

해안제방 시공 중 해수유입에 대한 차수보강 사례분석

Case Study of Improvement against Leakage of a Sea Dike under Construction

한상현¹, 여규권², 김홍연^{3*}
Sang-Hyun Han¹, Geu-Guwen Yea², Hong-Yeon Kim^{3*}

¹Member, Professor, Department of Civil Engineering, SEOIL University, 28, Yongmasan-ro 90-gil, Jungnang-gu, Seoul, 131-702, Republic of Korea

²Member, Head of Office, Technology Research Division, SAMBU Construction Co., 63, Toegye-ro, Jung-gu, Seoul, 100-804, Republic of Korea

³Member, Senior Researcher, Technology Research Division, SAMBU Construction Co., 63, Toegye-ro, Jung-gu, Seoul, 100-804, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, the causes and countermeasures for the leakage of a sea dyke under construction are analyzed. In general, the seabed ground is clearly divided from the embankment but a lot of parts show abnormal zones with low resistivity from the results of electric resistivity survey. Hence the causes of the leakage are considered as following: three-dimensional shear strain behavior, irregular compulsory replacement of the soft seabed ground with low strength and quality deterioration of the waterproof sheets during the closing process. The improvement method is determined by considering the constructability in the seawater and its velocity condition, durability, economic feasibility, similar application cases and so on. Consequently, a combination of low slump mortar and slurry grouting and injection method is selected as an optimum combination. Mixing ratio and improvement pattern are determined after drilling investigation and pilot test. The improvement boundary is separated into general and intense leakage area. The construction is performed with each pattern and the improvement effects are confirmed. The confirmed effects with various tests after completion show tolerable ranges for all of the established standards. Finally, various issues such as prediction of length of the waterproof sheet, installation of it against seawater velocity, etc. should be considered when sea dykes are designed or executed around the western sea which has high tide difference.

요 지

가
가
가
3
가
가
가
3
가

Keywords : Sea dyke, Leakage, Improvement, Waterproof sheet, Compulsory replacement

Received 21 Apr. 2015, Revised 24 Jun. 2015, Accepted 24 Jun. 2015

*Corresponding author

Tel: +82-2-3706-2542; Fax: +82-2-756-3920

E-mail address: hykim74@sambu.co.kr (H. Kim)

1. 서론

화력발전 과정에서는 석탄이 연소된 후 부산물인 석탄 회(ash)가 발생하게 되며 이들 가운데 상당량은 시멘트 혼화재로 재활용되거나 나머지는 처리장 매립에 의존하고 있다. 따라서 발전소와 인접한 부지에 매립처리장의 건설이 필수적이며, 이들은 통상 공유수면에 제방을 설치하여 그 내부공간을 활용하므로 해안과 접하여 건설된다. 방조제 등 해안제방을 건설하는데 있어서 많은 어려움을 겪는 부분은 조수차에 의한 해수의 제어문제가 큰 원인이 된다. 이와 관련하여 Oh et al.(2006)은 방조제 끝막이 후 축조된 후속단면에 대하여 다양한 조위변화를 재현한 실내 침투 모형시험을 통하여 사석단면 내의 유속변화, 침윤선 분포 등 침투거동을 예측한바 있다. 또한, 제체를 형성하여 가면서 좁아지는 해수통로에서 발생하는 빠른 유속은 체절 공사를 어렵게 한다. 더구나 본 사례와 같이 해수유통을 완전히 차단하여 부산물에서 발생하는 침출수 유출을 방지할 필요가 있는 제방에서는 빠른 유속조건에서 차수재를 안정적으로 설치하는 것이 매우 어려운 일이다. 그러한 이유로 준공된 제방 특히, 체절구간 인접부에서 누수사례가 빈번히 발생하고 있는 실정이나 그에 대한 보강방법 등의 연구결과는 많지 않다.

최근에도 화력발전소에 부속된 해안제방의 최종 체절구간에서 해측으로 누수가 발생하여 원지반 차수벽 및 제체와의 경계부에 차수재를 이용하여 보수한 사례가 있다(Daelim Industrial Co., 2001). 석탄 회 매립을 위한 해안 제방에서 차수방법은 일반적으로 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 재질의 차수시트를 이용하고 있으며, 사석재와의 마찰에 의한 손상을 막기 위하여 부직포와 함께 설치한다. 이 방법은 적용실적이 많아 충분히 검증되었고 연결부를 열 접합하여 연결부 차수가 유리하며 경제적인 반면, 원지반의 투수성이 큰 경우에는 적절치 못한 단점이 있다(Korea East-West Power Co., 2009).

