

앵카지지 굴착흙막이벽에 작용하는 측방토압

Lateral Pressure on Anchored Excavation Retention walls

홍 원 표*1
Hong, Won - Pyo
이 기 준*2
Lee, Ki - Joon

Abstract

Deep excavation increases utility of underground spaces for high buildings, subways etc. To excavate vertically the underground, safe earth retaining walls and supporting systems should be prepared. Recently anchors have been used to support the excavation wall. The anchored excavation has some advantages to provide working space for underground construction.

In this paper the prestressed anchor loads were measured by load cells which attached to the anchors to support the excavation walls at eight construction fields, where underground deep excavation was performed on cohesionless soils.

The lateral pressures on the retaining walls, which are estimated from the measured anchor forces, shows a trapezoidal distribution that the pressure increases linearly with depth from the ground surface to 30% of the excavation depth, and then keeps constant value regardless of the stiffness of the walls. The maximum lateral pressure was same to 63% of the Rankine active earth pressure or 17% of the vertical overburden pressure at the final depth.

The investigation of the measured lateral pressure on the anchored excavation walls shows that empirical earth pressure diagram presented by Terzaghi - Peck and Tschebotarioff could be applied with some modifications to determine anchor loads for the anchored excavation in cohesionless soils.

요 지

고층건물이나 지하철등의 건설시 지하굴착을 깊게 실시하므로써 지하공간의 활용도를 증대시킬 수 있다. 이 경우 지하를 연직으로 굴착하기 위하여는 흙막이벽과 지지구조를 안전하게 설계 시공하여야 한다. 최근에는 지하굴착시 지하 작업공간 확보등의 이점 때문에 흙막이벽 지지 구조로

*1 정희원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, (주) 호산엔지니어링 토질부 과장

앵카를 많이 사용하는 경향이 있다.

본 논문에서는 사질토지반의 지하굴착을 실시한 8개 굴착현장에서 굴착을 위한 흙막이벽을 지지하기 위하여 사용된 앵카에 하중계를 부착하여 앵카의 축력을 측정하였다.

측정된 앵카축력으로부터 환산된 측방토압은 흙막이벽체의 강성에 관계없이 지표면으로부터 굴착깊이의 30%에 해당되는 깊이까지는 선형적으로 증가하다가 그 깊이 아래부터는 일정분포를 보이는 사다리꼴모양의 분포를 보였다. 이 일정토압 분포부분의 토압은 평균적으로 최종굴착 깊이에서의 Rankine 주동토압의 63%에 해당하거나 연직상쇄압의 17%에 해당하였다. 이 연구 결과 사질토지반의 앵카지지 흙막이벽의 앵카축력설계에 적용하기 위한 측방토압으로는 Terzaghi - Peck이나 Tschobotarioff의 경험적분포를 다소 수정하여 적용할 수 있음을 알았다.

1. 서 론

지하공간의 활용도를 증대시키기 위하여 대형건축물이나 지하철도의 건설시 대규모 지하굴착작업이 수반되는 공사가 급증하고 있다. 지반을 깊게 굴착할 경우 굴착현장에 인접한 지반은 상당한 영향을 받게되어 시공중에 지반변형이나 붕괴사고가 종종 발생하고 있다. 이러한 사고는 재산상에 막대한 피해를 가져오는 물론이고 심한 경우 인명피해가 발생하는 대형사고로 나타나기도 한다. 최근 이러한 사고를 사전에 예방하기 위한 안전대책으로 흙막이 구조물의 안전시공을 현장계측을 통하여 관리하려는 경향이 늘어나고 있다.

종래 지하굴착현장에서는 엄지말뚝공법에 의한 흙막이벽이 많이 사용되었으며 엄지말뚝 흙막이벽은 버팀보(strut)에 의하여 지지되는 구조가 많았다. 이러한 형태의 흙막이벽에 작용하는 측방토압 분포도는 Terzaghi - Peck⁽¹⁰⁾이나 Tschobotarioff⁽¹¹⁾⁽¹²⁾에 의하여 제안된 경험식이 많이 사용되었다.⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁷⁾ 특히 Peck은 제7회 토질 및 기초 국제회의의 State of the Art 보고서에서 당시까지의 이 분야에 관한 연구를 잘 정리하여 제시하므로써 각종굴착현장에서 많은 참고로 삼아 오고 있다.⁽⁸⁾ 그 후에도 현장계측⁽⁶⁾ 및 수치해석⁽¹⁾⁽³⁾에 의하여 이 문제를 해결하려는 연구도 많이 실시되어 오고 있다.

최근에는 지하굴착의 심도도 깊어지고 도심지에서의 인접건물에의 영향도 되도록 억제시켜야 하며 지하수에 대한 차수대책을 마련하여야 하는 등 여러가지 어려운 제약이 제기됨에 따라 흙막이구조물도 다양하여졌고⁽⁴⁾⁽¹⁵⁾ 공압도 발달하게 되었다.⁽⁶⁾⁽¹³⁾ 그중에서도 특히 굴착구간에서의 작업능률을 향상시키기 위하여 앵카를 사용하는 경우가 많이 늘어났다. 즉 앵카로 흙막이벽을 지지시키므로써 버팀보로 지지하는 경우보다 작업공간을 넓게 확보할 수 있게 되었다. 그러나 현재 버팀보지지 흙막이벽을 대상으로 제시되었던 측방토압분포가 앵카지지 흙막이벽에도 적용될 수 있는지 검토됨이 없이 설계에 Terzaghi - Peck 및 Tschobotarioff의 경험적 분포가 그대로 적용되고 있는 실정이다.

여기에 본 연구에서는 앵카지지 흙막이벽에 설치된 하중계(load cell)로 흙막이벽지지 지반앵카에 작용하는 축력을 측정하고 이 측정치로부터 앵카지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압분포를 분석하여 금후의 설계에 그 결과를 활용하고자 한다.

본 연구를 수행하기 위하여 앵카지지 흙막이벽 방식에 의해서 지하굴토공사가 실시된 국내 8개 현장⁽⁴⁾에서 흙막이벽지지 지반앵카에 하중계를 부착하고 앵카축력을 측정하였다. 본 연구에 있어서 흙막이벽체는 벽체의 강성에 따라 강성벽체와 연성벽체의 두가지로 나누어 구분 하였으며 이들 각 현장에서 측정된 하중계

의 앵카축력을 측방토압으로 환산하여 국내의 지반특성에 부합되는 측방토압분포를 조사분석 하는데 중점을 두었다.

2. 측방토압의 실측현장

2.1 현장주변상황

그림 1은 각현장의 주변상황 및 계측기기의 설치위치에 대한 개략도를 나타내고 있다. 우선 제 1굴착 현장의 위치 및 주변상황은 그림 1(a)에 도시된 바와 같다. 신축예정인 건물은 지하 6층 지상 19층의 건물로 굴착면적은 56.8×53.0m이고 최종굴착깊이는 31.6m 이다. 본

현장의 북측과 동측은 각각 폭이 25.0m와 10.0m인 도로에 접하고 있으며 서측은 공지로 되어 있다. 또한 남측의 일부는 2층가옥에 접하고 있으며 나머지는 공지로 되어 있다.

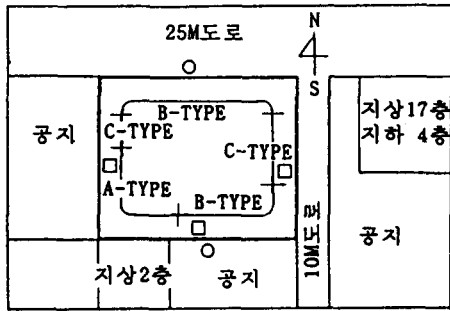
나머지 7개현장의 신축건물규모, 지하굴착 규모 및 현장주변상황을 정리하면 표 1과 같다. 이표로 부터 알 수 있는 바와 같이 이들 8개 현장의 굴착심도는 19m에서 32.8m까지이며, 굴착면적은 2,040m²에서 8,512m²까지의 굴착규모를 가지는 현장이다.

