

치환율에 따른 심층혼합 처리공법의 최적 설계

The Best Design of the Deep Mixing Method by the rate of substitution

박춘식¹⁾, Park, Choon-Sik, 이준석²⁾, Lee, Jun-seok, 정원섭³⁾, Jung, Won-sub

¹⁾ 정회원, 창원대학교 토목공학과 정교수, Professor, Dept. of Changwon National Univ., pcs@changwon.ac.kr

²⁾ 창원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Changwon National Univ.

³⁾ 한국농촌공사 의령지사 지역개발팀, Korea rural community & Agriculture corporation Uiryeong district office

Abstract : The study decided the improvement depth of soft ground of deep mixing method through 2 and 3 dimension finite element method and following results were acquired.

1. 2 dimension analysis shows settlement 10% more estimated than 3 dimension analysis.
2. When the rate of replacement is under 5%, the settlement sharply increased.
3. The most economical design for the levee was decided 3.0m for width direction, 6.0m for length direction and 8.0m for improvement depth.
4. When the soft ground is developed through deep mixing method, the decision of improvement should be decided through 3 dimension analysis than 2 dimension analysis.

요 지 : 본 연구에서는 2차원 및 3차원 유한요소 해석을 이용하여 심층혼합처리 공법에 의한 연약지반 개량시 개량 심도를 결정 하였고, 그 결과는 다음과 같았다.

1. 2차원 해석 결과는 3차원 해석 결과 보다 약 10% 정도 크게 해석되었다.
2. 연약지반의 치환율이 5%이하 일 때 침하량은 급격히 증가하였다.
3. 심층혼합공법으로 연약지반 개량시 횡방향 간격 3m, 종방향 간격 6m, 그리고 8m의 심도로 개량하는것이 가장 경제적인 것으로 나타났다.
4. 심층혼합공법으로 연약지반 개량시 2차원 유한요소 해석보다 3차원 유한요소 해석으로 결정되어야 한다.

Keywords : deep mixing method, improvement depth, soft ground, FEM, settlement

1. 서 론

국토의 면적이 좁은 우리 나라는 삼면이 바다로 둘러 싸여 있고 동고서저의 지형으로 대부분의 하천이 서쪽과 남쪽, 즉 서해안과 남해안으로 뻗어져 있다. 하천의 시점부터 하구까지는 거리가 짧고 경사가 급하여 유속이 빠른 지형적 특성으로 인하여 하구에는 많은 양의 퇴적물과 해안선을 따라 두터운 퇴적지반을 형성하게 되고 오랫동안 반복되었던 큰 조수간만의 차는 두터운 해성 퇴적층을 이루기에 좋은 환경요소이다. 이렇게 퇴적된 하상 또는 해성퇴적토는 대부분이 연약한 점성토로 이루어져 있으며 퇴적된 토층의 깊이는 5~30m가 일반적이나, 낙동강 하류의 퇴적층의 두께는 대체적으로 30~60m, 또는 그 이상의 깊은 곳도 존재한다.

일반적으로 연약지반이라 함은 주로 점성토로 구성되며, 미립의 점토물질을 다량 함유하고 있고, 함

수비가 50%이상이거나 일축압축강도가 0.5kg/cm^2 이하, N값이 4이하인 점토지반을 일컫는다. 연약지반은 구성물질의 특성에 의해 지반침하, 액상화, 낮은 전단강도 등의 문제로 인해 공학적으로 많은 관심과 연구가 수행되어져 왔다.

현재 국내에 주로 적용되고 있는 연약 지반 대책공법에는 흙의 특성과 개량의 목적에 따라 지지력 향상, 전단변형, 장비주행성 확보측면에서 유리한 지반하중조절과 압밀침하 촉진, 활동과괴 방지 등에 유리한 지반개량공법으로 크게 나뉘어진다.

연약지반 위에 제방을 축조할 때 예상되는 제방의 침하 및 붕괴를 방지하기 위해 심층혼합처리공법이 적용되고 있다. 대상지반의 심층혼합처리 공법 적용시 지반의 물성치에 따라 필요의 강도를 얻기 위해 고결제의 심도 및 종·횡 방향의 간격을 결정하는 것은 공사시 큰 쟁점 중 하나인 공사기간이나 공사비용에 상당한 영향을 미치게 된다.

