매립지반 지하공동구의 수평이동원인에 대한 수치해석적 분석

운우현[†] · 황철성

가천대학교 토목환경공학과
(2013. 6. 26. 접수 / 2013. 9. 6. 채택)

Numerical Analysis of Utility Tunnel Movement under Reclamation Ground

Woo Hyun Yoon[†] · Chulsung Hwang

Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University

(Received June 26, 2013 / Accepted September 6, 2013)

Abstract : Recently reclamation land is largely developed to utilize the land according to economic growth. The soil of landfill is soft, low shear strength, which makes it difficult to use the equipment. A large movement is occurred on the utility tunnel under construction. The inclined land with high water level and underground facilities are widely distributed and the excess pore water pressure may occur under construction similarly to this study. Some different conditions are made to design result, such as 4m of soil piling near the construction area, heavy rainfall during 2nd excavation that may cause flow liquefaction. To analyze the cause of transverse lateral movement, Three dimensional analysis are performed to four load cases, which is original design condition, flow liquefaction by heavy rainfall, unsymmetric lateral soil pressure, and both of them simultaneously. Ten steps of full construction stage, 1st excavation for utility tunnel, construction of utility tunnel, 1st refill, piling soil from 1m to 4 m, 2nd excavation for drainage culvert, liquefaction around the utility tunnel, construction of drainage culvert and 2nd refill, are take into account to investigate the cause of movement.

Key Words : lateral movement, flow liquefaction, unsymmetric lateral soil pressure, construction stage, exceed pore water pressure

1. 서론

경제성장과 더불어 공업용지 및 주거용지에 대한 수요가 점차 증가되고 있으나 산지가 국토의 70%를 차지하고 있는 우리나라의 여건으로 볼 때, 합리적인 국토확장을 위하여 해안개발의 필요성이 점차로 높아지고 있다.

따라서 서해안과 남해안 일원의 해안연약지반의 매립을 통한 토지이용이 활발히 진행되고 있고 국제 업무단지로써 유리한 점으로 인해 대단위 주거단지, 산업단지, 도로, 항만, 철도 및 공항 등에 대한 투자가 지속적으로 이루어지고 있다.

그러나 해안매립에 의한 지반은 일반적으로 연약지반으로서 고함수비이며 고압축성이고 지반의 전단강도가 아주 작은 상태이므로 구조물의 설치는 물론 시공장비의 활용이 어려운 실정이다.

최근 시화호, 새만금 및 송도 지역과 같이 토지확보를 위한 해안 매립사업, 서해안 고속도로, 영종도의 국제공항 건설 등은 모두 연약지반 위에 건설되는 것으로 연약지반에 대한 연구개발의 활발히 진행되어 왔다.

이 중 연약지반에서 성토작업이나 교대, 옹벽의 시공 중에 편토압 등에 의한 측방유동이나 활동 등의 현상이 발생하며, 이러한 현상은 연약지반에 대한 터널의 굴착에

대한 연구¹⁾로 시작되었으며, 구조물에 작용하는 점성토 지반의 측방토압에 대한 연구²⁾가 수행되었다.

최근 컴퓨터를 이용한 수치해석적인 방법으로 연약지반상의 측방변위 특성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며^{3,4)}, 현장계측자료를 활용한 측방변위 특성의 평가에 대한 연구도 수행되었다⁵⁾.

국내에서 연약지반에 대한 측방유동에 대한 연구가 각종 실험을 통하여 진행되어 왔고^{6,7)}, 수치해석을 통한 사례연구도 수행되었다⁸⁾.

국내의 연약지반의 측방이동에 관한 규정은 측방향 이동지수에 의한 방법, 측방유동 판정지수에 의한 방법을 이용하여 교대의 안전성을 확보할 수 있도록 하였다⁹⁻¹⁰⁾.

