

측방이동 대책공법(SCP)의 영향범위 산정에 관한 해석적 연구 An analytical Study on the Influence length of SCP Method

이영근¹⁾, Young-Keun Lee, 박춘식²⁾, Chun-Sik Park, 김종환³⁾, Jong-Hwan Kim

¹⁾ 국립창원대학교 토목공학과 석사, Master, Dept. of Civil Engineering, Changwon National University

²⁾ 국립창원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Changwon National University

³⁾ 국립창원대학교 토목공학과 박사과정, doctor's course, Dept. of Civil Engineering, Changwon National University

SYNOPSIS : In this study, cohesion of soft ground, soft ground depth and embankment height varying conditions, such as the impact of each condition after the calculation of the range, SCP was performed to evaluate the applicability of the method. Reinforcing effects of scope, and permit lateral movement of SCP 2D and 3D analysis of the program were calculated by the displacement ratio, the result follows.

The height and depth of soft soil embankment with increasing and decreasing the cohesion tends to be affected were long range, SCP method applied by the finite element analysis $C_u = 1.0\text{tf/m}^2$, embankment height is 3.0m depth of soft soil can be applied in a less than 5.0m, and $C_u = 3.0\text{tf/m}^2$, embankment height, the soft soil depth is 3.0m 12.0m, $C_u = 3.0\text{tf/m}^2$, embankment height is 5.0m less than 7.0m depth of soft soil can be applied in was. And $C_u = 5.0\text{tf/m}^2$, embankment height is 3.0m below 15.0m depth rouge anti Floor, $C_u = 3.0\text{tf/m}^2$, embankment height of 5.0m 12.0m depth below the soft soil, $C_u = 5.0\text{tf/m}^2$, If the depth of soft soil embankment height of 7.0m and below 5.0m was applicable.

Keywords : Cohesion, Soft Ground, Range, Sand Compaction Pile, Embankment Height

1. 서 론

연약지반에 구조물 설치를 위한 시공은 우리나라 전국 어디서나 발생하는 지역이 아니기 때문에 일반적인 대부분의 건설 관련 기술인들은 경험 해보기 어려운 공법들이다. 따라서 경험해보지 못한 기술인들이 연약지반 구조물 설치시 설계나 시공시 부담을 가질 수밖에 없는데 이것은 측방 유동 보강 공법에 대한 해석이 복잡하고 시공량 산정이 적정항가에 대하여 간단하게 입증할 수 있는 검토 산식들이 개발되어 있지 않기 때문이기도 하다. 특히, 연약지반에 교량 구조물의 안전성 문제는 불합리한 공정 관리로 인한 시공순서 미준수, 지지력 부족, 지반침하, 사면 활동, 배면 지반의 뒤채움 불량, 과도한 압밀 침하로 인한 편재하중 발생 등에 의하여 빈번히 나타나고 있다. 연약지반 측방유동 문제는 크게 두 가지 범주에서 다루어 질 수 있다. 하나는 연약지반상 성토시공 시 발생하는 문제이고, 또 하나는 연약지반 상에 교대 등과 같은 구조물을 시공하고 뒤채움을 시공할 때 발생하는 문제이다. 많은 연구자들이 연약지반의 측방유동과 관련된 연구를 수행하여 왔으나, 지금까지 이와 관련된 연구는 주로 교대의 안정해석 측면(강도해석)을 중심으로 발전하고 있고, 연약지반상 성토문제와 관련해서는 주로 연약지반의 압밀거동 해석(변위해석)에 초점을 둔 연구가 주로 이루어지고 있다. 최근 성토 시공시 연약지반의 측방유동으로 인해 성토체의 파괴 및 인접지역의 융기(heaving) 등과 같은 사고가 빈번하게 발생하고 있어, 성토에 대한 측

방 변위의 특성을 구명할 필요성이 대두되고 있다.

