

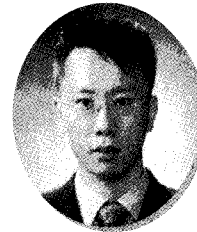
준설토를 이용한 새만금 방수제 설계사례



이 동 현
에스티비엔지니어링
사장



강 춘 식
에스티비엔지니어링
부장



권 해 균
에스티비엔지니어링
과장

1. 서론

'새만금'이란 명칭은 김제·만경 방조제를 더 크게, 더 새롭게 확장한다는 뜻으로 명품복합도시, 친환경 녹색도시 건설을 목표로 추진되고 있는 대표적인 국가 간척 개발사업이다.

방조제를 막아 만들어진 간척지 중 사용하기 위한 땅에 물이 넘어오지 않도록 홍수 방지 등을 위해 쌓는 둑을 방수제라 하며 바닷물이 간척지에 넘어 침입하는 것을 막고 밀물과 파랑을 막기 위해 설치하는 '방조제'에 비해서는 비교적 소규모다.

새만금 방수제 공사에서는 충분한 양의 토사확보가 어렵고 무분별한 토취장개발을 억제하고자 준설토를 이용한 제방축조가 활발히 진행되고 있으며, 최근 지구 온난

화 현상이 가속화됨에 따라 호우 특성이 대규모로 변화하는 양상이고, 강우량 또한 기왕의 수준을 넘어 장래에는 보다 많은 강우량이 예상되어 방수제의 안정성 저하 가능성이 커질 것으로 예상된다.

일반적으로 제방의 누수원인은 제체재료가 투수성이

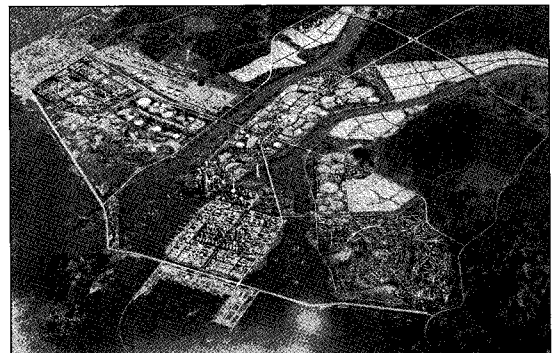


그림 1.

큰 모래층 또는 자갈층인 경우, 지반침하에 의해 침투압이 증가한 경우, 제체내 매설된 구조물과 접합부에 흐름이 생기는 경우, 제방단면에 너무 작은 경우, 제체를 충분히 다지지 않은 경우 등이 있다.

따라서 준설토의 특성분석 및 집중호우시를 고려한 보다 상세한 방수제의 안정성 검증의 필요성을 제시하고자 한다.

2. 준설토 토질특성 분석

시추조사 및 시험굴조사 결과 준설구간 계획하상고의 토질구성은 퇴적모래(SM) 85.1%, 퇴적실트(ML) 14.9%로 구성되었으며 만경14 및 만경16구역은 퇴적모래가 분포하며, 만경15구역 역시 퇴적모래 및 퇴적실트로 구성되었다.

제방재료 품질기준(하천설계기준, 하천공사 표준시방서)의 기준을 적용하여 준설토 재료의 물리적·역학적 특성 분석을 통한 제방재료 활용에 대한 적합성 검토 결과 투수계수는 10^{-3}cm/sec 이하로 전구간 만족 하였으며 수정 CBR은 2.5% 이상으로 전구간 만족하였으나 제체 누수저항성 평가 결과 퇴적모래는 적합하나 퇴적실트는 부적합한 것으로 판단되어 파이프 침투해석을 통하여 활용성을 평가하여야 할 것으로 판단되었다.

도로 노상재료 품질기준(도로공사 설계요령)을 통한 도로 노상재료 적합성을 검토한 결과 #200번체 통과량은 16.2~65.2%(상부노상 기준 0~25%)로 대부분 불만족

하였으며, 최대입경은 100mm이하로 전구간 만족하였고, 수정 CBR은 10% 이하로 전구간 불만족하는 것으로 나타났다.