본 논문에서는 호안제방을 축조하여 회 처리장 부지를 조성하는 공사과정에서 발생한 누수문제와 그 원인을 파악하기 위한 일련의 조사, 보강방법 선정 및 시공사례를 분석하였다. 우선 누수발생이 확인된 후 누수 범위와 원인을 파악하기 위하여 물리탐사를 수행하였다. 다음으로 조수차에 의해 빈번히 해수가 유통되는 조건에서 원활한 보강이 가능한 차수공법을 검토하여 경제성 및 차수효과 측

면에서 유리한 공법을 선정하였다. 시험시공 단계에서 정확한 보강심도와 차수효과를 결정하기 위하여 시추조사와 투수시험을 실시하였다. 시험시공 결과를 토대로 상세설계를 통하여 누수량 정도에 따라 적절한 공법의 조합 및 간격을 결정하여 보강을 실시하였다. 본 시공 후 보강효과를 검증하기 위하여 각종 실내 및 원위치 시험을 통하여 시공품질을 확인하였다.

2. 시공계획 및 지반조건

2.1 시공계획

연구대상 제방은 공해상에 건설되어 기존 방조제 및 제방에 접촉함으로써 폐합된 부지를 조성할 수 있도록 계획되었으며 제방의 연장은 약 2.6km에 달한다.

제방은 사석제 형식으로서, 기초지반 강제치환방식으로 사석제체를 축조한 후 해측은 피복석과 TTP를 이용하여 조류 및 파랑으로부터 제체를 보호하고, 내측 제방 비탈면은 매립재료의 유출 및 차수를 위하여 양질의 토사를 성토하도록 계획되었다. 이때 제체를 통한 내측 침출수의 유출을 방지하기 위하여 제체사석 내측의 마루부에서부터 해저면 원지반까지 차수시트(HDPE)를 설치한다. 차수시트는 사석재료와의 마찰로 인한 손상을 방지하기 위하여 필터매트(50kN/m)가 부착된 복합 차수시트를 사용하도록 하였다(Fig. 1).

2.2 지반조건

설계당시 시추조사 결과에 따르면 현장의 해저지층은 실트질 점토(4.8~24.1m), 실트질 모래(0~7.6m), 점토질 실트(0~22.7m), 자갈질 모래(0~5.9m), 모래(0~8.7m), 풍화토(0~3.3m), 풍화암(0~2.0m) 및 연암(1.5m 이상)층 순으로 분포하고, 위치에 따라 점성토 또는 사질토가 포켓(seam)의 형태로 존재한다. 실트질 점토층은 N=1~9의 범위를 나타내고 액성한계는 48.6% 이하로 각 지점별 자연함수비와 유사한 값을 보이며 USCS에 따르면 CL 내지 ML로 분류된다. 조위는 약 최고고조위 EL(+4.308, 약 최저저조위 EL(-)4.380, 평균해수위 EL(-)0.036으로 설계되었다(KEPCO E&C Co., 2008).

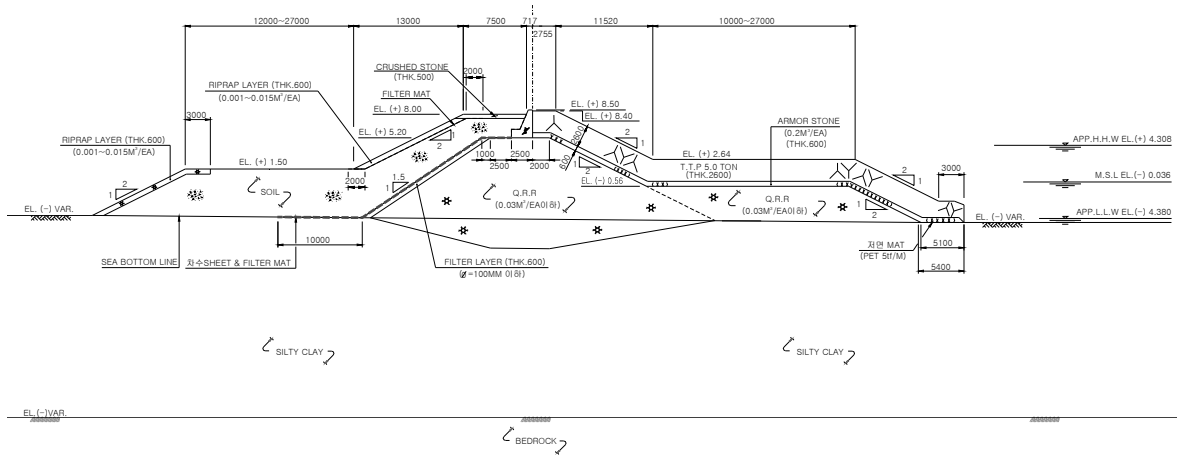


Fig. 1. Cross-sectional view of sea dyke



Fig. 2. Panoramic photograph of leakage

3. 누수발생 및 원인분석

3.1 누수현황

사석체체의 체결공사가 완료되고 내측 배면성토가 진행되는 과정에서 성토된 토사체체에서 해수유입에 의한 누수가 관찰되었다. 발생구간은 제방 중간부에 해당하는 No.52~79로서 연장은 L=540m이다. Fig. 2에 나타낸바와 같이 누수는 토사층의 하부소단(EL(+))1.5에서 만조시 발생하였다. 하부소단은 평균해수면(M.S.L)과 약 최고고조위(App. H.H.W) 사이에 위치한다.

