

대규모 굴착공사에 따른 지중연속벽체의 변형특성(I)

- 계측 및 실험 -

Deformation Characteristics of Diaphragm Wall Induced by Deep Excavation(I)

- Instrumentation and Experiments -

김 동 수 ^{*1}	Kim, Dong-Soo	이 병 철 ^{*2}	Lee, Byoung-Cheol
김 동 준 ^{*3}	Kim, Dong-Joon	양 구 승 ^{*4}	Yang, Gu-Seung

Abstract

The lateral deflections of cylindrical diaphragm wall induced by deep excavation are monitored and analyzed in the coastal area where excavations are performed in sandy soils and weathered soils underlain by rocks. Lateral wall deflection, rebar stress, earth pressure, and pore water pressure are measured and analyzed in 8 directions of diaphragm wall. The rational interpretations and correction methods are investigated to obtain an accurate results. According to the measurement results, lateral wall deflections increase with excavation steps. At a certain depth, sharp decrease of pore water pressure is observed by the excavation of clay layer. On the other hand, the variations of soil properties with the decrease of confining pressure before and after excavation are compared and plotted. Young's modulus decreases to a certain degree with depth and the differences of Young's modulus with various testing methods are also compared before and after excavation.

요 지

해성토층(풍화토 및 모래질 층적토가 암반위에 쌓인) 위에 준설매립된 수도권 해안매립지역에서 원형의 대심도 굴착공사로 인하여 발생하는 지중연속벽의 수평변위에 대한 현장계측을 중심으로 연구를 수행하였다. 현장측정으로는 지중연속벽의 8방향에서 벽체수평변위와 철근응력, 토압, 간극수압 등이 측정되었고, 정확한 측정결과를 얻기 위하여 합리적인 해석 및 보정방법이 연구되었다. 현장측정결과 굴착시공단계에 따라서 벽체수평변위가 증가하였으며, 일정깊이에 존재하는 점토층을 굴착함으로써 간극수압의 급격한 변화가 측정되었다. 한편, 굴착전후의 구속압감소에 따른 지반물성치의 변화를 정리하였다. 굴착전후의 탄성계수는 일정깊이까지 상당한 정도로 감소됨을 알 수 있었고 굴착전후 여러 가지 시험방법에 따른 탄성계수의 차이들을 비교하였다.

Keywords : Confining pressure effect, Cylindrical deep excavation, Deformation characteristics, Diaphragm wall, Instrumentation, Site characterization

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수
*2 정회원, 신구대학 토목공학과 조교수
*3 정회원, 현대건설기술연구소 연구원
*4 정회원, (주)삼성물산기술연구소 책임연구원

1. 서론

깊은 굴착시공의 현장계측은 지반공학자가 설계가정들을 확인할 수 있게 하고, 안전하고 경제적으로 작업을 수행할 수 있는 수단을 제공하기 위해서 매우 중요하다. 또한, 이들 현장 계측데이터는 해석적이고 수치적인 모델들을 검증하는데 유용하며, 깊은 굴착시공에 대하여 이해를 증진시키고 장래의 효율적인 설계를 위한 지침을 제공하는데 도움을 줄 수 있다.

지반과 지중연속벽 사이의 상호작용은 벽체의 수평변위(lateral wall deformation)와 토압의 현장측정값들에 기초하여 해석되며, 굴착에 의한 지반거동과 간극수압의 변화는 간극수압계와 기타 여러 가지 정밀한 계측기들을 사용한 측정값들에 기초하여 얻어진다.

본 논문에서는 서해안 00지역에 위치한 지하식 LNG 저장탱크를 시공하기 위한 대규모 굴착시, 지중연속벽과 주변지반에서 이루어진 지반조사 및 계측결과를 정리·분석하였다.

굴착전 수행된 지반조사 결과와 굴착후의 결과를 비교하여 굴착에 따른 구속압 감소에서 오는 변형특성의 변화를 살펴보고, 변형률크기에 따른 탄성계수의 변화를 연구함으로써 기존의 탄성계수 결정방법과 탄성파를 이용한 탄성계수 결정방법에서 얻은 값들을 비교 분석하였다.

지중연속벽내에서는 경사각, 토압, 간극수압, 철근응력, 트랜쉬를 이용한 상단변위와 온도가 계측되었고, 주변지반에서는 수평변위와 간극수압이 계측되었다. 그리고 계측결과의 해석방법과 필요시 수행된 오차보정방법에 관하여 설명하였고, 좀 더 정확한 계측을 위해 개선되어야 할 점에 대하여 기술하였다.

본 논문은 굴착전후의 지반의 변형특성의 변화, 지중연속벽에 작용하는 토압과 수압, 이에따른 지중연속벽의 수평방향 거동과 주변지반의 변형양상에 초점을 맞추었고, 다음의 동반 논문에서는 본 논문의 계측데이터를 이용하여 지반의 미소변형을 비선형성을 고려한 굴착시 지반거동해석법을 연구하였다.

2. 현장개요

본연구의 대상은 서해안 00지역에 위치한 지하식 LNG 저장탱크시설 건설을 위한 지중연속벽 굴착에 관한 것이며 저장탱크는 용량 20만 kl, 원통형으로서 직경

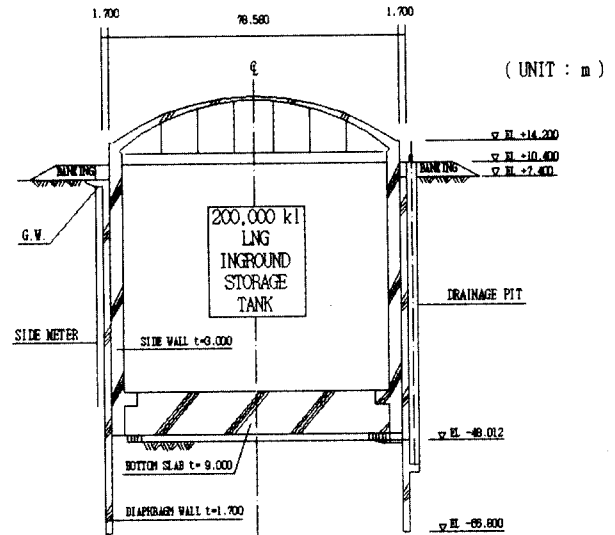


그림 1. 현장 단면도

은 80.3m, 깊이 74.2m, 내부굴착심도 56m, 지중연속벽의 두께는 1.7m이고, 저판으로는 약 50m 수두차의 양수압에 견디도록 두께 9m의 철근콘크리트 슬래브를 설치할 계획이다(그림 1).

3. 지반조건

현장조사는 시추조사, PS검층공형성, 표준관입시험, 자연시료채취, 지하수위측정을 하였고 현장시험으로는 공내수평재하시험, PS검층, 전기검층을 실시하였고, 여러가지 실내시험을 수행하였다. 또한 채취된 시료를 사용하여 공진주시험을 실시하였으며, 시험결과를 사용하여 현장지반의 미소변형을 거동특성을 산정하였다((주)삼성물산,1998).

