

포항영일만 외곽시설(2-1단계) 축조공사 설계사례



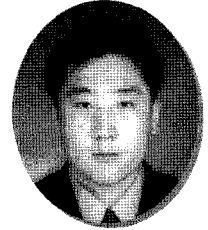
김 종 석
현대산업개발(주) 토목설계팀 부장
(toughkim70@paran.com)



유 재 명
(주)도담이앤씨 지반터널본부 본부장
(jmyu7@dodamenc.co.kr)



이 종 태
(주)도담이앤씨 지반부 부장
(goodman@dodamenc.co.kr)



강 홍 규
(주)도담이앤씨 지반부 과장
(ceo1976@dodamenc.co.kr)

1. 서론

본 사업은 포항영일만항의 원활한 운영에 필요한 항내 정온도 확보 및 통항선박의 입·출항 안전성을 확보하기 위하여 북방파제 신설 약 1km 축조와 기존방파제 일부를 보강하는 사업으로 경상북도 포항시 북구 흥해읍 용한리 전면해상에 위치하고 있다.

최근 방파제는 항만규모의 대형화에 따라 대수심, 고파랑의 해역으로 전개되고 있으며 이에 따라 케이스 방파제의 채택이 늘고 있다. 이러한 케이스 방파제는 열악한 해역특성과 최근 기상이변에 따른 해수면 상승과 이상파 발생 등 설계외력 증가추세에 맞물려 활동피해가 증가하고 있다. 본 설계에서는 이에 대한 대안으로 인터록킹 시스템을 이용한 장대케이스를 구현하여 일체화거동에 의한 지반의 부등침하 방지 및 파력의 평활화로 활동피해에 대한 안정성을 확보하였다. 이러한 상부구조물의 제 기능을 위해서는 지반의 안정화가 우선되어야 한다.

지반개량공법은 지층조건에 따라 3개 구역으로 구분되

며, 연약층 깊은구간은 상부 단단한 모래층 하부에 연약 점토층이 분포하므로 고압분사공법을 적용하여 상부 단단한 모래층을 지지층으로 활용하였으며, 다층지반의 응력감소효과를 반영하여 최적의 치환율을 산정하였다. 일 반구간은 표층에 일부 느슨한 모래 및 점토가 분포하므로 삼축 대형 다짐공법을 적용하여 액상화 방지 및 지지력을 확보하였으며, 연약층 얇은구간은 모래, 점토, 기반암이 혼재된 다양한 지층특성을 보이고 있어 연성거동으로 순응성이 우수한 SCP공법을 적용하였다.

본고에서는 인터록킹 시스템에 의한 장대 케이스 방파제 소개 및 지반개량공법 중 상부 단단한 모래층 하부에 연약점토층이 분포하는 다층지반조건에서의 고압분사공법 적용 및 응력감소효과를 반영한 최적 치환율 산정에 대하여 중점적으로 설계사례를 기술하고자 한다.

2. 사업개요

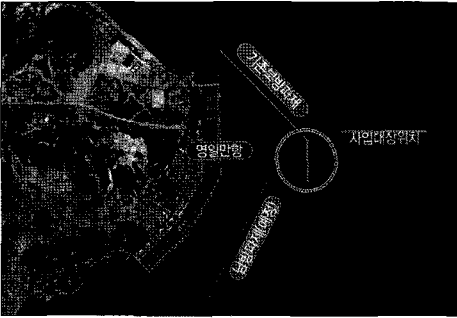


그림 1. 포항영일만 북방파제 신설 위치도

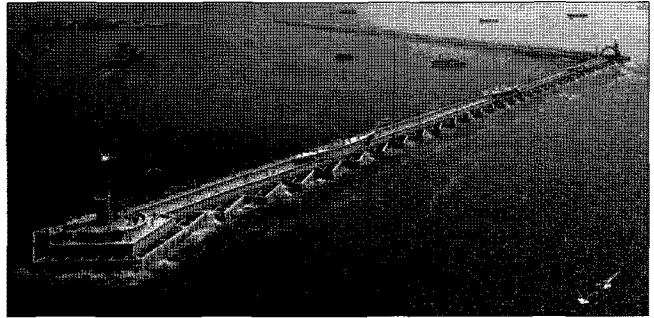


그림 2. 포항영일만 북방파제(2-1단계) 조감도

본 사업은 북방파제 미 시행구간 축조를 통한 포항영일만 항내 정온도 확보와 통항선박의 입출항 안정성 확보를 목적으로 하고 있다. 포항영일만 북방파제 신설구간 위치와 전체조감은 각각 그림 1, 2와 같다.