이와 같은 배경으로는 본 논문에서는 교대측방이동이 발생하는 다양한 연약지반상의 조건에서 성토하중에 의한 영향범위를 산정하고 교대시공 후 그에 따르는 추가 성토하중에 의해 발생하는 측방이동을 방지하기 위해 S.C.P(Sand Compaction Pile) 공법의 적용성 여부를 판단하여 상황에 알맞은 유형을 구하여 경제적이며 합리적인 시공방법을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 연구방법

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS를 이용하여 연약지반상 교대의 시공시 부득이하게 압밀과정을 거치지 못하고 교대가 시공되는 경우가 발생하게 된다. 이러한 경우 성토하중의 측방유동압의 영향으로 시공되어지는 교대에 측방이동이 발생하게 되는데 이를 방지하기 위해 교대를 성토하중의 영향이 미치지 않게 하기 위해서 어느 정도의 이격간격 즉, 영향범위 밖에서 성토가 이루어져야 하는데 이것을 유한요소 해석을 통하여 그 범위를 산정하였다. 그리고 S.C.P시공에 의한 교대의 수평침하량 저감효과를 검토하였으며, 그림 1은 해석대상 모델의 제원을 나타내고 있으며, 해석시 적용한 토질정수는 표 1과 같으며, 각각의 물성은 일반적인 값을 선정하였다.

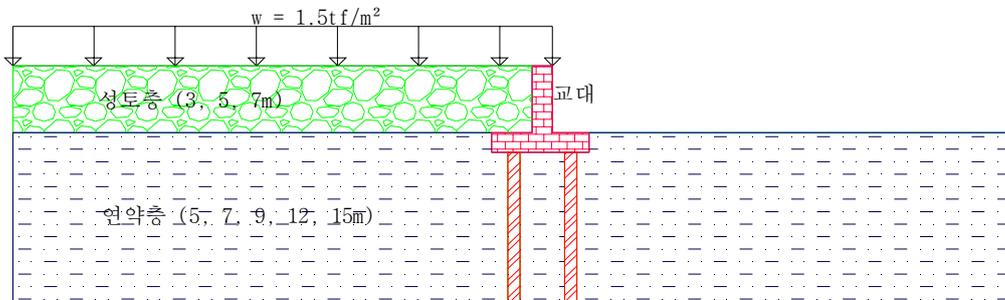


그림 1. 해석 Model 제원

표 1. 지반정수

구 분	γt (tf/m ³)	γsat (tf/m ³)	E (tf/m ²)	ν	c (tf/m ²)	Φ (°)
연약층	1.65	1.75	100C	0.35	(1.0~5.0)	-
성토층	1.9	2.0	1200	0.3	1	30

연약지반 상에 구축되는 교대의 변위양상은 교대의 형식, 연약지반의 심도, 배면성토하중 등의 영향을 크게 받는다. 이러한 교대의 기초말뚝에는 일반적으로 교대의 자중, 뒤채움재에 의한 연직 및 수평력 외에 연약지반의 압밀진행에 따른 부마찰력, 연약지반의 측방유동의 발생에 따른 측방유동압 등이 작용하게 될 것이다.

실제 설계시에는 이러한 영향을 고려하지 못하고 단지 교대의 자중과 뒤채움재의 연직 및 수평토압에 대해서만 저항하는 주동말뚝으로 검토하는 경우가 많다. 이렇게 시공된 교대는 측방이동이 크게 발생하여 차량의 주행성 불량뿐만 아니라 종국에는 교량의 기능마저도 상실하는 경우가 많이 발생되고 있는 실정이다.

따라서 연약지반상에 설치되는 교대의 기초가 말뚝의 경우 주동말뚝보다는 상기의 영향을 모두 고려한 수동말뚝으로 검토하는 것 적절할 것으로 판단된다. 이러한 수동말뚝으로 검토하기 위한 고전적인 방법이 있으나, 이 방법은 교대의 측방이동 방향 및 크기, 뒤채움 지반의 변위 등을 모두 고려하지는 못한다.

