

고압분사주입공법에 의한 지반개량사례연구(Ⅱ)

— 흙막이벽 배면지반보강 및 차수효과 —

Case Studies on Ground Improvement by High Pressure Jet - Grouting (Ⅱ)
- Effect on the Ground Reinforcement and Cut-off
of Ground Water Behind Temporary Retaining Walls -

윤 중 만*1

Yun, Jung - Mann

홍 원 표*2

Hong, Won - Pyo

정 형 용*3

Jeong, Hyeong - Yong

Abstract

When braced excavation with temporary retaining wall installation, is performed in loose sand with high ground water level boiling may be induced and considerable damage on the excavation works and structures in the vicinity can take place. Recently, for the purpose of reinforcement of ground and cut-off of ground water behind the temporary retaining wall, high pressure jet grouting is widely used.

The purpose of this paper is to investigate the effects of jet grouting on ground reinforcement and cut-off of the ground water behind temporary retaining walls for braced excavation. A series of both laboratory and field tests has been performed. The test results show that high pressure jet grouting has sufficient effects on reinforcement of stiffness of ground and retaining wall. The permeability of the improved ground was $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/s smaller than those of the original ground. Therefore, the effect on cut-off of ground water behind temporary retaining walls could be improved by high pressure jet grouting method.

요 지

지하수위가 높고 느슨한 사질토지반에서 가설흙막이벽을 설치하여 지하굴착공사를 실시할 경우 굴착저면에서 보일링현상이 발생하여 굴착공사 뿐만 아니라 인접구조물에 상당한 피해를 주

*1 성희원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*2 성희원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

*3 성희원, 한국기술개발공사 부사장

게 된다. 따라서 최근에는 흙막이벽 배면지반의 강도를 증대시키면서 동시에 흙막이벽의 차수효과를 높이기 위하여 고압분사주입공법을 실시하여 차수벽을 설치하는 보조공법이 널리 이용되고 있다.

고압분사주입공법에 의해 가설흙막이벽 배면지반에 시공된 지반개량체의 지반보강효과 및 차수효과를 검토하기 위하여 각종 실내시험 및 현장시험을 실시하였다. 시험결과 지반개량체는 지반조건과 시공방법에 따라 약간의 차이는 있으나 충분한 흙막이벽 배면지반의 보강 및 벽체의 강성보강 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 한편 지반개량체의 투수계수는 원지반의 투수계수보다 $10^2 \sim 10^3 \text{ cm/s}$ 정도 작아서 흙막이벽의 차수효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Jet Grouting, Soil improvement, Braced excavation, Temporary retaining wall, Soil strength, Permeability.

1. 서론

도심지의 인구집중현상으로 인한 교통난을 해소하기 위하여 최근 지하철건설공사가 지하수위가 높고 투수계수가 큰 충적토 지반에서 실시되는 경우가 급증하고 있다. 이러한 지반에서 지하굴착공사를 실시할 경우 굴착면과 굴착배면지반의 지하수위 차에 의해 굴착저면에 보일링현상이 발생하게 된다(홍원표의 2인, 1992). 이와 같이 보일링현상이 발생하게 되면 흙막이벽 배면지반의 토사가 유실되어 지반침하 및 인접구조물에 균열이 발생되기도 한다. 이러한 문제점을 방지하고 안전한 시공을 실시하기 위하여 흙막이벽 배면지반의 보강 및 차수를 목적으로 고압분사주입공법이 각종 토목공사현장에서 보조공법으로 널리 적용되고 있다.

본 공법은 가설흙막이벽 배면에 지반개량체를 주열식벽 형태로 시공하여 흙막이벽 혹은 댐 차수벽으로 널리 활용되고 있다(Miyasaka et al, 1985, 久保, 1990). 특히, 최근에는 지하굴착작업시 흙막이벽에 작용하는 토압을 경감시켜 흙막이벽의 과도한 수평변위 발생을 방지하며 굴착저면을 개량하여 히빙이나 보일링을 억제하여 수평지보공의 변형을 방지하는데 본 공법이 많이 이용되고 있다(山門, 1968, 三木の 2인, 1976). 한편, 연약지반의 지지력 보강, 기존구조물의 보호 및 언더피닝(Under-

pinning)등 구조물의 기초보강에도 널리 이용되고 있다(申基卓의 1인, 1986, Ichihashi et al, 1985). 이와 같이 각종 토목공사에서 이용되고 있는 고압분사주입공법에 의해 지중에 조성된 지반개량체의 지반보강효과 및 차수효과에 대한 연구의 필요성이 인식되어 국내 여러 학자들에 의해 이분야에 대한 연구(劉承伯, 1979, 沈在九, 1981, 천병식의 1인, 1993)가 활발히 진행되고 있다.

본 연구의 목적은 각종 지하굴착공사에서 가설흙막이벽 배면지반의 보강 및 차수를 목적으로 널리 사용되고 있는 고압분사주입공법의 흙막이벽 배면지반 보강효과 및 차수효과를 검토하는데 있다. 이러한 목적을 위해 지하수위가 높은 사질토지반에 실시되는 흙막이굴착의 세현장을 대상으로 흙막이벽 배면지반에 조성된 개량지반으로 부터 코어를 채취하여 일축압축시험, 간접인장시험(점하중재하시험, 압열시험) 탄성과속도시험 등의 실내시험을 실시하여 흙막이벽 배면지반의 지반보강효과 및 강도특성을 조사하였고 현장공내수압시험을 실시하여 지반개량체의 투수계수를 측정 후 원지반의 투수계수와 비교하여 차수효과를 검토하였다. 특히 본 논문에서는 2중관 및 3중관 고압분사주입공법의 흙막이벽 배면지반 보강효과 및 차수효과를 비교검토 하고자 한다.

본 논문은 고압분사주입공법의 지반개량효과를 규명하기 위한 일련의 연구결과로서 첫번

째 논문에서는 구조물 기초지반의 지지력증대 효과를 중심으로 정리하였으며(윤중만 외 2인, 1996) 본 논문에서는 흙막이구조물 배면지반의 보강 및 치수효과를 중심으로 정리하고자 한다.