3.2 원인분석

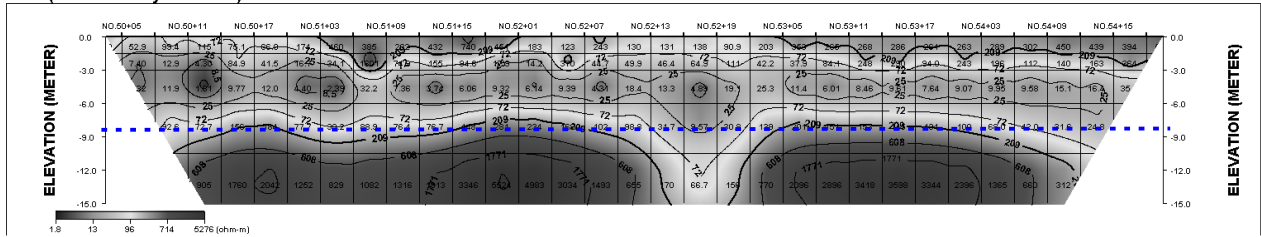
해수유입의 주된 경로와 원인을 파악하고자 누수가 관찰된 지점을 중심으로 전기비저항탐사를 실시하였다(Sambu Construction Co., 2013). 전기비저항탐사는 제방의 누수 파악에 많이 적용되는 쌍극자 배열법(Dipole-Dipole array)

을 이용하였다. 탐사는 네 개 구간으로 구분하여 실시하였고, 연장은 구간지점을 중심으로 전-후 50m씩 각각 100m, 3측선으로 배열하였다. Fig. 3은 전기비저항탐사 결과 나타난 비저항 분포 가운데 내측측선에 대한 것이다(Samsu Development Co., 2012).

Fig. 3(a)에서 L-1-1은 해저면 원지반인 GL(-)8.4m를 기준으로 상-하부 사이에 명확한 비저항치의 차이를 나타내는 반면, 중간부(NO.52+13~53+02)의 원지반은 낮은 비저항 이상대로 나타났다. Fig. 3(b)의 L-2-1에서 NO.66+10~68+02의 연장 32m구간은 해저면 원지반인 GL(-)8.4m를 기준으로 명확한 비저항치의 차이를 나타내는 반면, 그 외의 NO.69+00~69+15 및 NO.70+07~70+16 구간은 낮은 비저항치를, 나머지 구간은 매우 낮은 이상치를 나타내었다. Fig. 3(c)의 L-3-1에서 NO.77+17~78+18의 연장 21m구간은 해저면 원지반인 GL(-)8.4m를 기준으로 명확한 비저항치의 차이를 나타내는 반면, 그 외의 NO.79+13~80+02 및 NO.80+17~81+03 구간은 낮은 비저항치를, 나머지 구간은 매우 낮은 이상치를 나타내었다. Fig. 3(d)의 L-4-1에서 NO.57+12~58+07 구간은 비교적 낮은 비저항치이긴 하나 해저면 원지반과의 차이를 나타내는 반면, 나머지 구간은 매우 낮은 비저항치를 나타내었다. 특히, GL(-)3.0~4.0m 부근까지의 지표구간은 그 하부와 비저항치의 차이를 보여 제방 내측에 유지되고 있는 수위와 유사한 수준까지 포화되어 있는 것을 파악할 수 있었다. 또한, 전반적으로 GL(-)4.0~5.0m 사이에 저비저항대가 불규칙하게 분포되어 심한 누수발생 지점을 추정할 수 있었다.

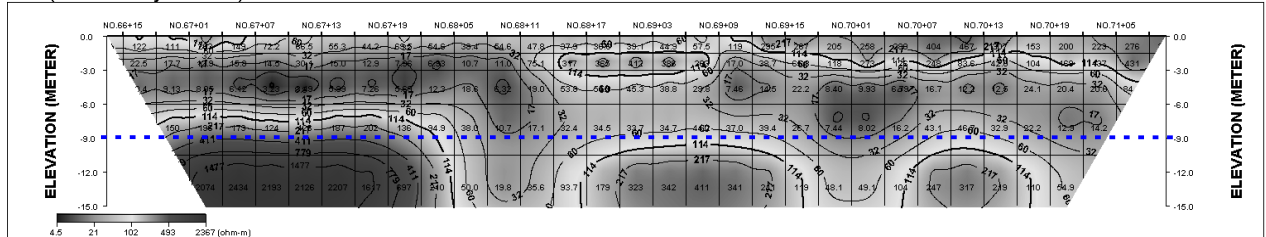
상기와 같이 전기비저항 분포에 나타난 광범위한 저비

L-1-1 (2-D Resistivity Structure)