일반적으로 2차원 유한 요소해석을 실시하여 개량심도 및 간격을 결정한다. 그러나 2차원 해석이 실제 지반의 거동 및 변형, 응력 등과 유사할 지는 아직도 규명되어 있지 않다. 따라서, 본 연구는 3차원 유한요소 해석을 실시하여 심층혼합처리 공법의 개량 심도와 종·횡방향의 간격을 결정하는데 그 목적이 있다.

2. 연구방법

본 연구에서는 지반 조건을 모래층, 점토층, 성토층 그리고 Cement Deep Mixing공법(이하 C.D.M) 재료로 지반 물성치를 결정한 후 공사에 가장 큰 영향을 미치는 안정성 및 경제성에 기초를 두고 심층혼합처리 공법의 타설 심도 및 간격을 2차원 해석 통하여 결정하였다. 그리하여 2차원 해석을 통해 결정된 심층혼합처리 공법의 최적 심도 및 횡방향 간격을 3차원 해석을 통해 비교하고, 3차원 해석에 맞는 심도 및 종방향 간격을 결정하고자 한다. 다음 그림 2.1과 표 2.1은 해석될 단면의 형상 및 물성치를 나타낸 것이다.

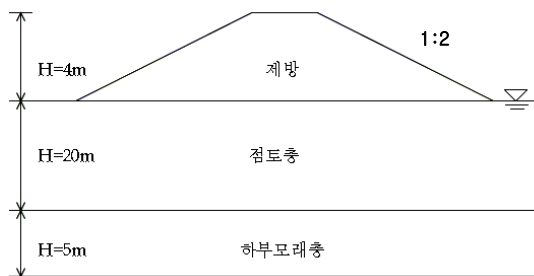


그림 2.1 해석단면의 형상

표 2.1 수치 해석 시 적용된 토질정수

	점토층	하부 모래층	성토층 (제방)	C.D.M 재료
점착력 (tf/m ²)	1.0	0.01	0.5	25
내부 마찰각(°)	0.1	35	25	0.1
탄성계수 (tf/m ²)	100	5000	3000	8500
r _t (t/m ³)	1.6	1.8	1.9	1.6
r _{sat} (t/m ³)	1.6	1.8	2.0	1.6
포아송비 (v)	0.45	0.35	0.35	0.3

3차원 해석시 제방 하중의 영향 범위를 고려하여 지반의 수평길이를 100m로 충분하게 가정하였고, 지하수위는 지표에 지하수위를 생성하여 완전 포화된 점토층으로 가정하였다.

2차원 해석시 원지반에서 개량지반으로의 표현을 심층혼합처리공법 적용후 원지반과의 복합된 하나의 지반으로 보지 않고, change parameter를 이용하여 실제 상황에 가깝게 구현하였다.

3. 2차원 해석 결과 및 분석

3.1 보강전 해석

심층혼합처리 공법의 보강전 해석 결과는 그림 3.1과 같다. 가장 큰 침하가 예측되는 제방의 중앙 부분에서 최대 약 4.34m로 지반 침하가 나타났고, 제방의 양쪽 끝에서 약 1.4m의 heaving이 발생하였다.

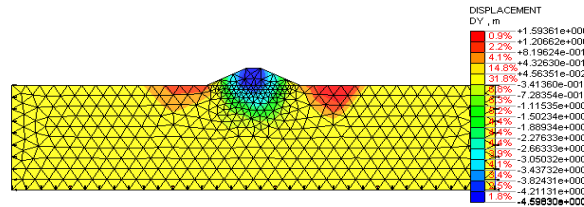


그림 3.1 보강전 수직 방향에 대한 변위해석

해석결과 강성 기초가 없는 구조물인 제방의 허용 침하량 30cm를 초과하므로 제방하부 연약 지반층의 보강이 요구되는 것으로 판단된다.

3.2 보강심도에 따른 2차원 해석

(1) 심층혼합처리 공법 심도 10m개량

10m 개량후 지반의 수직변위에 대한 해석결과는 그림 3.2와 같다.

개량지반의 보강재 간격은 2m이고, 보강 깊이 10m일 때 제방 중앙 하부의 최대 침하가 약 18cm로 허용 침하량에 충분히 만족하였고, 보강재 하부 양끝에서 수평방향으로 약 8cm의 측방변위가 발생하였다. 따라서, 최대침하량 18cm로 허용 침하량에 크게 못 미치므로 보강재의 심도를 줄일 필요가 있다.