2. 고압분사주입 시공현장

2.1 현장개요

본 연구의 대상으로 활용된 사례현장은 흙막이벽 배면지반 보강 및 치수를 목적으로 2중관 분사방식 및 3중관 분사방식으로 지중에 지반개량체를 조성한 현장으로 제1현장과 제2현장은 3중관 분사방식으로 제3현장은 2중관 분사방식으로 시공되었다.

제1현장은 일산 신도시지역 일산선 전철 장항정차장 건설을 위한 지반굴착현장으로 흙막이벽 배면에 S.G.R. 차수용 그라우팅을 2열로 시공한 후 굴착공사를 실시하던 도중에 보일링 현상이 발생하여 추가로 S.C.W.(Soil Cement Wall)를 시공하였으나 차수효과를 얻지 못하고 보일링현상이 계속 발생하여 다시 3중관 분사주입공법으로 지중에 지반개량체를 시공하여 굴착공사를 실시한 현장이다(홍원표외 2인, 1992). 사진 1에서는 본 현장에서 발생된 보일링현상으로 형성된 원형모양의 분수구를 보이고 있다. 한편, 제2현장과 제3현장은 서울 지하철 6호선 제6-2공구 및 제7호선 7-23공구의 지반굴착현장으로 굴착현장 주변으로 부터 1~2m 떨어져 인접구조물(상가 및 주택)이 밀집해 있어 굴착으로 인한 흙막이벽의 변형 및 지하수위의 하강으로 인접구조물에 침하 및 균열이 발생할 우려가 있는 현장이다. 따라서 고압분사주입공법으로 흙막이벽 배면지반을 보강하였다. 제2현장은 현재 지반굴착작업이 완료된 상태로 굴착도중 별다른 문제점이 발생하지 않았으며 제3현장은 아직 지반굴착작업이 실시되지 않고 있다.

지반개량체 조성시 3중관 분사주입공법(S.I.G.: Super Injection Grouting)이 적용된 제1현장의 분사압력은 $500\text{kgf}/\text{cm}^2$, 제2현장은

$450\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이며 2중관 분사주입공법(J.S.P.: Jumbo Special Pattern)이 적용된 제3현장의 분사압력은 $200\text{kgf}/\text{cm}^2$ 였다.



사진 1. 굴착지반 보일링발생 현장

2.2. 지반조건

본 연구에 활용된 사례현장의 지반은 우리나라 지층생성 시기중 선캠브리아기 경기변성암 복합체의 편마암이 기반암을 이루고 있다. 기반암의 상부에는 오랜 풍화작용에 걸쳐서 형성된 풍화대가 분포하며 그 상부에는 제3기의 충적층이 부정합적으로 넓게 분포되어 있다.

사례현장의 지반조건 및 표준관입시험 결과는 그림 1과 같다. 지층분포 형태는 현장에 따라 차이가 있으나 대체적으로 지표면에서 표토층, 충적토층, 풍화대, 기반암층으로 구성되어 있다. 표토층은 주로 도로 및 제방축조, 도시개발을 위한 매립과정에서 형성된 지층으로 실트, 점토, 모래 및 소량의 자갈 등이 혼재되어 있는 매립토층으로 이루어졌으며 상대밀도는 느슨한 상태를 나타내고 있다.

매립토층의 하부에는 충적토층이 형성되어 있으며 본 층은 과거 상류의 범람원으로 부터 퇴적물이 유입, 공급되어 형성된 하상퇴적층으로 실트질점토, 실트질모래, 모래, 모래질자갈층으로 구분된다. 상부충적층의 상대밀도는 중간정도로 나타나고 있으나 하부층으로 내려갈수록 조밀한 상태를 나타내고 있다. 특히 모래

층 및 모래자갈층은 한강수계의 대수층을 형성하고 있으며 투수성이 매우 큰 지층이다.

풍화대는 상부 풍화토층과 하부 풍화암층으로 구분된다. 풍화토층은 기반암이 완전히 풍화되어 실트 또는 모래질실트로된 상태이며 풍화암층은 모암으로서의 역학적 성질은 변화되었지만 모암의 조직이 남아 있으며 일부 암편을 함유하고 있다. 상대밀도는 조밀 내지 매우 조밀한 상태를 지니고 있다.

기반암인 연암층은 선캄브리아기의 경기편 마암류로 구성되어 있으며 보통 내지 약간 풍

화되어 코어 채취시 압편상 내지 압주상의 코어가 채취되었으며 균열 및 절리가 발달되어 있다.

한편, 본 사례현장의 지층 가운데 모래층 및 모래자갈층은 한강수계의 대수층을 형성하고 있어 지반조사 결과 각 현장의 지하수위는 상당히 높게 형성되어 있는 것으로 나타났다. 각 현장의 지하수위는 제1현장의 경우, G.L.-1.0~-4.0m, 제2현장은 G.L.-4.9~-6.7m, 제3현장은 G.L.-3.0~-3.5m정도에 형성되어 있는 것으로 나타났다.