따라서 도로 노상재료로 퇴적모래 및 퇴적실트는 모두 부적합하여 상부 30cm는 산토로 대체하는 것으로 계획하였다.

3. 준설토 활용계획

준설토 활용방안으로는 크게 제방 재료로서의 활용, 도로 재료로서의 활용, 구조물 뒷채움 재료로서의 활용으로 구분할 수 있으며 이에 대한 활용방안은 다음과 같다.

3.1 제방 재료로서의 활용

앞 장의 준설토의 토질특성 분석에서도 언급하였듯이 준설토의 물리적·역학적 특성분석 결과 제방재료로서 퇴적모래는 적합하고 퇴적실트는 부적합 것으로 판단되어 파이프 침투해석을 통하여 안정성 확보시 활용을 계획하였으며 검토결과 제방+연약지반 개량(유용토량:233.3만 m^3), 공사용 가물막이 및 가도(유용토량:6.5만 m^3), 가적 및 공원부지 조성(가적치량:18.0만 m^3)를 계획하였다.

3.2 도로 노상재료로서의 활용

도로공사 설계요령의 도로 노상재료 품질기준을 통한

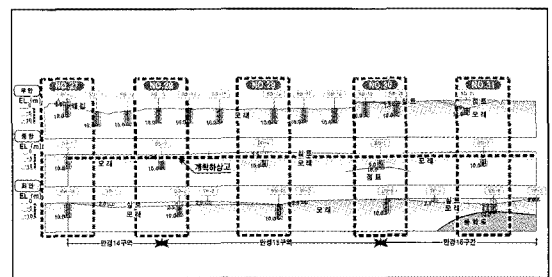
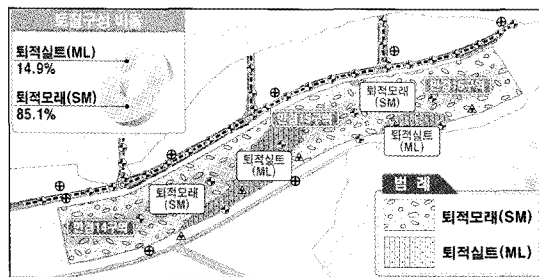


그림 2. 준설토 토질특성 분석

기술기사 1

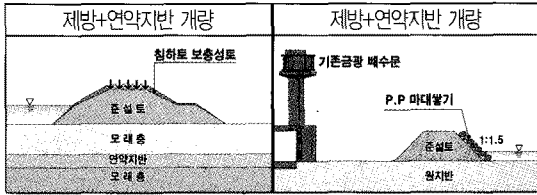


그림 3. 준설토의 제방 재료 활용계획

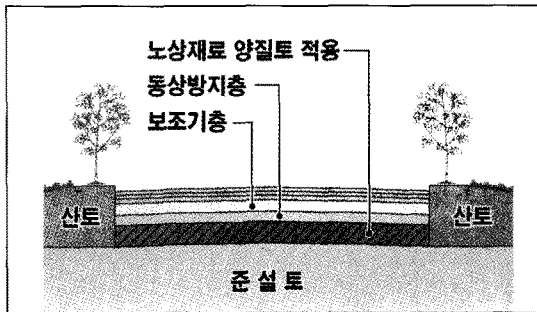


그림 4. 준설토의 도로 재료 활용계획

표 1. 준설토의 구조물 뒷채움재료 적합성 검토

구분	도로교 표준시방서	도로 설계요령	시험결과	판정
최대치수	80mm이하	100mm이하	-	OK
#4통과율	30~65	25~100	100	NG
#200통과율	2~10	15 이하	44.8~70.0	NG
소성지수	6 이하	10 이하	7.2 NP	NG
수정CBR	30 이상	10 이상	8.3~9.6	NG

노상재료 적합성 검토결과 #200번체 통과량은 16.2~65.2%(상부노상 기준 0~25%)로 대부분의 구간 불만족

하였으며, 수정 CBR은 10% 이하로 전구간 불만족하는 것으로 나타났다.

따라서 준설토는 도로 노상재료로 퇴적모래(SM), 퇴적실트(ML) 모두 부적합하여 도로주행의 안정성 확보를 위하여 그림 4와 같이 상부 30cm는 산토로 대체하여 성토하는 것으로 계획하였다.