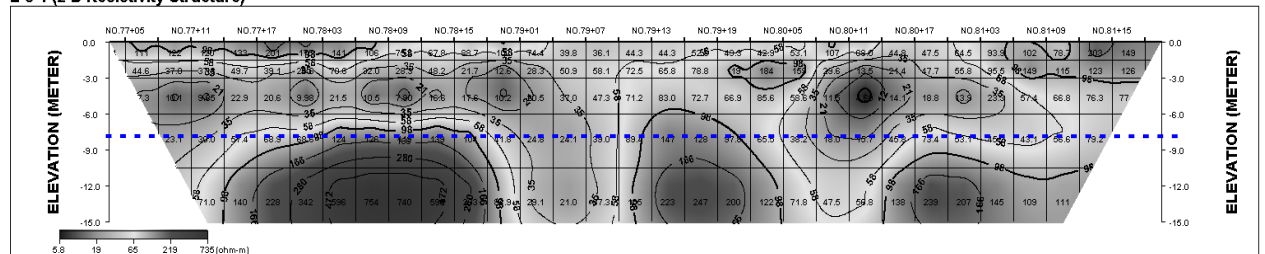
(a) NO.50+00 ~55+00

L-2-1 (2-D Resistivity Structure)



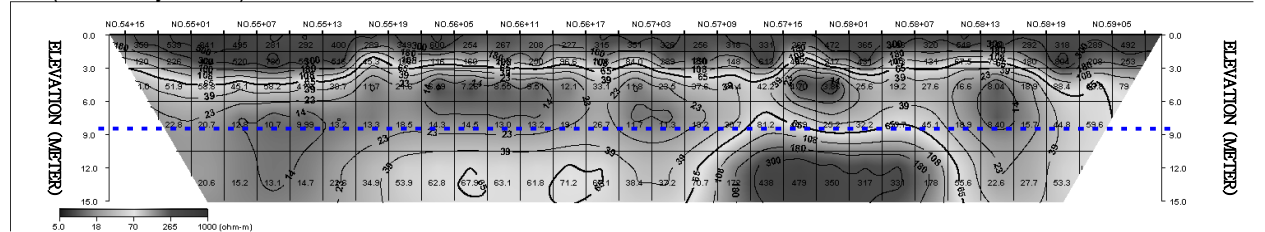
(b) NO.66+10 ~71+10

L-3-1 (2-D Resistivity Structure)



(c) NO.77+00 ~82+00

L-4-1 (2-D Resistivity Structure)



(d) NO.54+10 ~59+10

Fig. 3. Distribution of electrical resistivity (inner line)

저항 이상대의 원인은 다음과 같이 추정할 수 있다. 첫째, 기초사석 투하로 인한 원지반 강제치환 시 연약 점성토층의 횡방향 전단변형으로 치환면적이 제방 내·외측으로 넓게 퍼짐으로써 투수성 지반이 확대될 수 있다. 특히, 사석 체체 체결구간 부근은 횡방향뿐 아니라 종방향으로도 전단변형이 발생하여 원지반 친층부에 매우 불규칙한 재료 분포 및 교란이 발생할 수 있다. 둘째, 사석체 체결 후 배면성토 시 투하된 토사 자중에 의해 2차적인 원지반 강제치환과 함께 전단변형이 이루어지고, 그 과정에서 앞서 원지반에 치환된 기초사석, 모래층 및 교란 용기층의 범위가

더욱 확장될 가능성이 있다. 셋째, 시추주상도에 나타난 해저면 하부 sand seam이 해저면 근처에서 불규칙하게 출현하거나 해저면 부근에 사질토층이 존재할 경우 유로가 될 수 있다. 실제로 차수시트 포설 시 원지반 면에서 모래층이 확인된바 있다. 넷째, 배면 성토체의 침하 및 전단변형과 함께 불규칙한 사석재료와 차수시트 사이의 마찰로 시트가 부분적으로 천공되어 유출이 발생할 가능성이 있다. 다섯째, 원지반부에 포설된 차수시트 길이가 교란된 용기토를 포함하도록 충분히 확보되어야 하나 그렇지 못함으로 인하여 원지반과 차수시트 사이에 유로가 발생하

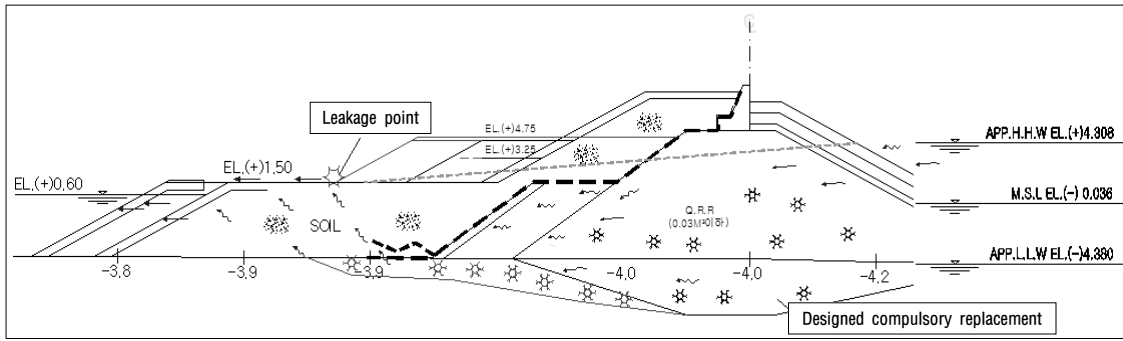


Fig. 4. Predicted leakage route

였을 가능성이 있다. 마지막으로 수상에서 차수시트 포설 중 일부구간에 차수시트 상호간 융착이 제대로 되지 않은 부분에서 유출의 가능성이 있다.

