2016 년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집 KSR2016A121

연약지반 성토지지말뚝을 이용한 철도노반 건설의 경제성 분석

Economical Analysis on Pile-supported Embankment for Railway Construction

김동환*, 김승선**, 조국환†

Dong Hwan Kim*, Seung Sun Kim, Kook Hwan Cho†

Abstract In this study, economics study based life cycle cost on the pile-supported embankment was conducted to analyze the application of pile-embankment method for concrete slab on the soft ground in Korea. Economics studies by changing the height of embankment, thickness of soft soil were carried out. When the embankment height is less than 12m, and the depth of soft soil is less than 15m, Pile-supported embankment is cost effective comparing with the bridge. The pile-supported embankment has great potential for application in soft ground condition.

Keywords **:** the Pile-Supported Embankment, Life Cycle Cost, Soft Soil, the Bridge

초 록 본 연구에서는 성토지지말뚝 공법의 현장조건별 최적의 공법선정을 위한 기준자료를 제시하기 위해 성토지지말뚝공법과 교량공법의 경제성 및 생애주기 비용을 비교·분석하였다. 현장 조건별 경제성 분석을 위해 기존 교량공법과 성토지지말뚝공법을 계획고와 연약층 두께에 따라 단면을 선정하여 분석을 수행하였다. 생애주기비용은 비용항목의 선정과 LCC 분석방법, 분석기간, 화폐의 시간가치 산정방법, 할인율, 유지관리비용, 점검 및 진단비용 등을 고려하여 산정하였다. 현장조건을 고려한 성토지지말뚝과 교량공법 경제성 검토 결과, 약 20년 이후부터는 성토지지말뚝공법이 교량공법 대비 더 경제적인 것으로 분석되었다. 그리고 연약지반 심도 15.0m, 성토높이 12.0m이하까지는 공사비가 교량대비 70% 수준으로 경제성이 확보되는 것으로 검토되었다.

주요어 : 성토지지말뚝공법, 생애주기비용, 연약지반, 교량

1. 서 론

콘크리트 궤도는 주행안정성 및 승차감과 생애주기비용(LCC)측면에서 유리하다고 평가되어 전통적으로 부설되어온 자갈도상 궤도의 단점을 보완할 수 있는 대안적인 시스템으로 자리잡아가고 있다. 토공구간에서 콘크리트 궤도를 적용하기 위해서는 다양한 설계인자를

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 한국철도시설공단

** ㈜본이앤씨(sunandjoy@naver.com)

† 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수(khcho@seoultech.ac.kr)

추가로 고려해야 되며 그 중에서 노반의 침하를 기준값 이내로 유지함으로써 차량 및 궤도의 주행안정성을 확보하고 유지보수를 감소시키는 것이 중요한 인자이다. 콘크리트궤도는 기존 자갈도상궤도와 달리 침하가 발생하였을 경우 궤도의 사용성 저하가 크고 대처방안이 매우 제한적이기 때문에 장기적으로 노반 침하를 엄격히 제한하여야 한다. 이러한 여건에서 연약지반 상에 콘크리트궤도 부설 시 지금까지의 일반적인 지반개량 공법을 적용하는 데에는 한계가 있으며, 이차압축이 큰 특정연약지반에 대해서는 근본적으로 적용이 불가능한 경우도 있다. 따라서 현재까지는 연약지반 대책공법으로 치환공법을 제한적으로 사용하고 대부분 교량으로 건설하고 있는 실정이다. 최근 이러한 문제점을 근본적으로 해결할 수 있는 새로운 공법이 요구되고 있으며, 이에 대한 대안으로 성토지지말뚝공법이 새롭게 부각되고 있다. 성토지지말뚝공법은 연약지반처리공법의 일종으로 성토 및 상부하중을 말뚝을 통하여 지지력이 양호한 지반에 전달하여 연약지반 자체의 압밀침하에 영향을 받지 않기 때문에 장기침하를 근본적으로 억제하는 능동적인 공법이다. 이러한 침하억제형 말뚝지지구조는 유럽, 미국 및 중국에서 교량공법을 대체하는 공법으로 활발히 적용되고 있다. 본 연구에서는 성토지지말뚝공법과 교량공법의 생애주기비용(Life cycle cost; LCC)을 비교·분석하여 현장 조건별 최적의 공법 선정을 위한 기준 자료를 제시하고 교량대체 공법으로서 성토지지말뚝 공법의 경제성 분석을 수행하였다