매립지반의 토질이 사질토를 다량 함유할 경우 액상화 현상에 의한 구조물의 변위가 유발될 수 있으며, 이러한 과정의 액상화는 흐름 액상화와 반복 유동이라는 두 그룹으로 나누어 설명될 수 있다. 이 중 흐름 액상화는 토질의 정적 평형상태를 위한 전단응력이 토질의 전단강도보다 클 때 발생하며 일단 흐름 액상화가 진행되면 큰 변형이 발생하고 상당히 빨리 이동하며 먼 거리까지 이동한다. 또한 흐름 액상화는 지진이 아니더라도 발생할 수 있는 특징을 가지고 있다.

본 연구는 매립지반상에 대단위 택지조성을 위한 기반시

[†]Corresponding Author: Woo Hyun Yoon, Tel: +82-31-750-5560, E-mail: uu5000@gachon.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, 1342, Sunnamdae-ro, Sujung-gu, Seongnam-si, Kyunggi-do 461-701, Korea

설의 시공 중에 발생한 지하공동구의 대변위(최대 1.97m 측방이동)에 대한 각 시공환경 별 수치해석적 분석을 통해 원인을 밝힘으로서 연약지반의 설계기술 및 시공기술의 발전을 도모한다.

2. 현장상황

2.1. 지하공동구의 변위

Fig. 1은 택지조성현장의 지하공동구의 지반내의 변위를 설계값과 비교한 그림이다.

시공 순서는 1차 터파기후 지하공동구를 시공하였으며, 되메우기를 실시하였다. 이 후 우수암거 시공을 위한 2차 터파기가 실시되었으며, 암거의 시공 후 2차 되메우기가 실시되었다.

이 후의 조사에 의하면 공동구의 측방이동 현상이 발생되었으며 이의 크기는 구간 중간부에서 수평방향으로 최대 1.97 m, 수직방향으로 -0.129 m~0.090 m의 변위가 발생된 것으로 나타났다.

2.2. 시공중 현장상황

본 현장에서의 시공과정은 1단계로 공동구설치를 위한 터파기와 공동구의 설치 및 복토과정과 2단계로 우수 암거설치를 위한 터파기와 공동구의 설치 및 복토과정으로 크게 구분된다. 그러나 실제 시공에 있어서 1단계 공사와 2단계 공사과정 사이에 3~4 m 두께의 토사 및 사석 등이 공동구 측으로 접근하면서 토사 적재가 이루어졌으며 우수암거를 축조하기 위한 터파기가 이루어질 시점에는 근접한 지점까지 적재가 이루어진 상황이었다.

따라서 당시의 주변여건은 설계조건과 다음과 같은 차

이를 나타낸다.

1. 추가조사에 의해 지반조건을 분석한 결과 매립층과 퇴적층사이에 사질토 성분의 연약지반에 분포되어 있다.
2. 1단계 공동구 설치 후 2단계 우수 암거설치 전에 3~4 m 두께의 토사 및 사석 등이 공동구 측으로 접근하면서 토사 적재가 이루어졌으며, 우수암거를 축조하기 위한 터파기가 이루어질 시점에는 근접한 지점까지 적재가 이루어진 상황이었다. 또한 우기에 의해 다량의 강우가 집중되었다.
3. 토사 적재와 이를 위한 중장비에 의한 동하중이 지속적으로 지하공동구와 우수암거 주변지반에 작용되었다.

2.3. 대상구조물 주변의 지반현황

현장 주변에 대해서는 추가 지반조사를 실시하였으며, 설계 당시의 지반조건에 비해 매립층과 퇴적층사이에 연약지반에 분포되어 있음을 보여 주고 있다.

준설매립 사질토의 액상화 방지를 위한 기초처리공법으로는 동다짐이 사용되었으며, 표준관입시험에 의한 개량 기준을 만족하고 있는 것으로 나타나 다짐에 의한 지반 개량이 발생된 것으로 나타났다.

Table 1에서 나타난 바와 같이 매립층은 주로 사질토가 분포되어 있음을 보여준다.

