

지반 그라우팅에 의한 상부구조물의 안전성 분석

황철성

가천대학교 토목환경공학과
(2011. 9. 14. 접수 / 2013. 7. 8. 채택)

Stability Analysis of Upper Structures by Soil Grouting

Chulsung Hwang

Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University

(Received September 14, 2011 / Accepted July 8, 2013)

Abstract : Transportation and further expansion of social infrastructure was needed along the development of urbanization and population concentration. To use the underground space due to the lack of availability of land, it is inevitable to intersect between present structure and tunnel during construction. Soil grouting is one of the ground improvement methods to reinforce weak soil around the underground structures by injection of grouting liquid. Some of central columns of an upper structure are damaged during injection of grouting liquid by injection pressure. To investigate and improve the stability of the tunnel, three dimensional analysis are performed with full construction stages which includes the construction of present underpass, damaging columns of the underpass, reinforcing the columns by H-pile and shear walls, and excavation and construct tunnel. The arrangement of grouting holes such as curtain and horizontal type affects largely to the stability of upper structure and horizontal arrangement diminish the shear forces which is the cause of damage of central columns. The liquid injection type of reinforcement for tunnel is not recommended while the presence of upper structure with columns. Wall type reinforcing is utilize for permant support of upper structures which is affected by grouting injection pressure. H-pile is utilize for temporary support, but not for permanent since the sharing of shear forces is not much to shear wall during tunnel construction.

Key Words : soil grouting, stability analysis, upper structures, grouting arrangement, shear wall

1. 서론

대도시의 인구집중화에 따라 신설되는 사회기간시설은 이용이 가능한 지상부지의 부족으로 말미암아 지하공간의 활용이 점차 확대되어 가고 있다. 이에 따라 기존의 지하시설물을 관통하여 교통시설물의 건설이 필연적으로 발생하게 되며 선형계획을 깊은 심도로 하여 기존 지하시설물과의 근접시공을 배제할 수 있으나 교통의 기능과 이용객의 편의성으로 인해 근접시공이 불가피한 경우가 빈번하다. 이러한 경우 기술적 안전성이 검증되지 않은 경우 붕괴사고가 발생할 수 있으며, 이에 대하여 연구 및 분석이 진행되었다¹⁻⁶⁾.

이때 기존구조물의 안전성을 확보하기 위해 주변지반에 대한 보강을 실시하며, 지반 그라우팅이 가장 널리 사용하는 방법 중의 하나이다.

지반 그라우팅은 사용 목적에 따라 다양한 공법이 개발되어 왔으며, 약액주입공법은 몇 가지 약액을 조합, 켈시간을 이용하여 흙속의 크고 작은 간극을 완전히 충전시켜 지반을 고결시키는 방법이다. 처음에는 시멘트계가 이용되었지만 최근에는 물유리계, 벤토나이트 및 고분자약액 등 각종 주입재가 개발 사용되고 있다. 이중 물유리계 그라우팅은 지하구조물의 차수 및 지반개량을 목적으로 가장 널리 사용되는 지반개량공법 중의 하나이다.

물유리계 그라우팅은 단순한 차수를 목적으로 하는 것 외에 연약지반 또는 파쇄대에서 터널굴진 또는 지반굴착시의 차수, 붕괴방지 또는 시가지에 있어서의 지하철 터널, 상하수도, 전기통신용 매설관 등의 건설을 위한 굴착에 있어서 인접빌딩, 제구조물의 침하방지를 위한 주입공사에 사용되며, 이에 대한 지반강도의 증대효과에 대해 연구되었다⁷⁾. 또한 지반 그라우팅에 의해 인접 구조물과 터널의 안전성을 증진시키는 효과는 국내의 터널시공이 증가함에 따라 연구가 활발히 진행되어 왔다⁸⁻⁹⁾.

지반개량공법이 적절한 효율을 발현하기 위해서는 그라우트의 켈타임, 점성, 주입압력, 주입속도, 주입공의 유효경, 주입방식, 지반의 투수계수 및 공극률에 대한 정밀한 조사에 의해 주입조건을 설계하여야 한다. 또한 적절한 주입압을 통해 지중에 약액을 침투시켜야 하므로 수압파쇄등의 문제가 발생되지 않게 하기 위해서는 현장의 지반조건에 부합되는 적정압력을 선정하는 것이 중요하다. 그라우팅의 주입압에 대한 연구로는 국내 그라우팅 재료별 특성에 따른 설계사양에 대한 연구¹⁰⁾와 수행되었고, 지반보강 그라우팅 적정주입압력에 관한 실험적 연구¹¹⁻¹²⁾, 절리 거칠기와 간극 변화에 따른 그라우트 유동과 주입압에 관한 수치해석적 연구¹³⁾가 수행되었다. 이때 주입압의 크기는 적어도 토질의 간극수압이상이어야 주입이 가능하므로 시공지침에서

*Corresponding Author: Chulsung Hwang, Tel: +82-31-750-5336, E-mail: cshwang@gachon.ac.kr
Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, 1342, Sunghnamdae-ro, Sujung-gu, Kyunggi 461-701, Korea

는 간극수압이상, 간극수압의 3~5배 이내의 값으로 제한하고 있다.