시추조사의 결과 전반적인 지층의 현황은 실트질 세립모래로 구성된 해성퇴적층이 상부매립토의 하부에 위치하며, 해성퇴적층에서는 EL-30m~ -42.3m에 점토층이 간헐적으로 분포하고 있는데(이러한 점토층 중 본대상 구조물은 EL-39.6m~ -42.1m에 위치.) 이러한 점토층은 불투수층의 역할을 하며 점토층 굴착시 배수량이 급격히 증가하여 간극수압의 급격한 변화를 초래하였다. 모래층 하부에는 자갈층이 약 3~4m의 두께로 분포하고 있다. 풍화암층은 퇴적층의 하부에 약 12.0m 이상의 층두께로 분포하며 모양이 풍화작용을 받았으나 조직과 형태는 유지하고 있는 층으로, 그 하부로는 기반암인 편마암 또는 화강암질 편마암의 연암층 및 경암층이 수직적으로 분포하고 있다. 연암층의 풍화정도는 보통

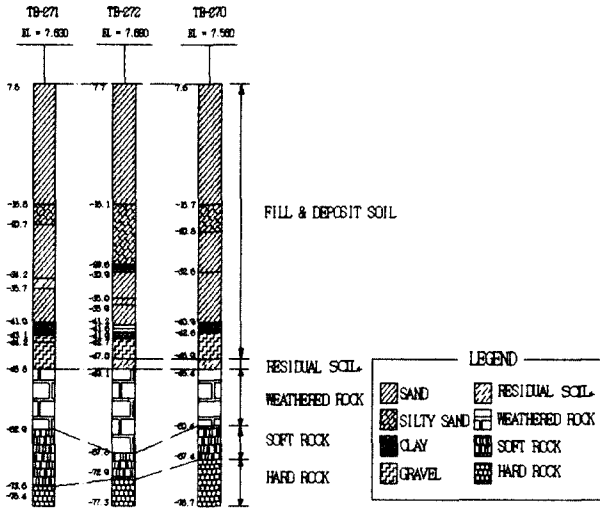


그림 2. 지반주상도

풍화로 부분적으로 파쇄대가 발견되기도 하나 전반적인 코아의 형태는 단주상이다. 코아회수율 T.C.R.은 22~100%, R.Q.D는 0~5%로 나타난다. 경암층의 풍화 정도는 신선한 상태이고 강도는 보통 내지 매우 강하며 부분적으로 파쇄대가 보이며 코아회수율 T.C.R.은 47~100%, R.Q.D는 0~99%로 나타난다. 기반암의 풍화도는 상부에서는 심한 풍화의 상태를 나타내나 하부로 갈수록 비교적 신선한 상태를 나타내었다(그림 2). 한편, 공내지하수위는 지표하 심도 GL-1.96m~-4.61m의 범위에 분포하는 것으로 조사되었다.

4. 지중연속벽 굴착공사 개요

흙막이 벽체로서의 지중연속벽은 내부의 저장시설공사를 위한 구조물로서, 본현장에 적용되는 지중연속벽 공사는 버팀대없이 직경 80.3m의 초대형 원통형 지중연

표 2. 굴착 시공단계

시공단계	시공 내용	기간
Level 1	1단계 굴착(EL-15m)	99/8/26-99/9/13(18일간)
Level 2	2단계 굴착(EL-23m)	99/9/13-99/9/28(15일간)
Level 3	3단계 굴착(EL-33m)	99/9/28-99/10/7(10일간)
Level 4	4단계 굴착(EL-44m)	99/10/7-99/10/14(7일간)
Level 5	5단계 굴착(EL-46m)	99/10/14-99/10/21(7일간)
Level 6	6단계 굴착(EL-46m) (굴착완료)	99/10/21-00/2/20

속벽만으로 토압과 수압을 지지하는 것으로 지금까지 국내에서 일반적으로 실시해온 지중연속벽보다는 대심도, 대규모로 고강도 콘크리트를 사용하여 고도의 정밀한 계측관리가 요구되는 공사이고, 벽체 두께 1.7m, 깊이 74.2m 내부직경 78.58m의 원통형 철근콘크리트로 만들어졌다. 벽체는 연암층에 3m 관입되도록 EL-66.8m 깊이까지 설치되었으며 26개의 패널로 나누어 타설되었다.

지중연속벽 타설 후 굴착이 시작되어 약 50일 동안 EL-46.0m 까지 굴착이 이루어졌다. 초기에는 장비들이 직접 굴착측으로 진입하여 토사를 반출하였으며 깊이가 깊어진 후에는 상부에 설치된 크레인을 사용하여 바닥의 토사를 끌어올리는 방식으로 공사가 진행되었다.

EL-39.6~-42.1m에 존재하는 점토층은 불투수층의 역할을 하다가, 점토층이 굴착되었을 때 급격한 배수량의 증가로 주변 간극수압이 급격히 감소되었다. 이러한 상황에서는 굴착지반의 구속압 감소 및 투수현상으로 인하여 더 이상의 굴착이 진행될 수 없어서 굴착진행을 중단하고 지반조사를 다시 정밀하게 실시하였다. 따라서 앞절에서 설명된 바와 같이, 굴착전후의 구속압 변화에 따른 지반물성치들의 변화가 비교되었다. 굴착시공 단계는 표 2에 나타내었다.

표 1. 굴착전 지반물성치(설계치)

깊이(EL,m)	지반분류		단위중량 γ (kg/m ³)	표준관입저항치 (평균N치)	전단파속도 V_s (m/s)	최대전단탄성계수 G_{max} (kg/cm ²)	탄성계수 E_{max} (kg/cm ²)
7.4~-2.6	매립토	F*	1850	17	160	483	1285
-2.6~-17.3	실트질 모래	SS ₁₁ *	1850	24	200	755	2008
-17.3~-30.0	실트질 모래	SS ₁₂ *	1900	42	260	1310	3487
-30.0~-39.9	실트질 모래	SS _m *	2050	70	310	2009	5347
-39.9~-42.3	점토	SC*	1900	73	310	1863	4956
-42.3~-47.3	모래질 자갈	SG*	2100	127	310	1960	5217
-47.3~-63.8	풍화암	WR*	2350	173	450	4854	12918
-63.8~-72.1	연암	SR*	2350	-	750	14627	38928
-72.1~-100.0	경암	HR*	2550	-	1500	58528	155714

* Samsung Corporation(1999) 참조.

5. 계측 개요

측정단면은 원주방향으로 8방향(31°, 73°, 128°, 170°, 211°, 253°, 308°, 350°)으로 분할되었다(그림3과 표3 참조). 73°와 253°(MAIN LINE 1)은 인접한 탱크들의 굴착에 영향을 받지 않는 방향으로, 주변지반의 경사계를 제외한 표 3의 모든 계측기들이 설치되었다. 170°와 350°(MAIN LINE 2)는 MAIN LINE 1과 거의 직각이고, 주변지반의 간극수압계를 제외하곤 모든 종류의 계측기들이 설치되었다. 31°, 128°, 211°, 308°(SUB-LINE) 방향은 MAIN LINE 1과 2의 보조적인 단면들이고, 최소한 요구되는 계측기들만이 설치되었다.

경사계는 주변지반과 지중연속벽의 깊이에 따른 변위 분포를 측정하기 위하여 설치되었다. 경사계관들은 8방향으로 설치되었고, 계측범위는 지중연속벽 전체이다. 주변지반에서는 73°와 253°(MAIN LINE 1), 170°와 350°(MAIN LINE 2)에서 지중연속벽의 외벽으로부터 4.5m 떨어진 위치에 네개의 가이드 파이프들이 설치되었다.

지중연속벽 상단의 변위는 EL+7.90m에서 8방향으로 Transit Level을 사용하여 측정하였다. 이러한 측정값들은 지중연속벽의 절대 변위값들을 결정하기 위하여 이용될 계획이었으나, 계측데이터의 신뢰성에 문제가 있어 사용하지는 않고 대신에 뒤의 7장에서 언급되는 것처럼 상단보정과 하단고정을 통하여 지중연속벽체의 수평변위를 구하였다.

원주방향 철근응력계는 8방향으로 5깊이에 설치되었다. EL+6.65m에 설치된 계측기들은 지중연속벽 상단의 중앙부분에서의 철근응력을 측정하였고, EL-36.0m에 설치된 계측기들은 원주방향 최대 철근응력을 측정하

였다. 이외의 계측기들은 수직방향으로 약 15m 간격으로 설치되었다.

수직방향 철근응력계들은 4방향(MAIN LINE 1&2)에서 4깊이에 설치되었다. EL-39.0m와 EL-50.0m에 설치된 계측기들은 각각 지중연속벽의 내벽과 외벽에서 수직방향의 최대철근응력을 측정하였다.

