

# 프리캐스트 아치교 말뚝기초 안정성 검토 사례



**이규홍**  
밀양~울산간 고속도로 9공구  
(주)한화건설  
부장  
(lgh8078@hanwha.com)



**김경남**  
밀양~울산간 고속도로 9공구  
(주)한화건설  
차장  
(my79kim@hanwha.com)



**전병암**  
한국도로공사  
밀양울산건설사업단  
차장  
(jeon2003@ex.co.kr)



**최광수**  
한국도로공사  
밀양울산건설사업단  
과장  
(choiks@ex.co.kr)

## 1. 서론

말뚝 기초로 설계된 교량인 경우 시추조사 등을 통해 추정된 기반암선을 고려하여 말뚝 자재 길이를 산정하는 것이 일반적인 경우이다. 그러나 산악지의 계곡부 등 험준한 지형에서는 제한된 보링 횟수로 인해 예기치 않게 기반암선이 조기에 출현하는 경우가 많다. 이러한 경우 직향타로는 원래 계획하였던 심도까지 말뚝 근입이 불가능하고, 별도의 천공장비(T-4) 등을 이용해 말뚝을 원래 심도까지 근입 하더라도 경제성 및 시공성이 현저하게 저하될 수 있다.

한편 기반암 조기출현으로 인하여 계획했던 말뚝길이에 비해 현저하게 짧은말뚝으로 시공하게 될 경우 수평방향 지지력 감소 등 구조안정성에 직접적인 영향을 미치게 되므로 말뚝의 추가 시공 등의 보강 대책을 수립할 필요가 있다.

본 기고문에서는 계곡부에 설치된 프리캐스트 아치교의 말뚝기초 지지기반암이 조기에 출현하여 당초 지반조건 및 말뚝강성을 고려한 긴말뚝조건(최소 5.4m 이상)을 만족하지 못하고 짧은말뚝(L=3.0~4.0m)으로 변경됨에 따라 구조안정성을 검토하고 적절한 보강대책을 수립한 사례를 소개하고자 한다.



## 2. 프리캐스트 아치교 설계 현황

### 2.1 프리캐스트 아치교(Tech-Span) 개요

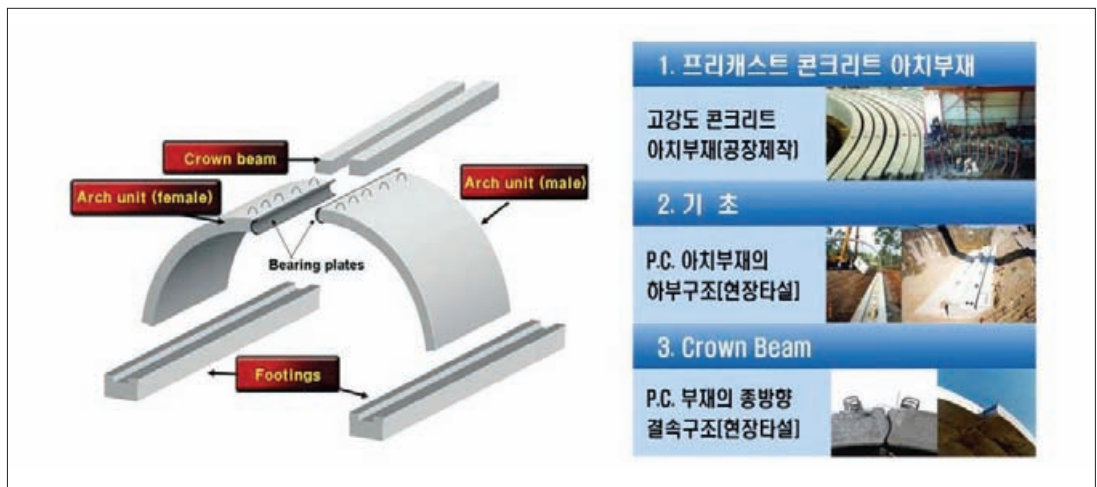
프리캐스트 아치교는 공장 제작되는 프리캐스트 콘크리트 아치 세그먼트를 이용하여 현장에서 조립 및 시공하는 공법으로써 고성도, 장기간 지중구조물에서도 교량의 안전성 확보가 용이한 형식이다. 또한 최적 아치형 단면을 적용하여 시각적 개방감을 개선하는 동시에 주변 환경과 조화를 이루어 미관이 수려한 장점이 있다.