가. 시설개요

- 외곽시설(2-1단계) : 1025.64m(제두부, 제간부, 접속부)
- 기존방파제(1단계) 보강 : 50m(접속부 기존방파제 일부구간)
- 항로 표지시설 : 등대(2기), 공사용 등부표
- 기타 부대공 : 오락방지막, 기존 등대철거

나. 공사기간

- 착공일로부터 36개월

3. 주요설계내용

3.1 인터록킹 케이스 방파제 도입

현행 설계기준상 방파제 설계는 50년 빈도의 설계파랑을 기준으로 하고 있으나 최근 연안구조물의 설계파랑이 급증되는 추세에 있으며, 이상파랑의 조우확률도 50년 빈도에서 약 64%, 100년 빈도에서는 약 40%나 되어 이에 따른 방파제 피해확률 또한 매우 높고 피해복구 비용이 증대하고 있다. 따라서, 안정성과 경제성을 동시에 만족하는 방파제 시스템으로 케이스의 상호 엇물림 효과를 이용한 인터록킹 케이스방파제를 착안하게 되었다. 그림 3은 일본의 여러 항만에서 발생된 케이스의 활동파해사례 중 기존 혼성제 방파제의 활동파해사례를 나타내고 있다.

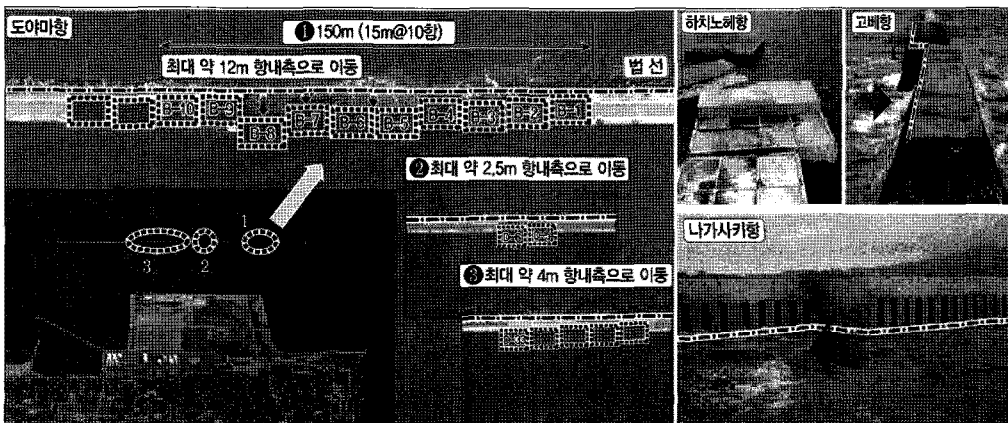
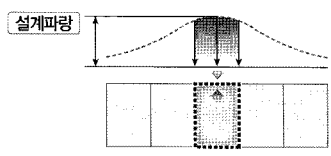
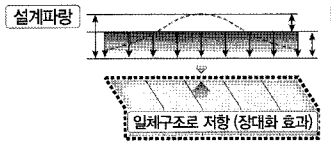
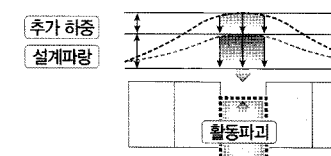
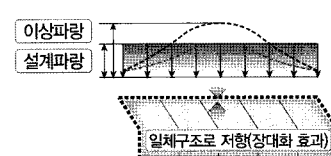