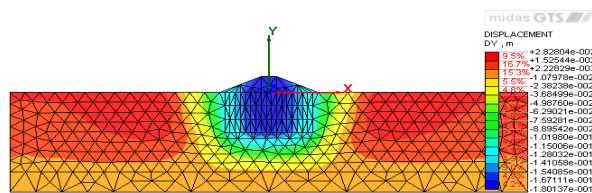


그림 3.2 10m 보강후 수직 방향에 대한 변위

(2) 심층혼합처리 공법 심도 5m보강

그림 3.3은 심층혼합처리 공법으로 심도 5m 개량 후 수직방향으로의 변위를 나타낸 것이다. 해석 결과 제방 하부 중앙 단면에서 최대 침하가 약 33~34cm가 발생하였다. 따라서, 허용침하량 30cm를 초과하므로 보강재의 심도를 더 깊게 할 필요가 있다.

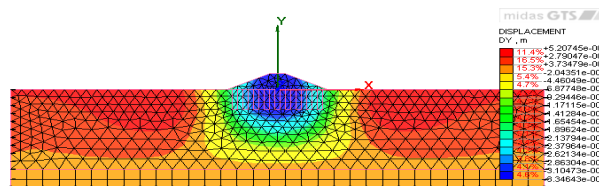


그림 3.3 5m 보강후 수직 방향에 대한 변위

(3) 심층혼합공법 심도 7m보강

그림 3.4는 심층혼합처리 공법으로 심도 7m개량 후 수직방향으로의 변위를 나타낸 것이다. 제방 하부 중앙 단면에서 허용 침하량에 만족하는 최대 침하 약 25.9cm가 발생하였다.

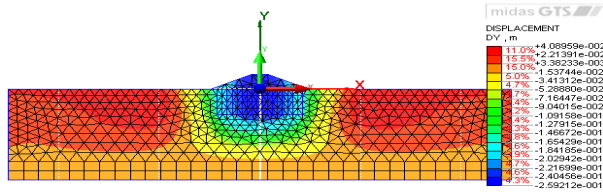


그림 3.4 7m 보강후 수직 방향에 대한 변위

(4) 심층혼합공법 심도 6m보강

그림 3.5은 심층혼합처리 공법으로 심도 6m개량 후 수직방향으로의 변위를 나타낸 것이다. 제방 하부 중앙 단면에서 최대 침하 약 28.2cm가 발생하였다. 심도 6m 개량시 허용침하량 30cm이하에 최대 근접하므로 최적 개량 심도로 결정하였다.

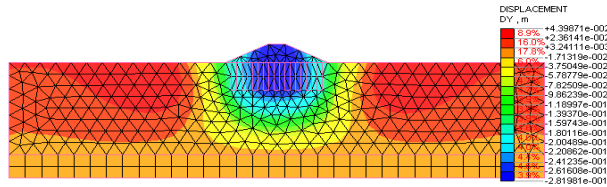


그림 3.5 6m 보강후 수직 방향에 대한 변위

3.3 보강간격에 따른 해석

(1) 보강심도 6m, 횡방향 간격 2.5m

최적 개량 심도로 결정된 보강심도 6m에 대해 보강재의 간격을 달리하여 해석한 결과로 그림 3.6은 심층혼합처리 공법으로 심도 6m, 간격 2.5m일 때 개량 후 수직방향으로의 변위를 나타낸 것이다. 제방 하부 중앙 단면과 제방 양쪽 끝에서 최대 침하 약 29.5cm가 발생하였다.

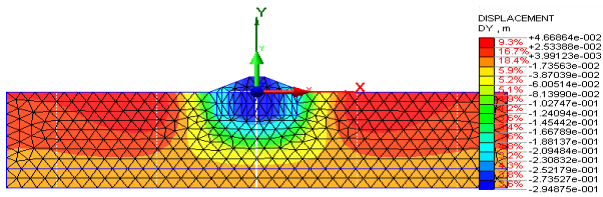


그림 3.6 심도 6m, 간격 2.5m 보강후 수직 방향에 대한 변위

(2) 보강심도 6m, 횡방향 간격 3m

그림 3.7은 심층혼합처리 공법으로 심도 6m, 간격 3m일 때 개량 후 수직방향으로의 변위를 나타낸 것이다. 제방 하부 중앙 단면에서 허용 침하량 30cm를 초과한 최대 침하 약 32.7cm가 발생하였다.