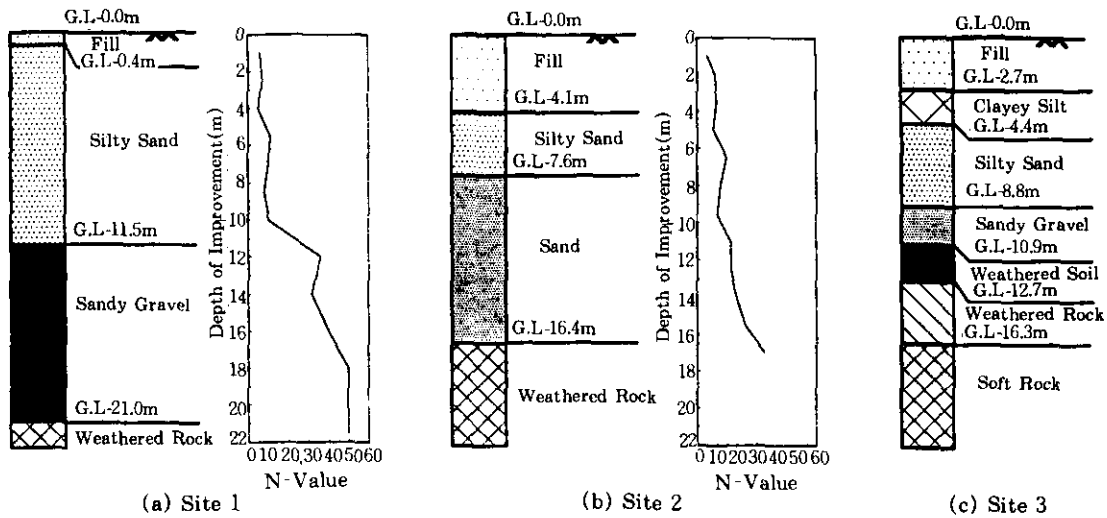


그림 1. 토질주상도

3. 시험결과

본 연구에서 고압분사주입공법에 의해 지중에 조성된 지반개량체의 지반보강 효과를 검토하기 위하여 현장에서 시공된 지반개량체로부터 코어를 채취하여 각종 실내시험을 실시하였다. 실내시험으로는 일축압축강도시험, 인장강도(점하중재하시험, 압열시험)시험, 탄성파속도시험을 실시하였으며 일축압축강도시험시 공시체에 종·횡방향으로 스트레인 게이지

(Strain Gauge)를 부착하여 포아손비를 측정하였다.

한편, 본 연구의 사례현장에 시공된 고압분사주입공법은 지반보강보다는 흙막이벽의 차수가 주된 목적이므로 지반개량체의 차수효과를 확인하기 위하여 현장에 시공된 개량체내에 NX 크기로 보링을 실시하여 공내수압시험(Packer Test)을 실시하였다. 고압분사주입공법에 의해 지중에 조성된 지반개량체에 대한 실내시험을 실시하여 얻은 개량강도를 지층별

로 구분하여 정리하면 표 1과 같으며 현장에서 실시한 수압시험결과를 토대로 지반개량체의 투수계수를 나타내면 표 2와 같다.

표 1을 보면 고압분사주입방식에 의해 지중에 조성된 지반개량체의 일축압축강도시험 및 인장강도시험 결과 동일한 분사메커니즘으로 시공되어도 분사압력과 지층의 구성성분, 원지반의 굳기에 따라 강도의 차이가 나타나고 있

으며 지반개량체의 직경은 분사압력에 비례하여 커지고 있음을 알 수 있다. 여기서 개량체의 직경은 지반개량체의 두부에서부터 G.L-2.0m 까지 깊이에서 확인된 결과이다. 한편, 표 2에서는 현장투수시험결과에 의한 지반개량체의 투수계수는 각 지층에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있으나 분사메커니즘(분사압력)에 따라 약간 차이가 있는 것으로 나타났다.

표 1. 지반개량체의 강도특성

구 분		지 층	제 1 현장		제 2 현장	
			실트질모래층	모래자갈층	실트질모래층	모래층
실 내 시험	일축압축강도(kgf/cm ²)		95.6~422.2	142.2~497.8	33~84	106~282
	인장강도(kgf/cm ²)	점하중강도	7.8~21.3	19.1~39.2	6.8~8.5	8.6~27.2
		압열강도	-	-	6.5~11.2	8.8~27.2
	탄성파속도(km/s)		2.269~3.388	3.232~4.198	1.567~2.481	2.818~3.469
포아손비		0.16~0.28		0.1~0.3	0.1~0.26	
개량체의 직경(cm)			150		120	

표 2. 지반개량체의 투수계수

지층	현장	투 수 계 수(cm/s)		
		제 1 현장	제 2 현장	제 3 현장
실트질점토층	-	-	-	3.80×10^{-5}
실트질모래층	$1.93 \times 10^{-3} \sim 6.89 \times 10^{-5}$	$5.95 \times 10^{-6} \sim 4.95 \times 10^{-6}$	$3.39 \times 10^{-5} \sim 1.65 \times 10^{-5}$	-
모래층	-	$7.31 \times 10^{-6} \sim 2.63 \times 10^{-6}$	-	-
모래자갈층	-	-	-	$4.99 \times 10^{-5} \sim 4.41 \times 10^{-5}$
풍화토층	-	-	-	$6.53 \times 10^{-5} \sim 4.16 \times 10^{-5}$

4. 흙막이벽 배면지반의 보강효과

4.1 각 공법에 의한 지반강도 비교

흙막이벽체의 배면에 고압분사주입에 의해 시험시공된 지반개량체가 흙막이벽 배면지반의 보강기능을 발휘하기 위하여는 충분한 강도를 지니고 있어야 한다.

3중관 고압분사주입공법에 의해 지중에 조성된 지반개량체의 강도특성을 알아보기 위하여 개량심도별 지반개량체의 일축압축강도 분

포를 나타내면 그림 2와 같으며 지반개량체의 강도는 대체적으로 개량심도가 깊어질수록 증가하는 형태를 보이고 있다. 이는 원지반의 강도(N값)의 차이로 인한 것으로 생각된다. 즉, 그림 1에 나타난 바와 같이 원지반 강도는 개량심도가 깊어질수록 증가하고 있으므로 지반개량체의 강도도 이에 비례하여 증가하고 있다. 그러나 지반개량체 강도의 최저치와 최대치 사이의 폭이 크게 나타나고 있는데 이것은 지층이 균일하지 못한 점과 시공성의 어려움에 의한 결과라 할 수 있다. 즉, 지반개량시 세

굴된 토립자의 일부가 고화재에 혼입되어 개량체를 조성하게 되는데, 이때 조성된 지반개량체의 밀도 및 간극의 불균일성으로 인하여 강도차이가 발생한 것으로 판단된다.

제1현장의 경우 그림 2(a)속에 타원으로 표시한 깊이에 형성된 개량체의 일축압축강도가 다른 깊이의 일축압축강도보다 현저하게 작게 나타나고 있다. 이러한 원인은 이 깊이에서 채취된 코어상태로 미루어 볼때, 원지반 구성성분의 일부인 점토가 과압밀 상태로 존재하고 있어 지반개량시 원지반의 토립자가 완전히 치환되지 않은 상태로 개량체에 혼입되어 강도가

저하된 것으로 판단된다. 제2현장의 경우 그림 2(b)와 같이 G.L.-4.1~-5.9m 정도에 형성된 지반개량체의 압축강도가 비교적 작게 나타나고 있는데 이것은 지반개량체 시공위치로부터 인접구조물이 1~2m 정도 떨어져 있어 고압분사주입공법으로 지반개량체 조성시 분사압력에 의해 인접구조물의 지하실에 균열등의 피해를 줄 우려가 있어 분사압력을 감소시키면서 지반개량체를 조성하여 원지반토의 질삭 및 교반혼합이 제대로 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.