터널에 인접하여 교각이 존재할 경우 안전성에 대한 연구¹⁴⁾와 터널 직상부 교각 하부에 터널굴착을 위한 보강방법으로 마이크로시멘트에 의한 그라우팅을 실시할 경우에 대해 주입압이 클수록 약액의 침투범위가 넓게 분포되어 지반개량효과가 커질 수 있으나 주변의 간극수압이 상승하여, 상부에 구조물이 존재할 경우 구조물에 좋지 않은 영향이 있을 수 있으며, 교량이 파손될 가능성이 있는 것으로 보고하였다¹⁵⁾.

물유리계 그라우팅의 주입압은 비교적 저압으로 시행되고 있으나 설계주입압에 의해서도 저면지반이 압반으로 구성되어 있을 경우 상부구조물에 직접 압력이 작용됨으로 인하여 구조물에 유해한 영향을 미치며 이에 의해 구조물이 파손된 사례가 보고되었으며, 이에 따른 그라우팅의 영향에 대한 연구¹⁶⁾가 수행되었다. 연구결과에 의하면 구조물의 직하부에 그라우팅이 시행될 경우 하부압반에 의한 구속에 의해 주입압이 직접 구조물에 전달되고, 그라우팅의 배치가 커튼그라우팅 형식의 원형으로 계획되어 구조물 손상의 직접적 원인이 된 것으로 판단하였다.

본 연구는 상기의 연구의 대상구조물을 연구결과에서 제시한 그라우팅의 수평적 배치가 이루어 졌을 경우에 대하여 터널의 시공이 완료된 시점까지를 시공과정에 따라 3차원 수치해석에 의해 분석을 실시함으로써 상부구조물과 터널의 안전성을 확인하여 구조물 직하부 그라우팅의 개선방법을 제시한다.

2. 수치해석

2.1. 해석조건

본 연구의 분석대상인 터널굴사는 지하차도 하부를 교차하여 통과하며, 터널 상부지반을 보호하기 위해 LW 그라우팅을 Fig. 1과 같이 매립층과 풍화토층에 대해서 최외측 라인을 따라 커튼그라우팅 형식으로 1차 그라우팅을 실시하였으며, 2차 그라우팅부터는 천단부의 우측 영역에 대해서 중점적으로 그라우팅을 실시하여 총 152공중 42공

(Fig. 1 빗금친 부분)에 대해서 그라우팅을 실시하였다.

상부 지하차도의 기둥부의 파손에 따라 수평그라우팅으로 변경되어 3차 그라우팅이 실시되었다. 강관추진에 의한 터널구축공법으로 설계되어 있으며, 터널굴착에 앞서 강관을 추진하여 인력굴착에 의한 터널단면의 형상으로 설치된 상태에서 강관설치단면 내부의 토사를 제거하여 터널을 구축하는 시공구간은 연장 83.0 m구간으로 강관의 추진을 위하여 양측에 작업구 2개소가 설치되었다.

기둥의 손상이 발생된 후 Fig. 2와 같은 H-pile에 의한 Jack-up(Jacking force : 100 kN/EA)보강과 손상기둥의 전면을 콘크리트 전단벽체로 보강을 실시하였으며, 이후 수평적 배치에 의한 3차 그라우팅 후 터널의 시공이 계획되었다.

본 연구는 기존 지하시설물인 지하차도의 기초지반에 그라우팅을 실시하면서 그라우팅의 주입압이 상부구조물에 영향을 미침으로써 일부 구조물이 파손된 결과에 대한 연구¹⁶⁾에서 그라우팅의 개선방법으로 제시된 수평그라우팅을 실시하였을 경우에 대하여 터널의 완성단계까지를 3차원 모델링을 통한 해석을 수행한다. 파손된 기둥에 H-pile보강과 전단벽체 보강을 시행한 과정을 모델링하여 효율적인 보강방법을 검증한다.

상부구조물과 터널의 안전성을 확인하기 위하여 기존의 연구에 사용된 지반조건과 구조물의 조건을 사용한다. 단 기존의 연구에서는 상부구조물의 파손이 계획된 152공의 그라우팅 중 42공을 시공하였을 때 발생하였으므로 이를 기준으로 수행되었으나, 본 연구의 해석조건은 터널의 시공이 완성된 단계까지를 검토하므로 전체그라우팅이 완료된 경우에 대하여 실시한다. 또한 주입압은 기존의 연구결과¹⁶⁾에서 0.125 MPa로 예상되었으므로 이를 지반 그라우팅의 대표주입압으로 한다.

지반조건은 지하구조물이 주변하천의 하상보다도 깊은 위치에 있어 지하수위 이하이며, 하부지반은 퇴적층, 풍화토, 풍화암층이 층별로 수직분포하고 있고, 이는 Table 1에 정리된 토질분포를 나타내고 있다. 이의 재료적 성질은 Table 2와 같다. 해석에 사용된 초기 상부구조물과 보강

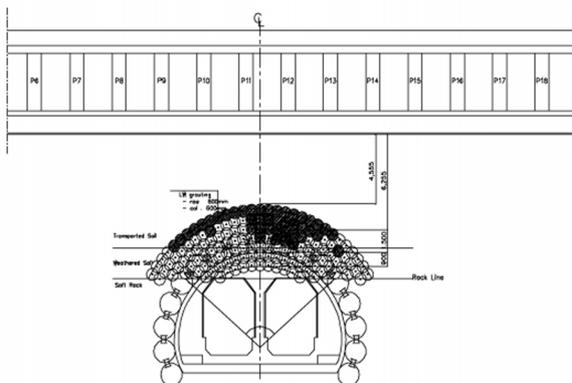


Fig. 1. Layout of the tunnel construction.