결과적으로 만조 시 제체의 사석을 통하여 유입되는 해수가 상기의 복합적인 원인으로 형성된 원지반 표층부의 교란층(치환사석, 모래층 및 교란 용기층 등)을 통하여 배면성토체로 침투되어 유로가 형성되었을 수 있으며, 체결 구간에서 충분한 차수시트 길이와 양호한 포설상태 확보의 어려움, 융착불량 등 복합적인 원인에 기인했을 것으로 판단된다(Fig. 4).

4. 보강공법 결정

4.1 보강계획 및 시험시공

4.1.1 보강계획

해수유입을 차단하기 위한 여러 가지 공법들 가운데 빠른 유속 및 해수조건에서의 시공성과 내구성, 유사한 시공 사례, 경제성 등을 감안하여 현장에 가장 적합한 공법을 선정하였다. 하부의 해저면 교란지반과 사석층은 공극이 크고 유통수량이 많으므로 유실우려가 적은 저유동성 몰탈 주입공법을 적용하고, 상부의 매립 토사층은 시멘트와 골재를 혼합한 슬러리 주입공법을 계획하였다. 또한, 누수량이 많은 구간은 주입공 사이에 약액을 주입하여 차단되지 않은 미세공극을 보강하도록 하고, 배면에 슬러리 그라우팅을 추가로 시공하도록 계획하였다. 각 공법의 특징은 다음과 같다.

1) 저유동성 몰탈 주입공법(Low Slump Mortar Grouting, LSMG)

교란된 원지반과 제체사석에 형성된 큰 공극에 압밀

주입되어 재료의 유실 없이 차수구근을 조성

2) 슬러리 주입공법

무기질계 또는 시멘트 밀크 그라우트를 주입 시 발생하는 비경제성을 제고하기 위하여 현장에서 확보가 용이한 토사(자갈을 혼재한 점토)와 시멘트를 혼합하여 몰탈 주입 상부의 매립 토사층 및 배면에 추가로 주입함으로써 차수효과 도모

3) 약액 주입공법(Expansibility Grout admixture Method of Construction, EGMC)

시멘트와 함께 조강 및 팽창효과를 지닌 혼화재를 섞은 약액을 선 시공된 저유동성 몰탈 사이에 주입하여 잔존하는 미세유로를 차단

보강패턴은 전체구간 중 누수가 집중되는 구간에 대하여는 저유동성 몰탈(하부) 및 슬러리(상부)와 슬러리(배면) 그라우팅을 2m 간격으로 시공하고 공 사이에 약액을 주입하는 것으로 계획하였다. 일반구간의 경우는 저유동성 몰탈(하부) 및 슬러리(하부) 그라우팅을 1m 간격으로 적용하도록 하였다(Fig. 5).

4.1.2 시험시공

계획 보강패턴의 적정성과 보강심도를 결정하기 위하여 누수 발생구역 가운데 No.52+0~No.60+0(L=160m)을 시험시공 구간으로 선정하여 시공한 결과 누수차단효과를 확인하였고, 시험시공 결과를 반영하여 전 구간의 시공계획을 수정하였다.

시험시공 전·후 현장투수시험 결과 보강 전 $k=1 \times 10^{-1}$ cm/sec, 보강 후 $k=6 \times 10^{-5}$ cm/sec로 투수성이 상당히 개선됨이 확인되었다. 시험시공에서 측정된 투수계수를 이용하여 SEEP/W(GEO-SLOPE International, Ltd., 2004)에

