

고압분사주입공법으로 보강된 개랑체의 특성 및 흠막이벽의 변형해석

Mechanical Properties of the Ground Improved by High Pressure Jet-Grouting and Analysis of Deformation of Propped Retaining Walls

심 태 섭* · 주 승 완**
Sim, Tae Sup · Joo, Seung Wan

Abstract

Recently, the construction method of high pressure jet-grouting is in wide-use, for the purpose of structure foundation ground, reinforcing of ground behind propped retaining walls and cut-off in order to perform safe construction of underground excavation work.

This study was performed a serious of tests of field permeability and unconfined compressive strength upon ground improved established on the ground behind propped retaining walls and examined proper jet mechanism by changing the construction parameter value of high pressure jet-grouting. In addition, we got the conclusion like the followings as a result of inspecting the condition of earth pressure distribution and deformation, using elasto-plastic method and FEM.

1. In that characteristics of strength of ground improved, with the same condition of construction parameter, unconfined compressive strength of sand gravel is shown bigger than that of silty sand by about 1.6 times and cut-off effect is shown to have effect of reducing the permeability of original ground by about $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$.

2. As a result of analysis of figures of horizontal displacing quantity of propped retaining walls materials regarding before and after High pressure jet-grouting through FEM, the reducing quantity of 0.1~0.3mm in maximum horizontal displacement is shown.

I. 서 론

최근 우리 나라의 대도시에서는 지하공간의 활용 및 도심지의 교통난을 해소하기 위한 지하도로 및 지하철 공사를 비롯한 고층건물의 건설이 증가

하고 있다. 이와 같은 지하굴착공사는 연약지반이나 하천에 인접해서 실시되는 경우가 흔하며 이러한 지반에서 건설공사를 실시할 경우 가장 큰 문제점은 굴착시 지하수위 저하로 인한 지반의 침하, 굴착면과 굴착배면 지반의 지하수위차에 의해

*조선대학교 공과대학

**서강정보대학

키워드 : 고압분사주입공법, 탄소성해석, 유한요소해석, 배합설계, 수평변위, 토압

Table 1. Design parameters of high pressure jet-grouting method

Comparison	Clay		Sand			Sand gravel	Boulder
	N=0~2	N=3~5	N=0~4	N=5~15	N=16~30		
Effective diameter(m)	1.0	0.8	1.2	1.0	0.8	0.8	0.8
Rod pull-out velocity(min/m)	7.0	8.0	7.0	8.0	9.0	9.0	9.0
Unit jet amount(l /min)	60	60	60	60	60	60	60
Jet amount(l /m)	462	528	462	528	594	594	594
Cement amount(kgf/m)	351	401	351	401	451	451	451
Space construction(m)	0.8~0.9	0.6~0.7	1.0~1.1	0.8~0.9	0.6~0.7	0.6~0.7	0.6~0.7
Compressive strength(kgf/cm ²)	20~40		40~150			100~200	

(1) 로드인발속도(min/m) : 100cm ÷ 2.5cm(양관 pitch) = 40회, 40회 × 12초(상용회전수) = 480초 = 8min/m

(2) 분사량(l /m) : 단위분사량 × 로드인발속도 = 60 l /min × 8min/m = 480 l /m, 480 l /m × 1.1(할증 10%) = 528 l /m

(3) 시멘트량(kg/m) : 분사량 × 0.76(시멘트밀도 3.15를 근거로 산정한 수치), 528 × 0.76 = 401kg

발생하는 굴착저면의 보일링 및 히빙현상 등 굴착으로 인한 인접 건물 및 공사의 안정성에 상당한 위험을 초래하게 된다. 이러한 문제점을 해결하고 안전한 시공을 실시하기 위해 구조물 기초지반 및 흙막이벽 배면지반의 보강 또는 차수를 목적으로 주입공법이 각종 건설공사 현장에서 보조공법으로 많이 이용되고 있으며 약액주입공법과 고압분사주입공법의 두 가지로 크게 나뉘고 있다.

본 연구에서는 고압분사주입공법중 특히 각종 지하굴착공사에서 보조공법으로 널리 사용되고 있는 2중관 분사주입공법의 흙막이벽 배면지반의 보강 및 차수효과와 수평변위, 토압의 경감효과를 검토하기 위해 2중관 분사주입공법의 설계제원을 변화시킨 2개의 Type에 대해서 각 2개소씩 시험주입 후 그 결과를 비교·분석 하였다.