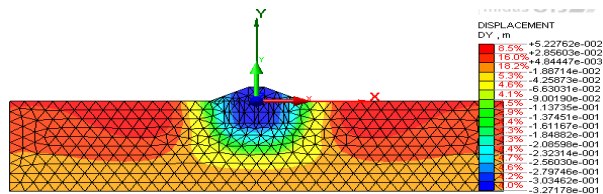


그림 3.7 심도 6m, 간격 3m 보강후 수직 방향에 대한 변위

(3) 보강심도 7m, 횡방향 간격 3m

그림 3.8은 심층혼합처리 공법으로 심도 7m, 간격 3m일 때 개량 후 수직방향으로의 변위를 나타낸 것이다. 제방 하부 중앙 단면에서 최대 침하 약 29.0cm가 발생하였다.

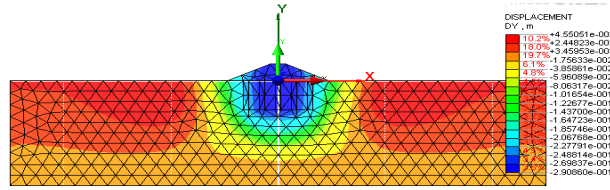


그림 3.8 심도 7m, 간격 3m 보강후 수직 방향에 대한 변위

3.4 2차원 해석 결과에 따른 최적 개량 심도결정

심층혼합처리공법으로 지반 개량시 보강 지반의 치환율은 공사비용에 상당한 영향을 미친다. 따라서, 단면 해석을 수행할 때 보강재를 최소로 사용하면서 적절한 안정성을 확보할 수 있도록 보강재의 심도 및 간격을 결정하여야 할 것이다.

표 3.1은 횡방향 간격 2m에 대한 개량 심도별 침하량에 대해 나타낸 것이다. 심도 10m까지 보강시 침하량 약 18.0cm로 허용침하량 30cm에 만족하는 안정성을 가졌고, 또한 7m, 6m의 심도로 보강시 허용침하량에 만족하는 것으로 나타났다.

표 3.2는 심도별로 보강재의 간격을 달리하여 침하량을 나타낸 것이다. 보강재의 심도가 6m일 때 보강재의 간격을 2.5m까지 허용침하량을 만족하였고, 개량 심도 7m일 때 간격 3m까지 허용침하량을 만족하는 것으로 나타났다.

표 3.1 횡방향 간격 2m에 대한 개량 심도별 침하량

개량심도	최대 침하량	판단여부
10m	18.0cm	O.K
7m	25.5cm	O.K
6m	28.2cm	O.K
5m	33.5cm	N.G

표 3.2 개량 심도 및 간격에 따른 침하량

개량 심도	간 격	침하량	판단 여부
6m	2.0m	28.2cm	O.K
	2.5m	29.5cm	O.K
	3.0m	32.7cm	N.G
7m	2.0m	25.5nm	O.K
	3.0m	29.1cm	O.K

표 3.3 개량 심도 및 간격에 따른 체적 치환율

개량 심도	간격	보강재 타설수	보강재면적 (m ²)	체적 치환율 (%)
6m	2.0m	9	1×6×9=86.4	12
	2.5m	7	1×6×7=67.2	9.6
	3.0m	5	1×6×5=48.0	6.9
7m	2.0m	9	1×7×9=100.8	14
	3.0m	5	1×7×5=56.0	9.3

표 3.3은 개량 심도 및 간격을 고려한 보강재의 수량을 나타낸 것이다. 보강재의 간격을 각각 2.0m, 2.5m, 3.0m로 하였을 때 보강재의 타설수는 9개, 7개, 5개로 보강재의 수량에 큰 영향을 미친다.

개랑 심도 6m, 각 간격 2.0m, 2.5m, 3.0m 일 때 체적 치환율은 12%, 9.6%, 6.9%이고, 개랑 심도 7m, 각 간격 2.0m, 3.0m 일 때 14%, 9.3%로 개랑 심도 6m 간격 3.0m일 때 체적 치환율 6.9%로 가장 유리하지만 허용침하량을 초과하므로 개랑 심도 7m 간격 3.0m일 때가 가장 적합한 것으로 나타났다.

