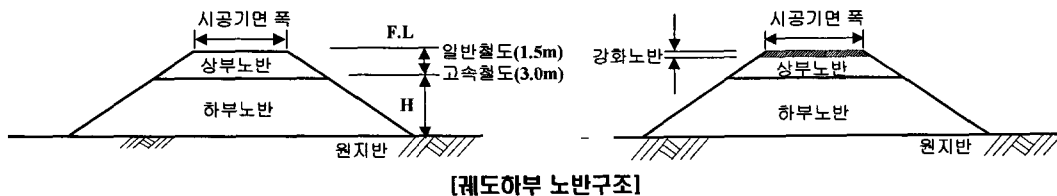
2. 기존 강화노반 설계법

2.1 국내 강화노반 두께

국내 강화노반두께 산정방법은 일반철도와 고속철도 각각 「철도설계기준(2004), 노반편」과 「고속철도설계기준(노반편, 2004)」에 명시되어 있다. 철도 강화노반 두께를 산정하는 설계 이론은 다층탄성이론을 이용하여 지반반력계수에 의해 결정하는 방법과 변형율계수(Ev2)를 이용한 방법이 있다. 전자의 방법은 일반철도와 일본에서, 그리고 후자의 방법은 고속철도와 독일 및 유럽에서 주로 사용하고 있는 방법이다.

현재 국내 철도토공 기준서는 일반철도와 고속철도 이원화하여 관리하고 있으며, 이에 따라 강화노반 두께 결정방법도 다르게 적용하고 있다. 일반철도와 고속철도 설계기준서에 제시하고 있는 강화노반 두께는 그림 1과 같다. 일반철도에서 강화노반두께는 상부노반의 지반반력계수(k_{30})조건에 따라 이음매레일과 장대레일로 구분하여 강화노반두께의 산정하며, 상부노반의 지반반력계수 평가는 평판재하시험방법(Plate Loading Test)에 의해 침하량이 1.25mm일 때의 하중의 크기로서 구한다. 즉, 일반철도의 경우 상부노반의 지지력조건과 레일의 용접여부에 따라 강화노반의 두께를 20~80cm의 범위로 설계한다.

고속철도의 경우에는 일반철도에서 사용하는 강화노반층에 대하여 보조도상층과 입도조정층으로 분리하여 구분하고 있다. 고속철도의 강화노반 두께는 일반철도와 같이 상부노반조건(k_{30})에 따라 강화노반두께를 구분하고 있다. 고속철도의 강화노반 층은 보조도상층을 20cm로 고정하고 입도조정층을 상부노반의 지지력 조건에 따라 다르게 적용하고 있다.



[궤도하부 노반구조]

(일반, 철도설계기준, 장대레일/이음레일)

(고속철도 설계기준)

상부노반조건	쇄석 또는 고로슬래그 쇄석	배수층	수경성입도조 정고로슬래그 쇄석	배수층	강화노반(cm)		계
					보조도상	입도조정층	
흙쌓기($k_{30} > 11 \text{kgf/cm}^2$)	20/35	0	15/25	0	20(30)	30	50(60)
흙쌓기($7 < k_{30} < 11 \text{kgf/cm}^2$)	35/65	0	25/50	0	20(30)	60	80(90)
땅깎기, 평지($k_{30} > 11 \text{kgf/cm}^2$)	20/35	15	15/25	15	20(30)	45(15-25)	65(35-45)
땅깎기, 평지($7 < k_{30} < 11 \text{kgf/cm}^2$)	35/65	15	25/50	15	20(30)	75	95

주1) ()은 암반구간에서의 강화노반두께

그림 1 국내 설계 기준서에서 제시하고 있는 강화노반두께

이상과 같이 국내 강화노반두께는 고속철도와 일반철도 모두 평판재하시험(PBT)에 의한 상부노반조건에 따라 노반두께를 규정하고 있다. 그러나, 열차하중과 같이 반복하중을 받는 도상자갈과 노반은 반복하중강도와 누적되는 전단변형에 의존하여 전단성이 저하하여 영구적인 변형이 진행된다. 반복하중 강도와 누적되는 전단변형의 관계는 성토 내부의 초기 응력비에 영향을 받는다. 표 1은 강화노반 설계에 대한 일반철도와 고속철도의 설계기본 개념을 정리하였으며, 현 설계방법의 한계성에 대하여 기술하였다.