또한, 흙막이벽 배면지반에 조성된 개량체로부터 코어를 채취하여 일축압축강도, 현장투수시험을 실시하여 원지반의 강도 및 투수계수와 비교하므로써 흙막이벽 배면지반의 지반보강효과 및 차수효과를 검토하였다.

그리고 2중관 분사주입공법 개량체의 강도실험 결과에서 얻은 강도특성치를 적용하여 굴착단계별로 변화하는 흙막이벽체의 수평변위와 벽체에 작

용하는 토압을 시공 전·후에 대해서 유한요소법과 SUNEX, EXCAV 등의 탄소성 해석 프로그램을 이용하여 수치해석한 후 상관관계를 파악하였다.

II. 2중관 분사주입공법의 설계제원

2중관 분사공법은 고화재를 고압으로 분사시켜 분류체가 가진 운동에너지를 이용해서 지반을 절삭 붕괴시키는 단관분사주입공법에 공기분류체를 병용하여 경화재 분류체의 도달거리를 증가시켜 개량체의 직경을 크게 한 공법으로서 시공제원에 사용하는 2중관 분사주입공법의 설계제원은 Table 1과 같으며, 그라우팅 설계제원들은 다음과 같은 계산에 의해서 결정된다.

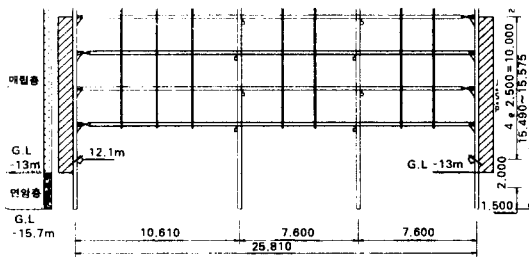
III. 현장적용

1. 지반조건 및 흙막이구조물

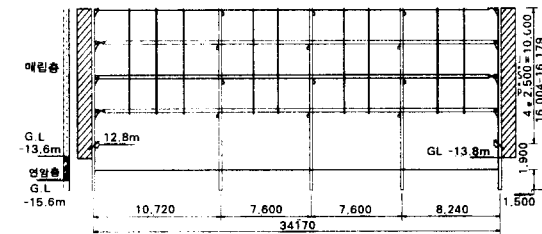
본 연구의 대상으로 활용된 사례현장은 흙막이벽 배면지반의 보강 및 차수를 목적으로 2중관 분사주입공법에 의하여 지반보강을 실시하였으며, 지층구성이 서로 유사한 A, B, C 지역을 각각 80m 간격으로 위치를 선정하여 각 위치마다 지반

Table 2. Subsoil profiles and their parameters

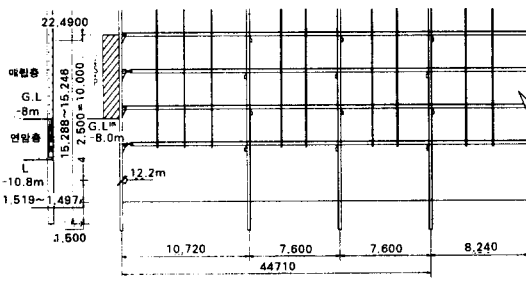
Case	Stratum	Depth (m)	N	γ (tf/m^3)	c (tf/m^2)	ϕ
Case A	Silty sand	0.0 ~ 1.8	21	1.8	1.0	33
	Sand gravel	1.8 ~ 13.0	30~46	1.9	-	35
	Soft rock	13.0 ~ 15.6	-	2.5	5.0	40
Case B	Silty sand	0.0 ~ 5.8	15~30	1.8	1.0	33
	Sand gravel	5.8 ~ 13.8	30~46	1.9	-	35
	Soft rock	13.8 ~ 15.6	-	2.5	5.0	40
Case C	Sand gravel	0.0 ~ 8.0	30~40	1.9	-	35
	Soft rock	8.0 ~ 10.8	-	2.5	5.0	40



(Case A)



(Case B)



(Case C)

Fig. 1. Typical section of braced excavation wall (Case A,B,C)

개량체로부터 시료를 채취하여 일축압축강도 및 현장투수시험을 실시하였으며 지중경사계, 하중계 등의 계측기를 설치하여 측정을 실시하였다. 2중관 분사주입공법의 시험공 개량심도는 연암층 상단까지 천공한 후 흙막이벽체 배면에 0.8m의 단열 간격으로 시공하였으며 A, B, C지역의 지층구성과 토질정수는 Table 2와 같다.