Table 1. Soil layer of the site(additional investigation).

Boring No.	EL. (m)	Landfill Layer	Deposit Layer		Depth (m)
		Sandy soil	Cohesive Soil	Sandy soil	
Boring 1	7.370	6.5	14.5	-	21.0
Boring 2	7.297	4.5	16.5	-	21.0
Boring 3	7.224	4.0	17.0	-	21.0

2.4. 본 현장의 액상화 조건

본 현장은 다음과 같은 지반의 액상화가 발생이 될 수 있는 조건을 내재하고 있다.

1. 지반조사 자료에 의하면 대부분의 매립층이 느슨한 모래질 실트 혹은 실트질 모래로 구성되어 있다.
2. 지하수위가 대체적으로 높고, 우수암거의 시공당시의 터파기로 인해 공동구를 기준으로 지하수위가 높게 형성되어 있었을 가능성이 많다.
3. 공동구 암거의 선시공은 지하수의 흐름에 방해를 가져와 우수암거의 시공당시 우수암거 방향으로 흐르는 지하수가 공동구 배면에서 높은 압력수두를 형성하였을 가능성이 있다.
4. 우수암거의 시공당시 집중호우가 발생하였으며, 공동구의 반대편에 토사적재가 이루어져, 토사적재-공동구-우수암거 터파기의 방향으로 사면이 형성되어 지하수의 흐름이 증가하였을 가능성이 많다.

Fig. 1. Section of maximum movement site.

5. 액상화 방지를 위한 동다짐, 중장비의 이동, 우수암거 구조물의 설치작업으로 인한 충격 등 액상화가 실현될 수 있는 외부하중의 작용이 있었다.

Table 2. Assumed constuction stage.

Stage No.	Construction Step	Numerical Model
Intial stage 0	Initial ground
Construction stage 1	1st excavation for utility tunnel
Construction stage 2	Construction of utility tunnel
Construction stage 3	1st Refill
Construction stage 4	Piling soil(1 m)
Construction stage 5	Piling soil(2 m)
Construction stage 6	Piling soil(3 m)
Construction stage 7	Piling soil(4 m)
Construction stage 8	2nd excavation for drainage culvert
Construction stage 8-1	Liquefaction around the utility tunnel
Construction stage 9	Construction of drainage culvert
Construction stage 10	2nd Refill

3. 구조해석

3.1. 구조물의 해석단계

현장상황의 분석에 의하면 공동구에서 측방변위(본 현장 내 최대변위 : 1.97 m)가 발생된 원인은 토사적재에 의한 편토압에 의해 사면이 안정성을 확보하지 못하여 발생하는 Sliding현상, 집중 강우에 의해 토사적재부와 터파기면과의 수두차가 발생하였으며, 이에 따라 과잉 간극수압의 발생하여 지반의 물성치가 변화함으로써 지반교란에 의해 흐름 액상화에 의해 발생되었을 가능성이 원인으로 나타났다.

이를 3차원 모델링에 의해 시공단계별(Stage)로 나누어 보면 다음과 같다(Table 2).

본 연구에서는 가정한 대변위의 원인을 분석하기 위해 다음과 같은 해석조건(Case)에 대해 각각 3차원 수치해석을 실시한다(Table 3). 각 Load Case에 대한 하중은 Table 2의 하중단계에 따라 구조물의 굴착단계에서 제거되는 지반요소의 경계면에 대한 Residual Force를 계산하고 단계별 하중재하 시에 적용된다.

Table 3. Load cases of 3-dimensional modelling.

Load case	Load condition	Remark
Case 1	Same as designed condition	-
Case 2	Liquefaction under construction of utility tunnel	Disturbed ground
Case 3	Piling soil	Lateral Load
Case 4	Piling soil and Liquefaction under construction of utility tunnel	Disturbed ground and Lateral Load

Table 4. Construction stages for each load case.