### 2.2 프리캐스트 아치교(Tech-Span) 적용 현황

고속국도 제14호선 밀양~울산간 건설공사(제9공구)는 울산광역시 울주군 삼동면 보은리에서 작동리까지 총연장 5.75km 구간이며, 교량 8개소, 터널 4개소로 이루어져있다.

그 중 프리캐스트 아치교는 출강4교, 작동2교 2개소이다. 각각 본선 하부를 횡단하는 형식으로 시공 완료 후 상부에 추가적인 성토로 수평방향 토압을 크게 받는 구조이기 때문에 짧은말뚝이 적용될 경우 특히 불리한 조건이 된다. 따라서 지지 기반암이 조기에 출현한 출강4교에 대하여 안정성 검토를 실시하였다.

출강4교 기초 말뚝은 길이가 9.7~5.4m인 긴말뚝으로 계획하였다. [표3]에서와 같이 연직 허용지지

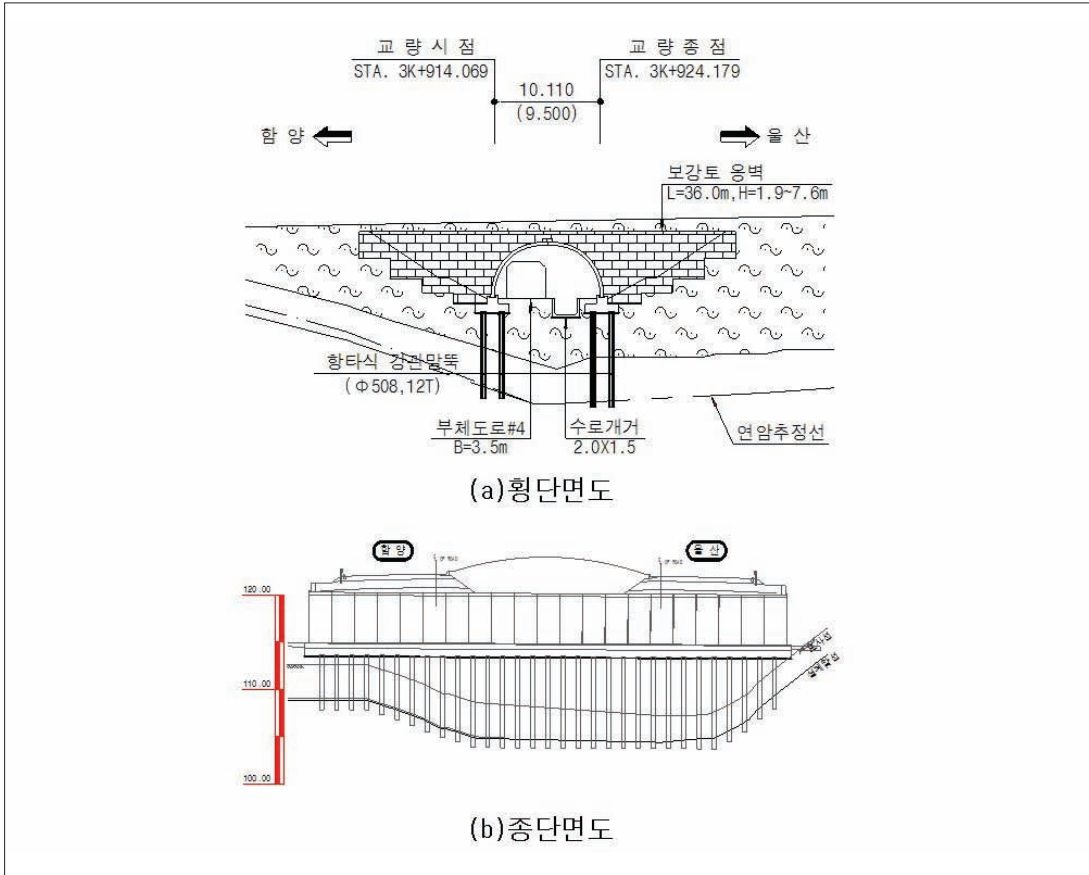


[그림1] PRECAST ARCH교 개요

[표1] 출강4교 설계현황

교량명	연장	폭원	기초형식	비고
출강4교	10m	57m	말뚝기초	연암지지

력(1586.3kN)이 작용하중(879.9kN)에 비해 약 2배 정도의 여유를 확보하고 있으나, 수평허용지지력(150.8kN)은 작용하중(125.5kN)의 약 1.2배 정도로 횡방향 지지력에 의해 말뚝이 지배가 되고 있음을 알 수 있다.