2. 성토지지말뚝공법

성토지지말뚝공법은 성토하중을 말뚝을 통해 직접 지지층에 전달시켜 성토구조물의 안정성을 도모하고 침하를 근본적으로 억제하는 공법이다. 최근에는 Fig. 1과 같이 연약지반과 성토지반 경계부에 다짐이 좋은 쇄석과 토목섬유로 보강된 하중전달층(load Transfer Platform)을 통하여 말뚝으로 전달하는 공법이 주로 적용되고 있다. 하중전달층은 Fig. 2와 같이 말뚝 위 성토지반의 하중을 하중전달층의 아칭효과(Arching Effect)를 이용하여 말뚝을 통해 직접 지지층에 전달시켜 성토구조물의 안정성을 확보하고 침하를 억제한다. 이 경우에는 말뚝, 캡, 연약지반, 성토지반, 토목섬유 등 많은 지지요소들 사이의 상호작용이 발생하기 때문에 지지 매커니즘이 매우 복잡해진다. 유럽 및 미국의 경우 지반을 단순화하여 해석적인 방법에 의해 설계를 수행하고 있다.

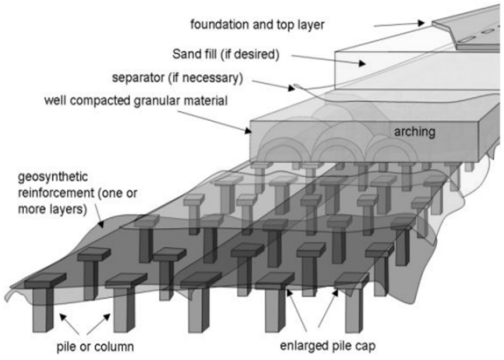


Fig. 1 The pile-supported embankment layout

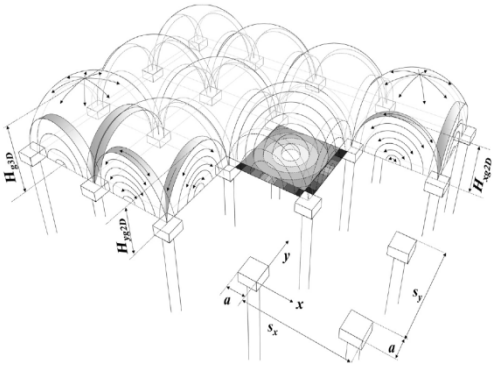


Fig. 2 Arching Effect diagram

3. 성토지지말뚝공법 경제성 분석

3.1 경제성 분석 개요

철도시설물 중 교량은 설계 시 또는 시공 시뿐만 아니라 정기점검 및 정밀진단 등의 유지관리 시에 시설물의 손상 정도에 따라 보수·보강 및 교체가 이루어지며 지속적인 지출이 발생된다. 이러한 점을 고려할 때 구조물의 생애주기 전반에 대한 비용검토가 필요하다. 따라서 성토지지말뚝공법의 경제성 분석을 위해 성토지지말뚝공법과 교량공법의 생애주기비용(Life cycle cost; LCC)을 비교·분석하였다. 그리고 현장 조건별 경제성을 분석하기 위해 계획고 및 연약지반 두께에 따라 단면을 선정하여 경제성 분석을 수행하였다.