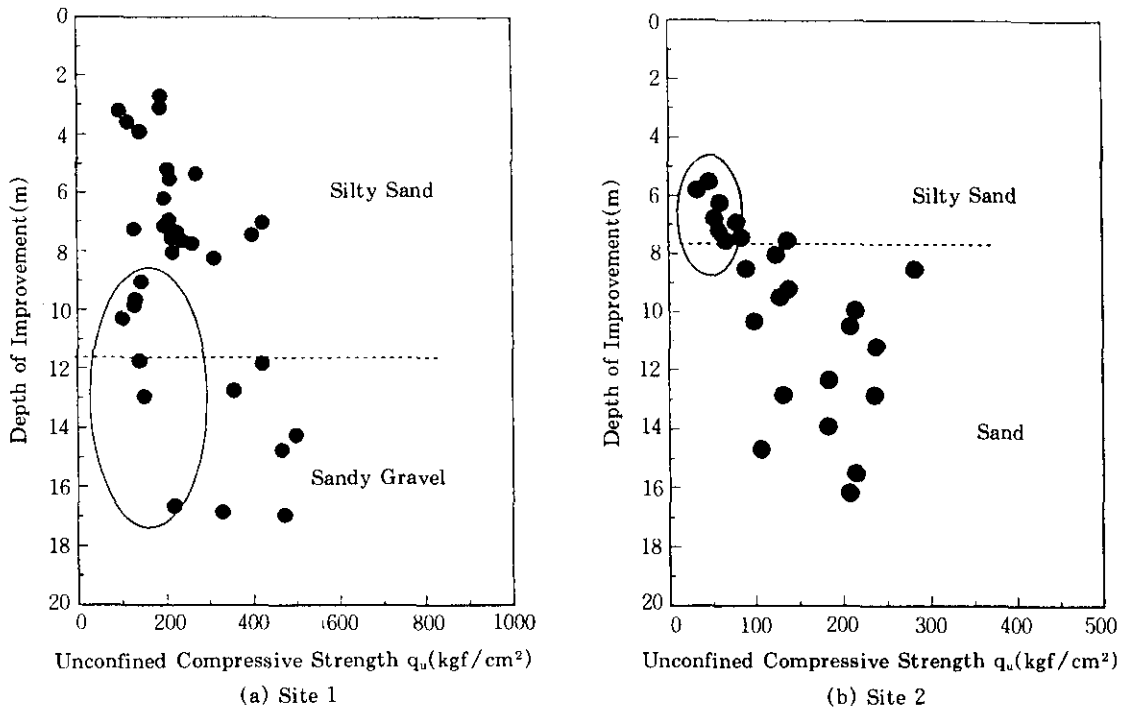


그림 2. 개량심도별 일축압축강도 분포

한편, 제1현장의 인근 공사현장에서 흙막이벽 차수공법으로 시공된 S.C.W.벽체와 2중관 분사주입공법에 의해 시공된 지반개량체의 강도를 3중관 분사주입공법에 의한 지반개량체의 강도와 비교하여 나타내면 그림 3과 같다. S.C.W., 2중관 및 3중관 분사주입공법에 의한

지반개량체의 강도분포가 확실히 구분되어 분포하고 있음을 알 수 있다.

즉, 제1현장에서 시공된 지반개량체의 일축압축강도는 표 1과 같이 실트질모래층에서 95.6~422.2kgf/cm²(평균 205kgf/cm²)의 범위에 분포하고 있으며, 모래자갈층에서는 142.2~

497.8kgf/cm²(평균 338kgf/cm²)으로 나타났다. 한편, 실트질모래층에서 S.C.W.벽체의 일축압축강도는 4.2~20.6kgf/cm²(평균 9.5kg/cm²)범위에 분포하고 있으며 2중관 분사주입공법에 의해 시공된 지반개량체의 강도는 49.0~195.0kgf/cm²(평균 87kgf/cm²)으로 나타났다(그림 3 참조). 3중관 분사주입공법에 의해 모래자갈층에 시공된 지반개량체의 강도가 실트질모래층의 강도보다 약 1.5배 정도 크게 나타났다. 그리고 3중관 분사주입공법에 의해 실트질모래층에 시공된 지반개량체의 강도는 S.C.W.벽체의 강도보다 약 20배 정도, 2중관 분사주입공법에 의해 시공된 지반개량체의 강도보다는 2.5배 정도 크게 나타났다.

이러한 일축압축강도를 콘크리트 설계기준강도와 비교하면(무근콘크리트 부재의 최저설계기준강도 $\sigma_{sk}=160\text{kgf/cm}^2$, 철근콘크리트 부재의 최저설계기준강도 $\sigma_{sk}=210\text{kgf/cm}^2$), S.C.W. 벽체와 2중관 분사주입공법에 의해 시공

된 지반개량체는 무근콘크리트부재의 최저설계기준강도보다 현저히 작게 나타났다. 그러나 3중관 분사주입공법에 의해 시공된 지반개량체의 강도는 실트질모래층에서 무근콘크리트 부재의 설계기준강도보다는 크고 철근콘크리트 부재의 설계기준강도보다는 약간 적으나, 모래자갈층에서의 강도는 콘크리트 부재의 최저설계기준강도보다도 크게 나타났다.

4.2 흙막이벽 배면지반의 강성보강

제1현장에서 3중관 분사주입공법으로 시공된 지반개량체에 대한 일축압축시험의 응력-변형률 곡선으로 부터 얻은 탄성계수(E_{50})와 2중관 분사주입공법 개량체의 응력-변형률 곡선에서 얻은 탄성계수(E_{50})를 개량심도에 따라 비교하여 나타내면 그림 4와 같다.