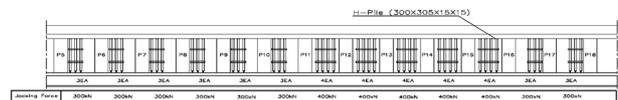


Fig. 2. Layout of the column reinforcement.

Table 1. Distribution of soil layers.

Layer	Depth	Description
Transported soil	~ GL -18.0M	- coarse-grained sand - include minor silty soil - moderate density - N : 20/30~50/26
Weathered soil	GL -18.0M ~ -18.8M	- silty sand after collapse - include rock fragment - moderate or coarse density
Soft rock	GL -18.8M~	- gneiss - moderate or severe weathered

Table 2. Material properties of soil.

Properties	Transported	Transported (Grout)	Weathered soil	Soft rock	Unit
Bulk modulus	50	375	200	5000	MPa
Unit weight	18	21	18	25	kN/m ³
Cohesion	0	30	0	300	KPa
Friction angle	30	40	30	40	°

Table 3. Material properties of concrete.

Properties	Size	Unit
Design strength of concrete	28	MPa
Elastic modulus of concrete	23000	MPa
Strength of reinforced steel	400	MPa

Table 4. Properties of central column(initial column).

Division	Size	Unit
width	50	cm
Height	100	cm
Reinforcement	116.13(H22-10EA+H22-5EA)	cm ²
Ultimate compressive force	13020	KN
Ultimate shear force	684	KN

Table 5. Properties of central column(reinforced column).

Division		Size	Unit
Reinforced concrete column	width	50	cm
	Height	300	cm
	Reinforcement	348.39(H22-30EA+H22-15EA)	cm ²
	Ultimate compressive force	39060	KN
	Ultimate shear force	2052	KN
Jack-up pile	Designation	H300x305x15x15	-
	Allowable compressive force	2561.2	KN
	Allowable shear force	1478.7	KN

구조물 및 터널의 물성치는 각각 Table 3~Table 5와 같다.

2.2. 구조물의 수치해석 모델링

보강된 지하차도의 안전성을 확인하기 위하여, 지반, 지하차도, 그라우팅 시공과정 및 터널의 시공과정을 3차원 단계적 모델을 통한 해석을 수행한다.

지반은 Solid요소를 사용하며, 중앙기둥은 Solid요소와 보요소, 벽체는 Shell요소로 모델링한다.

본 연구에서 지반의 모델은 Mohr-Coulomb 항복조건에 따른 Elastoplastic요소로 가정한다. 구조물은 부재가 파손되기 전까지는 선형탄성재료로 가정하며, 파손된 이후의 단계에서는 탄성계수를 영으로 물성치를 변경하여 적용한다. 경계조건은 지반의 측면은 수평방향으로 구속하고, 하부는 수직방향으로 구속한다(Fig. 3).

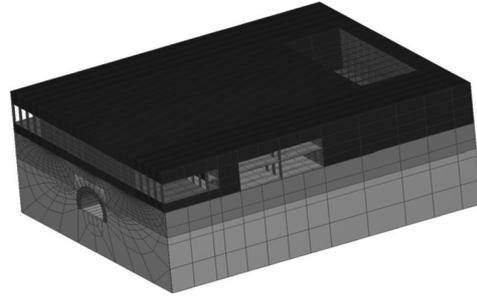


Fig. 3. Analysis model(section of repaired column layer).

해석프로그램은 지반-구조물의 시공단계별 해석이 가능한 Pentagon-3D¹⁷⁾를 이용하며, 해석단계는 Table 6과 같다. 기둥의 파손까지의 과정은 기존의 연구결과¹⁶⁾와 동일한 과정을 따르며, 수평그라우팅으로 변경되어 실시되므로 이를 계산과정에 포함한다. H-pile보강과 전단벽체에 의한 기둥보강 후 3차 그라우팅은 수평그라우팅을 실시하여 이를 반영하며, 강관추진 터널의 굴착에 의한 여력의 작용과정에 대한 해석을 수행하여 터널의 완공 후 지하차도의 안전성을 확인한다.

Table 6. Construction stages and applied loads.

Analysis Step	Applied load
1. Initial Stage	Initial ground
2. Construction Stage 1	Excavation and construct underpass
3. Save Residual Stage 1	Calculate residual force(underpass)
4. Load Stage 1	Load residual force(underpass)
5. Construction Stage 2	Refill(underpass)
6. Load Stage 2	Load refill force(underpass)
7. Construction Stage 3	Construct propulsion base
8. Save Residual Stage 3	Calculate residual force(propulsion base)
9. Load Stage 3	Load residual force(propulsion base)
10. Construction Stage 4	Boring 1st grouting hole(curtain grouting)
11. Save Residual Stage 4	Calculate residual force around grouting hole
12. Load Stage 4	Load residual force(1st curtain grouting)
13. Construction Stage 5	Refill 1st grouting hole
14. Load Stage 5	Load 1st grouting pressure
15. Construction Stage 6	Boring 2nd grouting hole and refill
16. Load Stage 6	Load 2nd grouting pressure(curtain grouting)
17. Construction Stage 7	Change material properties of column by failure
18. Save Residual Stage 7	Calculate residual force(existing columns)
19. Load Stage 7	Load residual force(existing columns)
20. Construction Stage 8	Install reinforcing pile
21. Load Stage 8	Load Jack up force(reinforcing pile)
22. Construction Stage 9	Install shear wall(repairing column)
23. Construction Stage 10	Boring 3rd grouting hole and refill
24. Load Stage 10	Load 3rd grouting pressure(horizontal grouting)
25. Construction Stage 11	Propulsion steel pipe and excavate tunnel
26. Save Residual Stage 11	Calculate residual force
27. Load Stage 11	Load residual force