유한요소 해석시 각각의 변수, 즉 성토고, 연약층의 심도, 연약층의 지반 강도 등을 기초로하여 뒤채움 지반의 침하 크기, 연약지반의 압밀침하량 및 측방유동, 기초말뚝에 작용하는 측방유동압 등의 제반현상을 모두 고려하기 위하여 지반공학 전용 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS를 사용하여 해석을 수행하였다.

유한요소해석은 시공과정을 적절히 모델화하여 해석하였으며, 교통하중은 1.5tf/m^2 로 입력한 다음, 원 지반에서의 수평변위의 영향이 없는 범위를 산정한 뒤 영향이 없는 범위에 교대를 시공하고, 성토부와 교대 사이에 샌드컴팩션과일 시공의 가능여부를 확인하도록 한다. 아래의 그림 2.는 유한요소 해석에 따른 영향범위 산정 결과의 일예를 나타낸 것이다.

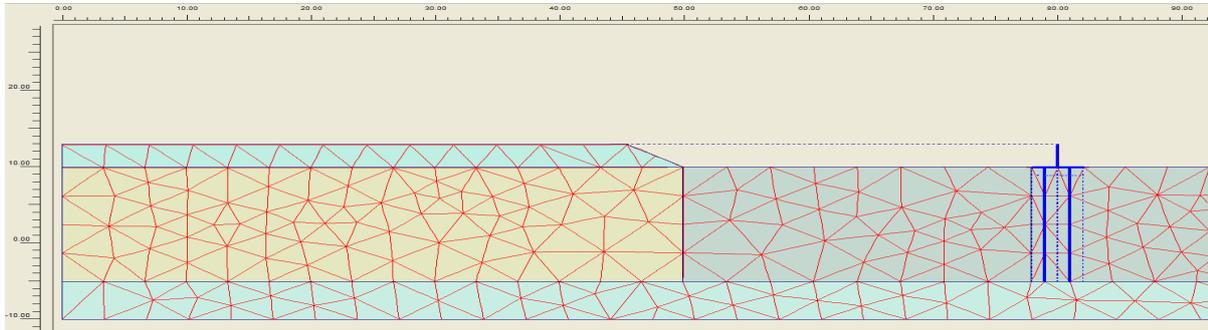


그림 2. 유한요소해석에 따른 영향범위 산정

3. 연구결과

3.1 유한요소 해석에 따른 영향범위 산정 결과

표 2.의 결과에서 검토해 보면 연약층의 심도가 깊어질수록, 성토 높이가 높아질수록 성토부의 영향범위가 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면 연약층의 점착력이 증가할수록 영향범위가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 성토하중이 커지면 측방유동압이 크게 발생하여 연약층에 미치는 영향이 더욱 더 커지는 것을 의미하는 것이다. 그리고 지반의 강도가 증가함에 따라 성토하중의 측방유동압을 연약층이 어느 정도 버틸 수 있기 때문에 감소하는 추세를 보여주는 것이다.

위의 결과를 이용해 그래프로 정리하여 보면 다음 그림 3~5과 같다.

표 2. 성토고, 연약층 성질에 따른 영향범위 산정결과

CASE No.	Cu (tf/m^2)	성토고 (m)	연약층심도 (m)	영향범위 (m)
1	1.0	3.0	5.0	2.0
2			7.0	9.0
3			9.0	15.0
4			12.0	29.0
5			15.0	44.0
6		5.0	5.0	8.0
7			7.0	13.0
8			9.0	19.0
9			12.0	32.0
10			15.0	50.0
11		7.0	5.0	12.0
12			7.0	22.0
13			9.0	25.0
14			12.0	35.0
15			15.0	X

표 2. 성토고, 연약층 성질에 따른 영향범위 산정결과(계속)