[그림2] 출강4교 설계 현황도

[표2] 출강4교 말뚝기초 설계 현황

공법	말뚝규격	말뚝길이	말뚝본수
직향타	φ508*12t	9.7~5.4m	132

[표3] 설계 말뚝 검토현황 (L=5.4m)

연직지지력(kN)		수평지지력(kN)		수평변위(mm)	
발생력	허용력	발생력	허용력	발생값	허용값
879.9	1586.3	125.5	150.8	3.5	15



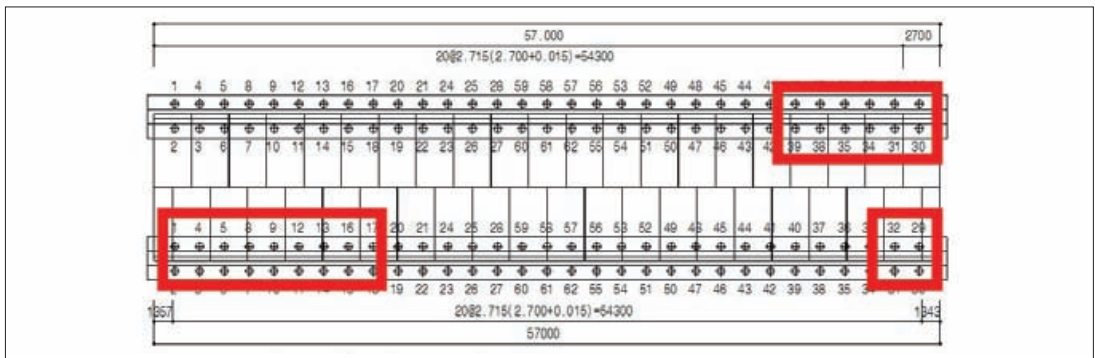
### 3. 짧은말뚝 안정성 검토

#### 3.1 말뚝 시공 현황

직항타 공법을 적용하여 말뚝 시공 중 교량의 좌우측 끝단부에서 설계심도에 비해 약 2~3m 높은 곳에서 기반암이 출현하여 항타가 불가능하게 되었으며, 총 34본의 말뚝이 약 3.0~4.0m로 당초 설계 5.4m 미만으로 근입되었다.

#### 3.2 말뚝의 안정성 검토

긴말뚝과 짧은말뚝의 판단은 지반조건, 말뚝의 직경과 강성에 의해 결정되는 말뚝특성치  $\beta$ 와 말뚝길이를 곱함으로써 판단하며 극한평형법(Broms방법) 또는 탄성지반반력법(Chang방법) 등으로 평가를 한다.