표 1 철도 강화노반 두께 산정을 위한 설계개념 및 한계성

	기본 설계개념	현 설계방법의 한계성
일반 철도	-다층탄성이론(Bousinesq's 탄성해석) -상부노반의 탄성변위량이 2.5mm일 때 강화노반 두께 결정 -일본 설계기준 모델	-설계시점에서 사용재료의 역학적 특징이 미 반영 -한계탄성변위량(2.5mm)은 아스팔트재료의 탄성변위 값으로 아스팔트가 균열이 발생하는 침하량임. -열차통과톤수(N)의 영향 미반영
고속 철도	-탄성이론 -노상의 재료, 지반조건 등을 최적의 시공조건으로 시공 하여 강화노반 두께를 산정 -독일 설계도표를 이용한 설계방법	-설계시점에서 사용재료의 역학적 특징이 미 반영 -열차통과톤수(N)의 영향 미반영

3. 소성설계를 이용한 강화노반 설계방법

3.1 기본개념

노반층을 입상재료로 하는 주요 목적은 일반적인 지지력을 확보하기 위한 것이 아니라 반복하중 하에서의 상부노반층의 과잉 변형이나 누적 전단파괴를 감소시키거나 제한하기 위함이다. 노반의 층 변형을 유발하는 2가지 주요 변형요인으로 회복변형(Resilient deformation)과 소성변형(Residual deformation)이 있다. 회복변형은 탄성변형이며 입상층의 두께와 강도가 증가함에도 회복변형이 감소할 수 있다. 이는 과잉 변형이 감소하는 것을 의미하는데, 이는 노반강도를 향상시키는 효과를 지닌다. 그렇기 때문에 노반 설계에서 입상층의 두께를 설계하는 것은 일차적으로 회복 변형을 감소시키기 위한 것이지만 보다 더 중요한 것은 과잉되는 소성변형을 최소화 할 수 있도록 고려되어야 하는 것이다. 누적 소성변형의 주요 요소로는 축차응력, 흙의 정적 강도, 흙의 종류 그리고 반복하중의 횟수 등이 있다. 축차응력을 제외하고 노반상태와 교통조건 그리고 그 외 요인들이 이미 정해진 고정 값이다. 따라서 소성변형율과 변형을 제어하는 주요 인자는 노반에서의 축차응력을 설계기준 이하로 제한하는 것이다.

반복하중 아래 노상의 점진적 전단파괴와 과잉 소성변형은 미립자 흙을 포함한 노상에서 주로 발생된다. 다음 두 가지 식(식 (1), (2))은 노상의 누적소성 변형율(Strain(ϵ_p))와 변형(Deformation(ρ))을 나타내는 식이다.

$$\epsilon_p(\%) = a \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m N^b \quad (1)$$

$$\rho = \int_0^T \epsilon_p dt \quad (2)$$

ϵ_p =누적 소성 변형율(strain), N=반복응력의 작용 횟수,

$(\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3)$ =열차 축하중에 의한 흙의 축차응력, σ_s =흙의 압축강도

(a, m, b)=흙 종류에 따른 변수, ρ =누적 소성 변형(Deformation), T=노상층 두께

노상의 점진적 전단파괴를 방지하기 위한 방법은 총 누적 소성 변형률로써 제한하였으며, 설계기간 동안 노상표면 아래 변형율을 허용 수준 안으로 들게 하기 위해 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\epsilon_p \leq \epsilon_{pa} \quad (3)$$

ϵ_p : 총 누적 소성 변형율(설계기간 동안 노상 표면에서)

ϵ_{pa} : 허용 소성 변형율(설계기간 동안 노상 표면에서)

노상의 과잉 소성변형을 방지하기 위한 방법은 설계기간 동안 허용 수준 이내로 노상의 총 누적 소성 변형을 제한하였으며, 이 설계 기준은 식 (4)와 같이 표현된다.