CASE No.	Cu (tf/m ²)	성토고 (m)	연약층심도 (m)	영향범위 (m)
16	3.0	3.0	5.0	1.0
17			7.0	7.0
18			9.0	12.0
19			12.0	23.0
20			15.0	34.0
21		5.0	5.0	6.0
22			7.0	12.0
23			9.0	16.0
24			12.0	30.0
25			15.0	44.0
26		7.0	5.0	9.0
27			7.0	18.0
28			9.0	23.0
29			12.0	32.0
30			15.0	46.0
31	5.0	3.0	5.0	0.0
32			7.0	5.0
33			9.0	9.0
34			12.0	18.0
35			15.0	28.0
36		5.0	5.0	5.0
37			7.0	11.0
38			9.0	15.0
39			12.0	26.0
40			15.0	38.0
41		7.0	5.0	6.0
42			7.0	13.0
43			9.0	20.0
44			12.0	28.0
45			15.0	41.0

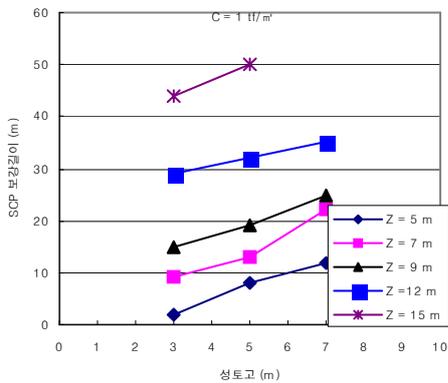


그림 3. Cu = 1.0tf/m²일 때 성토고, 심도에 따른 영향범위

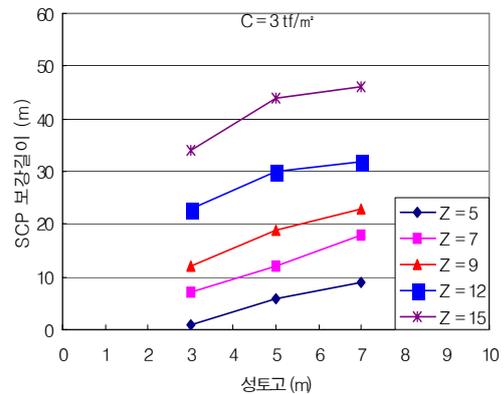


그림 4. Cu = 3.0tf/m²일 때 성토고, 심도에 따른 영향범위

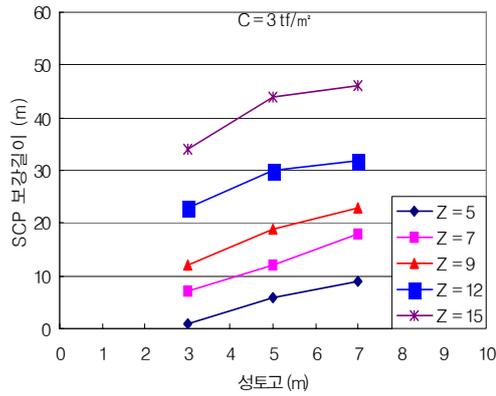


그림 5. Cu = 5.0tf/m²일 때 성토고, 심도에 따른 영향범위

그림 2.에서 연약층의 심도가 깊어질수록, 성토층의 높이가 높아질수록 영향범위의 반경이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 심도가 일정하게 깊어짐에 따라 영향범위가 비례적으로 증가하는 것 또한 확인할 수 있었다. 또한 연약층의 심도 15m, 성토 7m의 경우는 영향범위 구간을 찾을 수가 없었는데 이는 유한요소 해석시 연약층의 약한 점착력과 성토하중에 의한 지반 융기 현상으로 프로그램 해석시 오류가 발생하여 영향범위구간을 산정할 수 없었다. 그림 2.의 그래프와 비교했을 때 성토고와 심도에 따라 영향범위가 거의 직선적으로 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 다만 연약층 지반의 Cu 값이 증가됨으로써 그 영향범위가 Cu = 1tf/m²이었을 때 보다는 다소 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 연약층의 점착력이 5.0tf/m²의 경우는 그림 2.와 그림 3.과는 다른 양상을 보이는데 이는 앞서 두 가지의 경우보다 Cu 값이 더 커졌기 때문에 지반강도가 충분히 성토하중을 버텨주기 때문에 심도가 어느 정도 깊어져도 측방이동을 일으키는 변위를 발생시키지 않는다고 판단된다.