Stage	CASE 1 (Designed)	CASE 2 (Liquefaction)	CASE 3 (Piling soil)	CASE 4 (Liquefaction + Piling soil)
Intial Stage 0	O	O	O	O
Construction Stage 1	O	O	O	O
Construction Stage 2	O	O	O	O
Construction Stage 3	O	O	O	O
Construction Stage 4	X	X	O	O
Construction Stage 5	X	X	O	O
Construction Stage 6	X	X	O	O
Construction Stage 7	X	X	O	O
Construction Stage 8	O	O	O	O
Construction Stage 8-1	X	O	X	O
Construction Stage 9	O	O	O	O
Construction Stage 10	O	O	O	O

3.2. 구조물의 모델링

구조물의 모델링은 지반을 해당구간의 종방향길이인 68 m를 Box Segment의 간격인 3.4 m의 층으로 나누어 시공 단계별 3차원 모델링을 수행한다. 토질의 파괴이론은 지반의 해석 시 가장 널리 사용되고 있는 Mohr-Coulomb의 이론에 따르며, 재료적 비선형성은 Elasto-Plastic으로 가정한다.

지반의 경계조건은 모델링의 하단부의 수직이동과 측면의 수평이동을 구속하였으며, 액상화의 경계조건은 지반고에 따른 수두를 적용한다.

해석프로그램은 3차원 시공단계별 해석이 가능한 지반 전용 프로그램인 Pentagon-3D¹¹⁾를 이용하였다.

각 해석조건(Case)에 따른 시공단계별(Stage) 해석과정은 다음과 같다(Table 4).

3.3. 해석에 적용된 지반 물성치

해석에 적용된 지반의 물성치는 실시설계 당시에 설계에 적용된 물성치와 추가 조사를 통해 확인된 현장의 지반조건을 고려해 다음과 같은 물성치를 이용하여 해석을 실시하였다.

단, 지반의 액상화에 대한 물성치의 적용은 지반의 상황에 따라 크게 달라질 수 있으므로 구조물의 변위 결과에 따라 역 추정하여 정한 값이다.

기존 설계에 적용되었던 지반 물성치를 기준으로 매립층은 사질토, 퇴적층은 점성토의 값을 추가 조사된 N치를 적용하였으며, 풍화토와 풍화암은 기존의 설계에 사용된 값을 적용하였다. 이에 따라 지표면을 기준면으로하여 지층에 따라 작용된 값은 다음과 같다(Table 5).

3.4. 구조해석 결과

Table 5. Material properties along the depth of soil.

Depth	Soil layer	Bulk Modulus Kd (kPa)	Shear Modulus Gd (kPa)	Unit density γ_t (t/m ³)	Undrained Strength Cu (kPa)	Internal friction angle ϕ (°)	Lateral earth pressure coefficient (Ko)
0 m ~ -4.7 m	Landfill (sandy) N>10	220900	84700	1.85	0.0	30	0.5
-4.7 m ~ -11 m	weak (sandy) N<10	81300	37500	1.85	5.0	23	0.5
-11 m ~ -16 m	Deposit (점성) N<6	233400	50000	1.80	50.0	0	0.5
-16 m ~ -25 m	Deposit (점성) N>6	263900	121800	1.85	100.0	0	0.5
-25 m ~ -37 m	Weathered soil N<30	436500	145500	2.00	15.0	30	0.5
-37 m ~ -40 m	Weathered soil N>30	720300	240100	2.00	15.0	30	1
-40 m ~ -45 m	Weathered rock	1653800	634100	2.10	30.0	30	1
	액상화	13.56	6.768	1.80	0.0	0	1

Table 6. Horizontal displacements on each load case(unit:m).