[그림3] 근입 깊이 5.4m 미만 구간



[그림4] 말뚝시공 전경

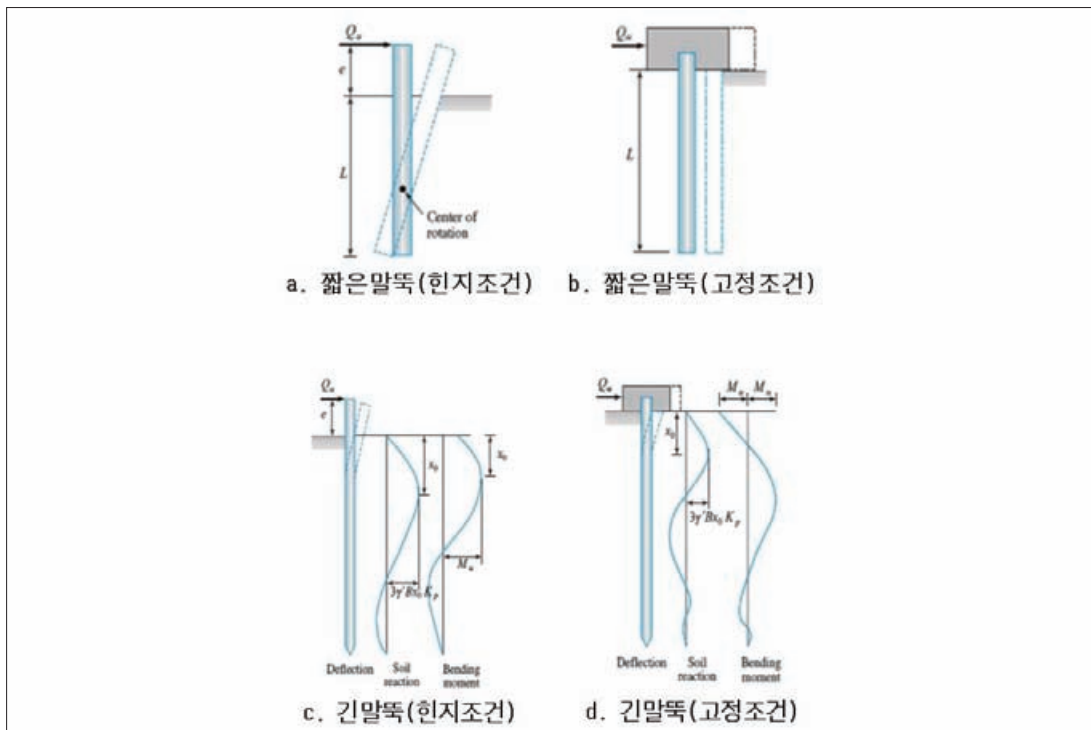
긴말뚝은 횡방향 하중에 대해 말뚝이 휨거동을 하게 되지만 짧은말뚝은 회전거동을 하게 되며 극단적인 경우 말뚝이 근입된 지반전체가 파괴되어 구조물이 전도될 가능성도 있으므로 수평하중이 크게 작용하는 교대 등의 설계에서는 불가피한 경우를 제외하고는 짧은말뚝은 피하는 것이 일반적이다. [그림5]는 긴말뚝과 짧은말뚝의 거동양상을 나타내었다.

말뚝 검토결과  $\beta = 0.562$ 로 말뚝길이가 5.4m 미만이면  $\beta L < 3$ 으로 짧은말뚝으로 분류되었으며, 짧은말뚝으로 수평방향 지지력을 재산정한 결과 길이가 3.0m인 경우 횡방향지지력이 106.17kN으로 당초 길이가 5.4m일 때 150.8kN에 비해 현저하게 저하됨을 알 수 있었다. 또한 감소된 수평방향 허용지지력은 수평하중 125.5kN보다 작으므로 유한장말뚝으로 변경하고 수평방향 안정성 확보를 위한 대책을 수립할 필요가 있는 것으로 확인되었다.