4. 3차원 해석 결과 및 분석

4.1 종방향 간격에 따른 침하량

(1) 심도 7m 간격별 침하량

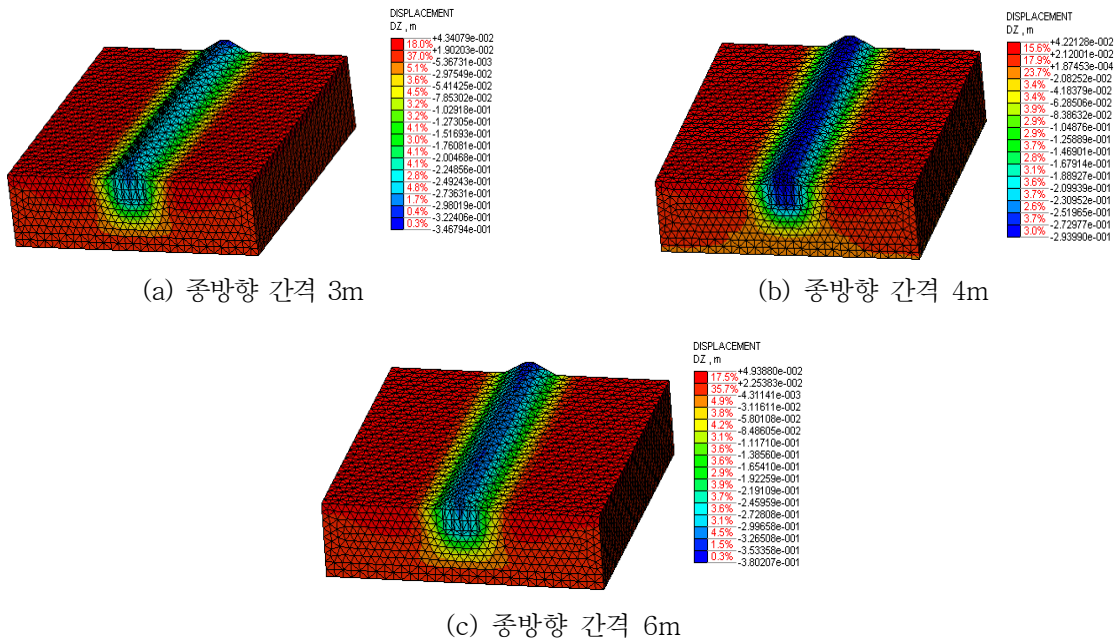
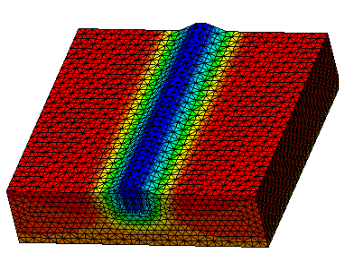


그림 4.1 심도 7m, 횡방향 간격3m에 대한 해석결과

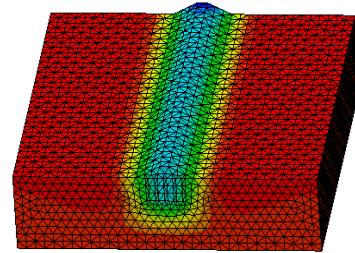
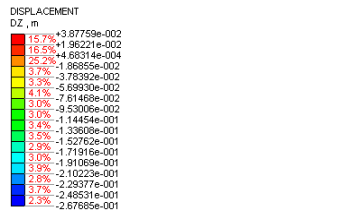
그림 4.1은 심도 7m, 횡간격 3m일 때 종방향 간격을 달리하여 해석한 결과이다. 종방향 간격 3m일 때 해석단면의 제방하부 중앙에서 최대 변위 27.5cm, 종방향 간격 4m일 때 29.5cm로 허용침하량 기준을 만족하였고, 종방향 간격 6m일 때 33.5cm로 허용침하량 기준을 초과하는 것으로 나타났다.

(2) 심도 8m 간격별 침하량

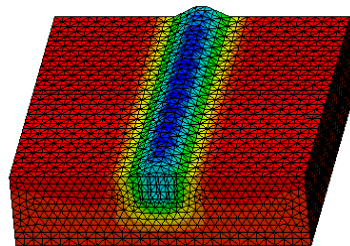
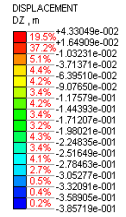
그림 4.2는 심도 8m, 횡간격 3m일 때 종방향 간격을 달리하여 해석한 결과이다. 종방향 간격 5m일 때 해석 중앙 단면의 제방 하부에서 최대 26.5cm, 종방향 간격 6m일 때 최대 변위 29cm가 발생하였고, 종방향 간격 8m일 때 최대 42.5cm가 발생하여 허용 침하량을 초과하는 것으로 나타났다.