Stage	Case 1 (Designed)	Case 2 (Liquefaction)	Case 3 (Piling soil)	Case 4 (Liquefaction+ Piling soil))
Initial stage 0	-	-	-	-
Construction stage 1	-	-	-	-
Construction stage 2	-	-	-	-
Construction stage 3	1.30×10^{-4}	1.30×10^{-4}	1.30×10^{-4}	1.30×10^{-4}
Construction stage 4	X	X	1.14×10^{-4}	1.14×10^{-4}
Construction stage 5	X	X	3.36×10^{-4}	3.36×10^{-4}
Construction stage 6	X	X	5.54×10^{-4}	5.54×10^{-4}
Construction stage 7	X	X	7.81×10^{-4}	7.81×10^{-4}
Construction stage 8	2.01×10^{-4}	2.01×10^{-4}	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-3}
Construction stage 8-1	X	9.96×10^{-3}	X	1.97242
Construction stage 9	5.93×10^{-4}	1.19×10^{-2}	1.67×10^{-3}	1.97598
Construction stage 10	1.37×10^{-4}	1.14×10^{-2}	1.00×10^{-3}	1.97564

구조해석 결과는 현재 공동구의 수평방향 대변위의 원인을 밝히기 위한 목적으로 본 조사가 수행되므로 각 Case 별로 각 시공단계별(Stage) 지반의 수평방향의 변위를 위주로 정리하였으며, Table 6는 각 하중경우별 지하공동구의 우측하단의 수평편위를 정리한 표이다.

Table 6의 해석결과에 의하면 지반이 토사적재에 의한 편토압의 작용과 구조물 주변지반의 액상화가 동시에 발생되지 않는 한 공동구에서 예상되는 최대수평변위가 1.14 cm정도로써 현재 발생된 최대 1.97 m의 변위량을 나타낼 수는 없다. 따라서 집중호우에 의한 수두차로 인해 발생된 지반의 교란과 토사적재에 의한 편토압이 동시에 작용될 때의 두 조건이 동시에 작용되었을 경우에만 가능한 것으로 나타났다.

또한 Table 7는 각 하중경우 중에서 본 현장에 나타난 결과와 일치하는 Case 4에 대한 변위도를 보여준다.

Construction Stage 8의 우수암거 설치를 위한 2차 터파기가 시행된 후 Construction Stage 8-1의 공동구 주변 액상화가 발생한 직후 지반변위는 급격히 증가하고 지반변위도 지하공동구 주변에서 집중적으로 변위가 발생되었음을 보여준다. 이후의 지반변위의 변화가 거의 나타나지 않은 것으로 볼 때 과잉간극수압에 의한 지반의 교란이 구조물의 이동의 주원인으로 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 매립지반 기반시설의 시공 중에 발생한 지하공동구의 이동현상에 대한 원인을 분석하기 위하여 현장의 시공과정을 각 조건별로 3차원 수치모델링하여 시공

Table 7. Horizontal displacement diagram on load case 4.

Stage	max. horizontal displacement(m)	Result of computer analysis
Initial stage 0 Initial ground	-
Construction stage 1 1st excavation for utility tunne	-
Construction stage 2 Construction of utility tunnel	-
Construction stage 3 1st Refill	1.30×10^{-4}
Construction stage 4 Piling soil(1 m)	1.14×10^{-4}
Construction stage 5 Piling soil(2 m)	3.36×10^{-4}
Construction stage 6 Piling soil(3 m)	5.54×10^{-4}
Construction stage 7 Piling soil(4 m)	7.81×10^{-4}
Construction stage 8 2nd excavation for drainage culvert	6.81×10^{-4}
Construction stage 8-1 Liquefaction around the utility tunnel	1.97242
Construction stage 9 Construction of drainage culvert	1.97598
Construction stage 10 2nd Refill	1.97564

환경 별 해석을 실시하였다.