그리고, 흙막이 구조물은 H말뚝과 나무널판을 사용한 흙막이벽과 상부는 버팀보, 하부는 앵커로 지지되는 엄지말뚝 흙막이공법으로 시공되고 있고 A, B, C 지역은 상부에 4단의 버팀보와 하부에 1단의 앵커를 설치하였으며 지반조사결과 지하수위가 G.L. -2.1m로 매우 높고 자갈 및 전석층의 심도가 깊어 굴착시 허빙이나 보일링 현상 등이 예측되어 엄지말뚝 흙막이벽으로부터 0.5m 떨어진 배면에 0.8m 간격으로 2중관 분사주입공법에 의한 그라우팅을 1열로 증첩하여 실시하고 굴토작업을 실시하였다. 각 지역의 흙막이벽체 단면도는 Fig. 1에 나타내었다.

IV. 결과분석

1. 실내 및 현장시험

흙막이벽 배면지반에 시공된 2중관 분사주입공법 개량체의 강도특성과 지하수의 차수효과를 분석하기 위하여 시료를 채취하여 일축압축강도 및 변수위투수시험을 실시하였다. 시료채취는 현장별로 시험공의 중심부에서 회전수세식 시추기를 사용하여 NX규격으로 채취하였으며 채취한 시료는 높이 5cm, 직경 5cm의 원통형 공시체로 각 토층별로 전석층에서 8개, 사질토층에서 8개를 제작하여 공시체를 시험기 가압판의 중앙에 놓고 공시체, 가압판, 시험기의 중심선이 일치하도록 설치하며 가압판과 공시체 상하단면이 완전히 접촉하게 하여 편심이 작용하지 않도록 한다. 공시체 압축강도의 계산결과는 Table 3에 나타내었는데 전석층의 일축압축강도는 102.0~181.0kgf/cm²의 범위에, 사질토층의 일축압축강도는 45.0~95.0kgf/cm²

Table 3. Unconfined compressive strength and permeability test (Case A,B,C)

Case	Failure load (kg)	Improved ground strength (kgf/cm ²)	Original ground strength (kgf/cm ²)	Depth (m)	Permeability coefficient of improved Ground (cm/s)	Depth (m)	Permeability coefficient of original ground (cm/s)
Case A	2,550	115	94	5.5	9.38×10^{-5}	6.0	2.46×10^{-3}
	2,250	102				9.0	2.83×10^{-3}
	3,200	145		12.5	1.32×10^{-5}	12.0	2.35×10^{-3}
Case B	1,870	85	70	5.5	1.52×10^{-5}	6.0	3.38×10^{-3}
	1,600	72					
	3,100	141		12.5	1.98×10^{-5}	9.0	3.28×10^{-3}
	2,450	111					
Case C	2,030	92	83	4.5	1.40×10^{-5}	4.0	4.34×10^{-3}
	2,070	94					
	2,470	112		7.0	4.20×10^{-5}	7.0	2.65×10^{-3}

의 범위에 분포하고 있는데 전석층에서의 일축압축강도가 사질토층에서의 강도보다 1.6배 정도 크게 나타났다. 이는 Table 1의 설계제원에 나와있는 지층별 N치에 따른 압축강도값과 거의 일치하는 것으로 나타났으며 이와 같은 결과로 볼 때 동일한 분사메카니즘으로 시공하는 경우에 있어서 고압분사주입공법 개량체의 일축압축강도는 원지반의 토층성분과 굵기에 따라 강도의 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다.