3.2 분석조건

3.2.1 검토단면

경제성 분석에 사용한 교량 구조물의 단면은 PCB 구조의 교량으로 선정하였으며 교각 1개소와 상부 구조물을 기준으로 경제성 분석을 수행하였다. 성토지지말뚝공법은 교량구조물의 상부 구조물과 동일한 연장을 기준으로 분석하였다. 경제성 분석 시 계획고와 지층조건을 기준으로 분석을 수행하였다. 계획고(H)는 원지반(GL.(±)0.0m)을 기준으로 GL.(+)6.0m, GL.(+)9.0m, GL.(+)12.0m의 높이에 따라 분석을 수행하였으며, 연약지반 두께(D)는 GL.(-)5.0m, GL.(-)10.0m, GL.(-)15.0m, GL.(-)20.0m의 4가지 경우에 대하여 분석을 수행하였다.

3.2.2 LCC 분석 조건

Life cycle cost(LCC; 생애주기비용)은 시설물의 생애주기 동안 발생되는 모든 비용 즉, 기획, 설계, 시공, 운영 및 폐기처분 등에 소요되는 전체비용의 총합을 말한다. LCC분석은 시설물 투자에 관한 보다 효과적인 의사결정을 위하여 LCC에 근거한 제반 평가를 가리킨다. 이러한 측면에서 LCC분석은 시설물의 설계, 시공단계뿐만 아니라 전체 사용기간 동안의 전략적