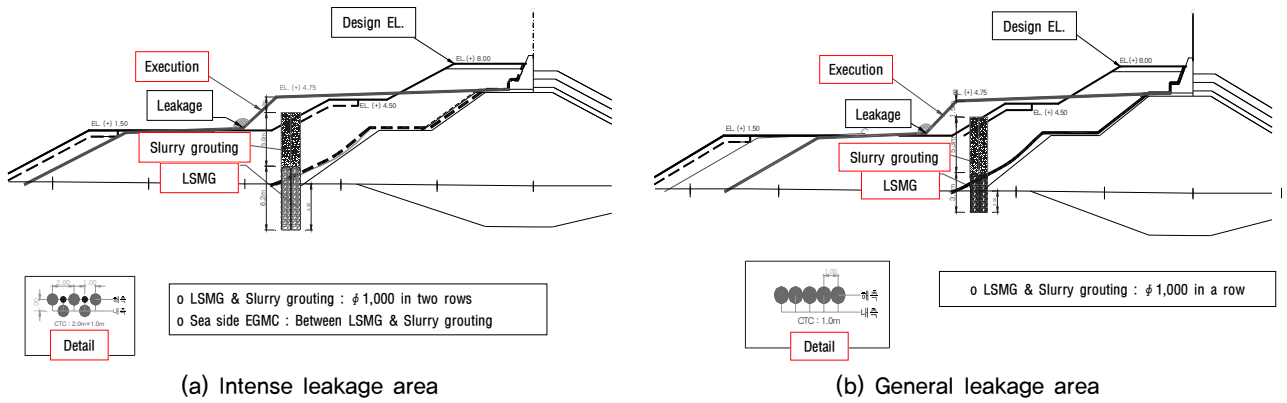


Fig. 5. Improvement patterns

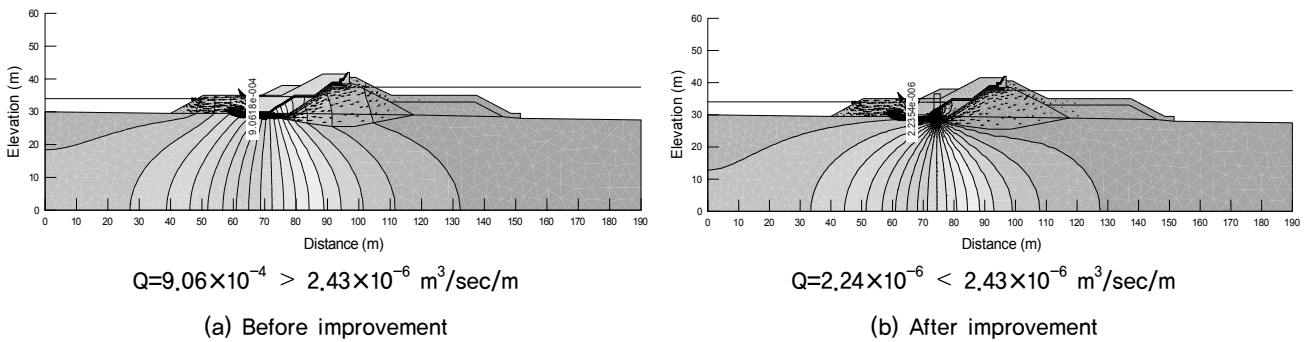


Fig. 6. Results of seepage analysis

의한 보강 전·후의 침투해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 보강 전과 비교하여 보강 후 침투수량은 $10^2 \text{ m}^3/\text{sec/m}$ 가량 감소하는 것으로 나타났으며 허용 누수량 기준도 만족하는 것으로 나타났다.

시험시공 시 천공을 통하여 지층분포를 확인한 결과, 상부로부터 제체 배면 성토층이 평균 6.5m 층후로 나타났고 이하 사석층은 3m로 형성되어 있었으며, 해저면 원지반 토층은 EL.(-)4.75에서 나타났다. 따라서, 주입연장은 원지반 하부 2m까지 실시하는 것으로 하여 총 11.5m (6.5+3+2)로 결정하였다. 주입위치는 해측 만조위시 가상 해수 침투선을 고려하여 성토 지표면으로부터 하부 1.5m(EL. (+)3.25)에서 주입을 시작하여 사석과 원지반 경계의 교란층을 통한 침투를 차단하기 위하여 원지반 하부 2m(EL. (-)6.75m)에서 종료하는 것으로 결정하였다.

4.2 본 시공 및 효과확인

4.2.1 본 시공

시험시공 결과를 감안하여 당초 계획되었던 보강패턴을 Fig. 7과 같이 수정하고 시공계획을 수립하였다. 당초

일반누수구간을 1열의 자유동성 몰탈 및 슬러리 그라우팅으로 계획하였으나, 시험시공 결과를 반영하여 본 시공의 배열은 2열로 수정하였다. 시공구간 중 누수가 발생하는 지점에 대하여는 약액주입을 추가로 실시하였다. 참고로 추가 누수현상이 발생되어 본 시공 시 당초(L=540m) 대비 누수연장이 100m 증가하였다(L=640m).

종간격 2.0m, 횡간격 1.0m로 주입재의 형성 및 양생을 위해 격공으로 시공하였다. 시공배열은 자유동성 몰탈공과 슬러리공을 격공으로 하되, 1차 4m 간격으로 몰탈공을 시공하고 그 사이에 슬러리공을 시공한 후 약액공을 시공하였다.

주입은 아래부터 주입관을 끌어올리면서 주입하는 상향식(up stage grouting) 방법으로 적용하였다. 주입 중 압력 게이지상의 주입압력은 몰탈주입 1.38~2.07MPa를 유지하였고, 슬러리공은 0.69MPa를 나타냈다. 계획주입량이 완료되면 주입관을 1단계씩 인발하며, 주입관의 1회 인발속도는 m당 주입량을 기준으로 하고 1회 인발 길이는 약 33cm 이내로 하였다. 계획심도(평균 11.5m)까지 주입이 완료되면 다음 공으로 이동하였다. 주입량은 상부(1.5~5.5m)구간 토사 매립층은 주입 확산경을 600~800mm

