

## 대심도 연약지반에 설치된 라멘 구조물의 시공 및 보강사례

### Case study on Construction and Improvement of Rahmen Structures in Deep Soft Clay Deposit

이사익<sup>1</sup>, 최영철<sup>1</sup>, 유상호<sup>2</sup>, 김태형<sup>3</sup>, 김성렬<sup>4\*</sup>

Sa-Ik Lee<sup>1</sup>, Young-Chul Choi<sup>1</sup>, Sang-Ho Yoo<sup>2</sup>, Tae-Hyung Kim<sup>3</sup>, Sung-Ryul Kim<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Expressway Coporation, 451-15, Jangyu-ro, Gimhae-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

<sup>2</sup>GeoR&D Company, Busan, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime University, Busan, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A University, Busan, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Structures that have constructed in soft clay might suffer from many issues related to consolidation settlement or lateral movement of soft-clay during long-term period. Therefore, it is important to establish proper design and construction processes related to site investigation, soil improvement, construction management, and so on. This case study focused on the construction of the rahmen structure supported by pile foundations. Especially, the structure in this case had been constructed without improving underlying soft clay and before constructing backfill embankment due to the limited construction time and the traffic connection of the old road crossing new highway. Therefore, in order to satisfy the structural stability, the construction processes and countermeasure methods were carefully planned based on the results of preliminary numerical analyses and monitoring of ground behaviors. Through the trial and error precess during the construction, the structures had been successfully constructed.

#### 요 지

연약지반에 설치되는 구조물은 장기간에 걸쳐 발생하는 연약지반의 압밀 침하 또는 측방유동 현상에 의하여 많은 문제점들이 발생할 수 있다. 그러므로, 지반조사, 지반개량, 시공관리 등과 관련하여 적합한 설계 및 시공순서를 결정하는 것이 중요하다. 본 연구의 시공사례는 기초구조물로 지지되는 라멘구조물을 대상으로 하였다. 특히, 본 사례는 공사기간의 제약과 새로운 고속도로를 가로지르는 기존 도로의 연결 문제 등으로 구조물 하부 연약지반을 개량하지 않고 배면 성토를 시공하기 전에 구조물을 먼저 시공하였다. 이에 따라, 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 수치해석 및 지반계측 결과를 바탕으로 시공절차 및 대책공법을 주의깊게 계획하였다. 시공과정 중에 여러 번의 시행착오를 거쳐 성공적으로 구조물 시공을 완료할 수 있었다.

**Keywords** : Soft deposit, Rahmen structure, Pile foundation, Road embankment, Lateral spreading

#### 1. 서 론

연약지반에 설치되는 구조물은 연약지반의 침하 또는

측방변위가 장기간에 걸쳐 발생할 수 있기 때문에 구조물의 설계 및 시공, 연약지반의 개량, 시공관리 등에 주의를 기울여야 한다. 지금까지 연약 지반에 구조물을 안전하게 시공하기 위한 여러 가지 공법과 기술이 개발되어 왔다. 그럼에도 불구하고 시공절차 및 연약지반의 거동에 대한 충분한 검토를 거치지 않아 구조물 시공 후에 구조물의 보

Received 7 Feb. 2014, Revised 25 Mar. 2014, Accepted 25 Mar. 2014

\*Corresponding author

Tel: +82-51-200-7622; Fax: +82-51-201-1419

E-mail address: [sungryul@dau.ac.kr](mailto:sungryul@dau.ac.kr) (S. R. K)

수 및 보강이 필요한 사례가 지속적으로 발생하고 있다.

본 연구의 시공사례는 냉정-부산 간 고속도로 확장 건설공사 중 고속도로를 가로지르는 면도 개방을 위해 시공 한 라멘구조물의 시공 및 보강사례이다. 특히, 본 사례는 공사기간의 제약과 고속도로를 가로지르는 면도를 연결하기 위하여 연약지반을 개량하지 않고 말뚝기초로 지지되는 라멘구조물을 시공한 후에 배면 성토를 실시하였다. 일반적으로, 연약지반에 성토를 실시하게 되면 연약지반의 측방유동 현상에 의하여 인접한 구조물이 불안정해지게 된다. 그럼에도 불구하고 본 시공사례는 불가피한 시공상의 제약조건에 의하여 구조물의 시공을 완료한 후에 배면 성토를 실시하여 구조물을 안전하게 완공한 특이할만한 사례이다. 본 사례는 향후 연약지반에 시공되는 구조물의 시공 및 연약지반 대책공법 수립에 매우 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 사례연구에서는 지반조사 및 시공현황 분석, 수치해석을 통한 시공절차 및 대책공법 수립, 계측관리에 의한 시공, 계측결과를 고려한 대책공법의 보완 등 시공 및 설계과정을 상세히 제시하고자한다(Korea Expressway Corporation, 2011, 2013)