그림 3. 혼성제 방파제의 피해사례

표 1. 인터록킹 케이스 방파제의 거동특성

구분	일반 케이스 방파제	인터록킹 케이스 방파제
설계파랑 내습시	 <p>설계파랑</p> <p>케이스 단위폭당 작용인력 = 설계파랑</p>	 <p>설계파랑</p> <p>여유안전율</p> <p>케이스 단위폭당 작용인력 = 설계파랑 감소 (평활화 효과)</p> <p>일체구조로 저항(장대화 효과)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • 인접 케이스와 독립구조로 저항 	<ul style="list-style-type: none"> • 인접케이스와 일체 구조로 저항하여 여유안전율 확보
이상파랑 내습시	 <p>추가 하중</p> <p>설계파랑</p> <p>이상파랑</p> <p>활동파괴</p>	 <p>이상파랑</p> <p>설계파랑</p> <p>작용파고감소 (평활화 효과)</p> <p>일체구조로 저항(장대화 효과)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • 설계저항력 초과로 Sliding 파괴 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계저항력 이내로 안정성 확보 가능

가. 인터록킹 방파제의 거동특성

일반 케이스는 독립구조로 저항하므로, 이상파랑 내습시는 활동파괴가 발생된다.

그러나 인터록킹 방파제는 인접 케이스와 일체구조로 저항하기 때문에 설계파랑 내습시는 여유안전율을 확보할 수 있고, 이상파랑 내습시에도 인터록킹에 의한 파력의 평활화 효과로 안정성 확보가 가능하며, 지반의 부등침하방지에 효과적이다. 표 1은 설계 및 이상파랑 내습시 일반 케이스 방파제와 인터록킹 케이스 방파제의 거동특성을 나타낸 것이다.

나. 인터록킹 방파제의 파력 평활화 효과

본 방파제(그림 4)는 케이스간 인터록킹에 의해 제체 전체가 일체화 거동하여 장대화 효과를 구현하였으며, 장대화에 따른 각 입사파별 입사각에 대하여 파력의 평활화에 따른 파력저감 효과를 산정하였다.

일반케이스의 경우 1함의 길이가 30m일때 약 1%, 50m일때 약 2%정도로 파력저감효과가 미미하였고, 인터록킹 케이스의 경우 제간부의 장대화 효과로 최대파랑에 대해 각각 36%, 32%의 파력저감효과를 보였다

제두부 구간은 다방향 입사파의 영향이 집중되는 가장 취약부로 이러한 특성을 고려하여 대형 펜타록킹 슬릿케

이슨을 이용한 일체화 구조로 계획하였으며, 피해확률이 높은 접속부에 대형 펜타록킹 케이스를 배치함으로써, 선, 구 방파제와의 연계성 뿐만 아니라 제간부의 고정점 기능으로 안정성을 극대화 시켰다. 펜타록킹 케이스의 구조형식은 그림 6과 같다.

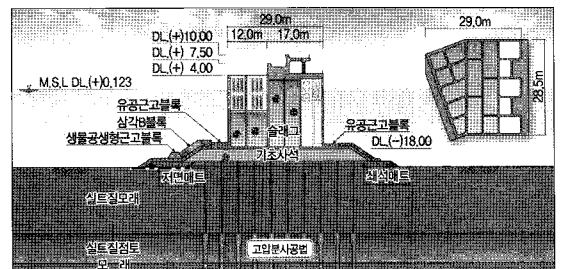


그림 4. 방파제 단면도

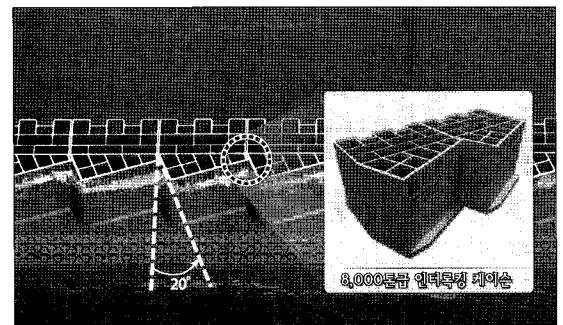
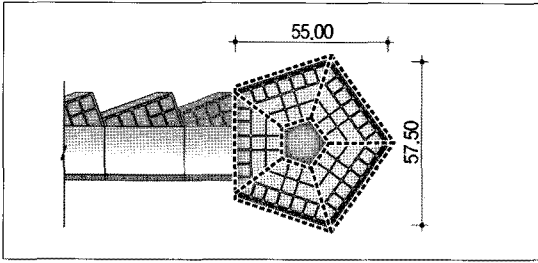
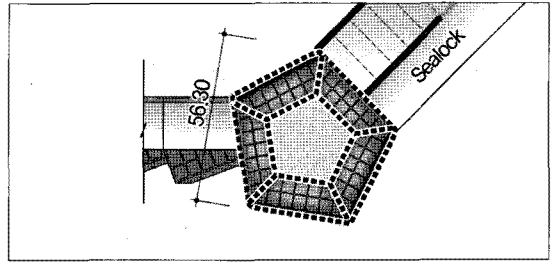