3.3 구조물 뒷채움재료로서의 활용

준설토의 특성분석 결과 도로교표준시방서 및 도로설계요령에 입각한 구조물 뒷채움재료 적합성 검토 결과 부적합 것으로 판단되어 구조물 뒷채움 토사는 전량 양질토를 적용하는 것으로 계획하였다.

구조물 뒷채움구간 시공계획은 아래 그림과 같이 구조물 전후 10m 이상 성토 유보 및 기울기 1:3.0 완화하면 적용으로 대형다짐장비 작업이 가능하도록 계획하여 부등침하 발생이 최소화 되도록 계획하였으며 유한요소 해석을 통하여 일반적인 뒷채움 터파기 기울기(SLOPE 1:1.0) 적용시와 비교하여 완화하면 적용시 안정성이 확보되는 것을 검증하였다.

4. 방수제 안정성 검토

4.1 수위변화에 따른 안정성 검토

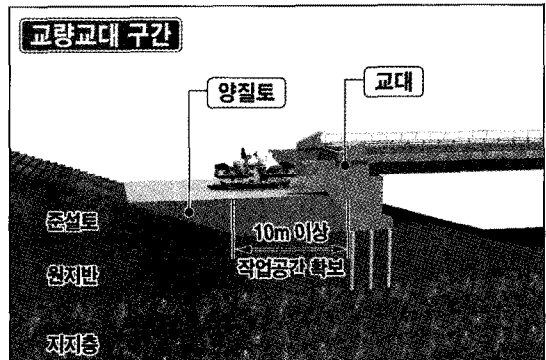
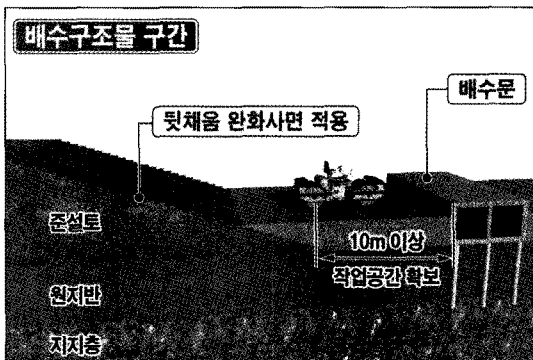


그림 5. 구조물 뒷채움구간 시공계획

하천제방 붕괴는 집중호우에 의한 월류 및 수위 변화에 의한 세굴, 사면활동에 의해 발생되고, 월류와 세굴이 제방붕괴의 주원인으로 이에 따른 안정대책이 필요하므로 비탈면 안정성 검토방법, 파이핑 안정성 검토방법, 침투 해석 방법등으로 검토한다.

비탈면 안정성검토방법은 한계평형해석법(SLOPE)과, 강도강소법(FLAC)이 있다. 또한, 고정된 적용 지반정수 사용의 한계(결정론적 해석방법)를 극복하기 위하여 파괴 확률(Pf)의 경우, 안전율 1.0이하인 결과들의 비율로서 파괴가능성 정도의 정량적인 판단자료로 제공하는 확률론적 해석방법이 있다.

파이핑 검토방법(SEEP/W)은 분사현상을 일으키는 한계동수경사는 Terzaghi의 식으로 계산하고,

$$i_c = \frac{h}{d} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = (1 - n)(G_s - 1)$$

〈Terzaghi의 식〉

- ic : 한계동수경사 h : 저수지 전수두 (m)
- d : 분사지점의 수두 (m) Gs : 비중
- e : 흙의 간극비 n : 흙의 간극률

제방 및 기초의 토립자 입경에 대하여 소류력에 의한 한계 침투유속을 한계치와 비교하는 한계유속방법은 Justin의 식으로 계산하여 안정성을 검토한다.