## 2. 시공 현황 및 성토 안정성 분석

### 2.1 시공 현황

본 사례의 구조물은 냉정-부산간 고속도로 확장공사 현장에 위치하고 있으며, 마을간의 통행을 위한 면도를 연결하기 위해 시공된 라멘 구조물이다. 고속도로는 4차로이며, 구조물은 좌우 2개의 라멘구조물이 중앙부에 조인트로 연결되어 있다. 전체 구조물의 길이는 10m, 폭 39m, 높이 8.6m이다.

Fig. 1은 하부 지반조건 및 라멘 구조물의 계획 단면도를 보여준다. 하부 지반조건은 상부로부터 실트질 점토, 실트질 모래, 풍화암, 연암 순으로 구성되어 있다. 상부 연약 실트질 점토층의 두께는 6.6m~19.5m로 변화하고 있다. 그리고, 본 현장이 산과 강의 가운데 위치하는 지리적 특성으로 인해 노선직각 방향의 연약지반 두께가 19.5m에서 6.6m로 급격히 변한다. 배면성토에 의하여 노선방향과 함께 노선직각방향의 측방유동 현상에 대하여 상당히 불안정할 것으로 판단되었다(Korea Expressway Corporation, 2008).

본 라멘교는 항타말뚝으로 지지되고 있다. 말뚝은 상부 강관말뚝, 하부 PHC말뚝으로 이루어진 복합말뚝을 적용하였다(복합말뚝의 상부 5m는 외경 508mm, 두께 12mm의 강관말뚝 사용; 강관말뚝의 하부는 외경 500mm, 두께 80mm의 A종 PHC 말뚝 연결). 말뚝의 근입깊이는 노선직각 방향으로 연약층의 두께가 급격히 변화하기 때문에 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 근입깊이가 25~35m로 변화한다.

본 구조물을 시공할 때 문제가 될 수 있는 사항은 배면 성토에 의한 연약지반의 측방유동으로 기초구조물의 변형이 발생하는 것이다. 일반적으로, 성토 및 지반개량을 우선 실시하여 측방유동에 대하여 안정된 상태에서 기초구조물과 라멘구조물을 시공하는 것이 일반적인 시공순서이다.

그러나, 본 현장의 경우 구조물 구간에 PBD 수량이 설계에 반영되어 있지 않아 연약지반이 무처리로 되어 있었으며, 구조물 시공 전에 프리로딩을 실시하면 도로를 횡단하는 면도가 폐쇄되어 마을로 진입이 불가능한 상황이 되므로 구조물을 선시공하게 되었다. 그러므로, Fig. 2에서 보는 바와 같이 배면 도로성토를 하지 않은 상태에서 기초구조물과 라멘교 시공을 완료하게 되었다.

배면성토에 의한 최종 압밀침하량 크기는 이론식을 적용하여 계산한 결과 성토 후 침하량이 2~3m로 예측되었다. 배면성토 전에 구조물이 선시공됨에 따라 성토로 인해 발생하는 침하량에 대하여 구조물을 안정하게 보호할 수 있는 대책공법이 시급히 요구되었다.

### 2.2 배면성토에 의한 구조물의 안정성 분석

2차원 수치해석을 수행하여 성토에 의한 구조물의 안정성을 검토하였다. 해석에 사용된 수치해석 프로그램은 Midas에서 개발한 SoilWorks 프로그램이다(MidasIT, 2013). 해석모델의 경우 지반은 Mohr-Coulomb 항복모델, 콘크리트는 탄성모델, 말뚝은 보모델을 적용하였다. Table 1은 해석에 적용된 지층 입력변수값을 정리하였다.