그림 5. 인터록킹 방파제 구조형식



(a) 제두부 대형 펜타록킹 슬릿케이스



(b) 접속부 대형 펜타록킹 케이스

그림 6. 펜타록킹 케이스 구조형식

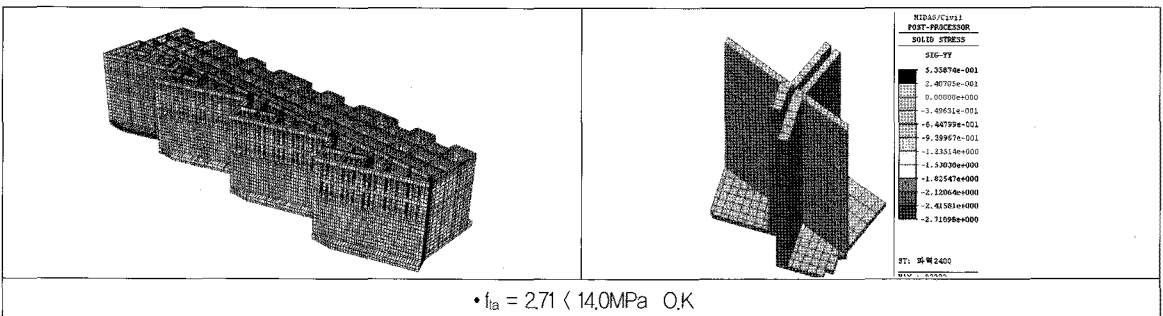
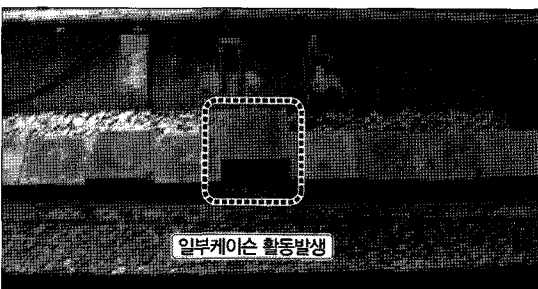
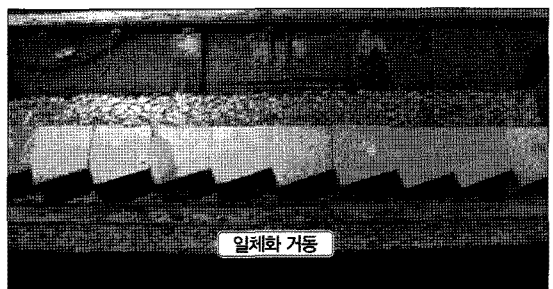


그림 7. 격벽 접촉부 응력 검토 결과



(a) 일반 케이스



(b) 인터록킹 케이스

그림 8. 진동대 실험 장면

다. 성능평가

구조물 해석은 해역특성과 인터록킹 케이스의 구조특성을 반영한 다양한 상세해석을 통해 신뢰성 및 안정성을 검토한 결과, 설계파 내습시는 자중으로 저항하므로 인접 케이스에 응력전달이 없고, 이상파랑 내습시는 격벽을 통해 압축력으로 전달되며 모두 허용응력 이내로 안전함을 확인하였다. 그리고 2차원 3차원해석, 응력집중부 등의 상세해석으로 신뢰성을 향상 시켰으며, 시공단계별 실험 중 동시재하로 안정성을 검증하였다. 특히, 이상파랑 내

습시 동파력에 대한 안정성 확보를 위해 균열과 피로에 의한 사용중 안정성을 검증했으며, 구조물의 내구성 증진을 위해 내염해성과 균열방지에 유리한 혼합시멘트를 사용하여 충분한 내구년한이 확보되도록 하였다.

또한, 고베 및 아이티 지진과 같은 실무모 7.0이상의 지진을 적용한 진동대 실험결과 그림 8과 같이 일반케이스는 활동이 발생한 반면 인터록킹 케이스는 일체화 거동으로 안정성을 확보하는 것으로 나타나 내진성능면에서도 우수함을 확인하였다.