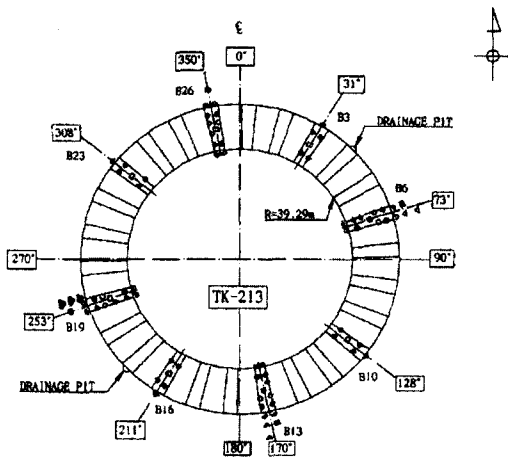
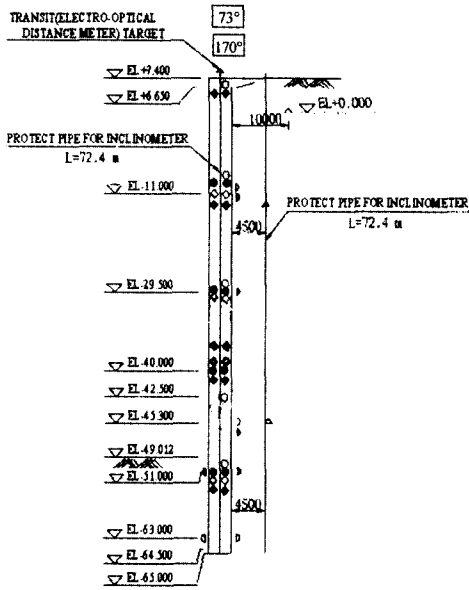
간극수압계들은 지중연속벽에 작용하는 수압의 측정과 EL-60.0m 부근에서의 침투에 대한 안전을 확인하기 위하여 설치하였다. 이러한 계측기들은 지중연속벽의 외벽에서는 3깊이에서 4방향(MAIN LINE 1 & 2)에 설치되었고, 내벽에서는 1깊이에서 4방향(MAIN LINE 1 & 2)으로 설치되었으며, 주변지반에서는 3깊이에서 2방향(MAIN LINE 1)으로 설치되었다. 지중연속벽의 외벽에 설치된 간극수압계는 벽체에 작용하는 간극수압을 측정할 목적이고, 벽체의 내벽에 설치되는 간극수압계는 벽체 내부에서의 간극수압을 측정하기 위하여 벽체 바닥 근처에 위치되었다. 주변지반에 설치된 간극수압계들은 주변지반에서 시간의 경과에 따른 간극수압의 변화를 측정하기 위하여 설치되었다.

토압계들은 지중연속벽의 외벽에서 4깊이에서 4방향(MAIN LINE 1 & 2)으로 그리고 내벽에서 3깊이에서 4방향(SUBLINE)으로 설치하였다. 이러한 토압계들은 외벽에서는 수직방향으로 15m 간격으로 위치하며, 지중연속벽의 내벽에서는 최종굴착깊이에서 약 10m 아래 설치하였다.

대부분의 간극수압계와 토압계들은 서로의 관련성을 조사하기 위하여 철근 응력계와 콘크리트 스트레인지이지와 거의 같은 깊이에 위치된다. LNG 지하탱크 현장의 지중연속벽의 계측기 설치위치를 정리하면 표 3과 같다((주)삼성물산,1998).

표 3. 계측기 배치항목

계측기 항목	기호	계측기 설치 위치								합계	
		B ₃	B ₆	B ₁₀	B ₁₃	B ₁₆	B ₁₉	B ₂₃	B ₂₆		
		31°	73°	128°	170°	211°	253°	308°	350°		
rebar stress meter	원주방향	◆	4	10	4	10	4	10	4	10	56
	수직방향	◇	0	8	0	8	0	4	0	4	24
concrete stress meter	원주방향	●	2	8	2	8	2	4	2	4	32
pore water pressure transducer	▶	0	4	0	4	0	4	0	4	16	
pore water pressure transducer(주변지반)	△	0	2	0	3	0	0	0	0	5	
total pressure meter	▷	3	5	3	5	3	5	3	5	32	
protect pipe for inclinometer(벽체내부)	□	1	1	1	1	1	1	1	1	8	
protect pipe for inclinometer(주변지반)	■	0	1	0	1	0	1	0	1	4	
transit target	▲	1	1	1	1	1	1	1	1	8	
thermometer	○	0	5	0	5	0	4	0	4	18	



* 각 계측기의 기호는 표4에 표시

그림 3. 상세계측 배치도

6. 현장 및 실내시험수행 및 결과분석

6.1 굴착 전·후의 지반조건 비교

표준관입시험을 실시하여 해당층에 대한 저항치(이하 N치)의 평균값을 구하였다. 관입깊이가 30cm일 때는 그대로 사용하고 30cm이하일 때는 30cm 관입깊이에 해당하는 N치를 외삽법에 의해 구하였다. 굴착공사의 경우 표준관입시험을 포함한 지반조사는 굴착이 시작되기 전에 시행되는데 반해서, 실제 구조물과 지반의 거동에 영향을 미치는 것은 굴착 전체과정에서의 지반물성이라는 점을 고려한다면 굴착에 의한 지반물성의 변화를 효과적으로 평가할 수 있는 기법의 필요성이 제기된다.

굴착전에 GL-60.0m까지 N치를 조사하였고 GL-55.0m

까지 굴착한 후에 상세지반조사를 다시 실시하였다 (Samsung Corporation,1999). 그림 4에서는 전체깊이에 걸쳐서 굴착전후의 N치와 각 지층에서의 평균 N치를 비교하였다. 굴착에 따른 구속압감소와 투수현상으로 인하여 굴착후에는 풍화암지반에서 N값이 상당히 감소되었음을 볼 수 있다. 그림 5에서는 굴착전후 실시한 공내재하시험 결과로서 탄성계수값을 비교하였다. 굴착에 따른 구속압감소 및 투수효과로 인하여 풍화암과 연암에서는 굴착후의 탄성계수는 굴착전 탄성계수보다 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 그림 6에서는 굴착단계별 전단파속도를 비교하였다. 굴착전의 전단파속도는 다운홀 시험을 이용하여 구하였고, GL-24m, -34.5m, -40m 굴착시의 전단파속도는 SASW시험으로 조사하였다. GL-55m 굴착시의 전단파속도는 현장여건상 SASW 시험을 수행하지 못하였으며 구속압 영향정도를 공진주시험을 바탕으로 결정하고 아래 식 1을 적용하여 추정하였다. 각각의 굴착깊이가 증가함에 따라서 구속압이 제거됨으로 인하여 전단파속도가 감소함을 보인다. 지반의 전단파속도는 구속압에 따라 변한다는 것이 일반적으로 알려져 있다. 현장에서는 굴착에 따라 상재하중이 제거되고 침투수압이 발생함에 따라 유효응력이 변화하게 된다. 이것을 고려하기 위해 구속압을 변화시키며 공진주시험을 실시하여 구속압 영향계수 n 을 산정하였다(한국과학기술원,1998).

$$V = V_o \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n \quad (1)$$

여기서 V, V_o 는 보정후와 지반조사시 전단파속도이며 σ, σ_o 는 보정후와 지반조사시의 유효구속압이다. n 은 전단탄성계수에 대한 구속압 영향계수이다. 공진주시험에서 얻은 구속압 영향계수는 풍화암층에 대해서는 0.34 연암층에 대해서는 0.29으로 나타났다. 여기서 연암층의 시료는 풍화가 많이 진행된 시료이나 더 깊은 층에서 시험을 실시한 결과가 없으므로 연암층의 값으로서 사용하였다.