복합말뚝의 상부 강관은 측방유동에 대하여 인장 및 전단저항력에 대한 저항력이 크지만, 하부 PHC 말뚝은 인장 및 전단저항력에 취약한 것으로 알려져 있다. 또한, PHC 말뚝 종류 중 인장응력이 4MPa로 작은 A종을 적용하여 측방유동에 더욱 취약할 것으로 판단되었다. Fig. 3은 수치해석 결과를 보여준다. 결론적으로, 대책공법을 적용하지 않고 배면성토를 실시할 경우 말뚝의 수평변위 208mm,



Table 1. Soil properties for numerical analyses

	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Internal friction angle	Young's modulus (kN/m <sup>2</sup> )	Poisson's ratio
Embank	19.0	15.0	25	28,000	0.32
Clay	15.9	15.8	-	698	0.35
Weathered soil	18.5	16.0	30	61,200	0.31
Weathered rock	22.0	30.0	32	200,000	0.3



Fig. 2. Construction of rahmen structure before backfill

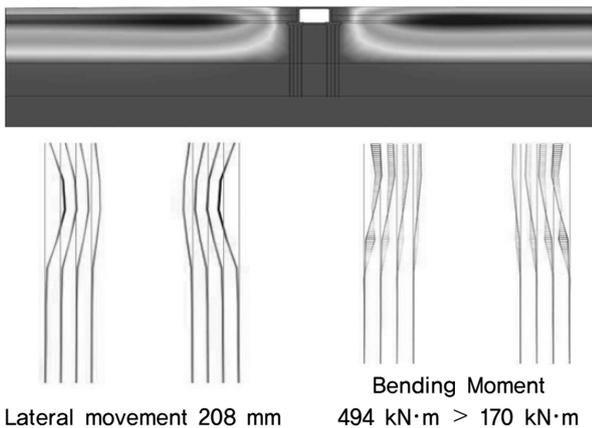


Fig. 3. Pile failure by backfill construction

### 3. 대책공법의 결정

#### 3.1 인버트 설치 및 성토이격 거리의 결정

교통전환 계획에 따라 구조물 인접구간 외에 도로성토 시공을 추진해야 하므로 수치해석 결과를 바탕으로 구조물 말뚝기초가 영향을 받지 않는 성토가능 이격거리를 검토하였다. 이 때, 측방유동에 의한 라멘구조물의 손상을 감소시키기 위하여 라멘구조물 하단부에 버팀대 형식의 인버트를 시공(라멘구조물 좌우측 하단부를 연결하는 콘크리트 타설)하여 폐합된 구조물로 거동하도록 하였다. 이 인버트는 라멘구조물 하단부와 말뚝상단의 변위를 함께

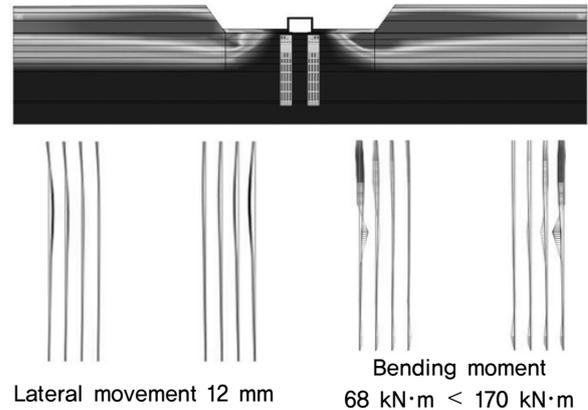


Fig. 4. Determination of separation distance of backfill

억제함으로써 구조물의 전체안정성을 향상시키는데 매우 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.

2차원 수치해석을 수행한 결과, Fig. 4와 같이 인버트를 설치하고 구조물로부터 성토시공이 25m 이격되는 경우 말뚝은 변위 및 휨모멘트에 대하여 안정한 것으로 나타났다(Dream E&G, 2012).

#### 3.2 뒤채움 성토 EPS 설치 검토

교대 뒤채움구간의 성토에 의한 구조물 안정성을 검토하였다. 이 때, 라멘구조물의 경우 인버트로 인해 폐합되어 말뚝 상부 수평변위는 고정되어 있으므로 말뚝 중앙부 변위 및 부재력에 대해서 검토하였다. Table 2는 배면 성토높이의 변화에 따른 말뚝의 안정성을 검토한 결과이다.