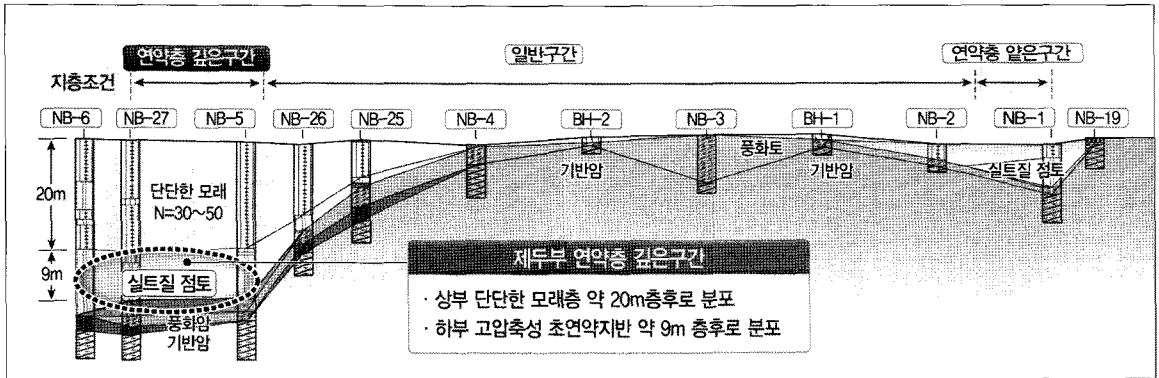


그림 9. 지층 현황

3.2 지반개량공

가. 지층개요

그림 9에서 좌측 제두부는 상부 단단한 모래층 (N=30~50) 20m하부에 고압축성의 초연약층이 6.4~8.8m의 층후로 분포하고, 일반구간은 표층에 일부 느슨한 모래 및 점토가 분포한다. 우측 점속부는 모래, 점토 및 기반암이 분포하며 연약층 출현심도가 매우 불규칙한 지층특성을 보인다.

나. 지반물성치

1)상부 모래층 설계지반정수 표 2와 같다.

2)하부 점토층 설계지반정수 표 3과 같다.

표 2. 상부 모래층 설계지반정수

구분		γ (kN/m ³)	c(kPa)	ϕ (°)	E(MPa)	ν
모래	N<10	20.2	-	32	4.2~24.5	0.30
	10 ≤ N<20		-	38		
	20 ≤ N		-	40		

표 3. 하부 점토층 설계지반정수

구분	물리특성		강도특성		압밀특성			변형특성	
	γ_{sat} (kN/m ³)	e_0	S_u (kPa)	ΔC (강도증가율)	C_c	C_v (cm ² /s)	k_v (cm/s)	E(MPa)	ν
GL(-)10m이상	16.9	2.15	1,172D+23.93	0.27	0.94	3.5×10^{-3}	2.2×10^{-7}	2.0	0.4

다. 지반개량공법 선정

지반개량공법은 서론에서 언급한 바와 같이 상부 단단한 모래층 하부에 연약점토층이 분포하는 다층지반 조건인 제두부구간에 대해서만 기술하였다.