그림 7에서는 굴착전후 여러 가지 시험방법에 따른 탄성계수의 차이를 나타낸다. 일본도로교시방서 방법인 28N과 전단파속도를 이용하여 구한 E_{max} , 공내재하시험(이하 PMT)으로 각각의 지층에서 평균치로 구한 값들을 비교하였다. PMT에서는 GL-36m ~ -60m까지는 보링공을 형성할 수 없어서 탄성계수값을 측정할 수 없었다. 3가지 방법 모두 굴착전보다 굴착후에 탄성계수가

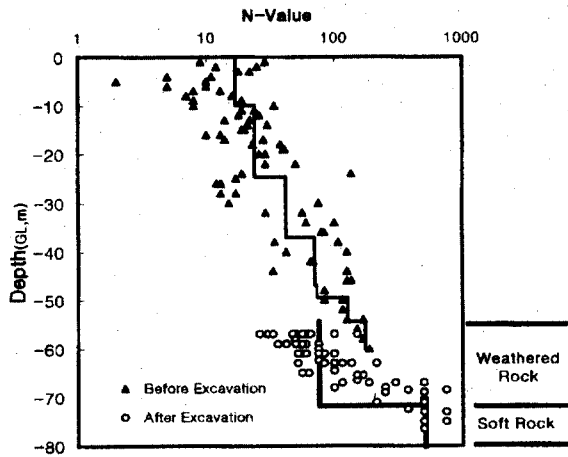


그림 4. 전체깊이에서 굴착전후 N치 비교

상당히 감소함을 보이고, 28N방법과 $E_{max}(Vs)$ 방법에서의 굴착전후 탄성계수값의 차이는 PMT 방법에서의 차이에 비하여 현저하게 작음을 보인다.

이와같은 굴착전후의 지반물성치의 변화를 표 4에 정리하였다. 이러한 지반물성치를 이용하고, 위에서 기술한 바와 같이, 굴착에 따른 구속압효과 제거로 인한 탄성계수의 감소를 고려하여 최종 굴착시 지중연속벽체의 수평변위를 정확하게 예측하여야 한다.

6.2 변형률 크기에 따른 탄성계수 변화

다운홀시험을 통하여 결정된 최대탄성계수와 공진주 시험(이하 RC시험)에서 결정된 변형률 크기에 따른 정규화탄성계수 감소곡선을 효과적으로 결합하면 변형률

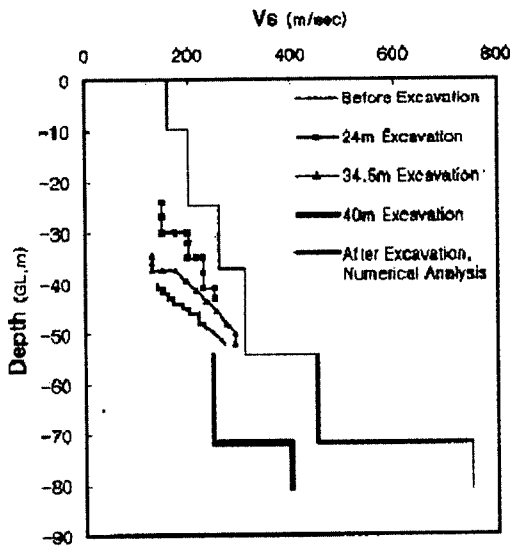


그림 6. 굴착단계별 전단파속도 비교

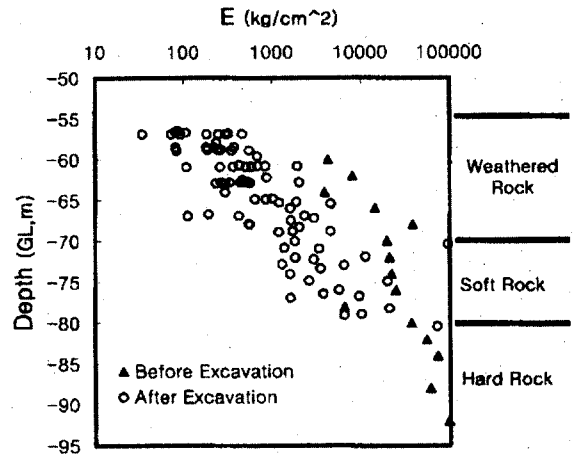


그림 5. 굴착전후 공내재하시험에 의한 탄성계수 비교

크기에 따른 탄성계수를 결정할 수 있는 것으로 알려져 있다.

LNG 지하저장탱크의 건설시, 강성이 큰 지하연속벽 구조체를 사용하므로 굴착에 의한 지반변형은 0.1% 미만일 것으로 판단되므로 미소변형률에서 중간변형률 영역까지 신뢰성있는 지반의 변형특성을 결정하는 것은 매우 중요하다. 현장지반의 변형률크기에 따른 탄성계수를 보다 정확하게 결정하기 위해서는 각각의 실내시험과 현장시험에서의 신뢰성있는 변형률 측정범위, 작용되는 응력의 크기, 시험이 수행되는 하중주파수 차이 등을 고려하고, 각 시험의 결과를 효과적으로 결합하여 사용하여야 한다(김동수 등, 1997).

본연구에서는 GL-3m~70m의 8개 깊이에서 채취된 시료에 대하여 공진주 시험을 실시하였는데, 각 평균유

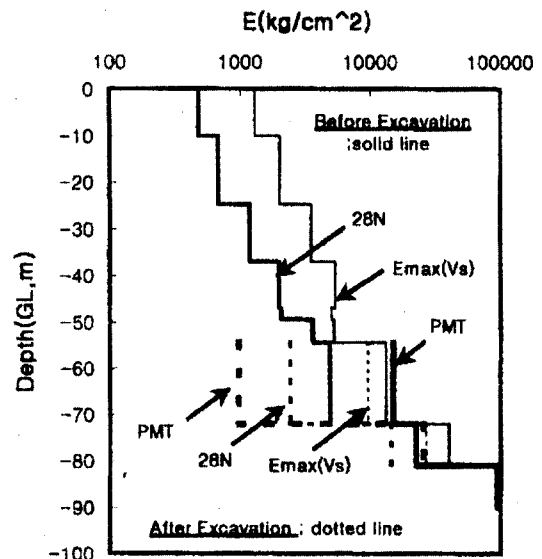


그림 7. 굴착전후 여러 가지 시험방법에 따른 탄성계수 비교

표 4. 굴착전후의 지반물성치 비교

깊이EL,m	지반분류	N-Value		E=28N(kg/cm ²)		Vs(m/s)	
		굴착전	굴착후	굴착전	굴착후	굴착전	굴착후
7.4~-2.6	매립토	17	-	476	-	160	-
-2.6~-16.3	실트질 모래	24	-	672	-	200	-
-16.3~-30.0	실트질 모래	42	-	1176	-	260	-
-30.0~-39.9	실트질 모래	70	-	1960	-	310	-
-39.9~-42.3	점토	73	-	2044	-	310	-
-42.3~-47.3	모래질 자갈	127	-	3556	-	310	-
-47.3~-63.8	풍화암	173	85	4844	2380	450	246
-63.8~-72.1	연암	-	510	-	14280	750	400
-72.1~-100.0	경암	-	-	-	-	1500	-

깊이EL,m	지반분류	E(kg/cm ²)					
		굴착전			굴착후		
		E _{max} *	E(0.01%)**	E(0.1%)**	E _{max} *	E(0.01%)**	E(0.1%)**
7.4~-2.6	매립층	1285	1028	424	-	-	-
-2.6~-16.3	실트질 모래	2008	1687	904	-	-	-
-16.3~-30.0	실트질 모래	3487	3313	1744	-	-	-
-30.0~-39.9	실트질 모래	5347	3965	2230	-	-	-
-39.9~-42.3	점토	4956	3816	2329	-	-	-
-42.3~-47.3	모래질 자갈	5217	4017	2348	-	-	-
-47.3~-63.8	풍화암	12918	10851	6459	3860	3255	1938
-63.8~-72.1	연암	38928	27250	13625	11073	7750	3875
-72.1~-100.0	경암	155714	-	-	-	-	-

* E_{max}는 V_s로부터 구한 값, ** E는 RC로부터 구한 값.