이 그림에서 실트질모래층에서의 3중관 분사주입공법 개량체의 탄성계수는 지표면에서

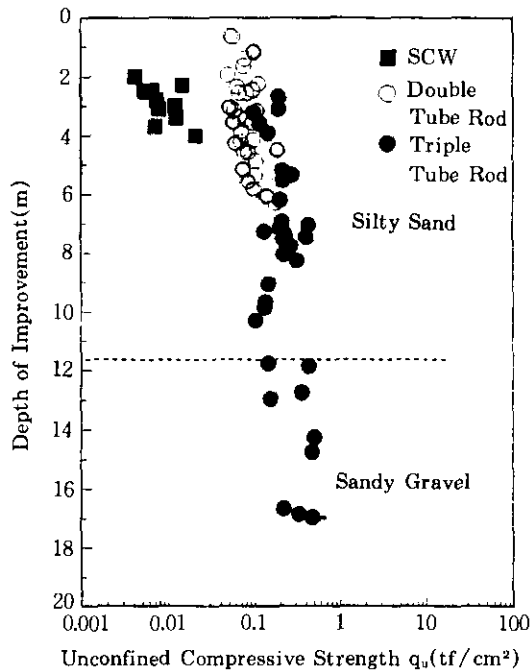


그림 3. 각 공법에 의한 지반개량체의 일축압축강도 비교

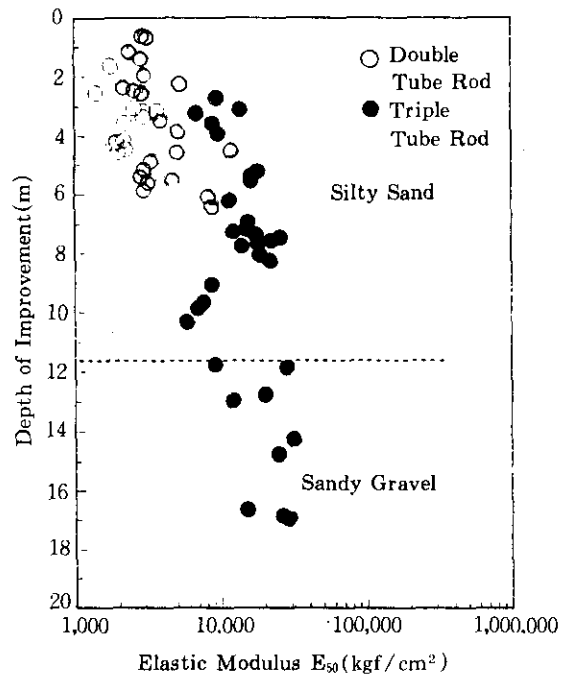


그림 4. 개량심도에 따른 탄성계수분포

G.L-8.0m 지점까지는 깊이에 따라 증가하는 분포를 보이다가 G.L-8.0m~G.L-11.5m 사이에서는 감소(이 부분은 4.1절에서 이미 설명한 바와 같이 시공시 토립자가 주입재와 혼합되어 지반개량체의 시공정도가 양호하지 못한 것으로 기인한다.)하는 분포를 보이는 반면, 모래자갈층에서의 탄성계수 및 2중관 분사주입공법에 의해 시공된 지반개량체의 탄성계수는 개량심도에 관계없이 대부분 일정한 분포를 보이고 있다. 한편, 개량심도에 따른 탄성계수 분포와 그림 2(a)에 나타난 개량심도에 따른 일축압축강도 분포를 비교하여 보면 거의 비슷한 분포형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 일축압축강도와 탄성계수는 비례관계가 있음을 알 수 있다 이 관계를 도시하면 그림 5와 같다.

즉, 그림 5는 3중관 고압분사주입공법에 의해 시공된 지반개량체의 일축압축시험에서 구한 탄성계수(E_{50})와 일축압축강도(q_u)와의 관계를 나타낸 것으로 탄성계수의 분포는 실트질 모래층에서 $5000 \sim 25000 \text{ kgf/cm}^2$, 모래자갈층에서 $8000 \sim 33000 \text{ kgf/cm}^2$ 사이에 분포하고 있어 지반개량체의 탄성계수도 원지반의 종류에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 한편, 지반개량체의 탄성계수(E_{50})와 일축압축강도(q_u)와

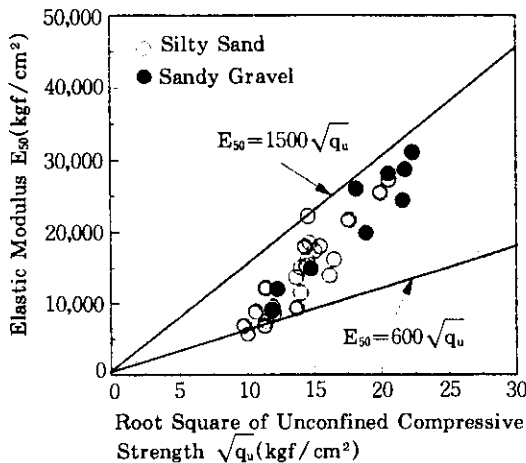


그림 5. 일축압축강도와 탄성계수와의 관계

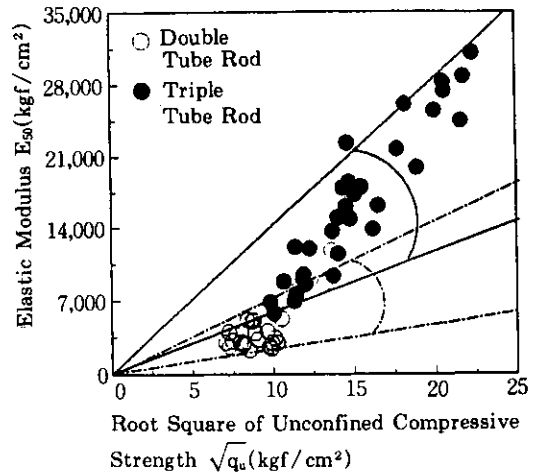


그림 6. 분사메커니즘에 따른 일축압축강도와 탄성계수와의 관계

의 관계는 $600 \sim 1500 \sqrt{q_u}$ 로 나타나고 있다.