제두부구간 지반개량공법은 선정시 N=30이상 지층에서 천공이 불가능한 SCP공법은 배제 시켰으며, DCM공

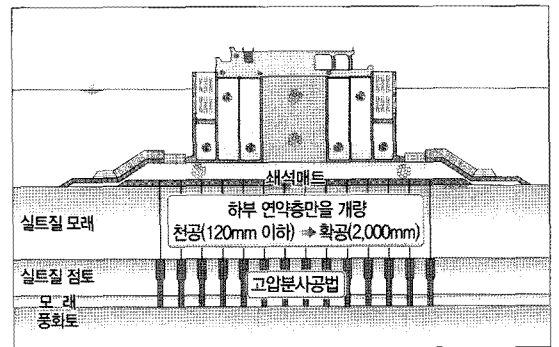


그림 10. 고압분사공법

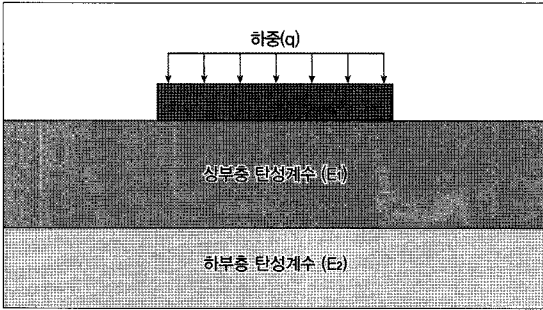


그림 11. 다층지반

법의 경우 상부 단단한 모래층의 천공이 어려울 뿐만 아니라 대구경의 천공장비로 상부 모래층을 교란시켜 원지반 강도를 저하시키는 비효율적인 공법이다. 따라서, 그림 10과 같이 소구경 천공 후 확공하여 하부 점토층만을 개량하는 고압분사 공법을 적용하여 상부 단단한 모래층의 교란을 최소화하고 지지층으로 활용토록 계획하였다.

라. 치환을 산정

상부에 단단한 모래층이 있는 경우 설계하중이 연약층에 직접 전달되지 않고, 모래층의 매트효과로 하중이 분산되어 전달되므로 지중응력이 감소하게 되며, 특히 제두부는 구조형상이 원형에 가까운 펜타로킹 케이슨을 적용하므로써 일반 사각형 형상대비 10%이상의 지중응력이 감소되는 효과를 얻을 수 있으므로 침하량 및 치환을 산정시 반영하여 효율적인 설계가 되도록 계획하였다.

다층지반의 응력감소효과는 국·내외 문헌조사 및 유사현장 계측사례, 수치해석을 통해 확인하였다.

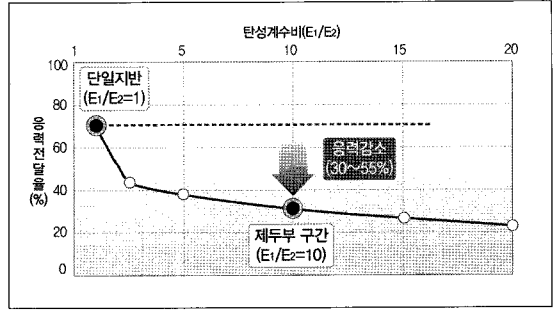
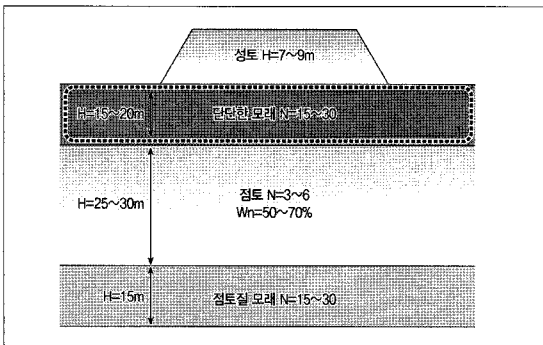


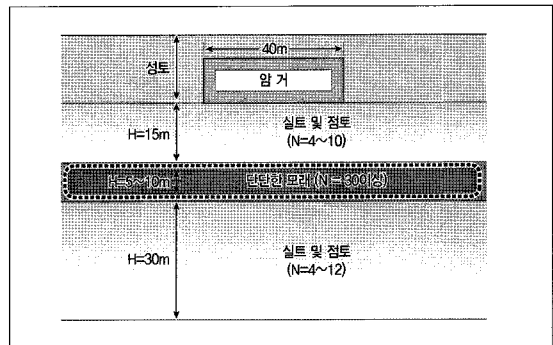
그림 12. 다층지반에서의 응력감소효과

첫째, 문헌조사 결과, Burmister(1958)는 그림 11과 같이 “탄성계수가 E1, E2 인 두 층으로 이루어진 지반을 고려할 때 탄성계수비(E1/E2)=1, 즉 두 층의 탄성적 성질이 같으면 단순한 Boussinesq 문제지만, 탄성계수비 (E1/E2)>1, 즉 위의 토층이 견고할수록 지중응력이 감소한다”라고 하였으며, 그림 12는 Burmister(1958)가 작성한 다층지반에서의 지중응력 도표를 이용해 당 현장의 탄성계수비를 적용하여 응력감소효과를 산정한 것으로 단일지반대비 제두부 다층지반이 30~55%의 응력감소가 있는 것으로 나타났다. 또한, 국내 박(1990), 이(2005)는 원형기초 및 띠기초 조건에서 다층지반에 대한 수치해석 및 모형실험을 수행하여 상부층 강성 및 두께가 클수록 지중응력이 감소함을 확인하였다.