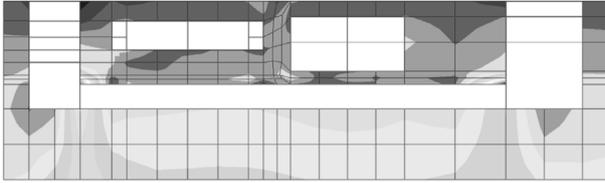


Fig. 4. Distribution of vertical ground stresses on longitudinal section along P12 section after construction(Max.: 0,024 MPa, Min: -0,169 Mpa).

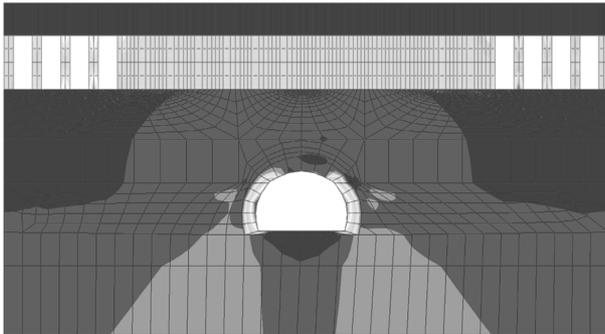


Fig. 5. Distribution of vertical ground stresses and shear force of columns on transverse section along central columns after construction.

3. 해석결과 및 분석

Fig. 4는 터널 완성 후의 종방향 단면에 대한 연직지반 응력을 보여주고 있으며, 그라우팅에 의한 주입압이 지하차도 하부로 직접 전달되었으며, 시공과정에서 지하차도를 포함한 상부구조물에 비교적 균일한 하중이 전달되고 있음을 보여 준다. 터널의 양단에서 응력이 집중되는 현상을 나타냈으나 이는 터널의 시공에서 단부에 지보재가 설치될 설치함으로써 안전성을 확보할 수 있다.

Fig. 5는 시공 완성단계의 3차원 모델의 중앙기둥부의 전단응력 분포도이며, 지하차도 구조물의 붕괴방지를 위해 파단된 기둥좌우에 H형강으로 지지하고 기둥 전면을 전단벽체로 보강을 실시한 결과 기둥에 균일한 전단응력이 발생되고 있음을 보여준다.

Table 7과 Fig. 6은 1, 2차 커텐그라우팅을 실시한 후 기둥 파손의 원인으로 분석된 전단력에 대해 파손이후 H-pile 보강과 전단벽체의 설치, 3차 수평그라우팅의 실시 및 터널완공까지의 시공단계별 해석결과를 보여주며, 최종단계까지 발생하는 기둥전단력의 최대값은 기둥 전단강도의 전단강도의 83.5%로서 한계이내를 나타내고 있다. 각 시공 단계별 전단력의 변화는 3차 그라우팅에서 전단력이 증가하였으나 터널의 굴착과정과 완성까지의 전단력의 변화는 미세한 감소정도로 거의 변화가 발생하지 않았다. 전단력의 미세한 감소는 터널의 굴착에 따른 불평형 역력이 작용됨으로서 발생하는 것으로 그라우팅 후 터널의 지보를 강관추진공법에 의해 터널의 안정성을 확보하여 상부구조물의 전단력의 변화에 거의 미치지 않았음을 보여준다.

Table 7. Comparison of column shear force along construction stages, (unit: KN)

Column	Construction Stage				Ultimate shear strength
	1st + 2nd Grouting	3rd Grouting	Excavate tunnel	Complete tunnel	
P1	3.1	-21.8	-21.4	-21.4	684
P2	64.8	48.8	50.7	50.4	684
P3	133.3	152.9	154.5	153.8	684
P4	251.6	337.4	336.5	335.7	684
P5	413.4	598.8	591.1	589.1	2052
P6	616.3	945.4	935.8	933.4	2052
P7	816.2	1320.4	1309.1	1306.3	2052
P8	922	1500.7	1491.3	1488.0	2052
P9	884.7	1381.9	1375.4	1372.1	2052
P10	688.3	1017.9	1015.2	1012.6	2052
P11	334.1	471.4	473.3	472.2	2052
P12	-127.8	-205.3	-198.5	-197.6	2052
P13	-691.6	-1016.7	-1005.6	-1003.1	2052
P14	-983.2	-1534.9	-1520.5	-1517.3	2052
P15	-1098.6	-1734.2	-1717.3	-1714.0	2052
P16	-979.3	-1487.9	-1472.7	-1469.8	2052
P17	-737.9	-1061.3	-1057.9	-1055.5	2052
P18	-495.8	-667.1	-673.4	-671.3	2052
P19	-303.4	-374.5	-378.4	-377.5	684
P20	-167.3	-180.8	-184.9	-184.2	684
P21	-80.4	-61.7	-64.9	-64.6	684
P22	-4.2	22.9	22.3	22.4	684