그리고 현장투수시험은 시험대상 구간의 단부에 패킹을 설치하고 그속에 일정압의 압력수를 주입하여 단위시간당의 투수량을 측정하여 투수계수를 구하는 방법으로서 2중관 분사주입공법에 의한 지반 개량체의 투수계수는 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm/s}$ 정도인데 이는 원지반의 투수계수보다 $10^2 \sim 10^3 \text{cm/s}$ 정도 작게 되므로 충분한 차수효과가 있었음을 알 수 있었다. 특히 전석층의 투수계수가 10^{-3}cm/s 에서 10^{-6}cm/s 로 사질토층에서의 투수계수가 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$ 에서 10^{-5}cm/s 정도로 작아진 것으로 보아 전석층이 사질토층보다 원지반에 있어서 투수성은 더 크나 2중관 분사주입공법에 의한 투수효과는 오히려 전석층이 사질토층보다 약간 더 있는 것으로 나타났다.

2. 설계제원을 변환한 주입시험

제트 그라우팅 시공절차에 있어 사용되어야 할 적절한 제트 그라우팅 시공제원값을 검토해보고자 별도의 지반에서 Table 4와 같이 두개의 시험 Type으로 분사메카니즘을 변화시켜 1개의 시험 Type에 대하여 각 2개소씩 시험주입 하였는데 분사량은 Table 1의 2중관 분사주입공법 설계제원에 나와있는 바와같이 사질토(N=16~30), 전석층에서의 분사량값 594 l/m을 사용하였으며 주입심도는 4공 모두 지표면 아래 1.0m에서 5.0m까지 4.0m 깊이로 하였다.

주입 완료 24 시간 경과후 개량체의 구근형성 확인을 위하여 주위를 굴착하여 직경 및 형상을 확인하였으며 개량체의 중심부 주입심도 2.0~4.0m구간에서 코어를 채취하여 1개소에 각 3개씩의 공시체를 제작하여 28일 수침양생시킨 후 일축압축강도 시험을 실시하여 그 결과를 Table 4에 나타내었는데 2중관 분사주입공법 개량체의 일축압축시험강도는 동일한 지반조건에서 Type II가 Type I보다 1.15~1.37배 정도 큰 것으로 나타났으며 개량체의 직경도 1.04~1.25배까지 증가하여 오히려 공기압을 병용한 Type I보다 더 큰 구근

Table 4. Construction process and output by high pressure jet-grouting

Parameter	Test construction	Type I		Type II	
Jet pressure (kgf/cm ²)		200		400	
Rod pull-out velocity (min/m)		9~9.9		4.5~4.95	
Air pressure (kgf/cm ²)		7		-	
Inpregnation nozzle		1		2	
Unit jet amount (l/min)		60		120	
Jet amount (l/m)		594		594	
Cement amount (kgf/m)		451		451	
Water (l)		451		451	
Unconfined compressive strength (kgf/cm ²)		53.0	55.0	61.0	72.0
		58.0	63.0	63.0	69.0
		59.0	56.0	63.0	77.0
Ground improved diameter (m)		0.84~1.14		0.87~1.42	

이 형성 되었음을 알 수 있었다. 단지 Type I 은 대체적으로 불규칙적인 원통형상을 보였고 Type II 는 거의 동일한 형태의 원통형상을 보였는데 이는 개량체의 중심부에서 주입액이 방사상으로 그만큼 덜 주입되어 나가기 때문으로 판단되었다.

따라서 주입공로부터 인접거리에 건물이 위치해 있는 도심지에서 주입재의 주입범위를 0.5~1.0m 정도로 한정주입을 해야 할 필요성이 있을 때는 주입압을 400kgf/cm²로 높이고 공기압을 제거한 Type II 의 시공체원으로 하는 것이 주변지반의 변위발생을 감소시키고 시공속도를 빨리 할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 2중관 분사주입공법시공 전·후의 비교분석

본 사례현장에 적용된 해석대상의 모델링으로서 지반은 사각형의 탄소성요소로 모델링 하였으며 H-파일은 프레임요소, 스트러트와 어쓰앵커는 트러스요소로 모델링 하였다. 작용하중으로는 과제하중, 자중에 의한 초기하중, 굴착에 의한 증가하중이 있으며 과제하중으로 지표면에 1.0t/m²의 등분포하중을 가하였다. 초기응력은 자중에 의한 응력을 계산하여 입력하였으며 임의의 요소 중앙에서의 수직 및 수평방향 초기응력은 $\sigma_v = \sum \gamma_h$, $\sigma_x = K_0 \sigma_v$ 로 나타내며 각 굴착단계마다 굴착으로

인한 굴착등가하중은 $\{F\} = -\{N\} \cdot \{\sigma\} d_s$ 이다. 여기서 $\{F\}$ 는 굴착등가하중, $\{N\}$ 는 형상함수, $\{\sigma\}$ 는 굴착되는 부재의 굴착 직전 단계에서의 응력, d_s 는 경계면이다.