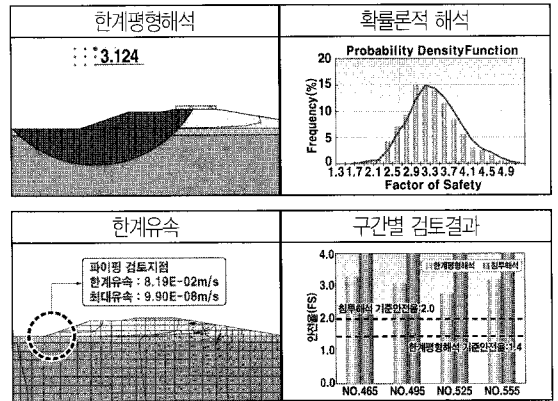
$$V_c = \sqrt{\frac{W \times g}{A \times \gamma_w}} = \sqrt{\frac{2}{3} \times (G_s - 1) \times d \times g}$$

〈Justin의 식〉

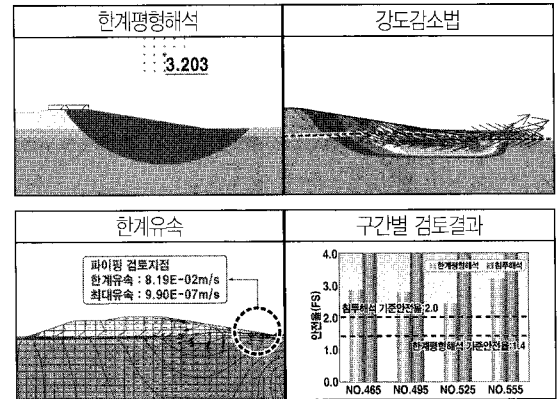
- W : 토립자 수중중량(g)
- γ_w : 물의 단위체적중량(g/cm³)
- k : 투수계수(m/s)
- g : 중력가속도(cm/s²)

- A : 물의 흐름을 받는 토립자의 면적(cm²)
- CD : 저항계수(Reynolds수 Re의 함수)
- Gs : 비중
- d : 유효입경(D10, cm)
- ν : 동점성 계수(cm²/s) (20℃)

- 홍수위시 안정성 검토



- 수위 급강하시 안정성 검토



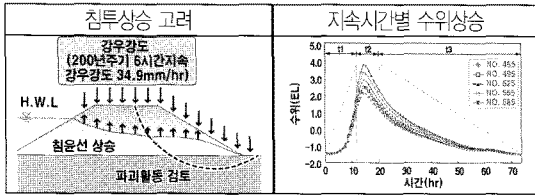
수위변화에 따른 검토결과에는 홍수위시때 한계평형 해석 검토안전율 3.124는 허용안전율 보다 크고 확률론적 해석은 허용값 5%보다 작은 0.006으로 안정하였고 파이핑검토의 한계유속은 $V_c = 8.19e-02m/s$ 으로 안정성을 확보하였다. 또한 수위 급강하시에는 한계평형해석시 검토안전율 3.203 으로 허용안전율 (F=1.4)보다 크고 강도

기술기사 1

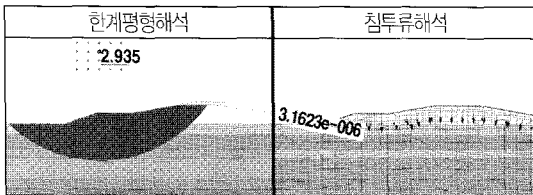
감소법에서도 역시 2.62로 허용안전율 ($F=1.4$)보다 큰값이 나왔다. 파이핑검토의 한계유속에서도 홍수위시대와 같은값이 나왔고 구간별검토결과 한계평형해석의 결과는 조금 차이를 보였지만 기준안전율에는 크게 웃도는 값으로 안정성을 확보하였다.

4.2 집중호우시 안정성 검토

200년 빈도 강우강도 식에 의해 침투상승을 고려하고 지속시간별 수위상승으로 지하수 상승고를 산정하였다.