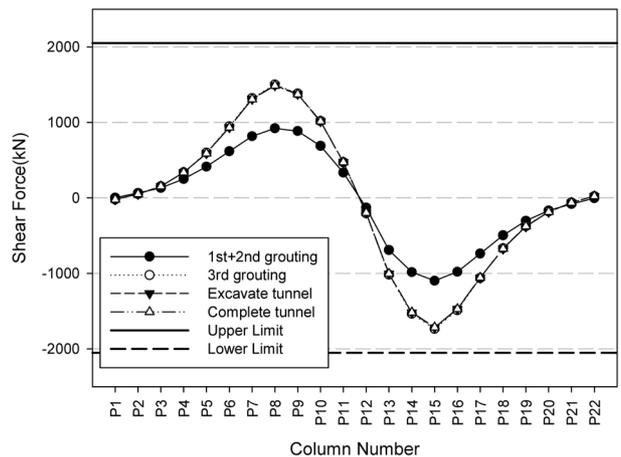


Fig. 6. Shear force distribution on central columns.

3차 수평그라우팅을 실시한 경우에도 P15에서 최대전단력이 발생되며, 이는 1, 2차 그라우팅에서의 최대전단력이 발생하는 위치와 동일하며, 시공단계별 전단력도 유사한 분포를 나타낸다. 따라서 그라우팅의 배치가 기둥의 전단응력의 분포에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Table 8과 Fig. 7은 시공단계별 축력의 변화를 보여주고 있으며, 전단력의 변화와 같이 3차 그라우팅 시 축력의 증가가 발생되나 이후 터널의 완공까지는 거의 변화가 발생

되지 않음을 보여준다. 최종단계인 터널 완공시의 축력은 기둥 강도의 1.3%로서 터널의 시공이 기둥의 축력에 대한 안전성에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 기둥의 축력은 최대축력의 발생구간인 P12~P14에서 1, 2차 커텐그라우팅에 비해 3차 수평그라우팅에서 다소 증가하는 형태로 나타나며, 수평그라우팅이 기둥의 축력에 대한 감소효과는 없는 것으로 판단된다.

실제 시공된 1, 2차 커텐그라우팅 과정을 동일조건하에

Table 8. Comparison of column axial force along construction stages. (unit: KN)

Column	Construction Stage				Ultimate axial strength
	1st + 2nd Grouting	3rd Grouting	Excavate tunnel	Complete tunnel	
P1	-122.3	-119.0	-115.7	-115.8	-13020
P2	-169.5	-217.5	-214.7	-215.2	-13020
P3	-166.4	-220.0	-223.8	-224.0	-13020
P4	-153.3	-161.8	-170.1	-170.8	-13020
P5	-138.3	-125.4	-133.4	-134.1	-39060
P6	-123.6	-68.6	-67.7	-68.3	-39060
P7	-127.8	-46.9	-48.7	-49.3	-39060
P8	-152.7	-202.3	-199.5	-200.0	-39060
P9	-181.8	-349.8	-347.6	-347.6	-39060
P10	-215.9	-381.1	-377.4	-376.6	-39060
P11	-249.3	-409.9	-405.7	-404.1	-39060
P12	-275.8	-476.5	-470.0	-467.9	-39060
P13	-273.6	-510.8	-509.0	-507.9	-39060
P14	-216.8	-423.4	-418.9	-418.4	-39060
P15	-153.6	-149.1	-146.6	-146.8	-39060
P16	-109.9	-1.7	-0.4	-0.7	-39060
P17	-110.4	-49.8	-68.3	-68.8	-39060
P18	-129.2	-120.4	-113.4	-114.0	-39060
P19	-151.5	-165.1	-168.5	-169.3	-13020
P20	-165.4	-223.3	-219.1	-219.4	-13020
P21	-168.3	-220.7	-222.9	-223.5	-13020
P22	-122.3	-116.0	-109.8	-116.2	-13020

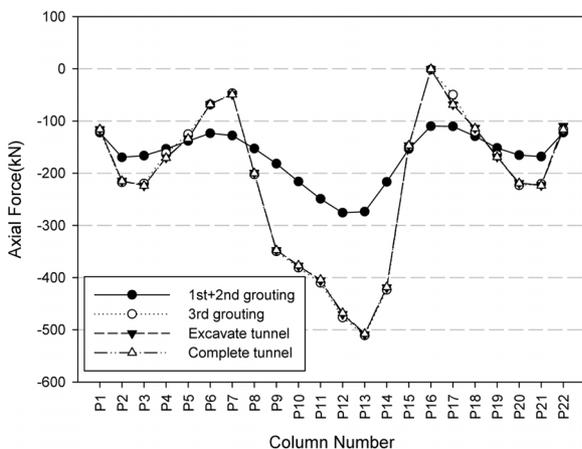


Fig. 7. Axial force distribution on central columns.

1, 2차 그라우팅을 모두 수평그라우팅을 실시하였을 경우와 비교한 결과를 각각 Table 9과 Table 10에 정리한다. Fig. 8과 Fig. 9에서는 최대전단력이 발생된 P15에서의 시공단계별 전단력의 변화와 최대축력이 발생된 P13에서의 축력의 변화를 보여준다.