그림 6은 3중관 및 2중관 분사주입공법에 의해 지중에 조성된 개량체의 일축압축강도와 탄성계수의 관계를 함께 도시한 결과이다. 이 그림에 의하면 압축강도가 큰 3중관 분사주입공법 개량체가 2중관 분사주입공법 개량체보다 탄성계수가 상당히 큼을 알 수 있어 3중관 분사주입공법의 지반개량효과가 2중관 분사주입공법보다 양호함을 알 수 있다.

5. 흙막이벽 배면지반의 차수효과

5.1 지하수의 영향

제1현장의 3중관 분사주입공법에 의해 시공된 지반개량체로 부터 채취된 코어의 함수비는 10~30% 정도로 나타났다. 그림 7은 지반개량체의 일축압축강도와 함수비와의 관계를 나타낸 것으로 지반개량체의 강도는 함수비가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 고압분사주입공법에 의하여 형성된 지반개량체는 콘크리트나 모르타와 달리 내부에 흙입자를 포함하고 있어 물의 영향을 많이 받게되기 때문이다. 그러므로 흙막이구조물의 차수목적으로 고압분사주입공법을 이용할 경우, 건기와

우기시의 지하수위 변화에 따른 지반개량체의 강도 변화를 조사할 필요가 있다.

그림 8은 지하수위 변화에 따른 지반개량체의 강도변화를 조사하기 위하여 일축압축용 공시체 및 인장강도용 공시체를 48시간 수침시킨 경우와 노건조기에서 건조시킨 두 경우를 대상으로 건조상태와 습윤상태의 강도(일축압축강도, 인장강도)변화를 비교한 결과이다. 그림에서 습윤상태의 지반개량체의 일축압축강도는 건조상태보다 평균 20%정도, 최대 45%까지 감소하는 것으로 나타났으며 인장강도는 습윤상태가 건조상태보다 평균 30%정도 감소하며 최대 60%까지 감소하는 것으로 나타났다.

따라서 지반개량체 시공시 지하수위의 유무 및 지하수위의 변화가 개량체의 강도에 미치는 영향은 상당히 크므로 정확한 지반조사를 실시하여 지하수위의 위치를 정확히 조사하고, 지하

수위의 변화요인의 여부를 면밀히 조사할 필요가 있다.

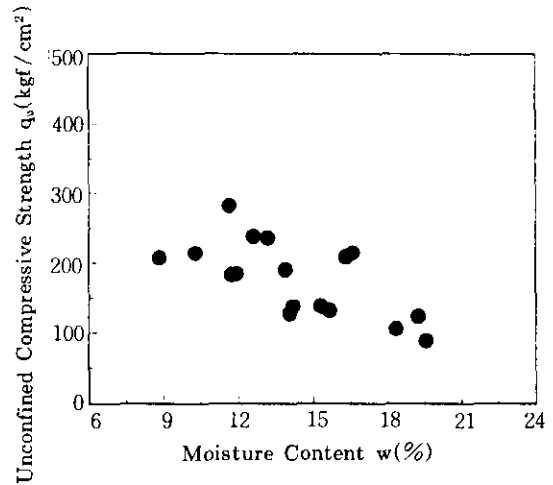
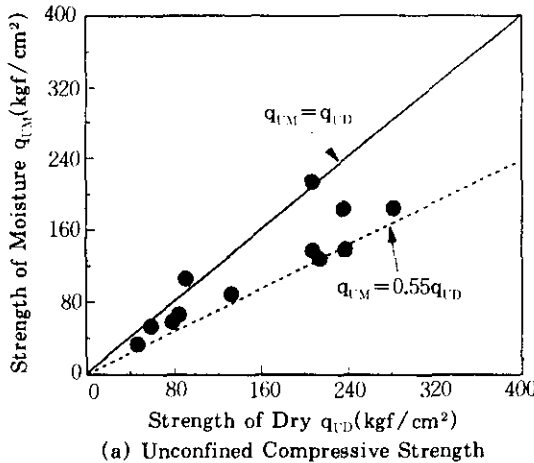
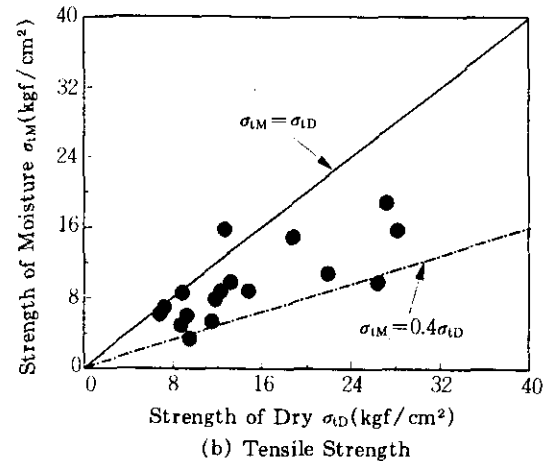


그림 7. 일축압축강도와 함수비와의 관계



(a) Unconfined Compressive Strength



(b) Tensile Strength

그림 8. 습윤상태와 건조상태의 지반개량체 강도변화

5.2 투수계수의 변화

각 현장의 흙막이벽 배면지반의 지하수위는 각각 G.L.-1.0~ -4.0m, G.L.-4.9~ -6.7m, G.L.-3.0~ -3.5m에 형성되어 있다. 특히, 2.2절에 언급된 바와 같이 본 사례현장의 모래층 및 모래자갈층이 한강수계와 대수층을 형성하고 있

어 굴착공사도중 보일링현상이 발생하기도 하였으며, 혹은 발생할 우려가 매우 높은 지반으로 흙막이벽 배면에 차수벽의 설치가 절실히 요구되는 현장이다. 따라서 고압분사주입공법을 이용하여 흙막이벽 배면에 지반개량체를 주열식벽 형태로 1열 중첩시공하여 벽체의 연속

성을 유지시켰다.