또한 이들현장의 굴착면적폭은 33m에서 80m까지로 되어 있으며 길이와 폭의 비(L/B)는 1.07~2.36이고 깊이와 폭의 비(D/B)는 0.25~0.97로 되어 있다.

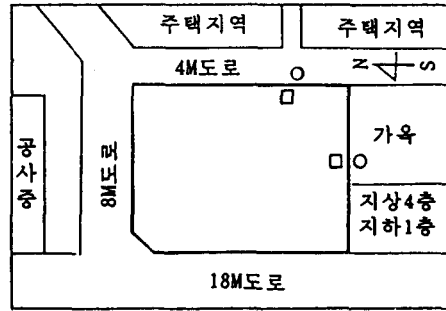
표 1. 각 현장의 지하굴착규모와 주변상황

현 장	지하굴착규모 ^{주)}	주 변 상 황			
		동 측	서 측	남 측	북 측
제 1 현장	지하 6층 57×53m 31.6m	30m 떨어져 지하 4층 지상 17층 건물과 공지	공지	지하 2층 건물과 공지	25m 도로
제 2 현장	지하 4층 88 × 76m 20.3	5m 도로를 경계로 주거지역이 위치	18m 도로	지하 1층, 지상 4층의건물이 서측 도로와 접하고, 나머지는 공지	8m 도로와 접하고 30m 거리에 신축 건물
제 3 현장	지하 5층 70 × 57m 27.15m	30m 도로	10m 도로와 접하여 단층주택지역	8m 도로	10m 도로를 경계로 지상 2층 건물과 공지
제 4 현장	지하 7층 78 × 33m 32.0m	지하 3층 지상 9층의 건물과 공지	25m 도로	20m 도로	8m 도로와 접하여 공지
제 5 현장	지하 4층 112 × 76m 19.0m	10m 도로와 접하여 시장 상가건물	8m 도로를 경계로 상가지역	8m 도로와 접해서 주택과 상가지역	8m 도로를 경계로 상가지역
제 6 현장	지하 5층 90 × 80m 23.0m	6m 도로를 경계로 주택과 상가건물	10m 떨어져 단층 한옥의 주택지역	5m 떨어져 단층 한옥과 공지	2m의 골목길을 경계로 단층한옥의 주택지역
제 7 현장	지하 6층 60 × 34m 26.3m	50m 떨어져 철도	도로와 접하며 주택가와 30m 떨어져 5층 아파트	공 지	공 지
제 8 현장	지하 8층 65 × 41m 32.8m	30m 떨어져 신축 건물	30m 도로	공 지	지하 3층, 지상 16층 대형건물과 주차장

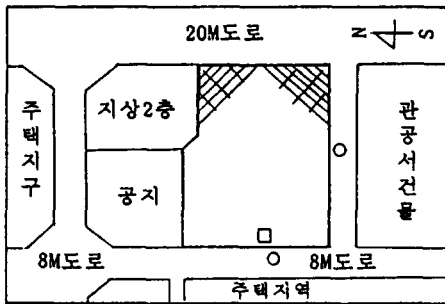
주) 굴착규모는 지하층수, 지하굴착면적 및 최종굴착깊이의 순이다.



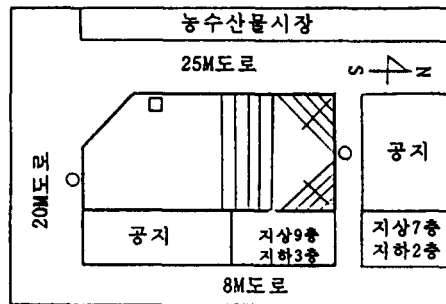
(a) 제1현장



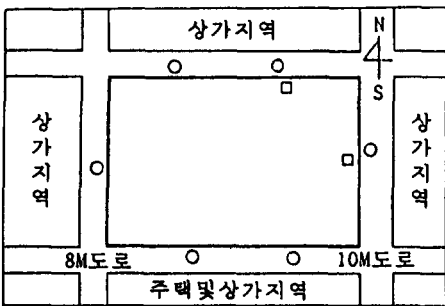
(b) 제2현장



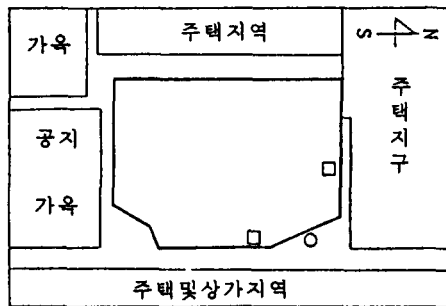
(c) 제3현장



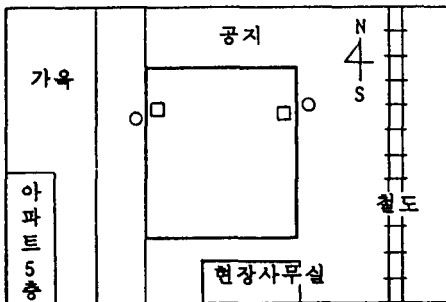
(d) 제4현장



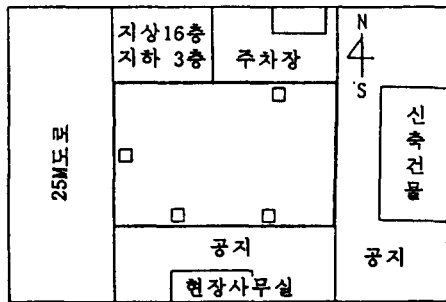
(e) 제5현장



(f) 제6현장



(g) 제7현장



(h) 제8현장

□ 영카축력축정하중계 ○ 지하수위계

그림 1. 각현장 주변상황 및 계측기 설치위치 개략도

2.2 지반특성

각 현장의 대표적 지층구성은 그림 2와 표 2에 정리되어 있는 바와 같이 표토층, 퇴적토층, 풍화잔류토층, 풍화암층, 연암층 및 경암층의 순으로 구성되어 있다. 표토층은 주로 실트질모래 혹은 자갈로 구성되어 있으며 제 3현장과 제 5현장에는 쓰레기가 일부 섞여 있었다. 제 1현장, 제 4현장, 제 5현장 및 제 6현장은 점토, 모래, 자갈등의 층적층이 풍화대위에 존재하고 있었다. 풍화대는 전 현장에 분포되어 있으며 특히 제 3현장, 제 5현장, 제 7현장 및 제 8현장은 풍화도가 심한 풍화잔적토가 상당한 두께로 존재하고 있었다. 풍화잔적토 하부에는 풍화암이 분포되어 있었으며 그 하부에 연암으로 구분되는 암층이 분포 되어 있었다. 풍화암까지의 토사층은 제 4현장과 제 5현장의 일부를 제외하고는 대부분이 사질토로 구분될 수 있을 것이다.

이 표에 의하면 본 연구 대상 현장에서의 지

반굴착작업은 제 5현장을 제외하고는 상부에서 토사층의 굴착이 실시되고 하부에서는 암반층의 굴착이 실시되는 현장이다. 제 5현장은 지하굴착 깊이가 19.0m 로 풍화잔류토층까지 굴착하게 되어 굴착구간이 전부 토사층에서 실시된 현장이다.

2.3 흙막이 구조물

각 현장의 흙막이벽형식과 지지구조인 앵카의 설치상태는 그림 2 및 표 3에 정리되어 있는 바와 같다. 이들 벽체는 강성벽체와 연성벽체의 두가지로 구분될 수 있다.