집중호우시 안정성 검토

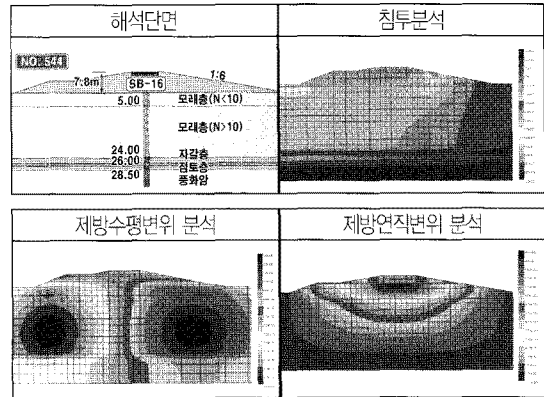


집중호우시의 검토결과에서는 한계평형해석 검토결과 $F_s=2.935$ 로 허용안전율 ($F=1.4$)보다 크고 침투류 해석결과 침투유속은 $3.1623e-06m/s <$ 한계유속 $7.9e-06m/s$ 보다 작으므로 집중호우시에도 안정한 것으로 판단된다.

4.3 수치해석에 의한 고성도 방수제 안정성 검토

2차원 유한요소법에 의한 응력-침투 coupling 해석으로 고성도 구간 방수제의 안정검토를 하였다.

수치해석에 의한 고성도 방수제 검토결과 침투유속은 한계유속($8.1946e-02m/s$) 이내로 안정성을 확보하였고 최대 수평연직변위에서는 허용값 100.0mm보다 작은 수

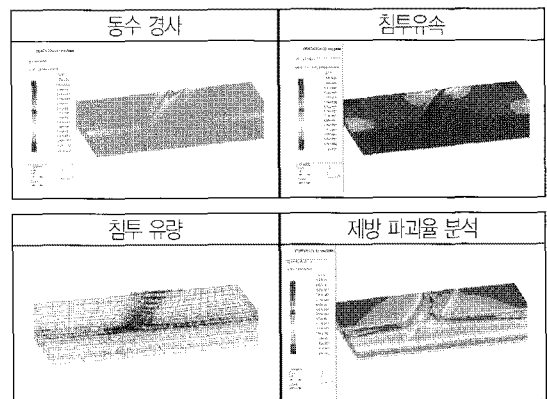


평변위 3.238mm 연직변위 65.981mm 연직수평변위가 미소하여 안정적인 것으로 판단된다.

4.4 3차원 침투해석에 의한 방수제 우각부상세검토

우각부의 안정검토는 성토고가 가장 높으며 인접 시설물 배치가 많은 접합구간을 선정하여 3차원 유한요소법에 의한 응력-침투 coupling 해석으로 우각부 접합구간 방수제의 상세 안정검토 하였다.

3차원 침투해석에 의한 방수제 우각부 검토결과는 발생 침투유량은 $0.2l/s$ 로 허용침투유량($1.0l/s$) 이내로 안정성이 검증되었고 수평변위와 침하량은 6.4cm 와 5.4cm 로 허용값인 10.0cm보다 작아 안정하였고 소성도를 나타내는 파괴율도 1.0미만으로 안정성을 확보하였다.



5. 준설굴착 안정성 검토

5.1 준설 비탈면 안정성 검토

준설 굴착시 치수, 생태환경, 시공성, 유지관리 측면 등을 고려하여 가장 유리할 것으로 보여지는 1:6.0 기울기의 적정성을 검증하고(그림 6) 대표단면을 선택하여 Monte Carlo Simulation 기법의 파괴확률분석과 강도감소해석 프로그램인 FLAC Slope, 한계평형해석 프로그램인 SLOPE/W를 이용하여 준설 비탈면의 안정성을 검토하였다.