3중관 고압분사주입공법에 의한 지반개량체 및 S.C.W.벽체의 보링공내에서 수압시험을 실시하여 측정된 투수계수와 원지반 투수계수를 지층별로 구분하여 나타내면 표 3과 같으며 개량심도에 따라 비교하여 나타내면 그림 9와 같다. 표 3에 나타난 바와 같이 지반개량체의 투

수계수는 제 1현장의 경우를 제외하고는 3중관 분사방식의 경우 10^{-6} cm/s, 2중관 분사방식의 경우 10^{-5} cm/s 정도로 나타났다. 이는 BELL (1993)에 의해 발표된 모래 및 모래자갈층에 형성된 시멘트 개량지반의 투수계수 10^{-5} ~ 10^{-6} cm/s와 매우 유사하게 나타났다.

표 3. 각 지층별 투수계수

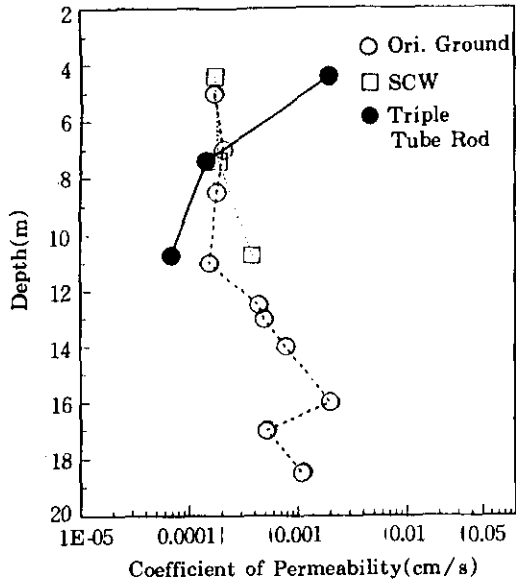
지층	투수계수 (cm/s)						
	제 1 현장			제 2 현장		제 3 현장	
	원지반	지반개량체		원지반	지반개량체 (S.I.G.)	원지반	지반개량체 (J.S.P.)
S.C.W.		S.I.G.					
점토질 실트층	-	-	-	-	-	-	1.57×10^{-5}
실트질 모래층	2.12×10^{-4}	3.18×10^{-4}	1.95×10^{-5}	-	6.71×10^{-6}	2.57×10^{-4}	7.03×10^{-5}
	1.55×10^{-4}	1.75×10^{-4}	1.75×10^{-5}			1.34×10^{-4}	1.11×10^{-5}
모래층	-	-	-	2.64×10^{-4}	7.34×10^{-6}	-	-
	-	-	-	1.57×10^{-3}	2.67×10^{-6}		
모래 자갈층	2.01×10^{-3}	-	-	-	-	1.19×10^{-4}	6.83×10^{-5}
	4.91×10^{-4}	-	-	-	-		7.12×10^{-5}
풍화토층	-	-	-	-	-	1.95×10^{-4}	7.13×10^{-5}
풍화암층	-	-	-	-	-	6.17×10^{-5}	5.48×10^{-5}
	-	-	-	-	-		

그림 9(a)와 같이 우선 제 1현장에 시공된 S.C.W.벽체의 투수계수는 3.18×10^{-4} ~ 1.75×10^{-4} cm/s으로 원지반 투수계수 2.12×10^{-4} ~ 1.55×10^{-4} cm/s와 별차이가 없어 차수효과를 충분히 얻을 수 없었음을 알 수 있다. 또한, 지반개량체의 투수계수가 G.L-4.0~-4.8m구간과 G.L-7.0~-8.0m 구간에서 각각 1.95×10^{-5} cm/s, 1.47×10^{-4} cm/s로 비교적 크게 나타나고 있다. 이러한 이유는 수압시험을 실시하기 전에 공내재하시험을 먼저 실시한 관계로 공내재하시험시 보링 공벽에 가하여진 압력으로 인해 공벽에 균열이 많이 발생하였던 것에 기인한 것으로 생각된다. 즉, 수압시험시 공내에 주

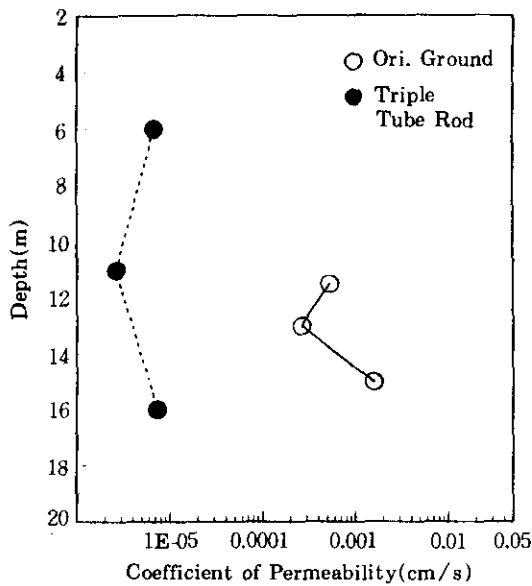
입된 물이 이 균열을 통해 빠져나가는 누수현상이 발생하여 투수계수가 크게 발생된 것으로 생각된다. 그러나 공내재하시험을 실시하지 않은 G.L-10.5~-11.5m구간에서의 투수계수는 6.89×10^{-5} cm/s로 다른 공법의 투수계수보다는 상당히 작게 나타나고 있다. 또한, 그림 9(b)와 (c)와 같이 고압분사주입공법에 의한 지반개량체의 투수계수는 원지반의 투수계수보다 10^{-2} cm/s~ 10^{-3} cm/s정도 작게 나타나고 있다. 따라서 고압분사주입공법에 의하여 흙막이벽의 차수효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

한편, 그림 10은 2중관과 3중관 분사주입공

법에 의해 시공된 지반개량체의 투수계수를 비교하여 나타낸 것으로 2중관 분사방식보다는 3중관 분사방식에 의해 지중에 조성된 지반개량체의 투수계수가 10^{-1} cm/s 정도 더 작게 나타나고 있어 2중관 분사주입공법보다는 3중관 분사주입공법의 차수효과가 더 뛰어난 것으로 나타나고 있다.