제 1현장과 제 8현장은 구간별로 흙막이벽의 구조를 다르게 하여 그림 2(a) 및 (h)에서 보는 바와 같이 제 1현장은 3가지, 제 8현장은 2가지 형태의 흙막이 구조를 채택하였다. 제 1현장과 제 8현장의 일부구간과 제 4현장 및 제 5현장에서는 철근콘크리트 지중연속벽을 설치 하므로써 강성벽체로 흙막이벽을 시공하였으

표 2. 각 현장의 대표적 지층구성

현장 지층	제 1 현장	제 2 현장	제 3 현장	제 4 현장	제 5 현장	제 6 현장	제 7 현장	제 8 현장
표토	실트질자갈*1 (3.5~5.7)*2	실트질모래 (0.8~7.3)	실트질모래 (3.5)	실트질모래 (3.0)	실트질모래 (3.0)	자갈, 실트질 모래 (1.0)	-	자갈, 실트질 모래 (4.5)
퇴적토	점토 (1.0) 모래(4.0~5.0)	-	-	점토(7.0) 자갈(2.0)	점토 (7.0) 실트질모래 (3.0) 자갈(2.0)	모래 (3.0~0.7)	-	-
풍화잔류토	-	-	(14.0)	-	지표면에서 15.0m 길이 이하	-	(10.0~15.0)	(8.0)
풍화암	(3.0~9.0)	(1.2~8.7)	(2.5)	(9.0)	-	(10.0~14.0)	(6.0~13.0)	지표면에서 12.5m이하
연 암	(8.0)	지표면에서 7~12.0m 길이 이하	(3.5)	(6.0)	-	(10.0)	(2.0~5.0)	-
지하수위	G.L-6.0m	G.L-6.5m	G.L-4.5m	-	G.L-2.5m	-	-	-

*1 : 토질분류 *2 : 층의 두께 (단위 m)

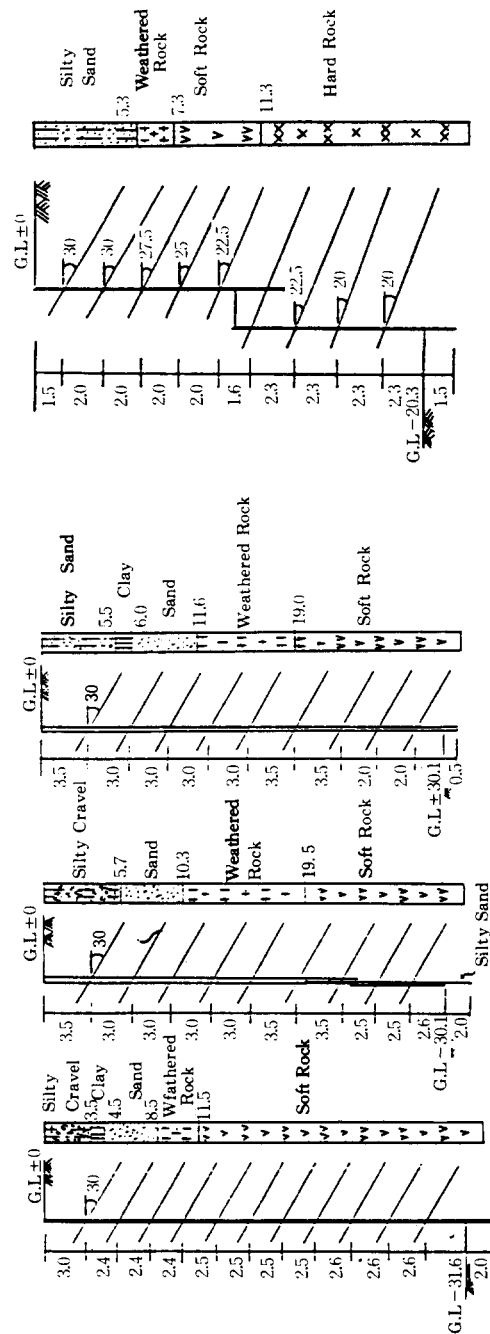
며 나머지 현장에서는 엄지말뚝과 나무널판을 사용한 연성벽체로 흙막이벽을 구성하였다. 지중연속벽체의 두께는 800mm로 하였으며 엄지말뚝은 제1현장의 일부구간에 H-250×250×9×14를 사용한 경우이외는 H-300×200×9×14강재를 사용하였다. 연성벽체를 사용한 경우 배면 지하수의 차수공으로 흙막이벽 배면에 제3현장에서는 S.C.W (soil cement wall)을 사용한 이외에는 L.W 그라우팅을 주로 사용하였다. 그러나 제2현장에서는 아무런 차수공도 실시하지 않았다. 또한 제2현장과 제8현장의 A-TYPE에서는 중간에 소단을 두고 흙막이벽을 시공하였다. 또한 제1현장 B TYPE과 제4현장에서는 일부구간에 Shear pin을 시공하였다. 특히 제4현장에서는 Shear pin 구간에 Rock bolt와 Shotcrete 시공도 실시하였다.

2.4 계측기기

계측기기도는 앵카축력측정 하중계 및 지하수위계를 그림1에 도시된 위치에 설치하였다. 이들 8개 현장에 하중계를 설치한 단면수는 그림1에 도시된 바와 같이 17개소이나 이중 본 연구에 채택된 하중계 설치단면은 13개소이다. 즉 제1현장이 3개단면과 제 2, 3, 4, 7현장에 각 1개단면씩을 제 5, 6, 8현장은 각 2개 단면씩으로 되어 있다.

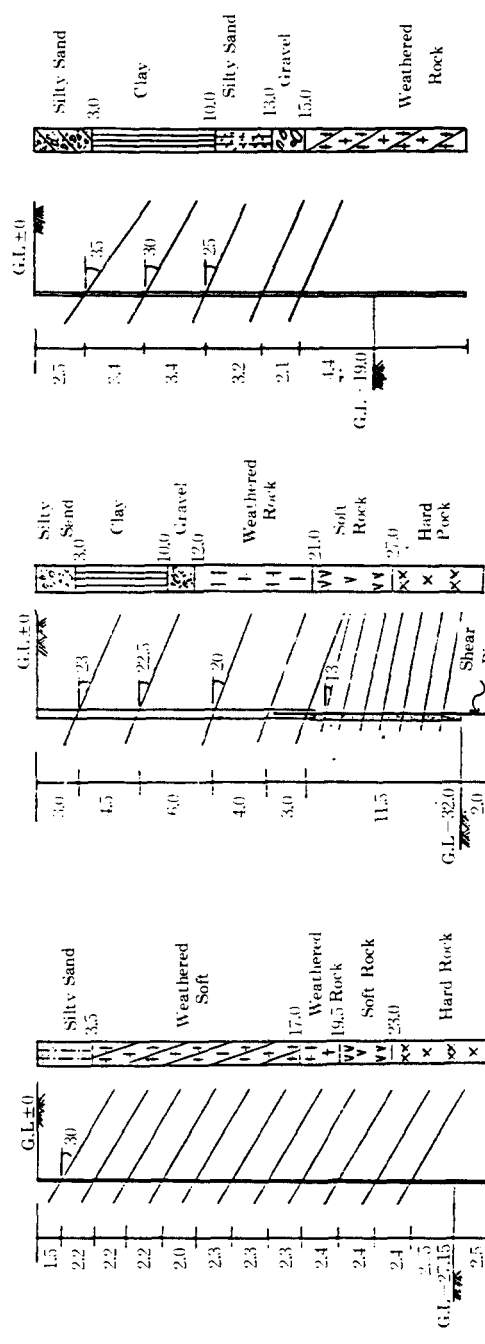
하중계 (load cell)는 이들 14개소 위치의 흙막이벽 단면에 설치된 앵카에 부착시켰으며 하중계가 부착된 앵카의 단 위치는 표3에 정리된 바와 같다.