Table 2. Determination of possible backfill height

Backfill height	Pile stability		
	Horizontal disp. (mm)	Aixal force (kN)	Moment (kN·m)
8m	22.1	1,786	124 (OK)
9m	19.6	2,101	131 (OK)
10m	21.0	2,413	171 (NG)
11m	19.6	2,697	176 (NG)

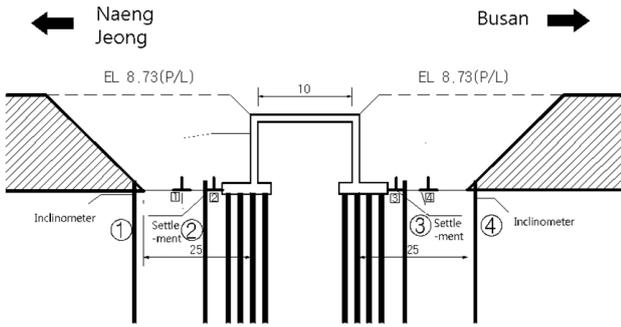


Fig. 5. Instrumentation for stability monitoring

그 결과, 배면에 프리로딩 성토 높이가 9m까지는 말뚝이 부재력 측면에서 안정한 것으로 나타났다. 이 때 발생하는 배면 침하량은 4m로 나타났다. 최종적으로, 배면 여성토를 1m 제거 후 EPS(D-20, 밀도 0.2 kg/m<sup>3</sup>) 를 3m 두께로 설치하는 대책공법이 적정한 것으로 검토되었다(Dream E&G, 2012).

## 4. 시공 계측관리

### 4.1 계측기 설치 및 계측관리 기준 결정

3장에서 결정된 대책공법(9m 배면성토 후 EPS성토시공)을 적용할 때 구조물의 안정성을 판정하기 위하여 Fig. 5와 같이 계측기를 설치하였다. 성토에 의한 지반의 횡변위 계측을 위하여 구조물 인접부와 25m 이격거리 위치에 각각 경사계를 설치하였으며, 지표 침하계를 함께 설치하여 침하량을 계측하였다. 이와 함께 구조물 중앙부에 위치한 조인트 부분에서의 간격을 주기적으로 계측하였다.

수치해석 결과를 토대로 Table 3과 같이 지중경사계에 의한 지중변위 관리기준값을 결정하였다. 수치해석 결과에서 구조물에 인접한 경사계 위치의 최대 지중변위가 80mm에 도달하였을 때 말뚝부재가 불안정해졌으므로, 이 변위의 70%와 90% 변위값인 56mm와 72mm를 1차와 2차 관리기준값으로 결정하였다.

Table 3. Determination of control displacement values

	control value (mm)	remark
1st step	56	70% of max. displacement
2nd step	72	90% of max. displacement
3rd step	80	max. displacement

## 4.2 계측 결과

성토시공은 단계별 성토고를 준수하여 주의깊게 시공하였으며, 성토속도는 5cm/day의 완속성토를 원칙으로 하고 25cm~35cm두께의 성토 후 진동 롤러다짐을 시행하였다. 그리고, 성토시행 시 경사계, 침하판, 조인트 간격 등을 계측하여 안정성 관리를 수행하였다.

계측결과 배면침하량은 1.5m~2m 정도로 예측값보다 작은 것으로 계측되었다. 지중경사계는 성토에 따른 변위 반응이 바로 나타났다. 즉, 성토를 실시하면 수평변위가 급격히 발생하였고 성토를 중지하면 변위가 수렴하는 경향을 보였다.

그런데, 당초에는 지중 수평변위를 관리기준값으로 설정하였으나 성토를 진행함에 따라 Fig. 6 및 Fig. 7과 같이 라멘구조물 중앙부 조인트 (상행-하행선의 경계부)의 간격이 성토고에 비례하여 벌어졌다. 조인트 간격이 벌어진