(a) 종방향 간격 5m



(b) 종방향 간격 6m



(c) 종방향 간격 10m

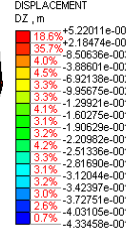
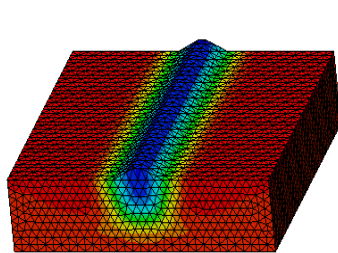


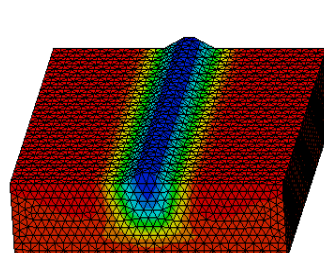
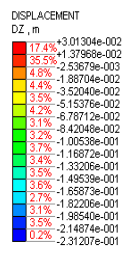
그림 4.2 심도 8m, 횡방향 간격3m에 대한 해석결과

(3) 심도 9m 간격별 침하량

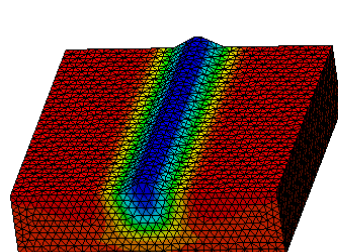
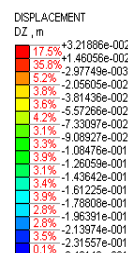
그림 4.3은 심도 9m, 횡방향 간격 3m일 때 종방향 간격별 침하량을 나타낸 것이다. 종방향 간격이 없이 연속적으로 처리하였을 때 그림 4.7과 같이 중앙단면에서 최대 변위 23.1cm가 발생하였고, 종방향 간격 4m일 때 최대 변위 24.9cm, 종방향 간격 6m일 때 최대 변위 26.8cm가 발생하였다. 간격이 다소 넓은 7.5m일 때 허용범위를 벗어난 32.7cm가 발생하는 것으로 나타났다.



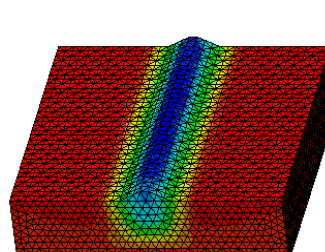
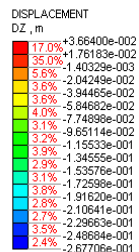
(a) 종방향 간격 1m



(b) 종방향 간격 4m



(c) 종방향 간격 6m



(d) 종방향 간격 7.5m

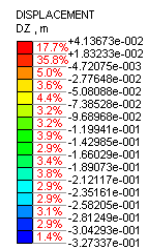


그림 4.3 심도 9m, 횡방향 간격3m에 대한 해석결과

4.2 3차원 해석 결과 분석

3차원 해석 결과 개량 심도 7m일 때 횡방향 간격 3m, 종방향 간격 4m일 때 가장 유리하였고, 개량 심도 8m일 때 횡방향 간격 3m, 종방향 간격 6m가 가장 유리하였다. 그리고 개량 심도 9m일 때 종방향 간격 6m일 때가 가장 유리하게 나타났다. 또한 표 4.1과 그림 4.11은 치환율에 따른 침하량을 나타낸 것이다.