대표단면은 준설구간 비탈면 중 비탈면 높이가 높은 만경14구역의 방수제 NO.510 단면과 하부지층이 연약 퇴적

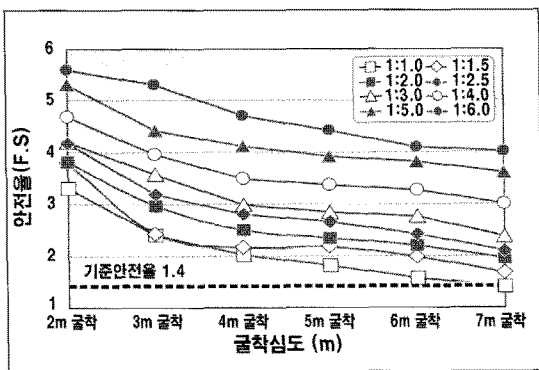


그림 6. 비탈면 경사별 안전율 분포

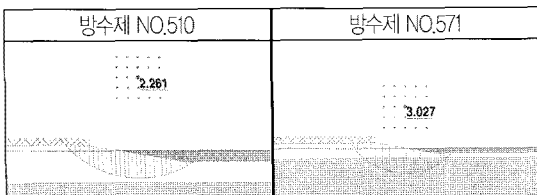


그림 7. 한계평형해석 결과

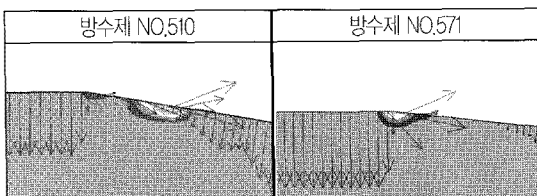


그림 8. 강도감소해석 결과

토로 구성된 만경15구역의 방수제 NO.571 단면을 선정하였다.

한계평형해석과 강도감소해석의 기준안전율은 하천설계 기준(한국수자원학회, 2009)에서 제시하는 제제의 인장균열은 고려하지 않고 간극수압을 고려하는 상태의 1.4 이상을 적용하였고, 파괴확률분석은 보수적인 조건을 적용하여 G.N.Smith(Probability and Statics in Civil Engineering, 1986)에 의해 제안된 기준안전율 5%이하로 적용하였다.

(1) 한계평형해석 결과

한계평형해석은 활동면을 따라 미끄러지는 순간에 지층의 안정성을 검토하는 방법으로 지반조사를 통하여 얻은 각 지층의 단위중량, 마찰각, 점착력, 간극수압을 고려하여 해석을 수행하였다.

준설 비탈면에 대한 한계평형해석 결과 그림 7에서 보는 것과 같이 각 대표단면의 비탈면 안전율이 방수제 NO.510은 $F_s=2.261$, 방수제 NO.571은 $F_s=3.027$ 이 산출되었다. 이런 결과값은 위에서 제시한 하천설계 기준의 기준안전율($F_s=1.4$)보다 높은 값으로서 준설 비탈면의 안정성을 확보하였다.

(2) 강도감소해석 결과

사면안정 해석방법중 수치해석에 적용되는 기법인 강도감소해석법은 입력된 전단강도를 적당히 감소 시켜가면서 파괴시 전단강도를 산정하여 안전율을 평가하는 방법으로 앞서 수행한 한계평형해석과 결과값 도출 과정이 다르다.

준설 비탈면에 대한 강도감소해석 결과 그림 8에서 보는 것과 같이 각 대표단면의 비탈면 안전율이 방수제 NO.510은 $F_s=1.48$, 방수제 NO.571은 $F_s=1.81$ 이 산출되었다. 결과값에 대한 기준안전율은 앞서 한계평형해석시 비교한 하천설계기준의 기준안전율 1.4와 같으며 두 단면

기술기사1

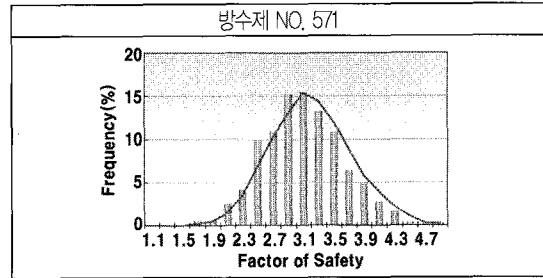
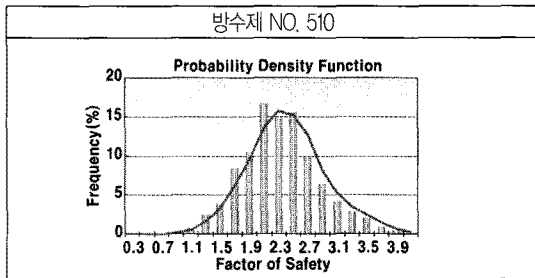