위를 기초로 하여 2중관 분사주입공법의 보강효과를 규명하고자 사례현장 3개위치의 단면에 대하여 흙막이벽 배면에 있어서 시공 전·후에 대한 수평변위, 토압을 굴착단계별로 분석하였는데 경사계로부터 얻어진 계측 수평변위와 각 프로그램에 의한 수치해석 수평변위와는 변위의 크기면에서는 서로 큰 차이를 보이고 있으나 변위의 분포형태는 거의 유사하게 나타났으며 각 지역의 최종 굴착단계에 있어서 계측변위와 각 수치해석 변위의 최대 수평변위량을 Table 5에 나타내었다.

유한요소법에 의한 해석에서 2중관 분사주입공법 시공전·후의 수평변위 차이는 A, B, C 지역에서는 0.1~0.3mm의 아주 미소한 감소효과가 있는 것으로 나타났는데 이와같은 원인으로 A, B, C 지역의 경우는 2중관 분사주입공법 벽체가 2열중첩이 아니고 단열중첩으로 시공되었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 계측치는 이미 2중관 분사주입공법 시공후에 실측한 값을 감안할 때 수치해석치와는 큰 차이가 나타남으로써 적절한 비교가 되지 못했다.

Table 5. Relationship of displacement and observation value by case

Case	Maximum displacement in last excavation depth (mm)				
	Observation value	FEM		SUNEX	EXCAV
		Before construction	After construction		
Case A	16.0	2.2	2.0	8.4	29.8
Case B	11.3	2.6	2.3	5.5	17.0
Case C	4.8	0.7	0.6	2.9	5.9

그러나 최대 수평변위가 발생하는 위치, 즉 굴착에 따른 변위의 중심점은 평균적으로 계측치에서 0.23H, 유한요소해석에서는 0.24~0.30H, SUNEX에서 0.15H, EXCAV의 경우는 불규칙적인 것으로 나타났으며 변위의 중심점은 굴착심도와 비교하여 약 0.25H와 굴착면 사이에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, Table 6은 동일한 굴착단계에 있어서 토압을 도시한 것인데 전반적으로 유한요소 해석에 의한 것은 삼각형 토압분포도를 나타내고 있으며 SUNEX와 EXCAV의 토압분포도는 사각형 토압분포도를 보이고 있다.

A, B, C 지역에서 유한요소 해석에 의한 2중관 분사주입공법 시공 전과 후의 토압의 변화는 각 단의 스트러트 위치에서 스트러트의 강성으로 인

Table 6. Relationship of excavation depth and earth pressure by case program

Case	Excavation depth(m)	Earth pressure by depth of excavation (tf/m ²)			
		FEM	SUNEX	EXCAV	Terzaghi-Peck
Case A	5.1	6.2/2	2.4	5.1	2.2
	7.6	9.4/2	3.5	7.2	3.3
	10.1	12.0/2	4.6	9.4	4.4
	12.6	14.1/2	5.7	11.6	5.5
Case B	5.8	7.6/2	2.7	5.7	2.5
	8.3	11.0/2	3.8	7.8	3.6
	10.8	13.7/2	4.9	10.0	4.7
	13.3	16.6/2	6.0	12.2	5.8
Case C	5.0	5.5/2	2.4	5.0	2.2
	7.5	8.2/2	3.5	7.5	3.2
	10.0	14.8/2	4.8	9.2	4.3

하여 토압이 들출하고 있으며 이 지점에서 2중관 분사주입공법 시공 후에 약간의 토압이 증가하고 있다.