## 4. 수평저항력 향상 대책

### 4.1 구조안정성 확보 대책

출강4교는 앞서 설명한 바와 같이 프리캐스트 아치 구조형식으로 말뚝설계가 수평하중에 의해 결정되기



[그림5] 말뚝의 거동양상



때문에 대책방안으로는 수평저항력 향상방안과 수평하중 저감방안을 고려할 수 있다.

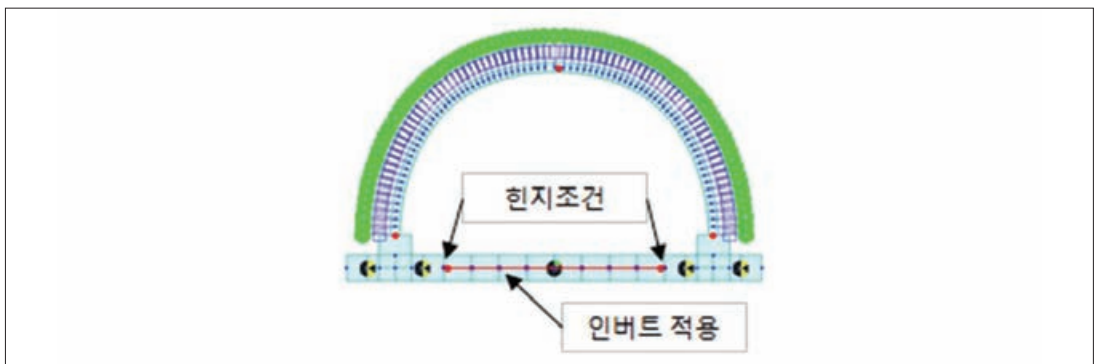
그러나 수평하중을 저감하는 방안의 경우 토압을 감소시키는 것이 일반적인 방법인데, 뒷채움부에 EPS블럭 등을 적용할 경우 공사비가 과도하게 증가될 가능성이 있고, 상부 토피고를 축소할 경우 도로 종단과 아치형 교량의 구조적인 특성까지 전반적으로 고려할 필요가 있기 때문에 적절한 방법이 될 수는 없는 것으로 판단되었다. 따라서 수평저항력 향상방안을 최종적으로 검토하는 것으로 하였다.

## 4.2 인버트 공법

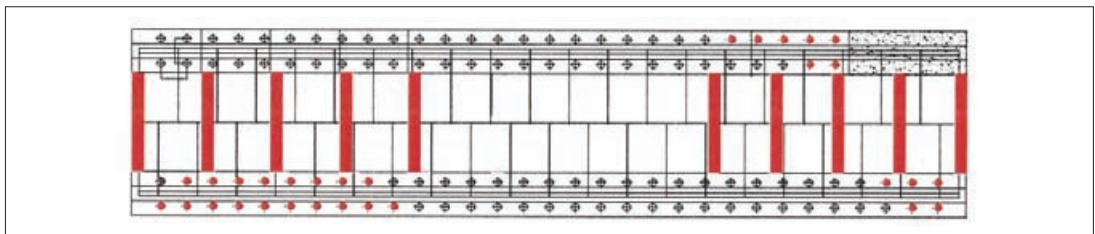
인버트 공법은 이격되어 있는 두 기초(A1,A2) 사이에 철근콘크리트 인버트를 시공하여 말뚝에 작용하는 수평하중을 인버트의 압축력으로 저항하는 방법으로 말뚝에 비해 인버트의 강성이 매우 크므로 대부분의 수평하중을 흡수하게 된다.

인버트 공법은 연약지반에 설치된 소규모 단경간 교량의 교대가 측방이동에 안정성을 확보할 수 없거나, 팽창성 지반이나 토사지반에 설치된 터널에 적용하기도 한다.