효구속압에서 얻어지는 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 그림 8과 같다.

실내시험인 공진주시험으로 변형률에 따른 전단탄성계수의 감소를 추정할 수 있지만, 시료의 교란에 의한 영향으로 최대전단탄성계수는 현장의 상태와 다른 값을 얻을 수 있다. 따라서, 다운홀 시험결과로 얻어진 최대전단탄성계수를, 공진주시험에서 얻어진 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 사용하여 변형률에 따라 감소시켜 현장지반의 변형률에 따른 전단탄성계수의 변화를

산정하였으며, 식2를 사용하여 전단변형률과 전단탄성계수를 축변형률과 영계수에 대한 관계로 변환하였다.

$$\epsilon = \frac{\gamma}{(1+\nu)}, E = 2(1+\nu)G \quad (2)$$

이때 포와송비(ν)는 0.33으로 가정하였다.

각 층의 탄성계수를 변형률 크기에 따라 결정하고 변형률크기 0.01%, 0.1% 에서의 탄성계수와 SPT시험의 N값으로부터 추정된 정적해석에 사용되는 탄성계수(E=

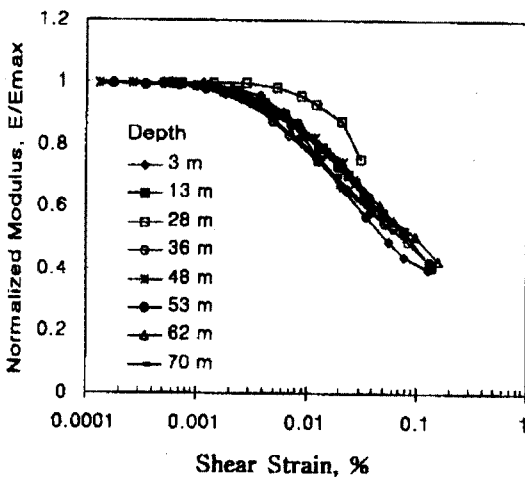


그림 8. 각 지층의 평균유효구속압에서 공진주시험으로 얻은 정규화탄성계수 감소곡선

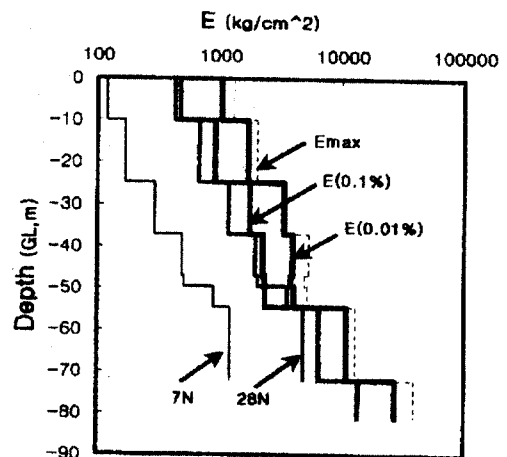


그림 9. SPT시험의 N값으로부터 추정된 정적탄성계수와 PS검층과 RC시험을 결합하여 결정된 변형률크기에 따른 탄성계수 비교

7N), 그리고 일본도로교시방서의 방법에서 제시하는 탄성계수($E=28N$)를 비교하면 그림 9와 같이 나타난다.

$E=7N$ 의 식으로부터 추정된 탄성계수는 PS검층과 RC시험을 결합하여 결정된 탄성계수보다 매우 작게 평가됨을 알 수 있다. 흥미로운 것은 $E=28N$ 으로 측정된 탄성계수가 변형률크기 0.1%에서의 탄성계수와 유사하다는 점이며, 공용하중상태(working load state)의 계측을 통하여 실제 구조물에서 지반이 거동하는 변형률 범위가 0.1-1.0% 이하(Burland,1989)라는 것을 고려하면, SPT시험의 N값으로부터 추정된 탄성계수와 유사한 값을 가진 일본 도로교시방서에서 적용하는 $E=28N$ 이 실제지반이 거동하는 변형률 크기를 적절히 평가하는 식으로서 판단된다. 그렇다고 하더라도 SPT시험의 N값으로부터는 선형의 탄성계수를 추정하게 되는 반면, PS검층과 RC시험을 결합하면 현장지반의 비선형탄성계수의 결정이 가능하다는 장점이 있다.

7. 현장계측수행 및 결과분석

7.1 연속벽체의 수평변위

본 연구에서는 지중연속벽체와 주변지반의 변형을 측정하기 위해 벽체 내에 8개의 계측공과 주변지반에 4개 포함 12개의 계측공에서 경사계 계측을 시행하였다.

경사계에 의해 측정되는 것은 경사각이므로 절대변위를 산정하기 위해서는 기지의 한 변위점이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 신뢰성있는 변형예측을 위하여 상단을 고정점으로 해석하는 방법, 상단을 기준으로 하면서 초기에 상단의 변위가 나타나는 경우 보정을 하는 방법, 그리고 하단을 기준으로 해석하는 방법 등 세가지를 조합하여 계측 결과를 해석하였다(Ng,1998; 김동준,2000).

7.1.1 상단을 고정점으로 해석

원통형 지중연속벽을 사용한 본 현장의 경우에는 벽체의 최대 예상변위량이 2.0cm 정도로서 매우 작고, 원통형 지중연속벽 자체의 hoop 강성으로 인해 변위가 어느정도 억제되기는 하나 지중연속벽 하단부의 토압이 상단부의 토압보다 클 것이기 때문에 상대적으로 하단부의 변형 가능성이 크다. 또한, 계측공 하단부가 지중연속벽 하단부를 관통하여 지반에 충분히 관입되지 않고, 지중연속벽 내부에 설치되었기 때문에 계측공 하단

부를 고정점으로 보기 보다는 상단이 고정된 것으로 간주하고, 8개의 패널에 대한 계측 결과 중 B16 패널에 대한 계측결과를 해석하였다.

7.1.2 상단의 변위를 보정

계측 데이터를 상단을 고정점으로 분석한 결과, 굴착 초기에 하단부에 비해서 상단부가 상대적으로 배면쪽으로 이동한 경우가 일부 계측지점에서 발견되었으며, 굴착 초기 벽체 대부분에서 변위가 없음에도 불구하고 벽체 하단부가 이동하였다는 것은 생각하기 어려우므로, 이 경우는 벽체 상단이 그만큼 이동한 것으로 간주하여 보정을 실시하였고 그 예를 그림 10에 표시하였다. 보정은 굴착초기에 벽체 상부의 변위가 명확하게 나타나는 경우에 실시하였으며, 이처럼 상단변위를 보정하여 해석한 계측지점은 B3, B10, B13, B26 등 4개 패널이며 각 패널에 대한 보정량은 각각 0.414cm, 0.139cm, 0.169cm, 0.336cm(모두 굴착배면측 방향)이다.