Table 6에 나타나듯이 Terzaghi-Peck의 경험토압과 SUNEX에 의해 해석된 토압이 거의 일치하고 있으며 유한요소해석에 의한 토압은 오히려 Terzaghi-Peck의 토압보다도 작게 나올 것으로 예상된다. 이상의 결과로 볼 때 유한요소해석 프로그램에 의한 토압은 종래의 방법에 의한 해석결과와 현장계측에 비해 과소평가되는 것으로 알려져 온 바와같이 과소평가 되었음을 알 수 있으며 이와같은 원인으로서는 흙의 변형은 주동이나 수동 어느 한계에 도달될 때까지는 탄성체로 가정하는 것과 엄지말뚝, 버팀부재, 앵커의 불연속적 벽체요소를 연속체로 이상화 시키는 것 등의 문제 때문인 것으로 생각된다.

그러므로 흙막이벽에 작용하는 토압의 크기는 지반의 특성과 다짐정도 뿐만 아니라 벽체의 변위에 의하여 영향을 받는다. 즉 벽체의 강성도에 따라 수평변위의 크기가 다르게 발생하므로 결국 토압의 분포는 벽체의 강성도에 의하여 영향을 받게 되는데 수평변위와 토압의 상관관계를 분석하기 위해 각 위치별로 최종굴착단계에 있어서 유한요소해석에 의한 수평변위와 토압을 서로 비교해 보았다.

Fig. 2은 A, B, C 지역에서 2중관 분사주입공법 시공전·후에 대한 수평변위와 토압의 관계를 도시한 것으로 흙막이 벽체 지보재의 큰 강성으로 인하여 전체적으로 수평변위의 크기가 작게 나타났으며 토압의 분포는 강성벽체의 경우에 나타나는 삼각형 분포로 나타났다. 그리고 각 위치별로 최종굴착단계에 있어서 수평변위와 토압의 분포에 대한 상관관계를 분석한 결과 A지역에서 수평변위의 감소구간은 G.L -8.1m~-12.1m로서 여기서의 수평변위 감소는 2.2~2.0mm로 0.2mm의 감소량을 나타내었고 이 부근에서의 토압은 0.8~1.0tf/m² 정도 증가한 후 G.L -10.6m부터 다시 감소를 나타내었다.

B지역에서 G.L -8.8~-13.5m구간에서 0.3mm의

수평변위 감소가 일어났고 G.L -10.1~-10.8m 구간에서 0.8tf/m^2 의 토압이 증가한 이후 감소를 보였다. C지역에서는 G.L -6.0~-8.0m 구간에서 0.1mm의 수평변위 감소가 있었으며 토압은 G.L

-6.8~-7.3m에서 0.2tf/m^2 의 증가가 있었다. 세 지역 모두 스트러트 설치위치에서는 2중관 분사주입공법 시공 후 토압은 증가하였으며 스트러트 상·하부에서는 감소를 보였다.

V. 결 론

굴착공사가 진행되고 있는 현장을 대상으로 지층구성이 유사한 인접된 세개단면을 선정, 흙막이벽 배면지반에 조성된 2중관 분사주입공법 개량체에 대한 일축압축강도 및 현장투수시험을 실시하여 지반보강 및 차수효과를 검토하였다.

그리고 개량체의 형성으로 인한 흙막이벽 배면의 수평변위 억제 및 토압 경감효과를 검토하고자 2중관 분사주입공법 개량체의 강도실험에서 얻은 강도특성치를 적용하여 굴착단계별로 변화하는 수평변위와 토압을 주입공법 시공 전·후에 대해서 유한요소해석과 SUNEX, EXCAV의 프로그램을 이용하여 수치해석한 후 상관관계를 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 개량체의 강도특성은 동일한 시공제원에 있어서 전석층이 사질토층보다는 일축압축강도가 1.6배 정도 더 크게 나타났으며, 흙막이벽 배면에 시공된 2중관 분사주입공법의 차수효과는 원지반의 투수계수를 $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{cm/s}$ 정도 감소시키는 효과가 있으며 전석층에 있어서 2중관 분사주입공법에 의한 투수효과는 사질토층보다는 약 10^{-1}cm/sec 정도 더 있는 것으로 나타났다.

2. 주입공으로부터 인접거리에 건물이 위치해 있는 도심지에서 시공제원을 Type II와 같이 하였을 때 원래의 2중관 분사주입공법 설계제원보다 주변지반의 변위발생 감소와 경제적인 시공이 될 것으로 판단된다.