둘째, 그림 13 (a)에서 보논바와 같이 일본의 미야기현 도로현장은 본 현장의 지반조건과 유사하게 상부에 단단한 모래층이 15~20m, 하부에 연약점토가 25~30m로 분포하는 지반으로 계측결과 실측치가 예측치의 30~50%



(a) 宮城(Miyagi)도로현장(2008)



(b) 信濃川(Shinanogawa)복구사업(2004)

그림 13. 유사현장 계측사례

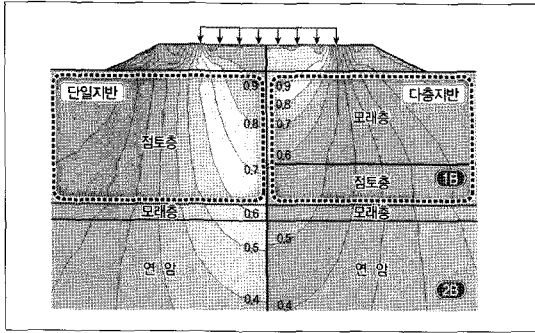


그림 14. 수치해석에 의한 응력감소효과 검토

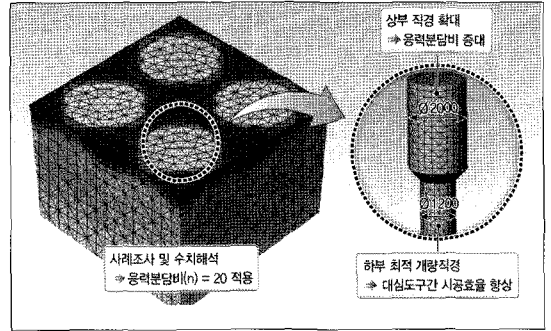


그림 15. 개선된 T형 개량체 적용

로 계속되었다. 이는 이론적인 예측치가 상부 모래층의 매트효과에 의한 응력저감을 반영하지 못하는 한계성을 나타내고 있다. 그림 13 (b)는 일본의 시나노가와 통문시설 현장으로 침하량 계측결과, 실측치/계산치=0.4~0.7로 나타났으며, 이는 단단한 상부 지반($N \geq 30$)에서 응력이 차단되었기 때문이라고 판단된다.

셋째, 그림 14와 같이 당 현장의 설계하중조건을 고려한 지층조건별 수치해석(2차원)을 수행하여 정량적인 응력감소효과를 산정한 결과, 단일지층대비 다층지반에서 16~18%의 응력감소효과가 있는 것으로 확인하였다.

이와 같이 다층지반의 응력전달 메커니즘을 분석한 결과 문헌조사에서 30~55%, 유사현장 계측사례조사에서 30~50%, 수치해석결과 16~18%의 응력감소효과가 있는 것으로 확인 되었다. 따라서, 본 설계에서는 안전적으로 연약지반에 전달되는 응력을 15% 감소시켜 최적 치환율을 12.6%를 적용하였다.

개량체의 개량형식은 상부 단단한 모래층의 하중분산 효과 및 파압에 의한 영향이 적어 수평력이 작으므로 말뚝식으로 효율적으로 배치하였다.

그림 15와 같이 개선된 T형 개량체를 적용함으로써 상부 직경($\phi=2,000\text{mm}$) 확대로 개량체의 응력분담비가 증대하여 잔류침하량을 최소화 하였으며, 하부 최적 개량 직경($\phi=1,200\text{mm}$) 적용으로 대심도 구간에서의 시공 효율을 향상시켰다.