한편 지하수위 측정용 천공은 그림1에서 보는 바와 같이 제8현장을 제외한 7개 현장의 17개소에 설치하였다. 즉 제1현장에서 제4현장 및 제7현장은 각각 2개소씩, 제5현장에는 6개소, 제6현장에는 1개소 설치하였다. 지하수위는 이 측정용 구멍내에 Piezometer를 삽입하여 측정한다.



(b) 제2 현장

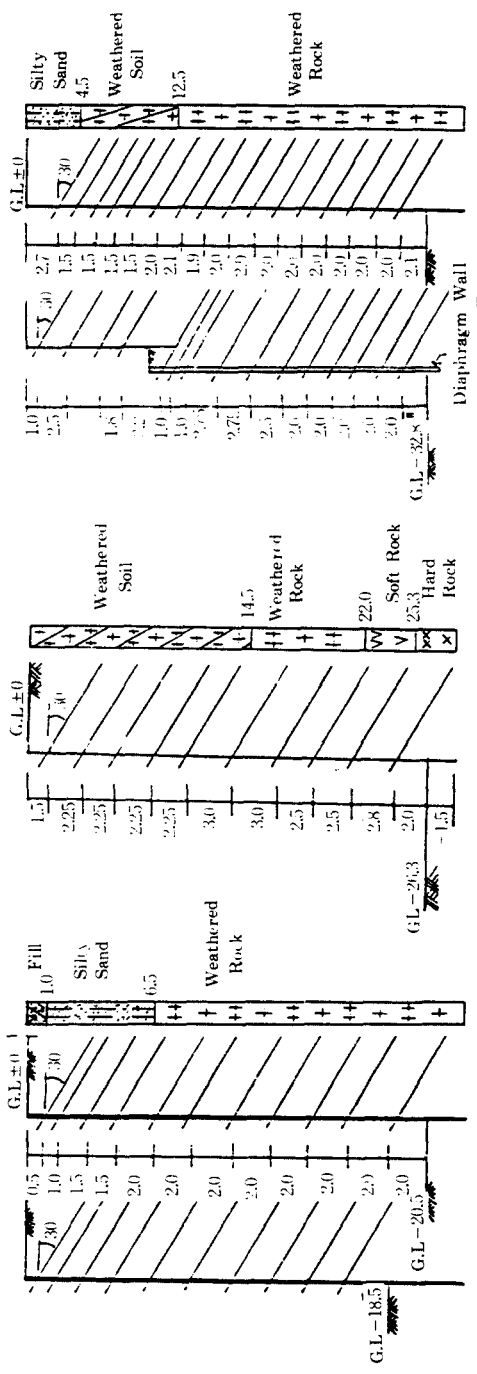
(a) 제1 현장



(e) 제 5 현장

(d) 제 4 현장

(c) 제 3 현장



A-Type B-Type
(h) 제 8 현장

(g) 제 7 현장

A-Type B-Type
(f) 제 6 현장

그림 2. 각 현장의 앵카설치도 및 토질주상도

표3. 각 현장의 흙막이구조와 계측기설치위치

현 장	흙막이벽형식	어스앵카설치상태	하중계설치위치	
1	A	H-말뚝 (250×250×9×14) 를 1.8m 간격으로 최종굴토심도보다 2.0m 더 근입. 배면을 2열의 L.W 그라우팅 실시. 흙막이판 사용	연직간격 A : 2.4~2.8m B : 2.5~3.5m C : 2.8~3.5m	서측벽의 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 단 앵카에 설치
	B	지중연속벽을 24.0m 까지 설치. 그 하부는 Underpinning 으로 Shear pin (H-250×250×9×14) 을 2.0m 수평간격으로 최종굴토깊이에 2.0m 더 근입시킴	수평간격 : 2.0m 경 사 각 : 30° 설치단수 A : 11단 B : 9단 C : 9 단	남측벽의 1, 2, 3, 5, 6, 7 단 앵카에 설치
	C	지중연속벽을 연암층에 0.5m 정도 근입시킴		동측벽의 1, 2, 4, 5, 7 단 앵카에 설치
2	상단부에 H 말뚝 (300×200×9×14) 를 13.5m 까지 1.8m 간격으로 근입후, 2.0m 소단을 두고 하단부는 레일을 1.6m간격으로 최종굴토깊이보다 1.5m 깊게 근입. 흙막이판 사용	연직간격 : 2.0~2.3m 수평간격 : 1.8~1.6m 경 사 각 : 20~30° 설치단수 : 7 단	동측과 남측에 10개소 설치하였으나 동측의 2, 3, 4, 5, 6, 7 단 하중계만 이용	
3	H-말뚝 (300×200×9×14) 를 1.8m 간격으로 최종굴토깊이보다 2.5m 더 근입시키고, 배면에 주열식 S.C.W 을 풍화암에 1.0m 근입. 흙막이판 사용	연직간격 : 2.2~2.4m 수평간격 : 1.8m 경 사 각 : 30° 설치단수 : 11 단	서측의 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9 단 앵카에 설치	
4	지중연속벽이 연암층에 0.5m 근입되는 21.5m 까지 설치되고, 그하부는 Shear-pin (H-100×100×6×8) 을 1.5m 간격으로 최종굴토깊이보다 2.0m 더 근입한 후, Shear-pin 표면을 Shotcrete 로 포설하고, 13도 경사의 Rock Bolt 를 연직과 수평간격이 1.5m 되게 설치	연직간격 : 3.0~6.0m 수평간격 : 1.4~2.8m 경 사 각 : 20~23° 설치단수 : 5 단	서측의 1, 3, 4 단 앵카에 설치	
5	A	지중연속벽은 최종굴착깊이보다 5.0 m 더 깊이 근입시킴	연직간격 : 2.1~3.4m 수평간격 : 1.7~2.5m 경 사 각 : 25~35° 설치단수 : 5 단	동측과 북측에 각각 1, 2, 3, 4, 5 단 앵카에 설치. 동측을 A, 북측을 B로 구분
	B			
6	A	H-말뚝 (300×200×9×14) 를 1.8m 간격으로 근입하고 흙막이판을 설치. 배면부에 L.W 그라우팅을 시행. 굴착심도의 차이에 따라 A와 B로 구분한다.	연직간격 : 1.5~2.0m 수평간격 : 0.9m 경 사 각 : 30° 설치단수 : 10 단 (A) 11 단 (B)	동측은 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 단 앵카에 북측은 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 단 앵카에 설치. 동측을 A, 북측을 B로 구분
	B			
7	H-말뚝(300×200×9×4) 를 1.8m 간격으로 최종굴토깊이에 1.5m 근입시킴. 흙막이판을 사용. 배면은 L.W 그라우팅.	연직간격 : 2.3~3.0m 수평간격 : 1.8m 경 사 각 : 30° 설치단수 : 10 단	서측에 4, 6, 7, 8, 10 단 앵카와 동측 6m 깊이 앵카에만 설치	
8	A	상단부에 H-말뚝(300×200×9×14) 를 1.8m 간격으로 12m 까지 근입후 2.0m 소단을 두고 하단부는 지중연속벽을 설치	연직간격 : 1.5~3.2m 수평간격 : 1.8m 경 사 각 : 30° 설치단수 : 15 단 (A) 16 단 (B)	북측의 4, 8, 9, 11, 13 단 앵카와 서측의 1개소 앵카를 조합 서측의 왼편 9, 10, 11, 13, 14, 15 단 앵카와 오른편 2, 5, 7, 10, 12 단 앵카를 조합
	B			

3. 실측결과

3.1 지하수위

그림 3은 굴착공사 진행에 따른 지하수위의 변화상태를 측정한 결과이다. 그림중 점선은 지하수위의 변화곡선이고 실선은 굴착깊이를 나타내고 있다. 이들 결과에 의하면 지하수위는 굴착과 더불어 현장에 따라 다소 차이는 있으나 점진적으로 수위가 낮아지는 경향을 보여주고 있다.