3. 굴착단계에 따른 흙막이 벽체의 수평변위량을 FEM에 의해 2중관 분사주입공법 시공전·후에 대해서 수치해석한 결과 단열중첩으로 시공된 지역에서는 0.1~0.3mm의 최대수평변위 감소량을 나타냈으며 최대변위 발생지점은 2중관 분사주입

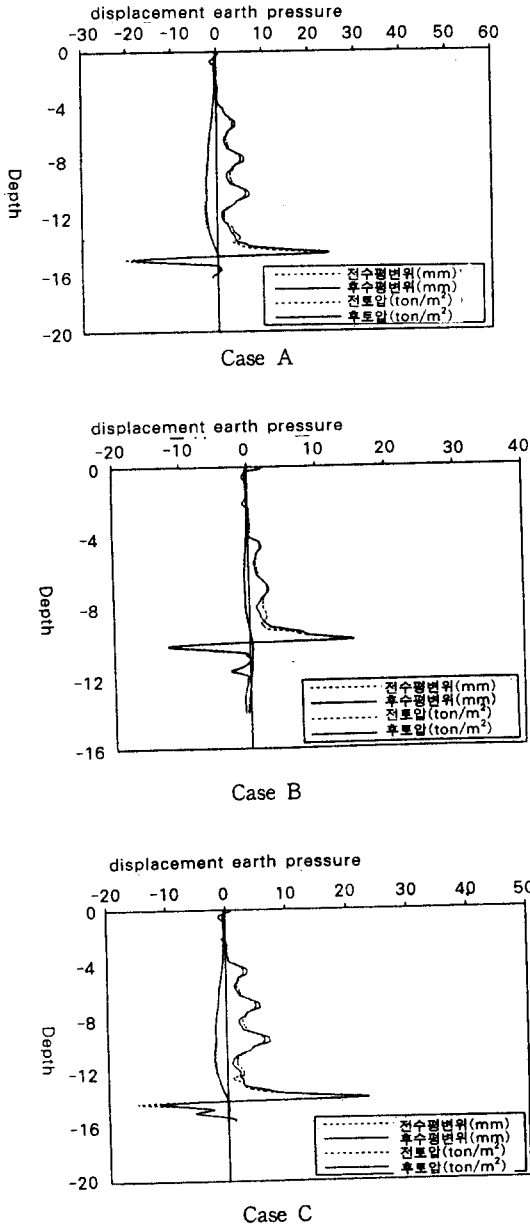


Fig. 2. Relationship of displacement and earth pressure (Case A, B, C)

공법 시공전·후에 있어서 대체적으로 동일하였고 굴착면으로부터 0.22~0.25H 되는 지점에서 발생되고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 대우엔지니어링 기술연구소, 1988, 도심지 굴착공사를 위한 지하가시설구조물의 설계 및 시공연구.
2. 부산지하철 2호선 231공구 지질조사보고서.
3. 이종규 외, 1993, 다층지반 굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포, 한국지반공학회 논문집 pp. 59~68.
4. 전성근, 1993 다층지반 토류벽체의 거동에 관한 연구, 단국대학교대학원, 박사학위논문.
5. 홍원표, 1995, 주입공법.
6. Clough, G.W. and J.M. Duncan., 1971, Finite Element Analysis of Retaining Wall Behavior, ASCE 97(SM12), pp. 1657~1673.
7. Clough, G.W., and Tsui, Y., 1997, Static Analysis of Earth Retaining Structures, Numerical Methods in Geotechnical Engineering edited by C.S. Desai and J. T. Christian, MGH Book Company, pp. 506~527.
8. Tschebotarioff, G.P., 1957 Soil Mechanics Foundations and Earth Structures, McGraw-Hill, New-York.
9. 關根 建, 1991, C.C.P工法の最近の施工例, 基礎工, vol. 19, No. 6, pp. 74~79.
10. 久保 弘明, 1990, ゼットグラウト工法による止水工法設計・施工とその効果, 基礎工, vol. 18, No. 8, pp. 82~89.
11. 玉置 修・矢作 樞・中川誠志, 1973, 多數の切梁反力實測値から求めた土留土壓について, 土と基礎, vol. 21, No. 5, pp. 21~26, 1973.
12. 玉置 修・和田克哉・中川誠志, 1976, たわみ性山留め壁に作用する土壓について, 土と基礎, vol. 24, No. 12, pp. 17~22.