T형 개량체 적용에 따른 압축응력, 전단응력(편칭전단 포함)을 검토한 결과 안정성을 확보하는 것으로 나타났다. 또한, 최적의 배치간격을 산정하기 위하여 그림 16과

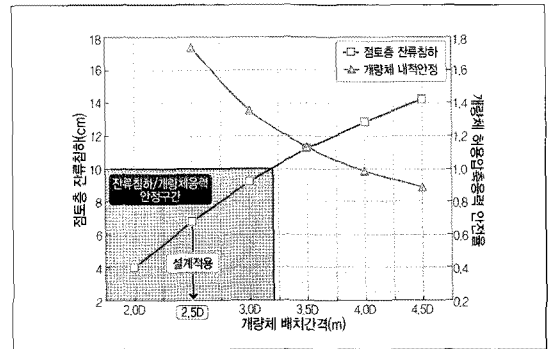


그림 16. 최적 배치간격 산정

같이 개량체 이격거리별(2.0~4.5D)로 개량체 허용압축 응력 및 점토층 잔류침하를 검토한 결과, 아칭효과에 의한 일체화거동으로 배치간격 3.2D까지 안정성을 확인하였으며, 안전측으로 2.5D 간격으로 배치하였다.

4. 결론

인접케이스와 맞물림 효과를 통해 방파제 전구간이 일체거동하여 지반의 부등침하방지 및 내진성능향상 뿐만 아니라 장대 케이스 방파제 구현으로 파력저감효과가 뛰어난 인터록킹 방파제에 대해 소개하였다.

상부 단단한 모래층 하부에 연약점토층이 있는 다층지반의 경우 문헌조사, 유사현장계측사례, 수치해석 등을 통해 응력전달을 확인하였으며, 안전측으로 15%의 감소 효과를 반영하여 최적의 치환율을 산정하였다. 또한, 개선된 T형 개량체 적용으로 응력분담비 증대에 의한 잔류

침하 최소화 및 시공성을 향상시켰다.

현재단계에서는 최적설계임에도 불구하고 충분한 안전율을 가져가는 것이 현실이나, 앞으로 정밀한 모형실험 및 현장 시험시공 등을 통해 좀 더 면밀히 검토하여 효율적으로 현장에 활용된다면 관련 국가예산 절감을 기대할 수 있을 것이며, 더 나아가 국내 건설기술이 발전하는데 큰 역할을 할 것이라 사료된다.

참고 문헌

1. 현대산업개발(2010). 포항영일만 외곽시설(2-1단계) 축조공사

대안설계보고서

2. Burmister, D.M(1958). "Evaluation of Pavement Systems of the WASHO Road Test by Layered System Methods", HRS Bull. 177. pp.26-54.
 4. Fox, L.(1948) "Computation of Traffic Stresses in a Single Structure", Proc. 2nd int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol2. pp.236-246.
 5. 박병기와 "유한 다층토지반의 응력해석" 대한토질공학회지 Vol.6 pp.19~32, 1990.
 6. 이인형(2005) "연약점토지층의 이층지반 지표면 재하시 지중 응력의 특성연구" 목포대학교 대학원 박사학위 논문.

한국지반공학회 터널기술위원회 계속교육 안내

- 일 시 : 2011. 2. 23(수) ~ 24(목) (2일간) 09:30 ~ 18:00
- 장 소 : 한국교원단체총연합회(서울 서초구 우면동 소재)
- 교육주제 : 터널의 환기와 방재설계(가칭)
- 주 최 : 터널기술위원회
- 접 수 : 120명 선착순(신청서 홈페이지 참조)
- 교 육 비 : 12만원(회원), 15만원(비회원) (중식 및 교재 제공)

일자	시간	내 용	연사 (예정)
23일	9:00~9:30	터널 환기와 방재 현황 및 향후 전망	김상환 교수/이인기 사장
	9:30~11:10	도로터널의 방재 개론 및 설계	신태균 사장
	11:20~13:00	도로터널 정량적 화재위험도 평가기법	유지오 교수
	13:00~14:00	점심	
	14:00~15:40	터널 유체역학 기초	윤성욱 박사
	15:50~17:30	도로터널의 환기개론 및 설계	김효규 사장
	17:30~18:00	종합토의/질의응답	황제돈 사장
24일	9:00~10:40	철도터널의 환기개론 및 설계	조형제 이사
	10:50~12:30	철도터널의 방재개론 및 설계	김동현 박사
	12:30~13:30	점심	
	13:30~15:10	터널의 내화구조 개론 및 설계	유지오 교수
	15:20~17:00	터널의 전기설비 개론 및 설계	김홍열 박사
	17:00~18:00	종합토의/질의응답	이완규 상무