Fig. 6. Joint gap induced by backfill

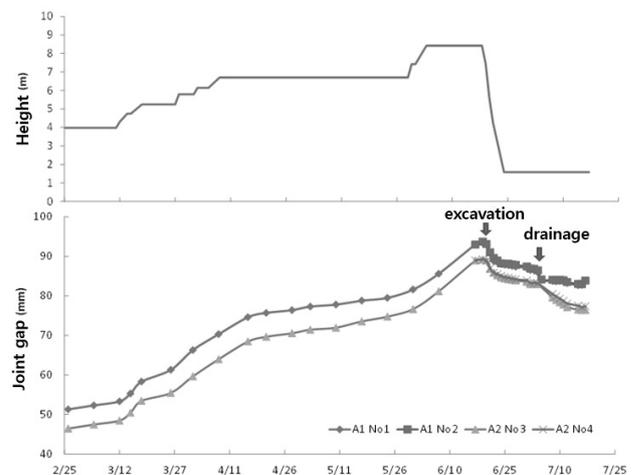


Fig. 7. Total backfill height and joint gap



Fig. 8. Excavation of backfill to prevent joint gap

것은 노선직각방향으로 연약층의 두께가 급격히 변화하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 즉, 연약지반 두께가 얇은 곳에 위치한 부산방향 쪽 라멘구조물은 변위가 발생하지 않았으나 연약지반 두께가 두터운 곳에 위치한 냉정방향 쪽 라멘은 노선직각방향으로 변위가 발생하였다. 특히, 총성토고가 6.7m에서 8.4m로 증가하였을 때 조인트부 간격이 93mm로 10mm이상 급격히 증가하였다.

이에 따라, 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 성토 중지 후 Fig. 8과 같이 구조물 배면에 인접한 배면 흙을 제거하였다. 그 결과 Fig. 7의 결과와 같이 지중변위가 감소하며 수렴하였다. 또한, 배면에 인접하여 고여 있던 지하수를 제거하는 배수를 실시하였을 때 조인트 간격이 감소하는 경향이 나타났다.

## 5. 대책공법의 보완

### 5.1 강선 인장 실시

시간이 경과함에 따라 중앙 조인트 간격이 감소하는 경향을 보였지만 향후 시공에 따른 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 좌우 라멘구조물을 관통하는 구멍을 천공한 후 구멍 내로 강선을 설치하여 인장력을 가하는 대책공법을 적용하였다. 인장강선의 설치 목적은 연약지반 두께가 얇은 곳에 위치한 부산 방향쪽 라멘의 변위가 발생하지 않고 안정한 상태이므로 이 구조물의 지지력을 반력으로 냉정 방향쪽 라멘의 수평변위 발생을 억제하는 것이다. 강선은 좌우 측 각각 하부 1개소, 상부 1개소의 총 4개소에서 Fig. 9와 같이 설치하였으며, 한 개소당 인장강도 400MPa, 외경 15.2mm의 강선 15개가 설치되었다.



Fig. 9. Installation of pretension rebar to prevent joint gap

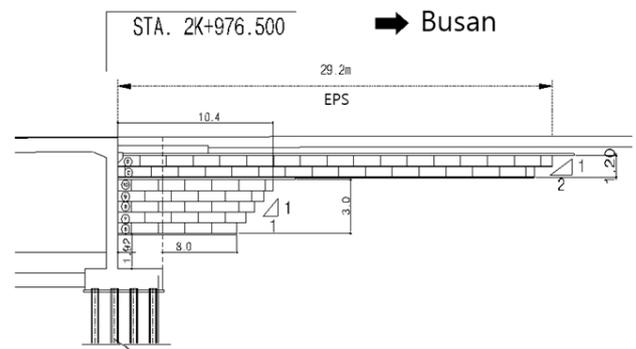


Fig. 10. Planning of EPS backfill

강선의 인장력은 조인트 간격을 관찰하면서 조인트 간격이 10mm 이내가 되도록 증가시켰다. 그 결과, 조인트 간격이 10mm 이내로 감소한 상태에서 배면성토 시공을 완료한 후에도 안정된 상태를 유지하였다.

### 5.2 EPS 물량의 보완

향후 뒤채움 구간에 대해 추가 하중이 가해지면 구조물의 조인트 간격에 대한 안정성 확보가 불확실하므로 EPS 시공을 통해 하중을 경감하였다. 교대 배면으로부터 이미 터파기한 4m에서 추가되는 성토하중과 포장 및 교통하중에 대응하기 위해서 뒤채움부 성토체를 최소 4m이상 제거해야 하는 것으로 판단되었다. 그러므로, Fig. 10 및 Fig. 11에서 보는 바와 같이 EPS 하단길이를 8m로 하고 1:1경사가 되도록 EPS를 시공하였다.