시공과정은 초기 설계에서는 1차 터파기 후 지하공동구를 설치하고 1차 되메우기를 실시한 후, 2차 터파기를 실시하여 우수암거를 설치하는 것으로 설계되었다. 그러나

시공과정 중 지하공동구에 근접하여 대량의 토사적재가 발생하였고, 2차 터파기의 시공 중에 집중호우로 인해 지하공동구 주변에 과잉간극수압이 발생할 조건이 형성되었다. 이를 검증하기 위하여 시공조건을 최초 설계상태, 지반의 액상화 상태, 토사적재에 의한 편토압상태 및 지반 액상화와 토사적재에 의한 편토압이 동시에 작용된 상태로 구분하여 해석을 수행하였다. 각 경우에 대하여 시공단계별 해석을 수행하였으며, 측방이동의 원인으로 판단되는 토사적재에 의한 편토압과 흐름의 액상화가 동시에 작용된 경우 1차 터파기와 지하공동구 시공, 1차 되메우기, 토사적재, 2차 터파기, 공동구 주변의 액상화, 우수암거 설치 및 2차 되메우기의 시공과정을 따라 각각 측방변위를 구하였다. 이의 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 지하공동구에서 발생된 1.97 m의 측방이동은 공동구 측으로 접근하면서 토사적재에 의한 편토압과 2차 터파기와 집중호우에 따른 과잉간극수압에 의해 발생되는 것으로 나타났다. 따라서 편토압, 또는 과잉간극수압의 발생 등의 개별조건에 의해서는 대형 변위가 발생되지 않는 것으로 나타났다.

2) 수치 해석적 시산법을 통해 교란상태의 지반의 조건은 체적탄성계수가 13.56 kPa, 전단탄성계수가 6.768 kPa으로 나타났다으며, 이는 일시적으로 흐름 액상화가 발생한 것으로 볼 수 있다.

3) 본 경우에서 발생된 현상은 건설현장에서 쉽게 노출되기 쉬운 조건으로 경사 지형 등의 편토압을 발생할 수 있는 조건에서 기존의 지하구조물 주변의 터파기 공사를 수행할 시에 집중호우 등에 의한 과잉간극수압이 발생되지 않도록 유의하여 시공하여야 할 것이다.

References

- 1) R. B. Peck, "Deep Excavation and tunneling in Soft Ground", Proc. of the 7th ICSMFE, State of Art, pp.225~290,1969.
- 2) G. P. Tschebotarioff, "Lateral Pressure of Clayey Soil on Structures", Proc. of the 8th ICSMFE, Moscow, Vol. 4, No. 3, pp. 227~280, 1973.
- 3) Loganathan et al, "Deformation Analysis of Embankments" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 8, pp. 1185~1206, 1993.
- 4) E. A. Ellis, Springman, S. M., "Modelling of Soil-Structure for piled Bridge Abutment in Plane Strain FEM Anaysis", Computer and Geotechnics, Vol. 28, No. 2, pp. 79~98, 2001.
- 5) W. P. Hong, "Laterl Soil Movement induced by Unsymmetrical Surcharges on Soft ground in Korea", Migration and Countermeasures of Ground Environmental(IW-SHIGA 2005), pp. 135~154, 2005.
- 6) J. J. Suh, S. S. Jeong, D. H. Seo and Y. S. Kim, "The Behavior of Piled Bridge Abutments Subjected to Lateral Soil Movements - A Study on the Centrifuge Model Tests - ", Journal of the Korean geotechnical society, Vol. 19, No. 1, pp. 5~19, 2003.

- 7) W. P. Hong and J. H. Kim, "Lateral Earth Pressures on Buried Pipes due to Lateral Flow of Soft Grounds", Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 11, No. 9, pp. 27~38, 2010.
- 8) E. C. Shin and J. S. Kim, "Case Study of Lateral Movement Prediction using Numerical Analysis, proc. Of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 2009, No. 9, pp. 317~324, 2009.
- 9) Korea Expressway Corporation, Method of Road Design -Substructure of Bridge, Vol. 3, No. 8-3, pp. 410~411, 1992.
- 10) Korea Expressway Corporation, "Road Design Manual for Practice - Soil And Foundation", pp. 111~121, pp. 148, 1996.
- 11) Emeraldsoft, Pentagon-3D Manual, 2009