7.1.3 하단고정

경사계 계측 결과를 상단기준으로 해석한 경우 벽체의 하단이 상단보다 배면쪽으로 밀려난 것으로 나타나는 경우가 B6, B19, B23 패널에서 발생하였다. 지중연속벽에 대한 하중은 배면측에서 굴착측으로 토압과 수압이 작용하고 일반적으로 상부보다는 하부로 갈수록 그 크기가 증가한다고 볼 수 있다. 그런데 본현장 조건

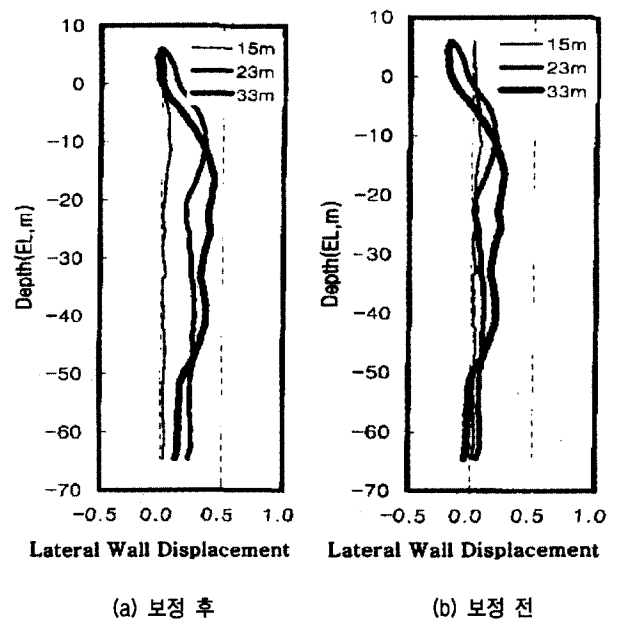


그림 10. 경사계 데이터 상단보정의 예(B13 패널)

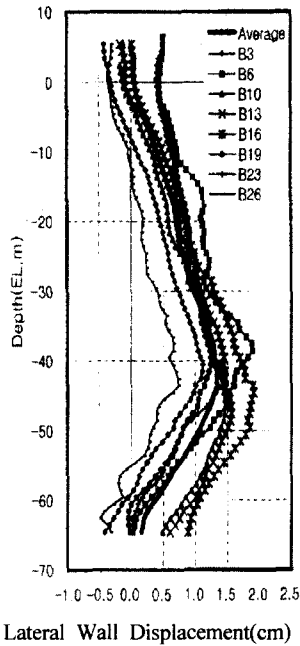


그림 11. 최종굴착단계 각 패널의 수평방향 변형량 및 평균값

과 같은 상황에서는 이처럼 하단이 배면측으로 밀려나기는 어렵다고 판단되므로, 이 경우에는 하단을 고정점으로 해석하여 상단이 굴착측으로 이동한 것으로 해석하였다. 그림 11은 앞에서 설명한 방법을 사용하여 정리한 최종굴착단계의 계측결과와 전체결과와의 평균값을 나타낸 것이다. 평균계측결과의 최대변위량은 1.34cm이며 위치는 EL-43m 인 것으로 나타났다.

7.1.4 계측결과의 타당성 검토

본현장의 지중연속벽은 원통형이기 때문에 직접 변위를 측정하지 않더라도 벽체의 원주방향 응력값을 측정하여 변위를 산출해 낼 수 있다. 철근의 경우에는 상대적으로 탄성계수값이 일정하고, 시간에 따른 변화가 없는 것으로 간주할 수 있기 때문에 응력값을 사용하여 벽체 변위를 산출해 보았다. 철근응력계는 EL -11m, -29.5m, -40.0 m, -51.0m 에 각 깊이당 4~8개의 계측기가 설치되었으며 같은 깊이에서는 측정값의 편차가 적어 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

원통형태의 벽체의 원주방향 응력(σ_{st})은 thin-wall theory를 이용하여 다음 식 3과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{st} = E\varepsilon = E \cdot \frac{\delta}{R} \quad (3)$$

여기서,

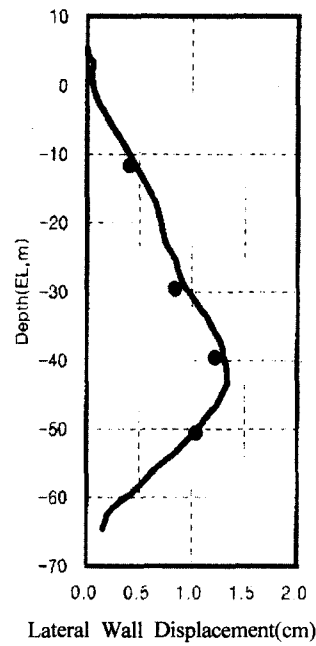


그림 12. 경사계 계측값의 평균과 철근응력계를 사용하여 계산한 변위의 비교

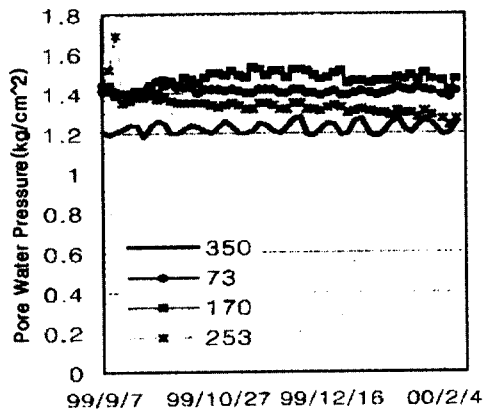
- σ_{st} = 원주방향 철근 응력
- E = 철근의 탄성계수
- ε = 철근 변형률
- δ = 벽체 변위량
- R = 벽체의 반지름이다.

위 식을 사용하여 철근응력계가 설치된 지점에서의 변위를 계산하여 이들과 경사계 계측값의 평균을 비교한 결과를 그림 12에 나타내었다. 그 결과 철근응력에 의한 변위와 경사계 계측에 의한 변위는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나 변위 계측이 신뢰성을 갖는다고 볼 수 있다.

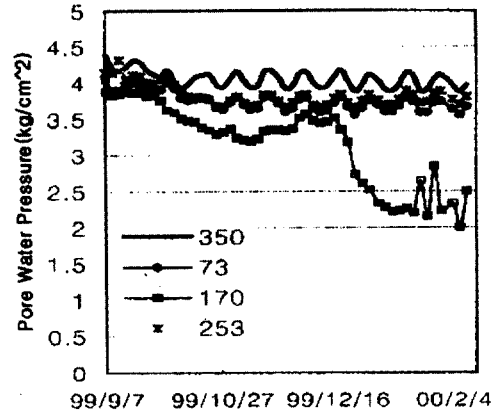
7.2 간극수압의 변화

간극수압은 3개 패널에서 각 패널당 벽체 배면 3곳, 굴착면 1곳에서 계측되었다. 간극수압계측을 실시한 패널은 B6(73°), B13(170°), B26(350°)이며, 각 패널에서 벽체 배면의 EL -11m, -45.3m, -63.0m 지점과 굴착면의 EL-63m지점에서 계측이 수행되었다.

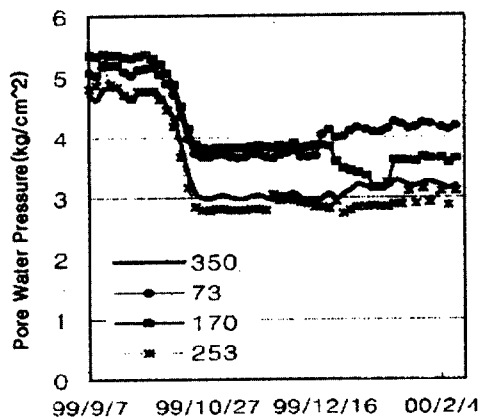
간극수압계 계측 결과를 그림 13에 나타내었다. 간극수압계 계측데이터는 같은 깊이에서 편차가 크지는 않지만 굴착이 시작되기 전의 상태에서 EL-45.3m와 -63m 지점의 수압이 정수압보다 작게 나타났다.



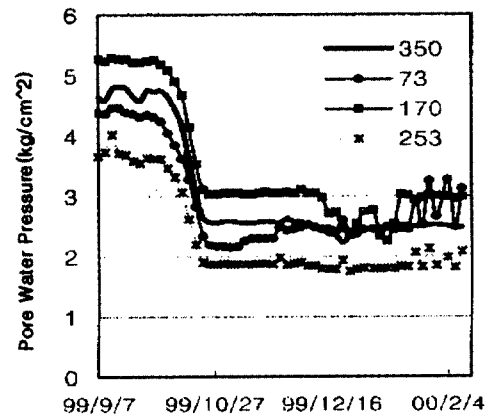
(a) EL -11m, 배면측



(b) EL -45.3m, 배면측



(c) EL -63.0m, 배면측



(d) EL -63.0m, 굴착면측

그림 13. 간극수압 계측결과(보정전)

EL-39.9~-42.3m에 점토층이 있어 그 아래층이 상부 층과 다르게 측정될 수 있으나 점토층이 얇고 굴착전 오래동안 수위가 일정하게 유지된 점으로 보아, 굴착이 시작되지 않았을 때를 정수압 상태로 가정하여 굴착초기의 측정값이 정수압과 일치되는 비율로 보정을 실시하였다.