### 5.3 계측관리 방안 수립

구조물 완공 후의 장기 안정성을 지속적으로 계측하기



Fig. 11. Construction of EPS backfill

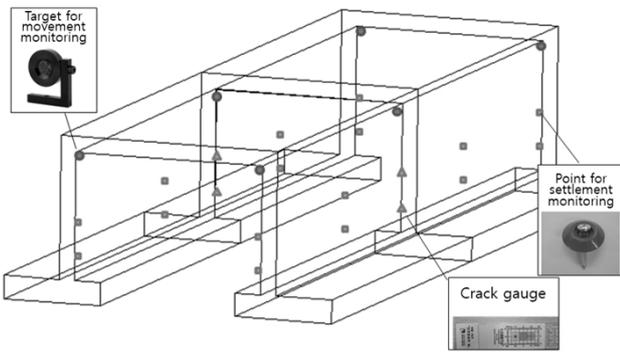


Fig. 12. Location of instrumentation

위하여 계측관리 방안을 수립하였다. 구조물의 자체 안정성을 판단하는 것이 중요하기 때문에 구조물 자체 변위 측정을 위한 계측기를 주로 설치하였다. 설치된 계측기는 Fig. 12에 나타난 바와 같이 크랙게이지 4개소, 변위타켓 6개소, 침하핀 16개소이다. 이러한 계측을 통하여 구조물의 변위추세를 파악하고 이상 징후가 발생할 경우 신속한 대책방안을 수립하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 시공 완료후 현재 약 5개월이 경과하였으며 구조물 및 성토체는 매우 안정된 상태로서 적절한 대책공법의 수립을 통해 구조물의 시공을 성공적으로 완료한 것으로 판단된다.

## 6. 요약 및 결론

연약지반이 두터운 냉정-부산간 고속도로 건설공사구간 중 배면성토 전에 말뚝기초로 지지되는 라멘구조물을 선시공함으로 향후 배면성토에 따른 구조물의 안정성을 확보하는 것이 필요하였다. 그러므로, 다음과 같이 적절한 시공계획 및 대책공법을 적용하여 구조물의 시공을 안전하게 완료할 수 있었다.

- (1) 2차원 수치해석 결과를 이용하여 구조물에 영향을 미치지 않는 성토가능 이격거리를 결정하였다. 그 결과, 구조물로부터 25m 떨어진 거리까지 성토가 가능한 것으로 결정되었다.
- (2) 수치해석 결과를 이용하여 구조물에 인접한 배면성토 및 EPS 보강범위를 결정하였다. 대책공법으로 라멘구조물 저면에 버팀대 역할을 하는 인버트 시공이 구조물의 안정성을 크게 증가시키는 것으로 확인되었다. 그리고, 배면성토 9m를 한 후 최종적으로 여성토를 1m 제거하고 3m 두께의 EPS를 시공하는 대책공법을 결정하였다.
- (3) 그런데, 구조물 인접 배면성토 중에 라멘구조물 중앙의 조인트부의 간격이 급격히 증가하였다. 이것은 노선직각방향으로 연약지반 두께가 6.6m~19.5m로 급격하게 변화하기 때문에 노선직각방향의 측방유동이 발생하였기 때문으로 판단된다. 이에 따라, 배면성토를 제거한 상태에서 2개의 라멘구조물을 일체화시키기 위하여 강선 시공 및 인장을 실시하였다. 그리고, 추가하중을 억제하기 위하여 EPS 시공범위를 당초 계획보다 증가시켰다.
- (4) 교통개방 후 현재 약 5개월이 지난 시점에서 구조물 및 배면성토체는 매우 안정한 상태를 유지하고 있다. 그러므로, 본 사례연구에서 제시한 바와 같이 수치해석 및 계측결과를 이용하여 적절한 대책공법을 수립함으로써 구조물의 시공을 성공적으로 완료한 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This study was performed with the support and cooperation of the Naengjeong-Busan Construction Agency of the Korea Expressway Corporation.

## References

1. Dream E&G (2011), *Detailed Design of Namhae Expressway Expansion (between Naengjeong and Busan) - Stability against Lateral Spreading of Soft Clay*.
2. Dream E&G (2012), *Stability against Bridge Lateral Spreading in Soft Clay*.
3. MidasIT (2013), *Analysis Reference of Soilworks program*

(Ver.350).

4. Korea Expressway Corporation (2008), *Site Investigation Report of 104 Namhae Expressway Expansion (between Naengjeong and Busan)*.
5. Korea Expressway Corporation (2011), *Soft Clay Technical Advisory Reports on Expressway Expansion between Naengjeong and Busan (1st year)*.
6. Korea Expressway Corporation (2013), *Soft Clay Technical Advisory Reports on Expressway Expansion between Naengjeong and Busan (3rd year)*.