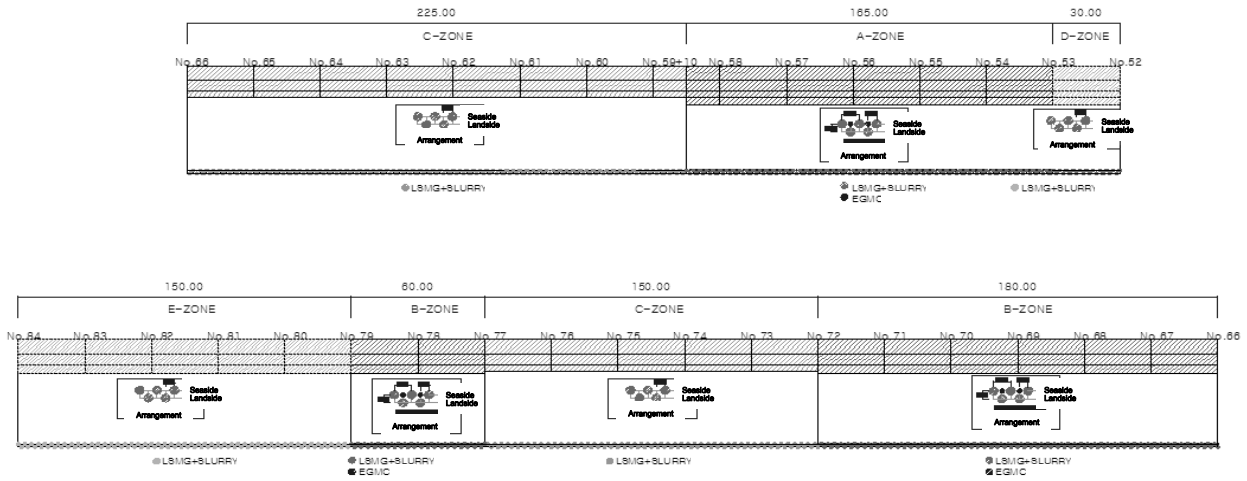


Fig. 7. Modified improvement patterns



Fig. 8. Slump test (left) and LSMG execution (right)

로 형성하고 하부(5.5~11.5m)구간은 누수발원지점으로 추정되는 차수시트층과 사석층, 원지반에 대하여는 1,000~1,200mm의 확산경을 확보하도록 하였으며, 누수가 심한 지점에 대해서는 주입량을 높여 1m당 최대 5m³까지 주입하였다. 천공심도는 평균 11.5m, 주입심도는 평균 10.0m로 유지하였으며, 몰탈 주입량은 당초 1공당 6.1m³를 계획하였으나, 실제 주입량은 공당 8.6m³으로 약 40% 가량 증가하여 주입되었다.

저유동성 몰탈과 슬러리공이 완료된 후에도 누수가 발생하는 구간에 대해서는 약액주입을 실시하여 미세한 공극에 침투되도록 하였다. 주입량은 1m당 0.2m³로 미세한 공극에 침투될 수 있도록 저압주입을 실시하였다.

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 주입재의 배합강도(f_{cr})가 5MPa 이상 발현되도록 각각 4포(160kg/m³-저유동성 몰탈) 및 5포(200kg/m³-슬러리) 이상을 배합하였다. 사용되는 물의 양은 골재의 함수비, 주입재의 Slump 치 및 하부 지반상태, 기온 등 작업여건에 따라 각각 200L± 50L/m³(저유동성 몰탈) 및 500L/m³(슬러리)로 조절하였

다. Fig. 8은 저유동성 몰탈의 현장 슬럼프 시험 및 시공전경을 나타낸다.

4.2.2 효과확인

시공이 완료된 후 차수효과를 확인하기 위하여 육안조사를 포함하여 현장투수시험, 추적자 시험, 확인시추 및

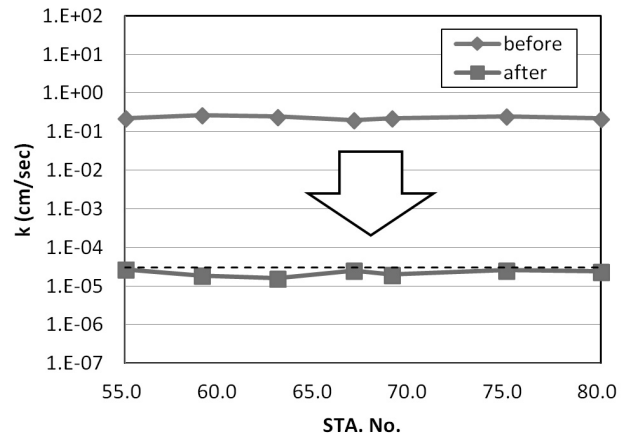


Fig. 9. Comparison of field permeability

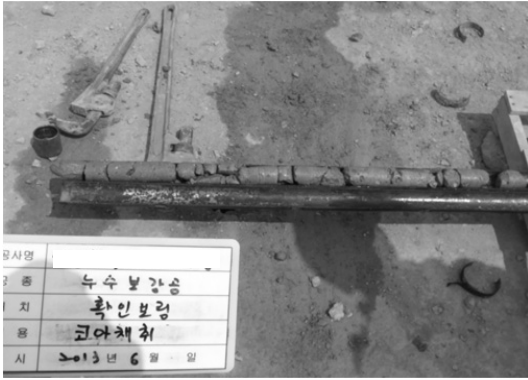


Fig. 10. Core extraction (left) and UC test (right)

코아 강도시험을 실시하였다.