간극수압계 계측결과에서 주목할 것은 그림 13(c),(d)에서 나타나는 것처럼 EL-63m 지점의 수압이 10월 7일 부근에서 급격히 하락하기 시작해 굴착 완료시까지 계속 감소하다가 굴착이 완료된 후에는 더 이상 감소하지 않고 일정값을 유지한다는 점이다. 이때는 굴착깊이가 EL-35m 근처일때 인데, 지질주상도를 검토해보면 점토층이 EL-30m~43m 사이에 간헐적으로 분포하고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 수압의 급격한 변화는 점토층이 굴착되면서 굴착측에서 배수가 급격히 증가한데 그 원인이 있는 것으로 보인다.

같은 깊이에서의 각 패널 측정값에 대해 평균값을 구하여 시공단계별 간극수압변화를 비교하면 그림 14와 같다. 상부(EL-11m)에서의 수압은 굴착전후에 거의 변화가 없으나 EL-63m 지점에서는 시공단계에 따라 변화가 크게 나타난다. 이것은 굴착으로 인해 굴착면측의 점토층이 제거된 이후에 침투수가 급격히 증가한 데 그 원인이 있는 것으로 생각되며, 굴착 배면측에서는 점토층을 경계로 아래층에서는 물의 흐름이 발생하는 반면

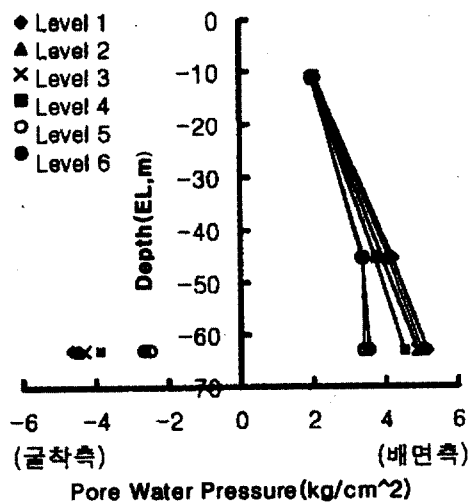


그림 14. 시공단계별 간극수압 변화

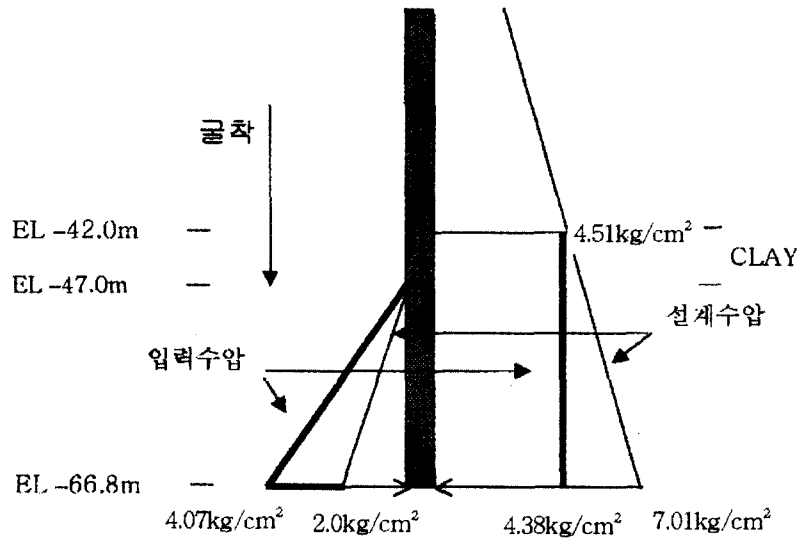


그림 15. 침투수를 고려하여 산정한 수압분포

위층에서는 점토층에서 지하수의 흐름이 차단되어 정수압 상태를 유지하는 것으로 볼 수 있다.

앞절에서의 계측결과에 대한 검토를 토대로 지하수 위부터 점토층까지는 정수압이 작용하는 것으로 생각하였고, 점토층부터 벽체 하부까지는 보정된 수압 계측값과 침투수압을 고려한 유선망을 통한 압력수두 계산을 통하여 간극수압을 산정하였다.

점토층 하부에 해당하는 EL-45.3m의 계측결과가 굴착 완료후에 4.38kg/cm²의 결과를 보이므로 이것을 기준으로 유선망을 통한 침투수압을 계산한 결과 벽체 하단부 굴착배면측에서는 4.24kg/cm², 벽체 하단부 굴착면측에서는 4.07kg/cm²을 나타내고 점토층과 벽체하부, 벽체하부와 굴착저면부 사이의 수압분포는 직선분포를 하는 것으로 나타났다. 이중 굴착면측의 수압은 벽체 하단부 굴착면측으로부터 굴착저면부까지 직선적으로 감소하는 분포를 하는것으로 모델링 하였고, 굴착배면측의 수압은 단순화하여 4.38kg/cm²의 등분포하중을 갖는 것으로 모델링 하였다.

이렇게 계산한 수압과 EL-63m 지점의 굴착면측의 수압(보정후)을 비교해보면 계산값이 3.28kg/cm²이고 계측값은 3.53kg/cm²으로 나타나 차이가 크지 않으므로 위와 같이 산정한 수압분포가 타당하다고 볼 수 있으며 그 결과를 그림 15에 나타내었다.

설계시에는 이러한 점토층의 불투수층으로서의 역할을 고려하지 못하고 설계수압을 정수압으로 고려하였고 연암에 근입된 지중연속벽이 투수현상을 억제할 것으로 판단하였다. 계측결과를 바탕으로 판단하여 볼 때

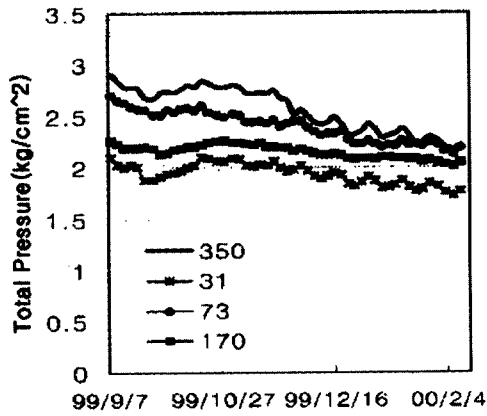
지반조사에서 점토층의 역할, 연암 및 풍화암의 투수성의 정확한 예측이 실제거동을 평가하는데 중요한 역할을 함을 알 수 있다. 그림 15에서 보듯이 이러한 점토층의 역할을 고려하여 좀더 정확한 수압분포를 동반논문의 수치해석에 이용하였다.

7.3 벽체에 작용하는 토압

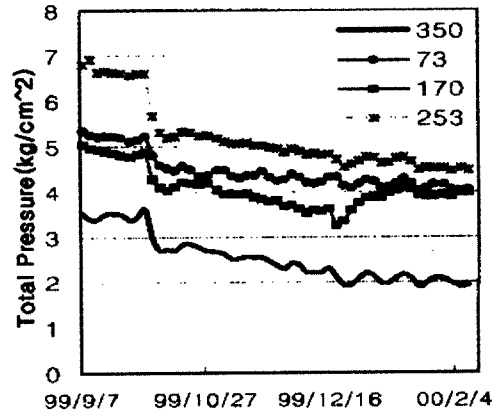
토압계는 EL-11m, -29.5m, -40m, -45.3m, -51m 깊이에서 각 깊이당 2~8개 패널에서 굴착배면측의 전응력(토압+수압)을 계측하였고, EL-51m 지점에서 굴착면측의 전응력 또한 계측하였다.