예를 들어 제1현장의 경우 그림3(a)에서 보는 바와 같이 초기의 지하수위는 G.L - 6.0m 정도였으나 굴착과 더불어 G.L - 28.0m 깊이의 굴착시점까지 지하수위가 점진적으로 낮아졌고 굴착 개시 6개월후 부터 G.L - 26.0m 깊이로 안정되었음을 보여주고 있다.

그림 3(b)는 제2현장의 지하수위변화 측정 결과인데 이 현장은 엄지말뚝 흙막이벽을 설치하고 아무런 차수공도 실시하지 않은 현장이다. 따라서 지하수위가 굴착과 더불어 감소하는 경향은 당연히 예측한대로 라고 할 수 있다. 그러나 그림 3(a), (c) 및 (d)의 제1현장, 제3현장 및 제5현장은 각종 차수공을 실시한 현장이다. 즉 제1현장의 경우는 지중연속벽과 엄지말뚝구간에 L.W 그라우팅을 실시하였으며, 제3현장은 엄지말뚝 흙막이벽 배면에 S.C.W를 실시하였고 제5현장은 지중연속벽 시공에 의한 차수공을 실시한 현장이다.

결국 차수공을 실시하고 굴착을 실시한 현장에서 지하수위를 차단시켜 지하수위 하강을 방지시키려는 효과는 거두지 못한 것으로 생각된다. 따라서 굴착시 흙막이벽의 배면에 수압은 작용하지 않았을 것으로 생각된다.

3.2 앵카축력

그림 4는 굴착이 진행됨에 따라 하중계가 설치된 앵카단의 변화를 대표적 현장에 대하여 굴착단계별로 도시한 결과이다. 그림 우측부의 표식과 숫자는 하중계가 설치된 앵카단을 표

시하고 있다. 이중 그림 4(a) 및 (c)는 연성벽체의 결과이고 그림 4(b) 및 (d)는 강성벽체의 결과이다.

전형적인 강성벽체의 거동을 보이는 그림 4(b)에서 앵카축력의 측정치는 30t에서 70t 사이의 값을 보이고 굴착이 진행됨에 따라 앵카축력이 약간씩 증가됨을 보여주고 있다. 강성벽체로 시공된 다른 현장에서도 이와 비슷한 경향을 나타내고 있는데 앵카축력은 30t에서 55t 사이를 보이며 초기의 측정치가 굴착완료 시점까지 비교적 안정된 값으로 유지되거나 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다.

한편 전형적인 연성벽체의 거동을 보이는 그림 4(c)에서 앵카축력의 측정치는 30t 이하의 측정치를 보이며 굴착이 진행됨에 따라 각 단의 앵카축력이 점진적인 감소 경향을 보이고 있어 최종굴착시의 측정치가 굴착진행중과 비교할 때 가장 적은 값을 나타내고 있다. 이는 굴착진행에 따라 연성벽체의 변형이 진행되어 벽체의 변형에 따른 응력의 재분배 현상이 발생되었음을 의미한다. 연성벽체로 시공된 다른 현장에서도 이와 비슷한 경향을 나타내고 있는데 앵카축력은 30t에서 40t 이하를 보이며 초기의 측정치가 굴착의 진행에 따라 강성벽체의 경우와 달리 매우 감소하여 최종굴착시 안정된 값을 유지하는 현상이 나타나고 있다. 이와 같이 연성벽체는 굴착에 따라 벽체의 변형량이 강성벽체의 경우보다 크므로 측방토압이 감소하고 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 최종굴착시의 앵카축력은 초기치나 굴착진행시와 비교하여 강성벽체의 경우는 증가하고 연성벽체의 경우는 감소하는 경향을 전반적으로 보였으나 그림 4(a) 및 (d)의 경우는 약간 예외의 경향을 보이고 있다. 즉 연성벽체로 된 제1현장의 A-TYPE의 경우는 이 구간이 연성벽체로 되어 있음에도 불구하고 최종굴착시의 앵카축력이 초기치에 비하여 다소 증가하였음을 보여주고 있다. 이는 제1현장이 원래 전구간을 지중연속벽으로 시공에 정이었으나 일부 구간에서만은 엄지말뚝