인버트를 설치함에 있어 박스형 구조와 같은 슬래브 형태와 일정간격으로 기초와 힌지 결합하는 버팀보 형태의 두 가지 형식을 고려하였는데, 말뚝의 휨저항력을 충분히 활용할 수 있고 기초부와 아치부의 추가적인 구조변경을 고려할 필요가 없으며, 콘크리트가 압축부재로써 상당히 효과적인 것을 감안하여 인버트에



[그림6] 구조모델링



[그림7] 인버트 설치 평면도(간격 4.8m)

는 순수 축력만 전달될 수 있도록 기초와 힌지로 결합된 버팀보 형태를 적용하는 것으로 결정하였다.

말뚝에 작용하는 수평하중은 31.74kN(고정 시), 61.42kN(힌지 시)으로 설치 전 125.5kN에 비해 약 75%의 수평하중이 감소되는 것으로 검토되어 상당한 효과가 있는 것으로 확인되었으며, 특히 짧은말뚝으로 변경되어 감소된 횡방향지지력 106.17kN에 비해 작용하중이 최대 57.9% 이하로 구조적 안정성을 확보할 수 있는 것으로 검토되었다.

### 4.3 보강말뚝 시공

수평저항력을 향상하는 다른 방법으로 기 시공된 말뚝 사이에 추가로 보강말뚝을 시공하는 방안을 고려하였다. 말뚝 간격 축소(0.85m)로 설계기준에서 제시하는 말뚝 중심간격(2.5D=1.27m)를 만족하지 못함에 따라 무리말뚝으로 검토하였고, 수평지지력은 무리 효율( $\mu=0.83$ )을 고려하여 근사적으로 계산하였다.

검토결과 기 시공말뚝 사이에 추가로 22본의 말뚝이 필요한 것으로 확인되었다. 이때 말뚝 두부에 작용하는 횡방향 하중은 최대 110.4kN으로 무리말뚝에 의해 감소된 허용지지력에 거의 근접하는 것으로 나타났다.

### 4.4 공법비교 결과

짧은말뚝이 적용된 프리캐스트 아치교의 안정성 확보를 위해 인버트 공법과 보강말뚝 공법을 비교 검토한 결과 수평저항력이 우수하고 경제적인 인버트 공법을 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

## 5. 맺음말

구조물을 시공함에 있어 기초 공사는 구조물 전체의 안정성에 막대한 영향을 미친다. 특히 산악지대 계곡

[표4] 구조계산 결과(말뚝길이 3.0m 인 경우)

구 분	수평허용지지력 (kN)	수평력(kN)	
		고정	힌지
적용값	106.17	31.74	61.42

[표5] 보강말뚝 적용 시 수평지지력(근사계산)