그림 9. 파괴확률분석해석 결과

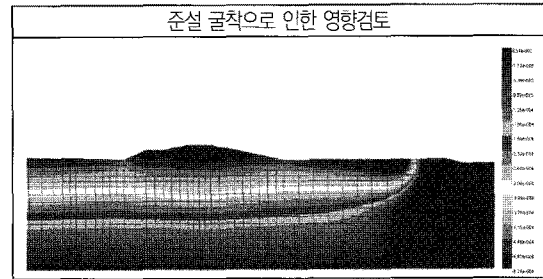
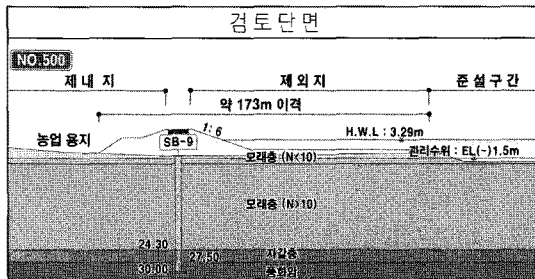


그림 10. 검토단면 및 영향검토 결과

모두 1.4보다 높은 값을 가지므로 안정함을 알 수 있다.

이 그림 9다.

(3) 파괴확률분석 결과

Monte Carlo Simulation기법의 파괴확률분석은 반복적인 안정해석을 실시하여 파괴확률을 산정한다. 전체 파괴확률의 산정식은 다음과 같다.

$$P_f = P_{fp} \cup P_{fw} \cup P_{ft}$$

P_{fp} : 평면파괴확률 P_{fw} : 쉐기파괴확률

P_{ft} : 전도파괴확률

위의 산정식을 이용한 해석결과 방수제 NO.510은 0.94%, 방수제 NO.571은 0.006%의 파괴확률 값이 산출되었다. 이 파괴확률 값들은 기준안전율 5%이하로 준설비탈면의 기울기를 1:6.0으로 적용했을 때 안정할 것이라는 판단의 기준이 된다. 이러한 결과값을 그래프화한 것

5.2 준설굴착시 인접 농업용지 안정성 검토

준설 굴착시 지반의 응력변화로 인접지반이나 구조물에 영향이 가해질 수 있다. 본 사업구간 안에도 이러한 영향이 발생할 것이라 예상되는 곳으로 제내지측 농업용지가 위치한 구간이 있다. 이 구간을 해석단면으로 선정하여 앞서 고성토 구간 방수제의 응력-침투 coupling 안정검토를 할 때 사용한 2차원 유한요소법으로 변위값을 통한 안정해석을 실시하였다.

그림 10은 인접 농업용지 검토단면(상)과 영향검토결과(하)이다. 해석결과 준설 굴착시 인접 농업용지에 발생하는 변위량은 0.5mm로 극히 미미한 수준이며 준설 굴착으로 농업용지에 미치는 영향이 없다고 봐도 무방하다.