수평그라우팅을 실시하였을 경우 최종단계에서의 전단력은 1123.6 kN으로 1, 2차 커텐그라우팅을 실시하였을 경우가 1714.0 kN로 계산되어 65.5%로 나타나 수평그라

Table 9. Comparison of column shear force along construction stages(in case of totally horizontal arrangement), (unit: KN)

Column	Construction Stage				Ultimate shear strength
	1st + 2nd Grouting	3rd Grouting	Excavate tunnel	Complete tunnel	
P1	-24.9	-44.7	-44.3	-44.3	684
P2	-16.0	-28.8	-26.9	-27.2	684
P3	19.6	34.4	36.0	35.3	684
P4	85.8	153.5	152.6	151.8	684
P5	185.4	332.6	324.9	322.9	2052
P6	329.1	591.6	582.0	579.6	2052
P7	504.2	907.3	896.0	893.2	2052
P8	578.7	1041.3	1031.9	1028.6	2052
P9	497.2	894.9	888.4	885.1	2052
P10	329.6	593.4	590.7	588.1	2052
P11	137.3	247.2	249.1	248.0	2052
P12	-77.5	-139.3	-132.5	-131.6	2052
P13	-325.1	-585.0	-573.9	-571.4	2052
P14	-551.7	-992.9	-978.5	-975.3	2052
P15	-635.6	-1143.8	-1126.9	-1123.6	2052
P16	-508.6	-915.3	-900.1	-897.2	2052
P17	-323.4	-581.7	-578.3	-575.9	2052
P18	-171.3	-307.2	-313.5	-311.4	2052
P19	-71.1	-126.9	-130.8	-129.9	684
P20	-13.5	-23.5	-27.6	-26.9	684
P21	18.7	33.8	30.6	30.9	684
P22	27.1	48.7	48.1	48.2	684

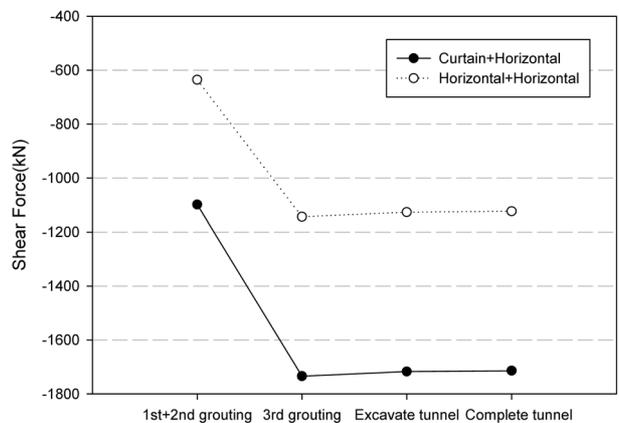


Fig. 8. Comparison of shear force by grouting types along construction stages(P15).

Table 10. Comparison of column axial force along construction stages(in case of totally horizontal arrangement), (unit: KN)

Column	Construction Stage				Ultimate axial strength
	1st + 2nd Grouting	3rd Grouting	Excavate tunnel	Complete tunnel	
P1	-114.7	-111.4	-108.1	-108.2	-13020
P2	-166.0	-214.0	-211.2	-211.7	-13020
P3	-171.6	-225.2	-229.0	-229.2	-13020
P4	-126.5	-134.9	-143.2	-143.9	-13020
P5	-105.1	-92.1	-100.1	-100.8	-39060
P6	-63.0	-7.9	-7.0	-7.6	-39060
P7	-37.1	43.9	42.1	41.5	-39060
P8	-167.6	-217.2	-214.4	-214.9	-39060
P9	-286.0	-454.1	-451.9	-451.9	-39060
P10	-283.2	-448.4	-444.7	-443.9	-39060
P11	-278.7	-439.3	-435.1	-433.5	-39060
P12	-318.8	-519.5	-513.0	-510.9	-39060
P13	-355.1	-592.3	-590.5	-589.4	-39060
P14	-324.6	-531.3	-526.8	-526.3	-39060
P15	-113.6	-109.1	-106.6	-106.8	-39060
P16	-9.8	98.4	99.7	99.4	-39060
P17	-57.4	3.2	-15.3	-15.8	-39060
P18	-109.2	-100.4	-93.4	-94.0	-39060
P19	-131.5	-145.1	-148.5	-149.3	-13020
P20	-175.8	-233.6	-229.4	-229.7	-13020
P21	-170.4	-222.8	-225.0	-225.6	-13020
P22	-111.7	-105.3	-99.1	-105.5	-13020

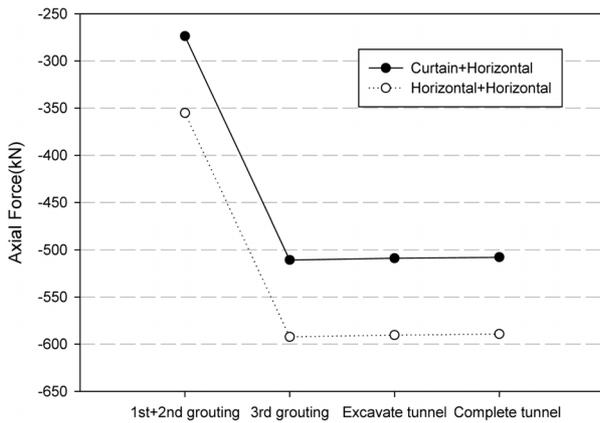


Fig. 9. Comparison of axial force by grouting types along construction stages(P13).