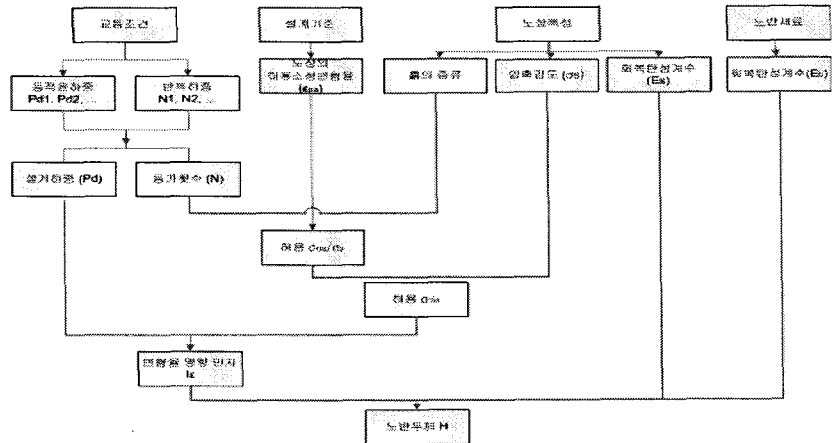
$$\rho \leq \rho_a$$

(4)

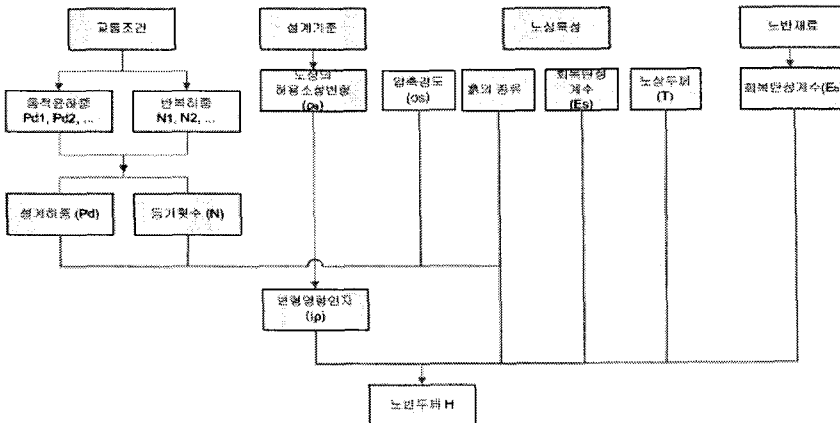
ρ : 총 누적 소성 변형(설계기간 동안 노상층에서)

ρ_a : 노상층의 허용 소성 변형(설계기간 동안 노상층에서)

노상 파괴를 방지하기 위해 강화노반층 두께를 설계 하려면 2가지 기준을 만족하여야 한다. 첫 번째 설계 기준은 노상표면에서 누적 소성 변형율을 제한하는 것으로 노상의 점진적 전단 파괴를 막기 위한 것이며, 두 번째 기준은 과잉 소성 변형을 막는 것이다. 그림 2(a)는 노반의 점진적 전단 파괴를 방지하기 위한 기준을 기초로 한 설계 흐름도이고, 그림 2(b)은 노반의 과잉 소성 변형을 방지하기 위한 설계 흐름도를 나타낸다.