또한 그림 6.~8.은 Cu값의 변화에 따른 성토고 및 연약층심도에 의해 변화되는 영향범위구간에 대해 결과를 정리한 것이다.

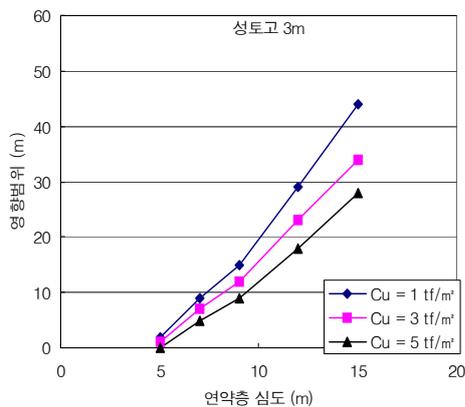


그림 6. 성토고 3m일 때 Cu값 변화에 따른 심도 및 영향범위

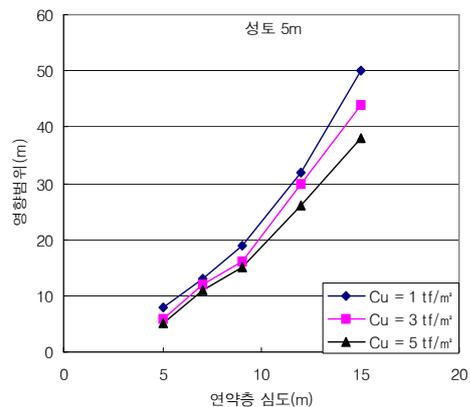


그림 7. 성토고 5m일 때 Cu값 변화에 따른 심도 및 영향범위

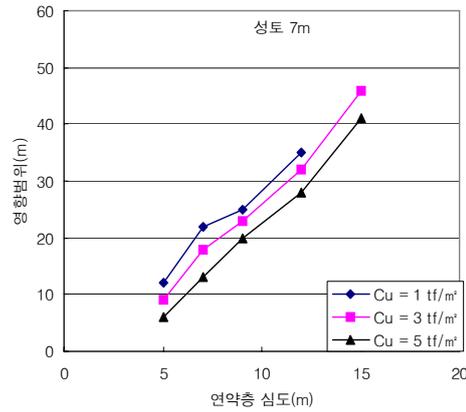


그림 7. 성토고 5m일 때 Cu값 변화에 따른 심도 및 영향범위

그림 4.5~4.7을 종합적으로 분석해 보았을 때 Cu값이 점차 증가할 때, 영향범위는 점차적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 연약층의 Cu값이 증가함에 따라 교대측방이동을 발생시키는 측방유동압을 충분히 견뎌내기 때문으로 해석해 볼 수 있다. 결과적으로 영향범위에 관여를 하는 지배인자는 연약층의 심도, 성토고, 점착력이라 판단된다.

3.2 S.C.P공법 적용성 검토결과

판정법 및 유한요소해석에 의하여 측방이동에 대해 검토한 결과 모든 방법에서 측방이동이 발생된다는 것을 확인하였다. 그리고 유한요소해석결과 수평변위가 허용수평변위($\delta_H = 15.0\text{mm}$)를 초과하는 것으로 배면성토에 의한 측방이동 가능성이 있다는 것을 확인하였다.

그러므로 시공이 끝난 뒤 시간이 지날수록 교좌장치의 파손, 교대와 주변지반과의 단차발생 등 차량주행성이 불량해질 뿐만 아니라 경우에 따라서는 교량의 기능을 상실할 가능성도 있으므로 교대의 측방이동에 대한 대책을 강구해야 할 것으로 판단된다.

교대의 측방이동 검토방법을 통하여 알아보았듯이 가정된 도로성토단면에 의하여 교대의 측방이동 가능성이 보였다. 따라서 시공시 보강대책을 수립해야 한다.