우팅이 상부구조물의 전단력의 감소에 큰 영향을 미칠 수 있다. 축력의 경우는 수평그라우팅을 실시하였을 경우가 -589.4 kN으로 커튼그라우팅의 최대축력인 -507.9 kN에 비해 116%로서 증가하는 것으로 나타난다. 그러나 축력의 크기는 극한강도의 1.5%로 상부구조물의 안전성에 영향이 없을 것으로 판단된다.

기둥을 전단벽체로 보강하지 않았을 경우를 가정하면 실제 시공상태인 커튼그라우팅과 수평그라우팅을 병행한 경

우와 전면 수평그라우팅의 경우에 대해 작용전단력은 각각 극한전단력의 251%과 164%로서 수평그라우팅이 전단력을 감소하는 데 충분한 효과는 발현할 수 있으나 상부구조물의 파손은 방지할 수 없으며, 이에 대한 보강은 반드시 필요한 것으로 판단된다.

또한 Fig. 8과 Fig. 9에 의하면 터널의 시공과정 중 상부구조물에 미치는 시공단계는 지반그라우팅에 의한 영향이 대부분인 것으로 나타난다.

Table 11 및 Table 12는 파손된 기둥에 보강된 H-pile (Fig. 2)의 1본당 작용하는 시공단계별 전단력 및 축력의 변화를 보여주고 있다. 작용전단력의 크기는 최대 34.2 kN으로 허용전단력의 2.3%이며, 작용축력의 크기는 최대 114.3 kN으로 허용축력의 4.5%를 나타낸다.

Table 11. Comparison of shear force along construction stages (H-pile/EA), (unit: KN)

H-pile	Construction Stage				Allowable shear force
	Jach-up	3rd Grouting	Excavate tunnel	Complete tunnel	
P5	0.0	34.5	33.7	33.5	1478.7
P6	0.0	28.6	27.7	27.4	1478.7
P7	0.0	22.1	21.1	20.8	1478.7
P8	0.0	14.9	14.1	13.8	1478.7
P9	0.0	8.3	7.9	7.6	1478.7
P10	0.0	3.0	2.9	2.7	1478.7
P11	0.0	-0.9	-0.6	-0.7	1478.7
P12	0.0	-3.9	-3.3	-3.2	1478.7
P13	0.0	-7.6	-6.7	-6.5	1478.7
P14	0.0	-12.2	-11.2	-11.0	1478.7
P15	0.0	-17.3	-16.2	-15.9	1478.7
P16	0.0	-30.0	-29.0	-28.7	1478.7
P17	0.0	-34.2	-34.4	-34.2	1478.7

Table 12. Comparison of axial force along construction stages (H-pile/EA), (unit: KN)

H-pile	Construction Stage				Allowable compressive force
	Jach-up	3rd Grouting	Excavate tunnel	Complete tunnel	
P5	-100.0	-109.9	-109.4	-109.5	2561.2
P6	-100.0	-112.0	-113.1	-113.1	2561.2
P7	-100.0	-115.1	-114.2	-114.3	2561.2
P8	-100.0	-113.3	-113.0	-112.9	2561.2
P9	-100.0	-110.6	-110.0	-109.9	2561.2
P10	-100.0	-108.5	-107.7	-107.4	2561.2
P11	-100.0	-96.7	-96.7	-96.5	2561.2
P12	-100.0	-105.0	-104.2	-104.0	2561.2
P13	-100.0	-105.8	-106.1	-106.1	2561.2
P14	-100.0	-106.2	-105.1	-105.2	2561.2
P15	-100.0	-106.2	-107.0	-107.1	2561.2
P16	-100.0	-104.6	-108.0	-108.2	2561.2
P17	-100.0	-96.2	-98.4	-98.5	2561.2

각 시공단계의 전 과정을 통해 축력의 변화는 14.3%의 변화를 나타냄으로서 초기 Jack-up하중에 대한 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 즉 H-pile은 구조물 파손에 대한 초기의 직접 보강의 효과를 발현하며, 시공과정 중의 추가 하중은 대부분 전단벽체가 지지하고 있음을 보여준다. 특히 전단력의 변화는 터널완성 단계까지의 최대전단력이 1714.0 kN임을 고려하면 H-pile의 전단지지 효과는 거의 없는 것으로 볼 수 있다. 따라서 H-pile은 상부구조물의 보강방법으로 일시적으로 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 도심지하차도 하부를 가로지르는 터널을 시공하기 위해 터널상부의 연약지반을 지반 그라우팅공법으로 보강하던 중 지하차도 중앙기둥에서 전단파손이 발생한 사례에 대하여 터널의 시공이 완료된 시점까지를 시공과정에 따라 3차원 수치해석에 의해 분석을 실시함으로써 상부구조물과 터널의 안전성을 확인하고, 구조물 직하부의 시공에 대한 개선방법과 시공시의 보강방법을 제시한다.

연약지반을 통과하는 터널의 상부를 보강하기 위한 방법으로 약액주입공법이 널리 사용되고 있으나 상부에 구조물이 존재할 경우 설계시 반드시 주입압을 고려한 설계가 필요하다. 상부구조물의 경우 터파기를 통해 지반상에 설치하는 구조물로 기둥 혹은 벽체가 주로 축력을 저항할 수 있도록 설계되며, 지반의 허용침하에 의한 편심력을 적용하여 설계한다. 따라서 추가적인 불균질한 하중에 의해 발생하는 전단력에 취약한 구조물이며 하부에 터널을 계획할 때에는 지반그라우팅에 의한 상부의 기존 구조물에 대한 안전성 해석을 반드시 실시하여야 한다. 특히 기둥식 구조물은 벽식 구조물에 비해 전단력에 취약한 구조물로서 시공전 전단벽체 등의 보강등을 통하여 안전성 확보가 필요한 것으로 판단된다.