표 4.1 치환율에 따른 침하량

심도 (m)	종방향간격 (m)	지반 치환율 (%)	침하량 (cm)
7	2.0	11.7	24.5
	3.0	5.9	27.5
	4.0	4.4	29.5
	6.0	3.0	33.5
	8.0	2.2	38.5
	9.0	2.0	44.5
8	5.0	4.1	26.5
	6.0	3.4	29.0
	10.0	2.0	42.5
9	2.0	11.4	23.1
	4.0	5.7	24.9
	6.0	3.8	26.8
	7.5	3.0	32.7

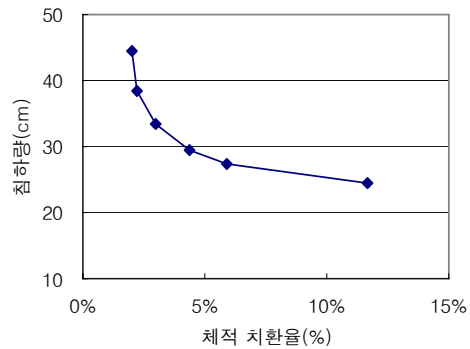


그림 4.11 개량심도 7m일때 지반치환율에 따른침하량

위에서 나타난 바와 같이 심층혼합처리 공법의 최적 심도는 공사비에 큰 영향을 미치는 지반 체적 치환율에 있어 가장 유리하게 나타나는 횡방향 간격 3m, 종방향 간격 6m일 때 심도 8m로 개량하는 것으로 나타났다.

또한 간격에 따라 달라지는 지반 치환율에 의해서 침하량이 급격히 커지는 것을 알 수 있으며, 같은 치환율일 때 개량심도가 깊을수록 침하량이 작게 산정되는 것을 종방향 간격 3m일 때 개량 심도 7m와 종방향 간격 4m일 때 개량 심도 9m 경우를 보면 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 유한요소해석을 이용한 수치해석기법을 통하여 대상 연약지반을 심층혼합처리 공법으로 개량, 2차원 및 3차원해석을 통해 대상 지반의 개량 심도를 결정하였다. 해석 결과 다음 같은 결론을 얻었다.

1. 심도가 일정할 때 간격이 좁을수록 침하량은 작게 산정되었고, 2차원 해석시 횡방향 간격 3m일 때 개량심도 7m가 같은 안정성과 수량산정에 있어서 가장 유리한 것으로 나타났다.
2. 2차원 해석시 종방향 간격을 고려하지 못하는 불리한 조건 때문에 같은 조건(횡방향 간격:3m, 개량 심도: 7m)의 3차원 해석에 비해 침하량이 약 10%정도 과대 평가 되는 것으로 나타났다.
3. 2차원 및 3차원 수치해석결과 심층혼합처리 공법의 횡방향 및 종방향 간격에 따른 침하량이 크게

차이가 나고, 간격에 따른 지반 치환율이 5%이하 일 때 침하량이 급격히 늘어나는 것으로 나타났다.

4. 수치해석 결과 횡간격 및 종방향 간격, 3차원 지반 체적 치환율을 고려하였을 때 가장 경제적이고 유리한 심도는 횡방향 간격 3m, 종방향 간격 6.0m일 때 개량 심도 8m인 것으로 나타났고, 이때 지반 치환율은 3.4% 이었다.

5. 2차원 및 3차원 해석을 종합해볼 때 3차원 해석이 종방향 간격을 고려하지 못하는 2차원 해석의 지반 치환율에 약 36.5%로 그 차이가 3배에 가깝게 과대 해석되어졌다.

위 결과를 종합해 볼 때 연약 지반을 심층혼합처리 공법으로 개량시 개량심도 결정은 공사비에 가장 큰 영향을 미치는 수량에 있어 심도 및 횡 종방향 간격이 크게 좌우하므로 3차원 해석을 통해 개량 심도 결정을 결정해야 할 것이다. 위의 결과들은 하나의 제방을 대상으로 나타난 결론이므로 향후 많은 제방을 대상으로 연구하여 보다 신뢰성 있는 결론을 도출하여야 한다.

참고문헌

1. 정원섭(2008). "3차원해석에 의한 심층혼합처리공법의 심도 결정에 관한 연구". 석사학위논문. 국립 창원대학교
2. 김상현(2005), "EPS공법에 의한 측방유동 대책공법에 관한 해석적연구". 석사학위논문. 국립창원대학교, p.3~30
3. 한국토지공사 기술연구소(1988) "지반개량"
4. MIDAS GTS(2006) "MIDAS GTS 매뉴얼"
5. 한국건설기술연구원(1998) "도로설계 실무 편람"
6. Mc Graw Hill, Braja M. Das(1983)"Advanced Soil Mechanics", p225~227.
7. 전성기 "연약지반 설계실무편람" p.36~48
8. 기술경영사(1994) "새로운 연약지반 처리공법"
9. 한국지반공학회(1995.) "연약지반",