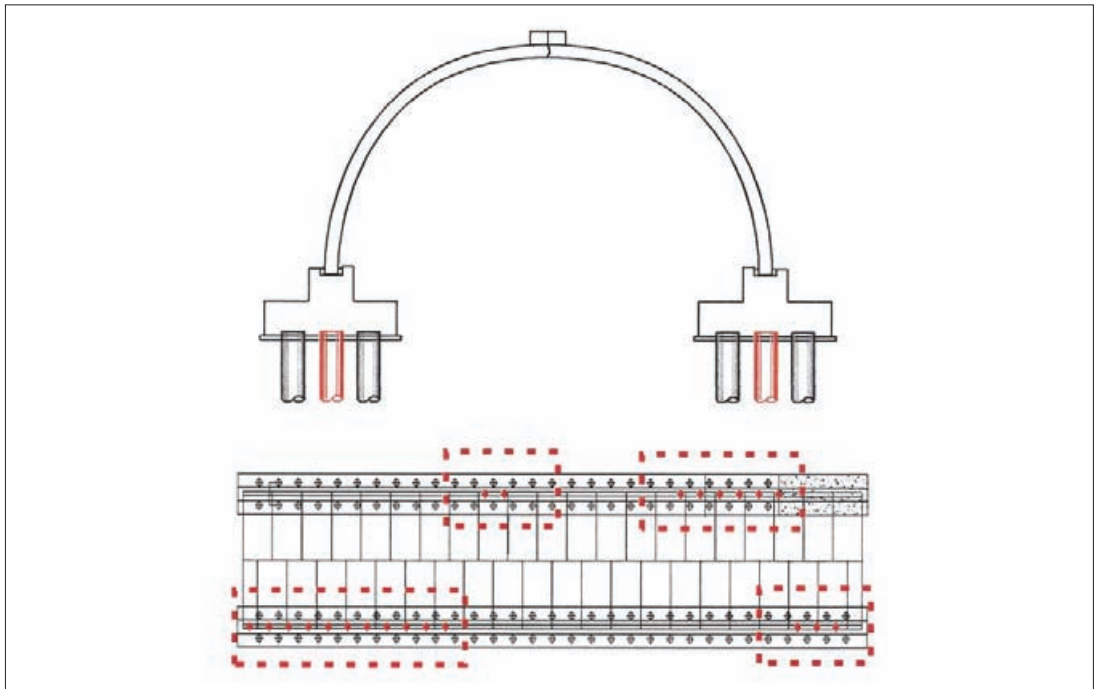
구 분	수평허용지지력	수평력(kN)
적용값	114.0	110.4



부나 불규칙적인 기반암 형태가 예상되는 구간에 말뚝기초를 시공 할 때에는 기반암 심도 추정에 노력을 기울여야 한다.

또한 불규칙한 기반암 구간에 말뚝 기초 시공 중 예상하지 못한 암선의 조기 노출로 인하여 짧은말뚝의 시공이 불가피할 경우, 말뚝 기초의 연직지지력, 수평지지력, 침하 및 수평변위 등의 안정성을 검토하고 다양한 보강방안을 검토할 필요가 있다.

당 현장의 출강4교의 경우 지반특성과 말뚝강성을 고려하여 긴말뚝이 적용가능한 최소 말뚝 길이는 5.4m



[그림8] 보강말뚝 개요도



[그림9] 인버트 보강 및 출강4교 시공 전경



[표6] 공법비교표

구분	인버트 공법	보강말뚝 공법
공법개요	•기초부에 일정간격 스트럿 보강	•기 시공 말뚝 사이에 추가 시공 (22본)
장·단점	•구조적 안정성 확보 효과 확실 •기초 시공 시 병행하여 시공이 가능 •경제적	•구조적 안정성 확보 가능 •기 시공말뚝 근접항타에 따른 영향 별도 검토 필요
공사비	20백만 원	41백만 원
채택안	◎	

로 원 설계에서도 짧은 말뚝을 피하기 위해 말뚝길이를 최소 5.4m이상으로 적용하였으나 기반암 조기출현으로 인해 말뚝이 3.0~4.0m로 시공됨에 따라 안정성 검토가 필요하였다.

안정성 확보 대책 중 하나인 인버트 공법은 구조물 기초 사이에 철근콘크리트 스트럿을 설치하여 횡방향 저항력을 확보하는 좋은 사례가 될 수 있다. 큰 비용을 수반하지 않으면서도 수평 저항력을 향상하는 확실한 방법이라 생각된다. 또한 별도의 시공단계가 필요하지 않고 기초 구체와 동시에 시공이 가능하므로 시공 효율성 측면에서도 상당히 우수하다고 판단된다.

향후 다른 건설현장에서도 이와 유사한 상황이 발생할 수 있으므로 인버트 공법을 참고하여 적용하는데 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

1. 한국도로공사, 고속국도 제14호선 밀양~울산간 건설공사(제9공구) 설계도서
2. 한국도로공사 밀양울산건설사업단(2016), 출강4교 기초 인버트 안정성 검토 결과
3. 대한토목학회 교량설계핵심연구단(2008), 도로교 설계기준 해설
4. 사단법인 한국지반공학회(2009), 국토해양부 제정 구조물 기초 설계기준 해설
5. 후레시네코리아(Techspan 공법소개), <http://www.taifk.co.kr>
6. 연세대학교 지질공학 연구실, <http://geo.yonsei.ac.kr/~structure>