여러 가지 보강대책 중 본 연구에서는 S.C.P(Sand Compaction Pile)공법을 시공하였을 경우 성토높이 및 연약층의 심도와 물성치에 따른 교대의 측방유동이 어떻게 변하는지 알아보도록 하겠다. 앞절에서 산정된 영향범위구간을 바탕으로 시공될 뒤채움 지반의 침하 크기, 연약지반의 압밀침하량 및 측방이동, 기초말뚝에 작용하는 측방유동압 등의 제반현상을 모두 고려하기 위하여 지반공학 전용 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS를 사용하여 해석을 수행한 결과는 아래와 같다.

표 3. S.C.P 적용에 따른 교대의 측방변위 검토 결과

CASE No.	Cu (tf/m ²)	성토고 (m)	연약층심도 (m)	2차원 평면변형 변위 (mm)	2,3차원 변위비 고려 (mm)	적용 가능성
1	1.0	3.0	5.0	14.0	4.7	적용가능
2			7.0	51.0	17.0	적용불가
3			9.0	80.0	26.7	
4			12.0	123.0	41.0	
5			15.0	169.0	56.3	
6		5.0	5.0	83.0	27.7	
7			7.0	161.0	53.7	
8			9.0	265.0	88.3	
9			12.0	312.0	104.0	
10			15.0	381.0	127.0	
11		7.0	5.0	194.0	64.7	
12			7.0	377.0	125.7	
13			9.0	427.0	142.3	
14			12.0	590.0	196.7	
15			15.0	X	X	
16	3.0	3.0	5.0	4.5	1.5	적용가능
17			7.0	14.0	4.7	
18			9.0	23.0	7.7	
19			12.0	38.0	12.7	
20			15.0	50.0	16.7	
21		5.0	5.0	25.0	8.3	적용가능
22			7.0	42.0	14.0	
23			9.0	61.0	20.3	적용불가
24			12.0	84.0	28.0	
25			15.0	102.0	34.0	
26		7.0	5.0	63.0	21.0	
27			7.0	98.0	32.7	
28			9.0	122.0	40.7	
29			12.0	155.0	51.7	
30			15.0	174.0	58.0	
31	5.0	3.0	5.0	11.0	3.7	보강불필요
32			7.0	8.9	3.0	적용가능
33			9.0	14.0	4.7	
34			12.0	21.0	7.0	
35			15.0	28.0	9.3	
36		5.0	5.0	15.0	5.0	
37			7.0	26.0	8.7	
38			9.0	34.0	11.3	
39			12.0	47.0	15.7	
40			15.0	57.0	19.0	
41		7.0	5.0	38.0	12.7	적용가능
42			7.0	56.0	18.7	적용불가
43			9.0	70.0	23.3	
44			12.0	86.0	28.7	
45			15.0	99.0	33.0	

위의 표의 결과를 토대로 정리를 해보면 S.C.P 적용 후 발생하는 수평변위가 허용범위를 만족하는 경우, 허용범위를 만족하지 못하는 경우, 그리고 적용하지 않고도 수평변위를 만족하는 경우 총 3가지 유형의 경우를 확인 할수 있었다. 이러한 경우가 발생하게 되는 이유로는 첫째, 성토부와 교대부 사이의 영향범위 상에 시공될 뒤편하중이 S.C.P공법만으로는 측방변위를 막을 수 없기 때문에 다른 공법과 병행해서 사용하든지 타공법으로 설계하여야 하며, 적용 없이도 교대에 발생하는 측방변위를 만족하는 경우는

연약층의 지반강도가 크기 때문에 S.C.P 공법을 적용하지 않고도 충분히 버틸 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 성토고 및 연약층의 심도와 물성치에 따른 성토하중에 의한 영향범위 산정후 그 범위 내에 S.C.P(Sand Compaction Pile)의 적용에 따른 측방이동 영향범위를 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS를 이용하여 해석하였으며, 본 연구에 의하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 성토고의 높이가 높아질수록, 연약층의 심도가 깊어질수록 성토체 영향범위 구간이 거의 직선적으로 증가하였다.
2. 연약층의 심도가 깊어질수록, 성토고가 높아질수록 영향범위 구간은 점차 증가하고 C_u 값이 증가할수록 영향범위구간이 점차 감소하였다.
3. S.C.P 공법 적용후 적용 가능한 경우는 아래의 표와 같다.