토압+수압 계측결과는 같은 깊이에서도 패널별 계측값의 편차가 상대적으로 크며, 굴착이 시작되지 않은 단계에서도 정수압보다 작은 값을 나타내었다. 수압계 계측결과가 정수압을 사용하여 보정이 가능한 반면 토압+수압 계측결과는 수평토압계수를 정확히 추정하는 것이 상대적으로 어려우므로 수치해석에 사용될 입력치 산정에 상당한 주의를 요하는 것으로 판단된다. 대표적인 계측결과는 그림 16과 같다.

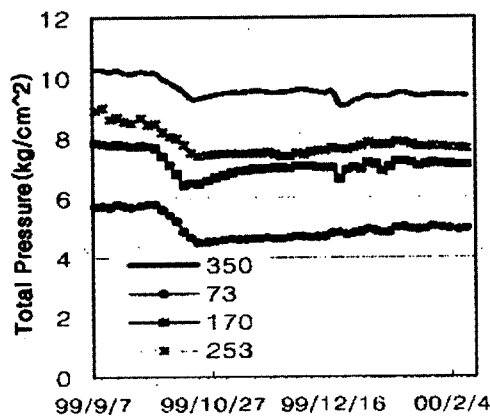
토압계 계측결과는 모든 깊이에 있어서 시공단계에 따라서 감소하는 경향을 나타내었다. 그중에서도 특히 EL-51m 지점의 굴착면측의 측정값은 그림 16(d)에서 볼 수 있는 것처럼 급격히 감소하는 경향을 나타내었는데, 같은 깊이에서의 굴착배면측의 전응력이 변화가 크지 않은 것을 생각한다면 점토층 아래에서 지중연속벽 배면측에서 굴착면측으로 일어나고 있는 침투수압에



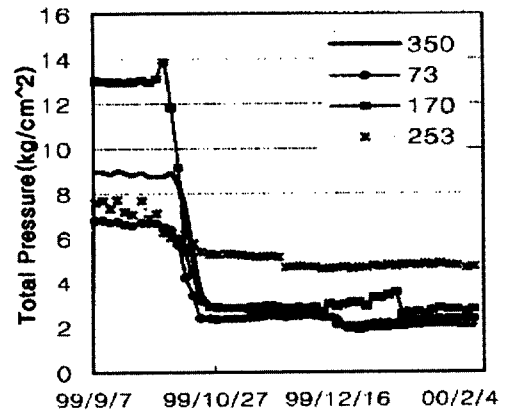
(a) EL -11.0m, 배면측



(b) EL -29.5m, 배면측



(c) EL -51.0m, 배면측



(d) EL -51.3m, 굴착면측

그림 16. 토압계 측정결과

의해 배면측에서는 유효응력의 증가가 일어나고, 굴착면측에서는 유효응력의 감소가 일어남에 의해 서로 큰 차이를 보이는 것으로 생각된다.

앞에서 설명한 수평토압계수의 불확실성, 측압계측의 한계 등을 고려하여 토압계 측정결과에 대한 직접적인 보정을 하지 않고, 보정된 간극수압과 상재하중을 기초로 하여 토압을 계산하였다. 지표부터 점토층까지는 침투수의 흐름이 없다고 볼 수 있으므로 수중단위중량과 수평토압계수를 사용하여 해석입력 토압을 산정하였다. 점토층 아래에서는 침투로 인한 굴착배면측에서의 유효응력 증가, 굴착면측에서의 유효응력의 감소 등을 고려하여 연직방향 토압을 산정하였다. 연직방향 응력의 산정후 수평토압계수를 적용하여 벽체에 작용하는 수평토압을 구하였다.

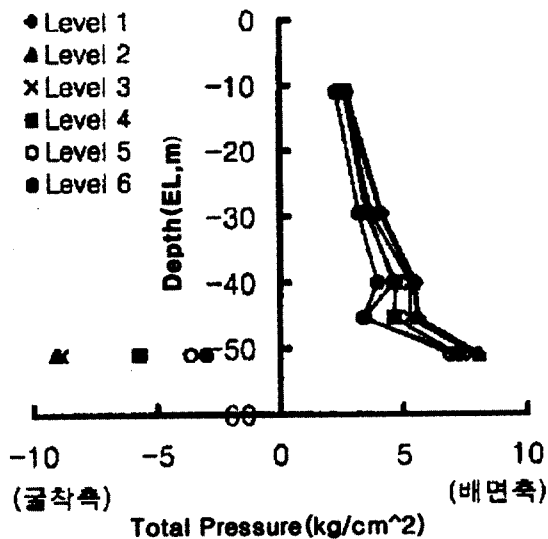


그림 17. 시공단계별 total lateral pressure

8. 결론

해성토층(풍화토 및 모래질 층적토가 암반위에 쌓인) 위에 준설매립된 국내 해안매립지역에서 원형의 대신도 굴착공사로 인하여 발생하는 지중연속벽체의 수평변위에 대한 현장측정을 중심으로 연구를 수행하여 다

음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 표준관입시험, 공내재하시험, 다운홀시험 등의 방법을 이용하여 굴착전후의 지반탄성계수값을 비교한 결과, 굴착후에는 굴착에 따른 구속압 감소효과 및 투수로 인하여 탄성 계수가 상당히 감소되었다. 따라서 해석을 위한 지반탄성계수 결정시 구속압 감소 효과 등을 적절히 고려하여야 한다.
- (2) 다운홀시험과 공진주시험 결과를 결합하여 변형률 크기에 따른 지반탄성계수를 산정한 결과, $E=28N$ 으로 예측한 값은 변형률크기 0.1%의 탄성계수와 유사하였다. 공용하중상태의 계측을 통하여 실제구조물에서 지반이 거동하는 변형률 범위가 0.1~1.0% 이하라는 점을 고려하면, N 값으로부터 추정되는 탄성계수는 도로교시방서에서 적용하는 $E=28N$ 이 실제지반이 거동하는 변형률 크기를 적절히 반영하는 것으로 판단된다.
- (3) 지중연속벽 상·하단에서의 고정과 변위보정을 고려한 수평변위에 대한 계측데이터 해석의 평균값은 원주방향 철근응력을 이용한 해석결과와 거의 일치된 결과(최대 변위량 1.34cm, 위치 EL-43m)를 보여, 경사계와 철근응력계를 이용한 수평변위 계측의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

- (4) 벽체에 작용하는 수압분포를 계측한 결과 깊이 EL-40m 부근에 있는 얇은 점토층의 굴착이 굴착면측으로 투수를 유발시켜 수압분포의 변화를 가져왔으며, 설계시 연암층에 근입된 지중연속벽의 투수 억제효과를 가정하였으나 풍화암과 연암층의 투수계수가 설계치보다 커 예상보다 많은 투수가 발생하였다.

참 고 문 헌

1. 김동수, 권기철, 정순용, 박재영(1997), "실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형특성 평가", 한국지반공학회, 제13권, 제5호, pp.89-100.
2. (주)삼성물산(1998), 인천 인수기지 2단계 2차 공사 상세설계 지반조사 보고서, 한국가스공사, 서울.
3. 한국과학기술원(1998), 표면파기법을 이용한 사질토지반 개량효과 평가시스템 개발, 건설교통부, 서울.
4. 김동준(2000), "지반의 미소변형을 비선형성을 고려한 굴착시 지반거동 해석법 연구", 한국과학기술원 석사논문.
5. Burland, J.B.(1989), "Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture: 'Small is Beautiful'-the Stiffness of Soils at Small Strains" Canadian Geo-tech. Journal, 26. pp.499-516.
6. Ng, C. W. W. (1998), "Observed Performance of Multipropped Excavation in Stiff Clay", ASCE, Vol.124, No.9, pp.889-905.
7. Samsung Corporation(1999), Subsoil Investigation Report, Korea Gas Corporation, Seoul.

(접수일자 2001. 1. 8)