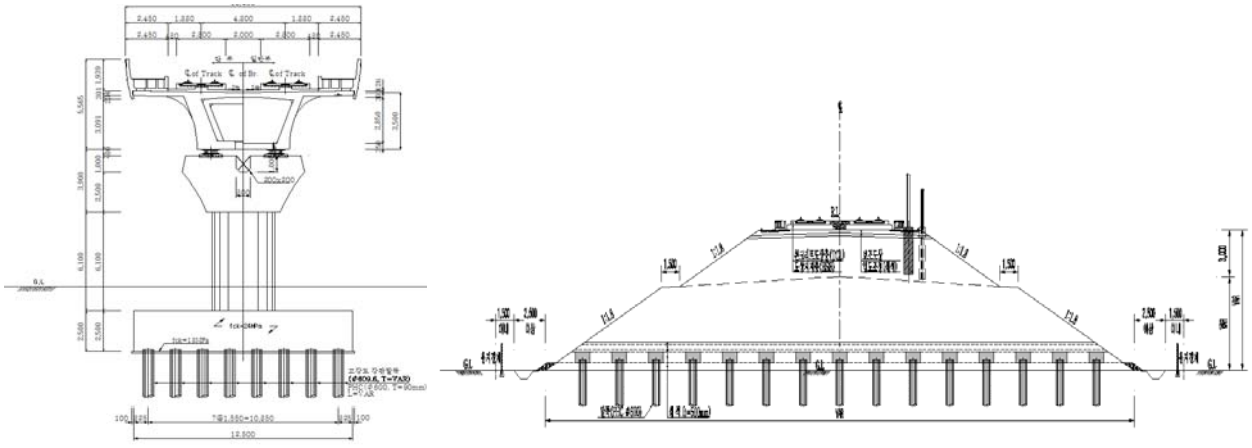


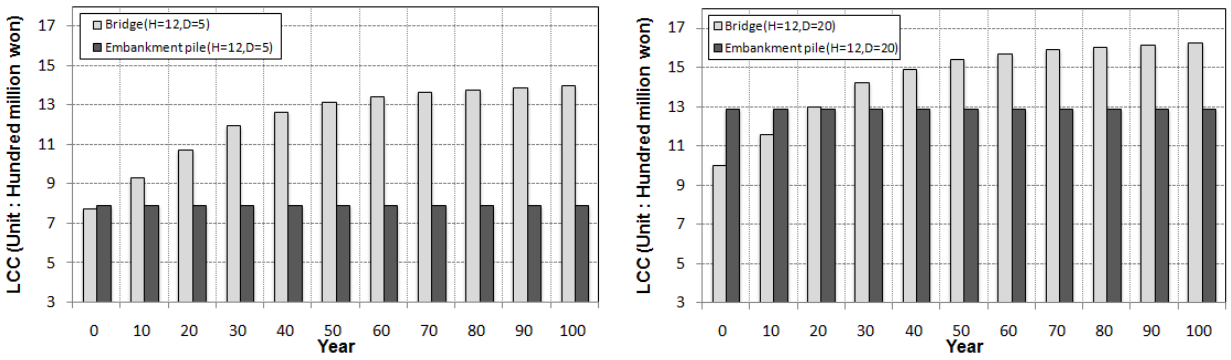
Fig. 3 The cross sectional view of the bridge and the pile-supported embanment

의사결정을 위한 필수적 관리기법 중 하나이다.

LCC 분석을 위해서는 비용항목의 선정과 LCC 분석방법, 분석기간, 화폐의 시간가치 산정방법, 할인율, 유지관리비용, 점검 및 진단비용을 결정하여야 한다. LCC 분석의 비용항목은 관리주체비용과 간접비용으로 구분될 수 있다. 철도교량에서는 유지보수 시 차량통행의 지장이 없는 심야시간에 수행하므로 간접비용의 발생하지 않는다고 한다(철도교량의 LCC 분석모델 개발 및 DB구축방안 연구, 2002). 따라서 본 연구에서는 비용항목은 관리주체 비용 항목을 기반으로 수행하였다. LCC 분석방법은 확정적 LCC 분석방법(Deterministic Life cycle cost analysis Approach)과 확률론적 LCC 분석방법(Probabilistic Life cycle cost analysis Approach) 그리고 신뢰성 LCC 분석방법(Reliability-Based Life cycle cost analysis Approach)이 현재 실무에서 가장 많이 적용되고 있으며 본 연구에서는 실용적이며 대안선정에 용이한 확정적 LCC 분석방법을 적용하였다. 분석기간은 내구연한을 100년으로 가정하여 산정하였다. LCC 분석에 사용되는 화폐의 시간가치 산정방법은 현재가치방법(Present Worth)과 연등가액방법(Equivalent Uniform Annual Cost) 등이 있으며, 두 방법 모두 LCC의 측정 방법으로 사용될 수 있으나 본 연구에서는 일반적으로 LCC 분석 시 적용하는 현재가치 방법을 사용하여 LCC분석을 수행하였다. 실질할인율은 4.5%로 적용하여 분석하였다. 유지관리 비용(보수, 보강, 교체비용)은 교량이 시공된 후에도 지속적으로 발생되는 항목으로 LCC비용으로 매우 중요한 부분이다. 국내의 경우 철도교량의 자료획득이 어렵고, 유지관리데이터 보안등을 고려하여 도로 교량의 유지관리데이터를 활용하였다. 유지관리비용 중 진단 및 점검비의 경우 교량 연장별 인원을 산정토록 되어 있으므로 검토단면에 따라 동일한 비용으로 적용하였다. 또한 보수, 보강, 교체비의 경우 교각 하부길이에 따라 비용이 다르게 산정되므로 교량높이에 따라 LCC 비용을 산정하였다. 초기 시공비의 경우 호남고속철도 3공구의 설계비를 적용하여 산출하였다.