(a) 소성변형율(설계 I 방법)



(b) 과잉 소성변위(설계 II 방법)

그림 2 노반토의 총 소성 변형율을 제어하기 위한 소성변형율에 따른 설계법

3.2 영향 인자 적용

본 논문에서 제안한 소성해석 설계법은 Selig 등(1994)이 제안한 설계법을 기본 모델로하여 국내 환경에 맞추어 개선시킨 방법이다. 따라서 지배방정식의 많은 부분은 Selig & Li의 제안식을 이용하여 설계지표를 개발하였다. 그 중 과잉 소성변형율에 따른 영향 인자 분석은 아래 식 (5)에 따른다. 식 (5)는 설계하중이 발생하중보다 크다는 전제하에 이루어진 식이며, 안전을 개념을 도입한 제안식이다.

$$I_e = \frac{\sigma_{da} A}{P_d} \tag{5}$$

σ_{da} : 단계 2로부터 결정된 노상 표면의 허용 축차응력

P_d : 단계 1로부터 결정된 설계 동적 운하중

A : 무차원 변형율 영향 인자를 만들기 위해 사용되는 면적 인자(A = 2.0m²)

과잉 소성변위에 따른 영향 인자 분석은 아래 식 (6)에 따른다. 식 (6)는 설계 변형율이 발생변형보다 크다는 전제하에 이루어진 식이며, 과잉 소성변형율에 적용된 개념과 같은 안전율을 도입한 제안식이다. 설계지표는 이 안전율에 따라 설계두께를 구하는 것이다.

$$I_p = \frac{\rho_a}{\frac{L}{a \left(\frac{P_d}{\sigma_s} \right)^m}} \times 100 \quad (6)$$

ρ_a : 설계기간동안 총 허용 노반 소성 변형, N : 설계기간동안 총 반복하중 등가 횟수

P_d : 설계 동적 률하중, σ_s : 흙의 압축 강도, a, m, b : 재료변수

3.3 설계지표를 이용한 강화노반 두께 산정 예

표 2는 강화노반 두께를 결정하기 위한 설계조건과 궤도 물성의 입력변수이다. 설계조건은 일반철도의 1급선 속도기준으로 정적윤중 110kN으로 연간 통과톤수를 60MGT로 가정하여 산정하였다. 또한 노상토의 지반조건은 Selig 가 제안된 식 (1)에서 실트질 흙(ML)의 구성모델식으로 가정하여 소성변형특성을 검토하였다.

표 2 두께산정을 위한 입력변수

설계 변수	값	
교통조건	$P_s = 110\text{kN}$, $V = 200 \text{ km/h}$ (일반철도 1급선의 설계속도) 연간통과톤수 = 60 MGT, $D = 0.97 \text{ m}$	
노반토(Subgrade soil)의 특성	Soil type : ML ($a = 0.64$, $b = 0.10$, $m = 1.7$) $\sigma_s = 100 \text{ kPa}$, $E_s = 28 \text{ MPa}$ $T = 1.5 \text{ m}$	
강화노반의 물성 및 설계기준	$E_b = 280 \text{ MPa}$, $\epsilon_{pa} = 1 \%$	
레일	탄성계수(MPa)	2.10×10^5
	단면2차모멘트(mm ⁴)	3.09×10^7
	총 면적(mm ²)	7.75×10^3
	레일 간격(mm)	1435
	단위중량(kg/m)	60
침목과 패드	바닥면 폭 (mm)	300
	바닥면 길이 (mm)	2600
	탄성계수(MPa)	3.0×10^4
	단면2차모멘트(mm ⁴)	1.864×10^8
	중량(kg)	250
	침목 간격(mm)	600
도상자갈	침목패드 강도(kN/m)	8.0×10^5
	밀도(Mg/m ³)	1.9
	포아송비	0.3
	회복탄성계수(MPa)	140
	수평토압계수(K_0)	1.0
두께(m)	0.30	