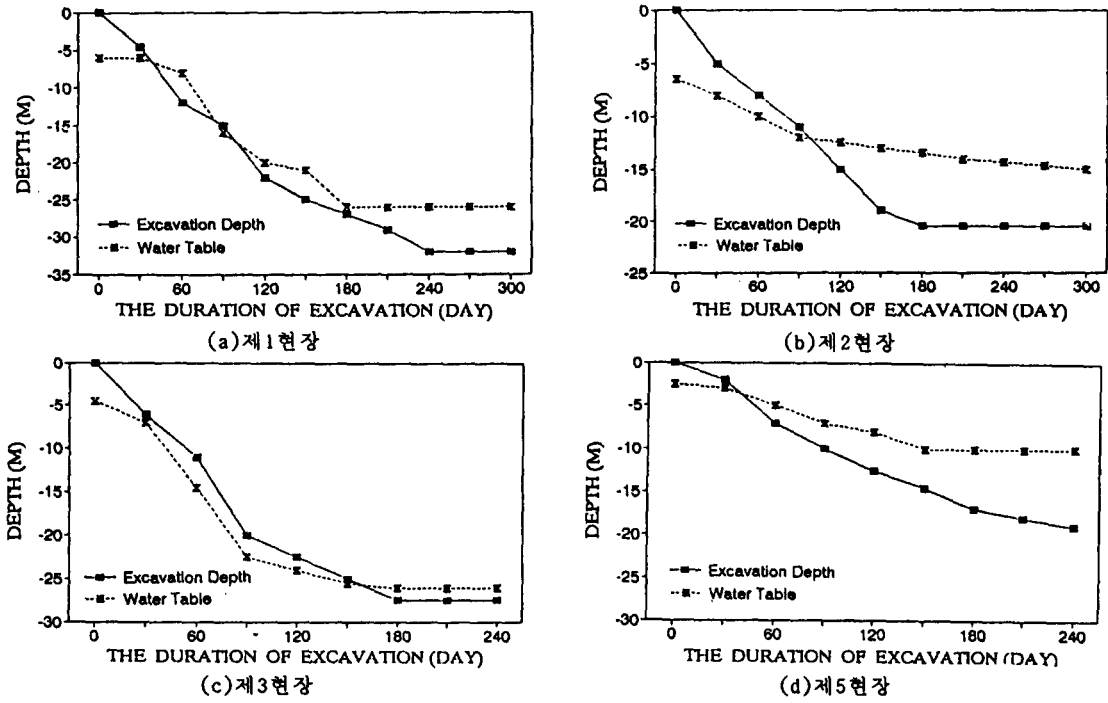


그림 3. 굴착에 따른 지하수위변화

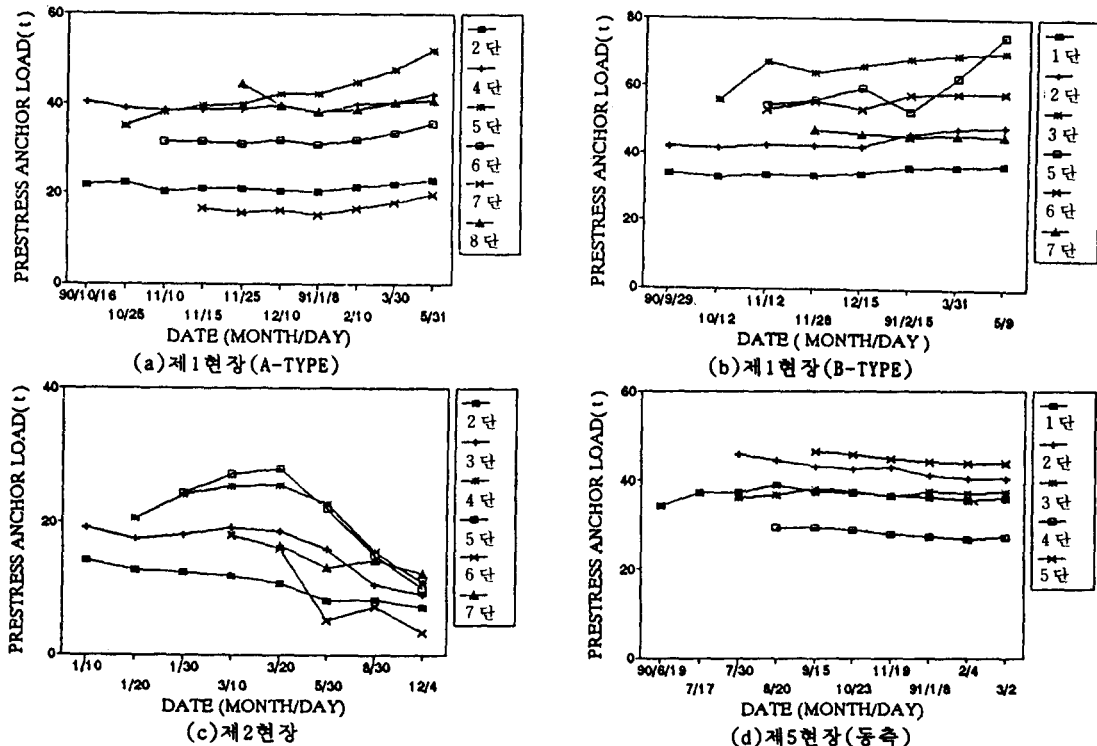


그림 4. 하중계가 설치된 앵카단에 대한 굴착에 따른 앵카축력의 변화

막이벽을 설치하였기에 전체적으로는 강성벽체의 강성이 어느정도 연결되어 있는 점 때문에 강성벽체의 경우와 비슷한 경향을 보인 것으로 생각된다.

한편 제5현장의 그림4(d)의 경우는 강성벽체로 시공되었음에도 불구하고 굴착종료시의 앵카축력이 초기치보다 약간 감소하는 연성벽체의 거동을 보이고 있다. 이는 제5현장이 8개현장중 유일하게 전 구간을 암반굴착이 없는 토사지반에서만 굴착으로 실시되었기 때문에 벽체의 변형이 약간 발생되어 측방토압이 감소된 것이 아니었나 생각된다.

4. 고 찰

4.1 환산측방토압

그림5는 4개현장에서 앵카에 작용하는 축력을 굴착단계별로 측정된 결과를 이용하여 산정된 흙막이벽 작용 측방토압 분포 결과이다. 여기서 흙막이벽에 작용하는 측방토압은 측정된 각 앵카의 축력을 중점분할법에 의한 하중분담원리에 근거하여 단위면적당 토압으로 환산하여 구하였다.

초기의 앵카축력은 앵카를 흙막이벽에 설치하고 앵카를 통하여 흙막이벽에 가하여진 선행압축력일 것이다. 즉 지반굴착에 의하여 흙막이벽체가 굴착구역내로 변형된 것을 앵카의 Prestress로 복귀시키게 하려고 한다. 여기서 변형을 억제시킨 힘은 변위를 유발시키는 토압과 관련이 있다 할 수 있을 것이다. 흙막이벽체의 변위를 굴착이전의 벽체 위치까지 환원시킨다면 정지토압과 관련이 있을 것이다. 그러나 이 사항을 확인하기는 용이하지가 않다. 다만 지하굴착공사에 지장이 없는 범위까지 벽체의 변위를 환원시키는 것이 일반적이다. 그러므로 앵카축력으로 부터 환산된 측방토압은 지하굴착에 지장이 없는 범위로 흙막이벽체의 변위를 환원시킨 경우의 측방토압으로 생각할 수 있을 것이다.

그림중 표식과 숫자는 굴착단계를 표시하고 있다. 예를들어 그림5(a)는 제1-B현장의 측정결과로 굴착을 5단계로 구분하여 측정된 결과이다. 그림 5(a) 및 (c)는 강성벽체의 경우이고 그림5(b) 및 (d)는 연성벽체의 경우이다. 그림5(d)의 제7현장을 제외하고는 굴착하단부에서 측정치가 존재하지는 않는데 그 이유는 굴착하단부의 굴착시 특히 암반굴착시에 일반적으로 앵카를 설치하지 않고 시공하는 경우가 많기 때문이다.

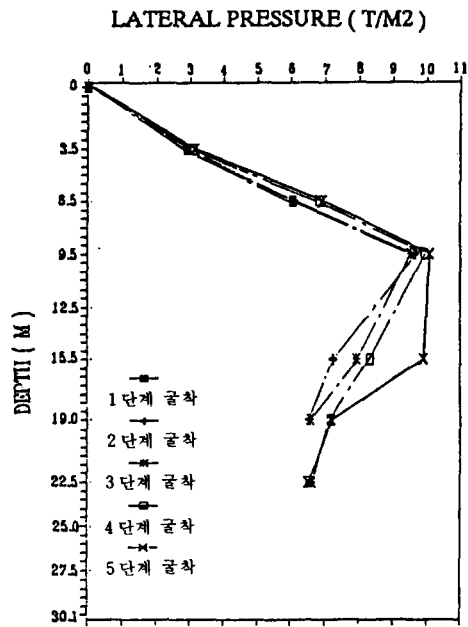
이들 결과에 의하면 흙막이벽체의 강성에 관계없이 지표면 부근 어느 깊이 까지는 흙막이벽에 작용하는 토압이 선형적으로 증가하며 그 아래에서는 약간 불규칙하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 이는 흙막이벽에 작용하는 토압은 굴착진행에 따른 벽체의 변위, 앵카의 시공상태 등의 여러가지 요소에 복합적으로 영향을 받고 있기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 이들 측방토압분포중 각 깊이에서의 최대치를 연결하면 대략적으로 사다리꼴분포를 보이고 있다고 할 수 있다. 이러한 경향은 8개현장 13개소의 계측위치에서 모두 비슷하게 나타났다. 굴착하단부의 경우는 그림5(d)의 제7현장의 결과로 추정하여 볼 수 있는데 측방토압의 감소 경향은 보이지 않고 있다.

4.2 측방토압 분포

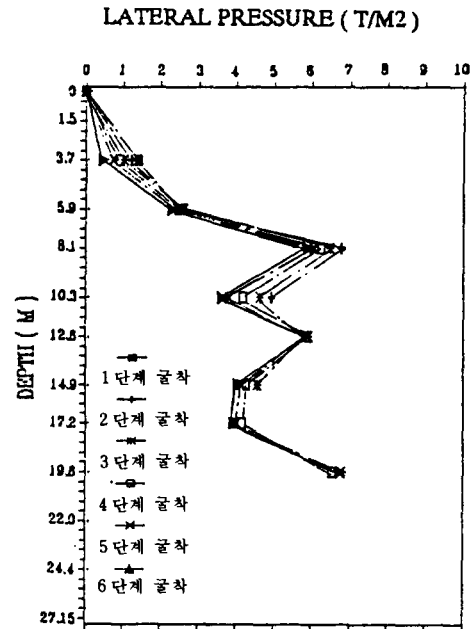
앞절에서 정리된 바와 같이 앵카축력의 측정치로 부터 환산된 흙막이벽작용 측방토압의 분포는 다음과 같은 경향을 보이고 있다고 할 수 있을 것이다.