Cu (tf/m ²)	성토고 (m)	연약층심도 (m)
1.0	3.0	Z < 5.0
3.0	3.0	Z < 12.0
	5.0	Z < 7.0
5.0	3.0	Z < 15.0
	5.0	Z < 12.0
	7.0	Z < 5.0

4. 본 연구는 유한요소해석 결과 값에 S.C.P(Sand Compaction Pile)을 복합지반으로 가정하여 해석을 하였고 허용변위량을 만족하는 값을 구하였다. 그러나 실제 시공사례와의 차이가 있기 때문에 어느 정도를 고려해야하는지를 향후 3차원 해석 및 현장계측 등을 통하여 검증해야 한다.

참고문헌

1. 김치열, “연약지반상 교대 측방이동의 수치해석에 관한 연구”, 중앙대학교 석사논문, 2003.
2. 김영황, “성토하부 개량된 연약지반의 측방이동에 관한 연구”, 중앙대학교 건설대학원, 2004
3. 이재훈, “지반의 측방유동”, 건설도서, 1998.
4. 전성기, “실무자를 위한 연약지반 설계실무편람“, 건설도서, 1998. p.p128~132
5. 이흥기, “측방유동 보강공법(EPS공법)의 보강길이 산정에 관한 해석적 연구”, 창원대학교 박사논문, 2008.
6. 박철수, “SCP 공법에 의한 교대의 측방이동 영향범위 산정에 관한 연구”, 창원대학교 석사논문 2009.
7. 배중순, 권종열, 권민재, “제형하중을 받는 말뚝이 매입된 연약지반에서의 측방유동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회논문집, 제22권, 제30C호, pp307~317, 2002.
8. 한국토지공사, “연약지반의 압밀특성에 관한 연구 I·II”, 1999.
9. 홍원표, 송영석, 조용량 “연약지반상 교대측방이동에 대한 판정”, 2001.
10. 안중필, “측방유동을 받는 연약지반의 변형거동에 관한 연구”, 한국지반공학회지, 제10권 제2호, pp.25~40, 1993.
11. 이대훈, ‘편재하중에 의한 연약지반의 측방유동에 관한 연구“, 증인대학교 대학원 석사논문, 2005.

12. 홍원표, 권오현, 한중근, 조성환, “연약지반 교대의 측방이동에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제 10권 제4호, pp.53~65. , 1994
13. Braja M. Das, "Principles of Foundation Engineering", PWS Publishing company, 1990.
14. Bozozuk, M. (1978) : Bridge foundation move, Transportation Research Record 678, Washington, D.C., pp.17~21
15. De Beer, E.E. & Wallays, M. (1972) : Force induced in piles by unsymmetrical surcharges on the soil around the piles, Proc., 5th ICSMFE, Madrid, pp.325~332
16. De Beer, E.E. (1977) "Piles subjected to Statics Lateral Loads", State of the Art Report, Proc. 9th ICSMFE
17. Duncan, J.M & Chang, C.Y (1970) "Nonlinear analysis of stress and strain in soils". Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 96, pp.1629-1653
18. Tschebotarioff, G. P.(1973a), "Lateral Pressure of Clay Soils on Structures", Proc. of the 8th ICSMFE, Special Session 5. Moscow, Vol.4.3, pp.227~280.
19. Tschebotarioff, G. P.(1973b): Foundations, retaining and earth structures, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., pp.400~410
20. Hong, W.P(2005), Lateral soil movement induced by unsymmetrical surcharges on soft grounds in Korea., Mitigation and Countermeasures of Ground Environment (IW-SHIGA2005). PP.135-154
21. Hong, W.P, Song, Y.S & Lee, S.J (2001a) A case study on lateral movement of bridge abutment, Proc. 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway, pp.607-614
22. Peck, R. B.(1969) , "Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground" Prec. of the 7th ICSMFE, State of the Art Volume, pp.225-290