연구결과에 의하면 초기단계부터 수평그라우팅을 실시한 경우에 커텐그라우팅 형식에 비해 기둥의 파손의 원인이 되는 전단력이 현저히 감소되는 것으로 나타났다. 그라우팅은 터널의 상부형상을 따라 커텐그라우팅의 형식으로 시공되는 것이 대부분이나 상부구조물이 존재할 경우 수평그라우팅이 바람직한 것으로 판단된다. 그러나 기둥식 상부구조물은 수평그라우팅을 실시한 경우도 기둥을 전단벽체로 보강하지 않았을 경우 극한전단력을 상회하여 안전성을 확보하지 못한 것으로 나타난다. 따라서 기둥식 상부구조물이 존재하는 터널의 시공에서는 그라우팅방법에 의한 연약지반 보강방법은 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

강관추진에 의한 터널단면의 보강에 대한 시공단계별 해석결과 터널의 굴착 및 완공의 과정에서 상부구조물의 단면력의 변화가 거의 나타나지 않았다. 기둥식 상부구조물이 존재하는 구간의 연약지반 터널공사는 지반그라우팅방법에 비해 지보재에 의해 보강하는 방법이 타당한 것으로 판단된다.

기둥의 파손단계에서 사용된 H-pile에 의한 보강은 Jack-up에 의한 기둥의 지지력을 일시적으로 지지할 수 있는 방

법으로 추가 그라우팅 및 터널의 시공과정에서의 전단력의 지지효과는 적은 것으로 나타났다. 따라서 상부기둥의 영구적인 보강은 전단벽체에 의한 방법이 효율적인 것으로 판단된다.

References

- 1) T. I. Addenbrooke and D. M. Potts, "Twin Tunnel Interaction: Surface and Subsurface Effects", *The International Journal of Geomechanics*, Vol. 1, No. 2, pp. 249~271, 2001.
- 2) A. M. Hefny, H. C. Chuna and J. Zhao, "Parametric Studies on the Interaction between Existing and New Bored Tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 19, issues 4~5, pp. 471, 2004.
- 3) S. A. Mazek, K. T. Law and D. T. Lau, "Use of Grouting to Reduce Deformations of an Existing Tunnel Underpassed by Another Tunnel", *Proc. of 3rd international Specialty Conference on Grouting and Ground Treatment*, February 10~12, pp. 1570~1581, 2003.
- 4) J. K. L. Pan, G. Plumbridge, R. B. Story and O. Martin, "Back Analysis of Cut and Cover Tunnels in Close Proximity to an Operating Railway in Hong Kong", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, Issues 3~4, pp. 453~454, 2006.
- 5) D. N. Chapman, S. K. Ahn, Hunt and D. V. L. Chan, "The use of Model Tests to Investigate the Ground Displacements Associated with Multiple Tunnel Construction in Soil", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, Issues 3~4, pp. 413, 2006.
- 6) G. Anagnostou and K. Kovari, "Face Stability in Closed Shield Tunnelling", *Proc. Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, Las Vegas, pp. 548~558, 1977.
- 7) J. W. Rhee, J. S. Lee and M. K. Kim, "A Study on the Tunnel Stability using Grouting Technique", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 6, No. 4, pp. 298~305, 1996.
- 8) D. S. Park, H. J. Kim and W. Y. Kim, "Investigation of the Lining Load Induced by Backfill and Consolidation Grouting", *Engineering geology* Vol. 13, No. 4 pp. 445~455, 2003.
- 9) B. S. Chun, J. N. Do, J. Y. Gong, H. D. Sung and J. H. Lim, "A Study on the Effect of Ground Improvement of LW Injection", *Proc. of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 2006, pp. 83~86, 2006.
- 10) B. S. Chun, J. C. Kim, S. S. Nam and K. H. Ha, "A Study on the Design Specification for Characteristics of Grout Materials", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 3 No. 4, pp. 67~79, 2002.
- 11) J. H. Park, S. I. Lee and Y. W. Park, "Experimental Study on Strength Properties of Pressure Grouting Bulb", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 4, pp. 221~229, 2003.
- 12) J. H. Park, Y. W. Park, B. I. Kim and S. S. Hong, "An Experimental Study on the Optimum Pressure of Grouting for Ground Reinforcement", *Proc. of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 2002, No. 11, pp. 2568~2571, 2002.

- 13) K. H. Jeon, D. W. Ryu, H. M. Kim, E. S. Park and J. J. Song, "Numerical Analysis of Grout Flow and Injection Pressure Affected by Joint Roughness and Aperture", Tunnel and Underground, Vol. 20, No. 2, pp. 82~91, 2010.
- 14) S. B. Lee and J. S. Yoon, "A Case Study on the Application of Safety Analysis for the Tunnel Adjacent to the Pier", Tunnel and Underground, Vol. 13, No. 2, 2003.
- 15) C. S. Hwang, "Influences of Grouting Pressure of Microcement to Upper Structures", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, pp. 70~77, 2010.
- 16) C. S. Hwang, "Damage Analysis of Underpass Columns by LW Grouting", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, pp. 75~82, 2011.
- 17) Emeraldsoft, "Pentagon-3D Manual", 2009.