첫째, 단계별 굴착이 진행되는 과정에서의 측방토압 분포상태의 변화를 보면 연성벽체의 토압은 굴착이 진행되어 감에 따라 대부분 약간 감소하는 추세를 보인 반면, 강성벽체의 토압은 정도는 적으나 약간씩 증가하여 굴착완료시점에서 최대의 토압분포가 나타남을 알 수 있다.

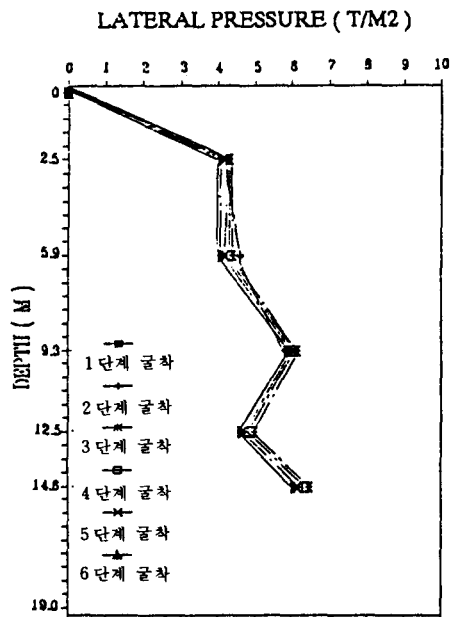
둘째, 측방토압의 깊이에 따른 분포는 흙막



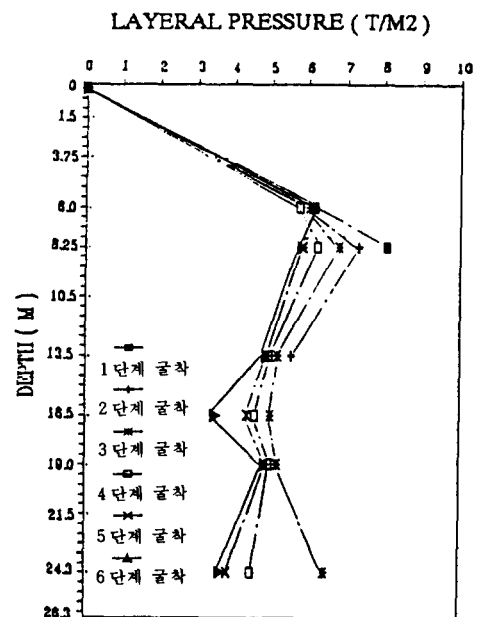
(a) 제1-B현장



(b) 제3현장



(c) 제5-A현장



(d) 제7현장

그림 5. 굴착단계별 측방토압분포

이벽체의 강성에 관계없이 지표면 부근에서는 어느 깊이까지 선형적으로 비례하며 증가하다가 그 깊이 아래부터는 불규칙하게 변화하나 대략적으로 그 최대치의 포락선은 일정분포를 보인다고 하여도 무방하다.

이와 같은 결과에 근거하여 앵카지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압의 분포는 그림 6과 같이 두가지 방법으로 도시할 수 있을 것이다. 즉 선형적으로 증가하는 측방토압분포를 보이는 한계 깊이를 αH 로 표시하며 일정토압분포를 보이는 그 하부의 일정토압의 폭 P 를 표시하는 방법으로는 $P = \beta \times P_a$ 및 $P = \lambda \times \sigma_v$ 의 두 가지로 생각하여 본다. 여기서 P_a 는 최종굴착깊이 H 에서의 Rankine 주동토압으로 $K_a \gamma H$ 이고 σ_v 는 연직상재압으로 γH 이다. 또한 $K_a (= \tan^2(45^\circ - \phi/2))$ 는 주동토압계수이며 γ 는 흙의 단위체적중량이다.

8개현장 13개 측정단면에 대한 측방토압의 선형증가깊이를 그림 5와 같은 실측 측방토압 분포에서 구하여 α 값을 최종 굴착깊이에 따라 정리하여 보면 그림 7과 같다. 그림중 검은사각형은 연성벽체의 결과이고 흰사각형은 강성벽체의 결과이다. 이 그림에 의하면 α 값은 벽체의 강성에 관계없이 0.20에서 0.34의 범위에 분포되어있으며 특히 0.27 이상의 범위에 전체 자료의 75%이상이 분포되어 있다. 이들 α 값은 평균적으로는 0.30 정도로 생각할 수 있다.

그림 8은 그림 6(a)의 일정토압구간의 토압 크기 P 를 8개현장으로부터 구하여 최종 굴착 깊이위치에서의 Rankine의 주동토압 P_a 와 비교하여 본 결과이다. 주동토압계수 K_a 의 계산시 지반의 내부마찰각과 단위체적중량은 굴착 깊이내 각층의 두께를 고려한 평균치를 다음식과 같이 구하여 사용하였다. 그림중 점선으로 표시된 선은 측방토압이 Rankine의 주동토압과 같은 경우를 나타내고 있다.

$$\phi_{AVG} = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot \tan \phi_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (1)$$

$$\gamma_{AVG} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot \gamma_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (2)$$

그림 8의 결과에 의하면 앵카지지 흙막이벽체에 작용하는 최대 측방토압은 벽체의 강성에 관계없이 Rankine의 주동토압보다 상당히 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 측방토압은 주동토압의 47%에서 79% 사이에 분포하고 있으며 평균적으로는 63%로 나타나고 있다. 따라서 수입을 고려하지 않을시 최대측방토압의 크기는 Terzaghi - Peck의 $0.65 K_a \gamma H$ 와 거의 비슷하므로 앵카지지 흙막이 벽체에 작용하는 설계토압으로는 Terzaghi - Peck의 $0.65 K_a \gamma H$ 를 사용하는것이 좋다고 생각된다.

그림 9는 일정토압구간의 토압크기 P 를 최종굴착깊이에서의 연직상재압 $\sigma_v (= \gamma H)$ 와 비교하여 본 결과이다. 그림중 점선은 모래지반의 흙막이벽에 작용하는 측방토압으로 Tschbotarioff가 제시한 토압의 크기를 나타내는 선이다. 즉 Tschbotarioff는 일정토압의 크기를 연직상재압의 0.25배로 제시한바 있다.¹¹⁾ 그러나 그림 9의 결과에 의하면 앵카지지 흙막이벽체에 작용하는 측방토압은 Tschbotarioff가 제시한 토압보다는 모두 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 측방토압은 연직상재압의 0.13에서 0.25배 사이에 분포하고 있으며 평균적으로는 0.17배로 나타나고 있다.

이상과 같이 그림 7에서 그림 9까지의 결과로부터 우리나라 사질토지반의 지하굴착시 앵카지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압분포를 현재 실무에서 많이 사용되는 Terzaghi - Peck 수정식과 Tschbotarioff식에 의거한 토압분포와 비교 검토하면 다음과 같은 것을 알 수 있다.

첫째, 측방토압분포는 Terzaghi - Peck 수정식중 연약~중간 점토지반의 경우와 유사하나 변곡점의 위치가 Terzaghi - Peck의 $0.25H$ 보다 깊은 $0.3H$ 로 나타났고 일정토압부분의 크기는 모래지반의 경우와 유사하게 $0.65 K_a \gamma H$

와 거의 비슷하게 나타났다.

둘째, 측방토압분포는 Tschebotarioff 식중 모래지반의 경우와 유사하나 변곡점의 부분이 Tschebotarioff 경우의 0.1H 보다 깊은 0.3H로 나타났으며 최대토압의 크기는 $0.17\gamma H$ 로 Tschebotarioff의 $0.25\gamma H$ 보다 적게 나타났다. 또한 Tschebotarioff는 굴착하단부에서 0.2H 높이까지 측방토압을 일정토압으로부터 감소시켜 굴착저면에서는 토압이 작용하지 않는 것으로 하였으나 이는 측방토압을 과소산정할 우려가 있다.