(1) 현장투수시험 및 추적자 시험

현장투수시험은 수위강하법을 이용하였다. 먼저 시험 대상공을 천공하고 대상지점에서 직상부까지 케이싱을 설치한 후 내부의 토사를 제거하고 나공상태를 유지하였다. 그리고 케이싱 상단까지 주수하고 일정시간동안의 수위저하를 체크하여 투수계수를 산출하였다.

시공 전·후의 투수계수를 비교한 결과를 Fig. 9에 나타내었고 점선은 기준치를 가리킨다. 시공 전의 경우 전량 주수상태로 $k=2 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 이상으로 나타난 반면, 시공 후에는 기준치로 설정한 투수계수 $k=3 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ (Earth Dam 기초지반 한계투수계수 값) 이하로 나타나 지반의 투수도가 현저히 저감되었음을 확인하였다.

해수의 유입여부와 그 경로를 파악하기 위하여 추적자 시험을 실시하였다. 시공구간의 주입 열 사이에 천공을 실시하고 해수 만조위 시 시추공에 수성페인트를 30분간 주수하고 1시간 동안 내수측 성토부 및 해수측 주변을 확인하였으나 침출수는 확인되지 않았다.

(2) 확인시추 및 압축강도시험

주입재의 구근형성과 그 상태를 파악하기 위하여 확인시추를 실시하고 채취된 코아의 압축강도를 측정하였다 (Fig. 10). 시공구간 중 No.73 지점에서 확인시추를 실시하고 채취된 코아를 규격으로 재단 후 압축강도시험을 실시한 결과 $f_{ck}=8\text{MPa}$ 로서 저유동성 몰탈의 기준강도인 5MPa 을 상회함을 확인하였다.

5. 결론

회처리장 조성을 위한 제방축조 공사 중 해수유입으로 인한 제체내측 누수가 발생하여 그에 대한 원인과 보강사례를 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 누수의 원인을 파악하기 위하여 전기비저항탐사를 실시한 결과 대체적으로 해저면 원지반과 제체가 명확히 구분되었으나 상당 부분에서 저비저항 이상대가 분포함이 확인되었다. 체절공사 당시 강한 조류력에 의해 차수시트 설치가 용이하지 않았다는 점과 최초 누수위치 등을 감안할 때 누수의 원인은 체절과정에서 강도가 부족한 원지반의 3차원적 전단변형 거동과 그로 인한 불규칙한 강제치환, 조류와 유속에 의한 차수시트의 품질확보 문제, 내수면과 접하는 부분에서의 차수시트 접합품질 등으로 판단된다.
- (2) 빠른 유속 및 해수조건에서의 시공성과 내구성, 유사한 시공사례, 경제성 등을 종합적으로 고려하여 저유동성 몰탈, 슬러리 및 약액주입공법의 조합을 최적의 보강공법으로 선정하고 확인시추 및 시험시공을 통하여 배합비와 보강패턴을 결정하였다. 일반 및 집중 누수구간으로 구분하여 각 패턴에 따라 시공하고 보강효과를 확인하였다. 보강된 지반의 현장투수시험, 추적자시험, 코아채취 및 일축압축강도 측정 등을 통하여 보강효과를 확인한 결과 모든 시험에서 설정된 기준치를 만족하는 것으로 나타났다.
- (3) 조위차가 큰 서해안 지역에서 차수가 요구되는 제방 시공에 있어서는 특히 체절공사 시 빠른 유속과 그로 인한 조류력이 차수재 품질확보를 저해하는 요인일

뿐만 아니라 해저면 연약층의 3차원적 전단변형 거동으로 강제치환 범위와 차수재 포설길이를 예측하는데 상당한 어려움이 있으므로 설계 및 시공 시 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

The present research has been conducted by the Research Grant of Seoul University in 2015.

References

1. Daelim Industrial Co. (2001), *Report for the leakage causes and countermeasures of the western embankment of Nambu ash pond in Boryeong Combined Cycle Power Plant*, pp.1-12.
2. GEO-SLOPE International, Ltd. (2004), *SEEP/W for finite element seepage analysis-Getting Started Guide*.
3. KEPCO E&C Co. (2008), *Basic design report for Dangjin thermal plant construction works*.
4. Korea East-West Power Co. (2009), *Report for environmental impact assessment of Dangjin thermal plant construction works (Draft summary)*, p.17.
5. Oh, Y. I., Yoo, J. Y. and Kim, H. T. (2006), "Seepage Behavior of Sea Dyke Final Closure with Installation of Bottom Protection Filter Mat", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, KGSS, Vol.5, No.1, pp.25-32.
6. Sambu Construction Co. (2013), *Report for the leakage improvement construction of Dangjin 2nd ash pond*.
7. Samsu Development Co. (2012), *Electrical resistivity survey report for 2nd ash pond construction in Dangjin thermal power plant*, pp.1-21.