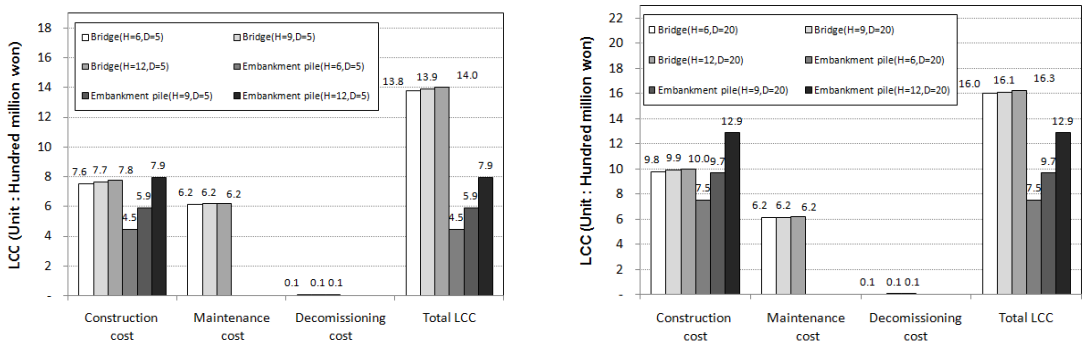
3.4 경제성 분석 결과

교량공법과 성토지지말뚝공법의 연도별 LCC 분석결과는 Fig 4과 같이 나타났다. H=12.0m, D=5.0m인 경우 성토지지말뚝의 건설 초기비용은 7.93억원이며, 교량의 초기 비용은 7.75억원으로 0.18억원이 더 크게 나타났으나 약 2년 후부터 성토지지말뚝이 더 경제적인 것으로 나타났다. 철도교 건설로부터 100년동안 발생하는 생애주기비용은 유지관리비용으로 인해 교량이 성



(a) D=5m (b) D=20m

Fig. 4 LCC analysis by time

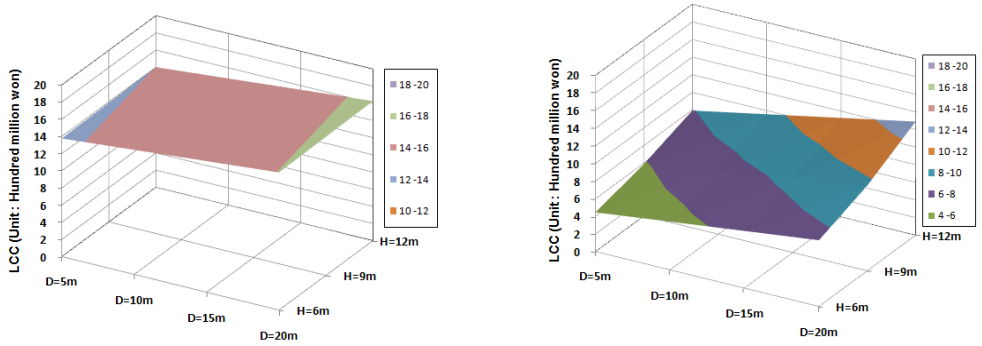


(a) D=5m (b) D=20m

Fig. 5 LCC analysis by items

토지지말뚝보다 6.08억원 더 크게 나타났다. H=12.0m, D=20.0m인 경우 성토지지말뚝의 초기비용이 12.89억원이며, 교량의 경우 10.01억원으로 2.88억원이 더 크게 나타났다. 그러나 약 20년 후부터 성토지지말뚝공법이 더 경제적인 것으로 나타났으며 100년동안 발생하는 생애주기비용은 교량이 3.38억원 더 크게 나타났다.

생애주기비용의 항목별 분석결과는 Fig 5와 같다. H=12.0m, D=5.0m인 교량의 경우 초기 공사비는 7.55억원, 유지관리비용은 6.16억원이며 해체폐기비용은 0.05억원으로 나타났으며, 성토지지말뚝공법의 경우 초기 공사비 4.45억원으로 나타났다. H=12.0m, D=20.0m인 경우 초기 공사