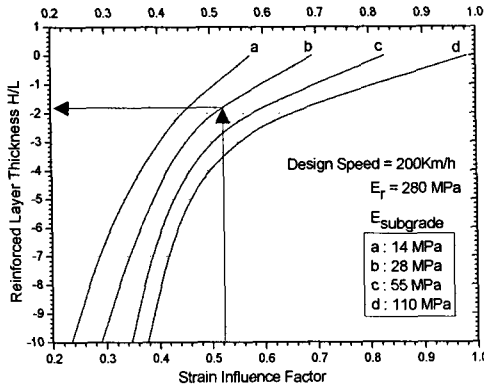
1) 점진적 전단파괴를 방지하기 위한 과잉소성변형율에 따른 설계법

설계에 필요한 교통조건, 강화노반과 노반의 재료 특성 그리고 노반의 허용 변형율을 구한다(표 2 참조). 동적 윤하중과 하중반복횟수는 식 (7), (8)를 이용하여 계산하면 동적윤하중은 225kN이며, 하중반복횟수는 680,000이 된다.

$$P_{di} = \left(1 + \frac{0.0052V}{D}\right) P_{si} \quad (7)$$

$$N_i = \frac{T_i}{8P_{si}} \quad (8)$$

식 (1)로부터 허용 누적소성 변형을 $\epsilon_{pa}=1\%$ 와 하중반복 횟수 $N=680,000$ 에 해당하는 응력비(σ_d/σ_s)를 구하여 최종적으로 요구되는 강화노반 두께는 0.19m 이다.



$$I_c = \frac{\sigma_{da} A}{P_d} = \frac{59 \times 2}{225} = 0.533$$

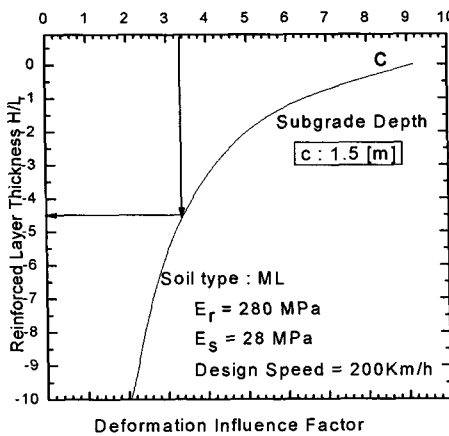
$$H = 1.9 \times 0.1$$

$$H = 0.19m (\text{도상 } 0.30m \text{ 포함} = 0.49m)$$

그림 3 새로운 강화노반의 설계지표 A

2) 과잉 소성변형을 방지하기 위한 과잉소성변위에 따른 설계법

과잉소성변위에 대한 설계방법은 앞서 언급한 바와 같이 동적 율하중과 하중반복횟수는 설계지표 A 방법과 동일한 방식으로 산정한다. 과잉소성변형에 의한 영향 인자를 구하기 위하여 식 (6)를 통하여 변형영향 인자 I_p 를 결정하여 최종적으로 요구되는 강화노반 두께는 0.45m이다. 따라서, 열차반복하중(N)을 고려한 소성이론을 통해 구한 강화노반 두께는 설계지표 A 방법과 설계지표 B 방법중에서 큰 값인 45cm로 산정할 수 있다.



$$I_p = \frac{P_d}{a \left(\frac{P_d}{\sigma_s A} \right)^m N^b} \times 100$$

$$I_p = \frac{1}{0.64 \left(\frac{225}{100 \times 2.0} \right)^{1.7} 680000^{0.1}} \times 100$$

$$I_p = 3.340$$

$$H = 4.5 \times 0.1m$$

$$\text{도상} + \text{강화노반} = 0.30 + 0.45 = 0.75m$$

그림 4 새로운 강화노반의 설계지표 B

표 3은 국내 설계기준서에서 제시하고 있는 강화노반 두께와 소성해석을 통해 구한 강화노반 두께를 비교하였다. 소성해석을 통해 구한 강화노반 두께는 상부노반이 다소 좋지 않는 조건($7 < k_{30} < 11 \text{ kgf/cm}^3$)에서는 설계지표를 통해 구한 강화노반 두께가 적게 산정되었다. 본 논문에서는 토질조건을 ML(실트질 흙)로 국한되어 강화노반두께를 산정해 보았다. 향후 국내 성토재료의 토질특성을 반영한 구성모델식을 개발하여 다양한 토질재료에 대하여 교통하중, 반복재하횟수 등을 고려한 강화노반 두께를 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 콘크리트 궤도와 같이 엄격한 잔류침하의 한계를 두는 경우 본 연구에서 제