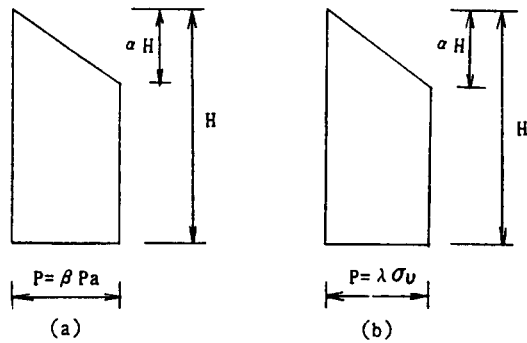


그림 6. 흙막이구조물에 작용하는 측방토압분포 개략도

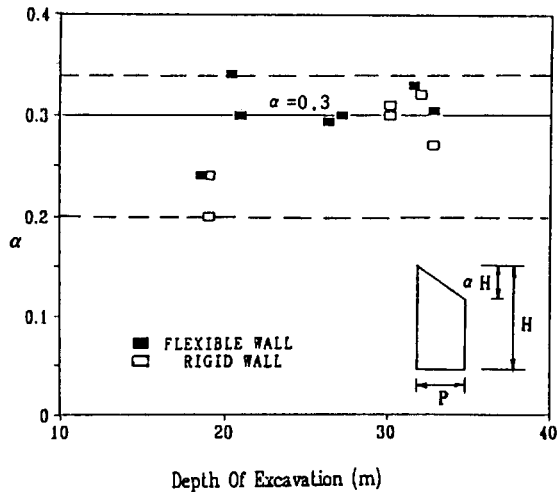


그림 7. 굴착깊이와 α 값과의 관계

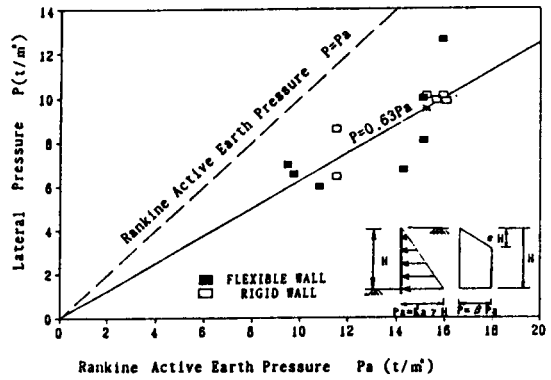


그림 8. 실측측방토압과 Rankine 주동토압과의 관계

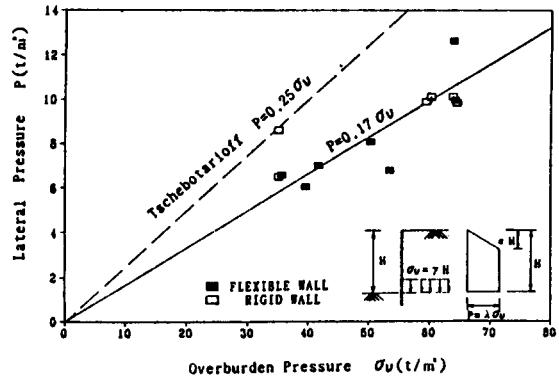


그림 9. 실측측방토압과 연직상재압과의 관계

5. 결 론

우리나라 사질토지반의 지하굴착시 흙막이 벽을 지지하기 위하여 설치된 앵카에 부착시킨 하중계로 앵카측력을 측정된 결과 다음과 같은 사항을 파악할 수 있었다.

1) 차수공을 실시하고 지하굴착을 실시하여 지하수위 하강을 방지시키려는 효과는 거두지 못하였으며 지하수위가 굴착진행과 함께 점진적으로 하강하였다. 이로 인하여 굴착시 흙막이 벽 배면에 수압은 작용하지 않았다.

2) 최종굴착시의 앵카측력은 초기치나 굴착진행시와 비교하여 강성벽체의 경우는 거의 변화가 없거나 약간 증가하고 연성벽체의 경우는

감소하는 경향을 전반적으로 보였다.

3) 앵카지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압은 흙막이벽체의 강성에 관계없이 굴착깊이의 30%에 해당하는 깊이까지는 선형적으로 비례하여 증가하다가 그 깊이 아래부터는 불규칙하게 변화하나 대략적으로 그 최대치의 포락선은 일정분포를 보이는 사다리꼴 모양의 분포로 취급할 수 있다.

4) 측방토압의 사다리꼴 모양 분포중 일정측방토압부분의 토압은 평균적으로 최종굴착깊이에서의 Rankine 주동토압의 63%에 해당하거나 연직상재압의 17%에 해당하였다.

5) 사질토지반의 앵카지지 흙막이벽에 작용하는 설계측방토압은 Terzaghi - Peck의 모래지반 측방토압분포를 사용하는 것이 좋으나 굴착상단부 30% 깊이까지는 선형적으로 증가하는 분포형태로 수정함이 좋다.

6) 모래지반 굴착에 대하여 Tschebotarioff가 제한한 측방토압분포는 최대토압의 크기 및 굴착상단부가 토압분포를 수정하여 사용함이 바람직하다.

감사의 말

본 연구는 중앙대학교 중앙문화연구소의 연구비지원에 의하여 이루어진 것이며 이에 감사드립니다 바이다.

참 고 문 헌

1. Chandrasekaran, V. S. and King, G. J. W.: "Simulation of excavation using finite elements", Jour, GED, ASCE, Vol. 100, NO, GT9, 1974, 1064 ~ 1089.
2. Dismuke, T. D.: Retaining structures and excavations, Foundation Engineering Handbook, 2nd ed., edited by H. - Y. Fang, 1991, pp. 465 ~ 475.

3. Finno, P. J. and Harahop, I. S.: "Finite Element Analyses of HDR - 4 excavation", Jour. GED, ASCE, Vol. 117, No. 10, 1991, pp. 1590 ~ 1609.
4. 홍원표, 이기준: 앵카지지 굴착흙막이벽에 작용하는 측방토압, 1992년도 대한토목학회 학술발표회, 제 1권, pp.579 ~ 582.
5. Hunt, R. E.: Geotechnical Engineering Techniques and Practices, McGraw - Hill, 1986, pp.598 ~ 612.
6. Juran, I. and Elias, V.: Ground Anchors and Soil Nails in Retaining Structures, Foundation Engineering Handbook, 2nd ed., edited by H. - Y. Fang, 1991, pp. 892 ~ 896.
7. NAVFAC DESIGN MANUAL 7.2, 1982, pp. 7.2 - 85 ~ 7.2 - 116.
8. Peck, R. B.: "Deep excavations and tunneling in soft ground", State of The Art Volume, Proc., 7th ICSMF, Mexico, 1969, pp 225 ~ 290.
9. Terzaghi, K. and Peck, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, 1st ed., John Wiley and Sons, New York, 1948.
10. Terzaghi, K. and Peck, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1967, pp. 394 ~ 413.
11. Tschebotarioff, G. P.: Soil Mechanics, Foundations and Earth structures, McGraw - Hill, New York, 1951.
12. Tschebotarioff, G. P.: Foundations, Retaining and Earth Structures, McGraw Hill, New York, 1973, pp.415 - 457.
13. 日本土質工學會: 土留め構造物の設計法, 東京, 1978, pp. 30 ~ 58.
14. 홍원표: 주열식 흙막이벽의 설계에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제 5권 제 2호, 1985, pp. 11 ~ 18.
15. 홍원표, 권우용, 고정상: 점성토 지반속 주열식 흙막이벽의 설계법, 대한토질공학회지, 제 5권 제 3호, 1989, pp. 29 ~ 38.

(접수일자 1992. 9. 29)