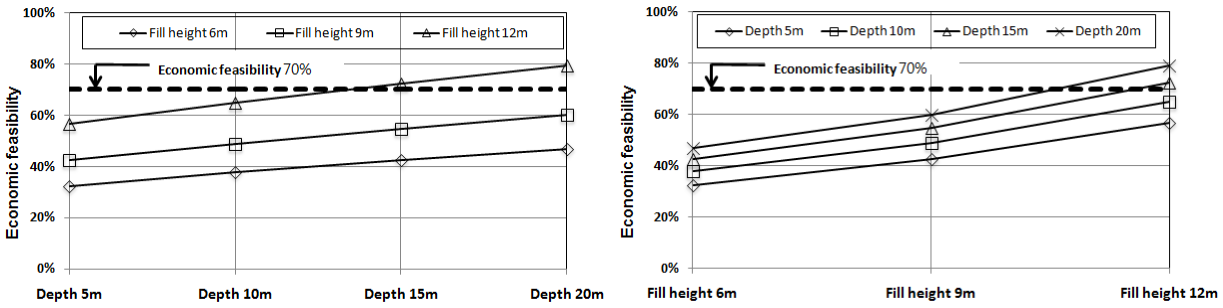


(a) Bridge (b) Pile-supported embankment

Fig. 6 LCC analysis by height of construction level and a depth of softsoil

Table 1 Economic study result in the bridge method and pile-supported method (unit : hundred million won)

Life cycle cost	Bridge method			Pile-supported method		
	H=6,D=5	H=9,D=5	H=12,D=5	H=6,D=5	H=9,D=5	H=12,D=5
Construction cost	7.55	7.65	7.75	4.45	5.90	7.93
Maintenance cost	6.16	6.17	6.19	-	-	-
Decommissioning cost	0.05	0.06	0.07	-	-	-
Total	13.76	13.88	14.01	4.45	5.90	7.93



(a) D=5m (b) D=20m

Fig. 7 Economic feasibility

비는 7.75억원이며 유지관리비용은 6.19억원이며 해체폐기비용은 0.07억원으로 나타났으며, 성토지지말뚝의 경우 7.93억원으로 나타났다. 성토지지말뚝의 경우 성토고 H=6m인 경우가 H=12m인 경우 대비 공사비가 1.78배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 성토고의 증가에 따른 성토사면의 증가와 이로 인한 말뚝 개수의 증가로 인한 것으로 분석되었다.

성토지지말뚝공법과 교량공법의 성토고 및 연약층 두께에 따른 생애주기비용은 다음 Table 1과 같으며 그림으로 도시화 하면 Fig. 6과 같다. Fig. 7은 교량공법 대비 성토지지말뚝 공법의 경제성 확보영역으로 교량대비 성토고 12m, 연약층 두께 20m 이내에서는 모두 경제성이 확보되는 것으로 나타나며 연약지반심도 15m 성토고 12m 이내에서는 교량대비 70% 수준으로 30% 이상의 경제성이 확보되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

성토지지말뚝의 경제성 및 LCC분석 연구의 목적은 교량공법 대비 성토지지말뚝공법의 경제성 및 생애주기비용을 비교·분석하여 현장 조건 별 최적의 공법 선정을 위한 기준 자료를 제시하는데 있다. 현장조건을 고려한 성토지지말뚝과 교량공법 경제성 검토결과, 약 20년 이후부터는 성토지지말뚝공법이 교량공법 대비 더 경제적인 것으로 분석되었다. 그리고 연약지반 심도 15.0m, 성토높이 12.0m이하까지는 공사비가 교량대비 70% 수준으로 경제성이 확보되는 것으로 검토되었다.

참고문헌

[1] Lee. S. H., Lee. I. H., Lee. S. J., Choi. J. H(2008), “Geosynthetic reinforced embankment piles supporting the latest design trends”, Journal of Korean Geothechnical Society, Vol.24, No.9

[2] BS8006(1995), British Standard, Code of practice for: Strengthened/reinforced soils and other fills.

[3] Korea Rail Network Authority(2012), “Design of embankment”, KR C-04020.

[4] the German Geotechnical Society(2011), “Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures Using Geosynthetic Reinforcements-EBGEO”