(a) Site 1



(b) Site 2

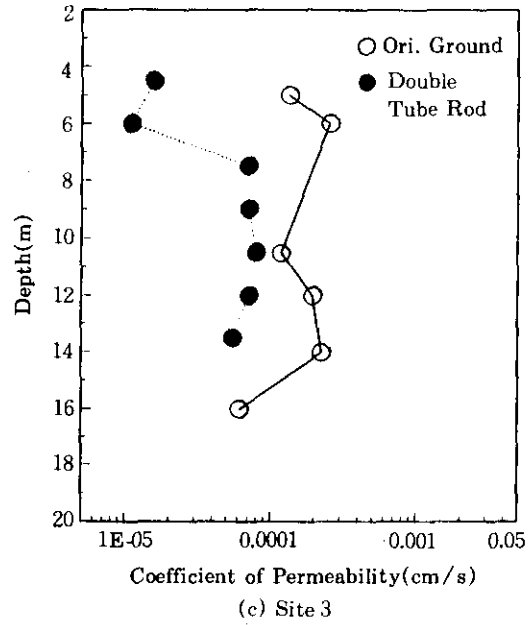


그림 9. 원지반과 지반개량체의 투수계수와의 비교

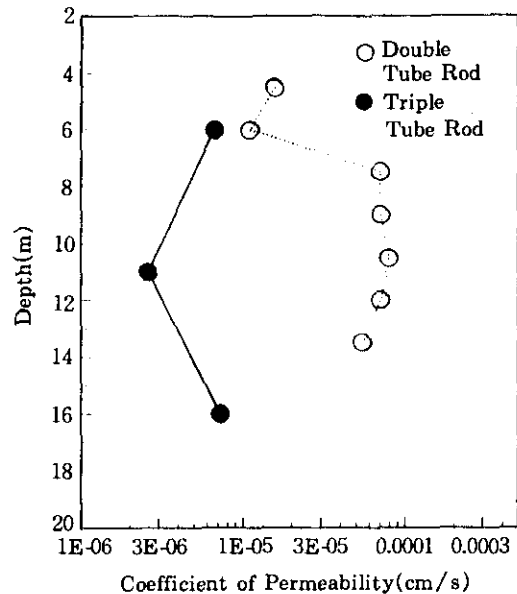


그림 10. 2중관 및 3중관 고압분사주입공법에 의한 지반개량체의 투수계수 비교

그러나 고압분사주입공법을 이용하여 흙막이벽의 차수공을 시공할 경우, 완벽한 차수효과를 얻기 위해서는 지반개량체의 벽체의 강성, 불투수층의 근입성, 벽체의 연직성, 벽체의 연속성. 등이 확보되어야만 한다. 특히 벽체의 연속성은 차수효과를 얻는데 대단히 중요한 조건이므로 지반개량체를 반드시 중첩시공해야만 한다.

6. 결론

지하수위가 높고 투수성이 큰 사질토지반에 가설흙막이벽 배면지반에 고압분사주입공법으로 시공된 지반개량체의 지반보강효과 및 차수효과를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 흙막이벽 배면개량지반의 강도는 원지반의 강도와 함수비의 영향을 많이 받는다.
- 2) 개량지반의 강도특성은 콘크리트와 비슷하며, 변형특성은 콘크리트와는 약간 차이가 있어 콘크리트보다는 일반적으로 변형량이 크다. 또한 개량지반의 탄성계수도 원지반의 토질에 따라 차이가 있다.
- 3) 3중관 분사주입공법에 의한 흙막이벽 배면지반보강 및 벽체의 강성보강효과가 S. C.W.공법이나 2중관 분사주입공법에 의한 경우보다 양호하다.
- 4) 습윤상태 지반개량체의 일축압축강도와 인장강도는 건조상태의 각 강도보다 평균 20~30%정도, 최대 50%까지 감소한다. 따라서 지반개량체의 강도에 미치는 지하수의 영향은 상당히 크다.
- 5) 지반개량체의 투수계수는 원지반의 투수계수보다 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ 정도 작게 되므로 고압분사주입공법에 의하여 흙막이벽의 차수효과를 얻을 수 있다. 특히 2중관 분사주입공법보다는 3중관 분사주입공법의 차수효과가 크다.

참고 문헌

1. 劉承伯(1979), "연약지반개량공법의 소개", 대한토목학회지 제 27권, 제2호, pp.22~25.
2. 申基卓, 金周範(1986), "매립토층의 특수말뚝기초 공사에", 대한토질공학회, 제2권, 제3호, pp. 89~95.
3. 沈在九(1981), "고압분사주입공법(JSP)", 한국농공학회지, 제2권, 제3호, pp.48~51.
4. 윤종만, 홍원표, 유승경(1996), "고압분사주입공법에 의한 지반 개량사례연구(I)", 한국지반공학회지, 제12권, 제4호 pp.33~45.
- 천병식, 오민열(1993), "지하철과 근접시공에서 지반주입의 역할", 한국지반공학회, 지반굴착위원회, 학술발표집, 제2집, pp.96~141.
5. 홍원표, 임수빈, 김홍택(1992), "일산전철 장항정차장구간의 굴토공사에 따른 안정성 검토 연구 보고서", 대한토목학회.
6. 山門明雄(1968), "高壓細噴流による土の切削し工法に關する考察", 土と基礎, Vol.16.
7. 三木五三郎, 佐藤剛司, 中川晃次(1976), "粘性土へのセメント係急硬材の壓力注入效果について", 第11回土質工學研究發表會, pp.1077~1080.
8. 久保弘明(1990), "ジェットグラウト工法による止水工法設計・施工とその效果", 基礎工 Vol. 18, No. 8, pp.82~89.
9. Bell, A. L.(1993), "Jet Grouting-GROUND IMPROVEMENT", Edited by Moseley, M. P., The USA and Canada by CRC Press, Inc. pp.149~174.
10. Miyasaka, G. et al.(1985), "Jet Grouting for a Self-Standing Wall", Grouting, Improvement Soil and Geosynthetics Edited by R. H. Borden, R. D. Holtz and I. Juran, ASCE, Vol. 1, pp.82~193.
11. Ichihashi, Y. et al.(1985), "Jet Grouting in Airport Construction", Grouting, Improvement Soil and Geosynthetics Edited by R. H. Borden, R. D. Holtz and I. Juran, ASCE, Vol. 1, pp. 82~193.

(접수일자 1995. 10. 23)