5.3 준설토 가적시 안정성 검토

준설토를 가적시 사면이 형성 되므로 사면에 대한 안정

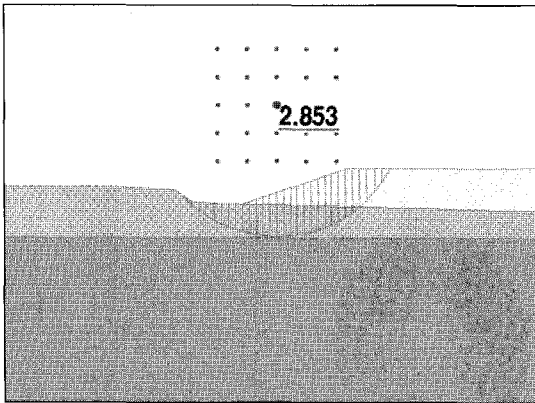


그림 11. 한계평형해석 결과

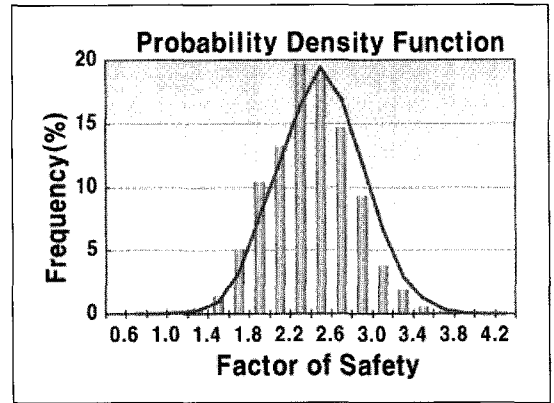


그림 12. 파괴확률론적해석 결과

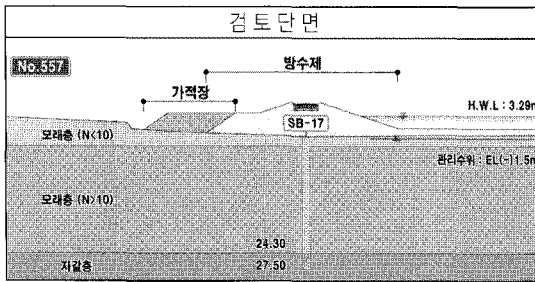
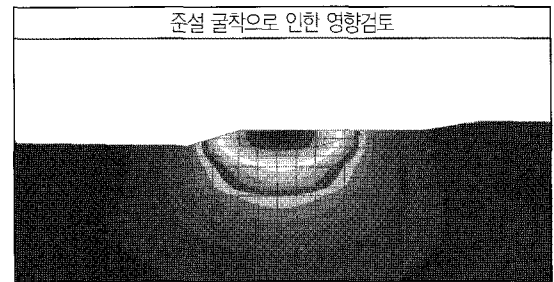


그림 13. 검토단면 및 영향검토 결과



해석이 이루어져야 하며, 가적되는 위치가 신설방수제의 측면이므로 가적으로 신설방수제에 미치는 영향검토를 수행해야 한다. 가적장의 사면안정과 영향검토는 앞서 준설 비탈면 안정성 검토와 준설 굴착시 인접 농업용지 안정성 검토때와 같은 방법으로 검토하였다.

5.3.1 가적장 쌓기비탈면 안정검토

그림 11과 그림 12는 각각 한계평형해석 결과와 파괴확률론적해석 결과를 보여준다. 먼저 한계평형해석결과 안전율 결과값은 2.853으로 하천설계기준의 기준안전율 1.4보다 큰값을 가진다. 파괴확률론적 해석결과값 또한 0.06%로 기준안전율 5%이하값을 가진다. 이 두가지 결과값으로 가적장 쌓기비탈면의 사면은 안정함을 알 수 있다.

5.3.2 가적시 인접 방수제 영향검토

신설 방수제 측면에 위치할 가적장의 무게로 인해 지반 내 응력이 변화하게 되고 변위가 발생하게 된다. 이렇게 발생하는 방수제의 변위가 너무 크면 방수제의 파괴를 야기시킬 수 있기 때문에 안정검토가 필요하다.

인접 농업용지 안정성 검토때와 마찬가지로 유한요소법을 이용하여 영향검토를 하였다. 그림 13은 영향검토할 단면(상)과 영향검토결과(하)를 보여준다. 가적으로 인해 발생하는 신설방수제의 변위는 0.7mm~59.2mm로 나타났다. 이 정도의 변위값이 방수제에 미치는 영향은 미미한 수준이므로 방수제 측면에 가적장이 위치하더라도 신설 방수제는 안정하다고 볼 수 있다.

6. 결론

새만금 방수제의 설계내용에 대하여 간략하게 기술하

기술기사1

였으며 본 과업의 가장 큰 특징은 준설토를 제방의 주 축조재료로 사용하였다는 점이다.

준설토를 주 축조재료로 사용함으로써 축조재료 확보를 위한 재료원 확보 및 개발, 재료 운반등을 최소화 함으로써 경제성 및 시공성을 확보하였다.

또한 준설토의 토질특성에 따라 차별화된 활용계획을 수립하고, 준설퇴출에 따른 인접 농업용지의 안정성 검증 및 3차원 해석을 포함한 여러 가지 해석방법을 통한 집중 호우시 방수제 구조물의 안정성 검증을 수행하였다.