안하는 소성이론을 통해 장기 침하를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

표 3 강화노반 두께 비교

원지반 조건	일반철도		설계지표로 구한 강화노반 두께
	장대레일	이음매레일	
흙쌓기($7 < k_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$)	35cm	65cm	45cm

4. 결론

본 논문은 기존의 탄성이론에 기초한 설계법이 노반의 다양한 파괴모드를 고려할 수 없다는 점에 착안하였다. 열차의 반복하중재하에 따른 소성변형으로 발생하는 노반의 파괴모드를 고려할 수 있는 설계법으로 다음과 같은 두가지 설계법을 제안하였다.

- 1) 점진적 전단파괴를 방지하기 위한 과잉소성변형율에 따른 설계법
- 2) 과잉 소성변형을 방지하기 위한 과잉소성변위에 따른 설계법

원지반 조건이 실트질 흙(ML)에 대하여 두가지 설계법에 대한 설계지표를 개발하였다. 설계지표를 이용한 새로운 설계방법은 하중조건으로 동적운하중과 하중반복횟수를, 재료의 역학적 특성을 반영할 수 있도록 회복탄성계수, 압축강도, 흙의 종류를 고려할 수 있다. 개발된 설계지표를 이용하여 일반철도 1급 선의 원지반 지지강성 조건이 $7 < k_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$ 에 대하여 소요 강화노반 두께를 결정하였다. 원지반 조건이 불량한 실트질 흙(ML)의 경우 소요 강화노반 두께는 45cm로 결정되었다. 향후 국내 성토재료의 토질 특성을 반영한 구성모델식을 개발하여 다양한 토질재료에 대하여 교통하중, 반복재하횟수 등을 고려한 강화노반 두께를 산정할 수 있을것으로 판단된다. 또한, 콘크리트 궤도와 같이 엄격한 잔류침하의 한계를 두는 경우 본 연구에서 제안하는 소성이론을 통해 장기 침하를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 대한토목학회 (2004), “철도설계기준(노반편)”
2. 한국고속철도건설공단(2003), “고속철도 전문시방서(노반편)”
3. 심재범 (2000), “토목섬유 시스템을 활용한 철도노반의 보강효과 및 설계기법 개발에 관한 연구”, 수원대학교 토목공학과 박사학위 논문
4. 이수형, 김대상, 이일화, 장승엽 (2005), “수치해석과 경험식을 결합한 콘크리트궤도의 소성침하 예측 기법 연구”, 2005 대한토목학회 정기학술대회
5. 한국철도기술연구원(1999), 철도노반재료로서 고로슬래그 활용화 방안 연구, 보고서.
6. 한국철도시설공단(2004), 철도설계기준(노반편)
7. RTRI (1996), “철도 강화노반 합리적 설계방안”
8. Akke S. J. Suiker, Ernest T. Selig and Raymond Frenkel (2005), "Static and Cyclic Triaxial Testing of Ballast and Subballast", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 6
9. Dingqing Li (1994), "Railway Track Granular Layer Thickness Design Based on Subgrade Performance under Repeated Loading"
10. Dingqing Li and Ernest T. Selig, E. T. (1998), 'Method for Railroad Track Foundation Design. I : Development', Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4
11. Dingqing Li and Ernest T. Selig, E. T. (1998), 'Method for Railroad Track Foundation Design. II : Applications', Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4

12. 運輸省 鐵道局, “鐵道構造物等設計標準・同解説 土構造物”, 鐵道總合技術研究所, 1992. 10.
13. 須長誠, 關根悅夫, “鐵道強化路盤厚さの低減に関する研究”, 土木學會論文集 No. 498/VI-24, pp. 57~66, 1994.9.
14. 佐藤吉彦, 梅原利之, “線路工學”, 日本鐵道施設協會, 1995. 3. 20.