LW 그라우팅에 의한 지하차도 기둥의 파손원인 분석

Damage Analysis of Underpass Columns by LW Grouting

황철성*

Hwang, Chul Sung

Abstract

Labiles Waterglass Grouting(LW Grouting) is one of the ground improvement methods to protecting water leakage and reinforcement in underground structures. Some of central columns of an underpass are damaged during injection of grouting liquid which is to improve loose soil for the construction of tunnel directly across beneath the underpass. Three dimensional analysis are performed with construction stages including the construction of underpass, the excavating of construction base and LW grouting to investigate the grouting influences to the underpass and the cause of damage. Even though the injection pressure of LW grouting is relatively low to the other grouting methods, the injection pressure is directly affect to the underpass while the bedrock layer which confine the pressure. The columns of underpass are damaged by shear force since the grouting arrangement is curved and the lateral component of injection pressure occurred. To improve the LW grouting effect and avoid similar pattern of accident, it is necessary to take account the injection pressure in primary design stage, grouting arrangement and injection order to prevent the unequal upheaval.

Key words : LW grouting, damage analysis, underpass column, injection pressure, injection order

요 지

LW 그라우팅은 지하구조물의 차수 및 지반개량을 목적으로 가장 널리 사용되는 지반개량공법 중의 하나이다. 지하차도를 가로질러 터널을 가설하기 위해 연약지반을 개량할 목적으로 지하차도하부에 그라우팅 약액을 주입하던 중 지하차도의 중앙기둥이 파손되는 사고가 발생하였다. 사고의 원인을 파악하기 위해 지하차도의 건설, 전진기지의 설치 및 약액의 주입과정을 3차원 모델링에 의한 단계적 해석을 실시한다. LW 그라우팅의 주입압은 비교적 저압으로 시행되고 있으나 설계 주입압에 의해서도 저면지반이 암반으로 구성되어 있을 경우 지하차도에 직접적인 영향을 미치고 이는 지하차도를 파손시킬 수 있는 것으로 계산된다. 파손된 지하차도의 기둥은 그라우팅의 배치가 건설될 터널의 곡면을 따라 배치됨으로써 횡력의 작용에 의한 전단력에 의해 파손된 것으로 나타난다. LW 그라우팅의 효과를 최대화하고 또 다른 사고를 방지하기 위해서는 설계단계부터 주입압, 주입공의 배치 및 주입순서에 따른 지하차도의 영향을 계산함으로써 적정 주입압과 배치를 정하여 부등응력에 의한 지하차도의 유해한 영향을 방지하여야 한다.

핵심용어 : LW 그라우팅, 파손원인 분석, 지하차도 기둥, 주입압, 주입순서

1. 서 론

최근 대도시의 지하공간을 활용하기 위해 기존 구조물의 하부를 관통하여 터널을 시공하는 사례가 빈번히 발생하고 있다. 그러나 도심터널은 암반층을 따라 시공되는 산악터널과 달리 풍화암 이하의 연약층을 통과하여야 하는 경우가 많으므로 지반개량 혹은 지반보강공법을 사용하여 터널의 안전성을 확보한다.

지반개량 공법으로는 차수를 목적으로 한 물유리계 주입공법인 LW공법, SGR공법등과 지반의 강도를 보강하기 위한 강관다단그라우팅공법, JET공법, JSP공법 및 RJP공법등이 있

으며 이들의 조합으로 터널의 안전성을 높이는 다양한 시공방법이 개발되었다(천병식, 1998; 조영웅, 2003). 또한 도시 철도공사 하저통과구간의 터널공사 시 지반투수저하공법에 안전시공과 완공 후 터널구조물의 장기적인 안전유지관리 측면에서 적용성이 양호하다고 판단되는 N.D.S공법과 S.M.I공법에 대하여 지반수리거동을 도모하기 위한 주입공법의 설계기법을 제시되었다(김지환 등, 2011).

이러한 지반개량공법이 적절한 효율을 발현하기 위해서는 그라우트의 젤타임, 점성, 주입압력, 주입속도, 주입공의 유효경, 주입방식, 지반의 투수계수 및 공극률에 대한 정밀한 조사에 의해 주입조건을 설계하여야 한다.

*정회원 · 경원대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (E-mail : cshwang@kyungwon.ac.kr, 교신저자)

약액주입공법중 대표적인 LW공법과 SGR공법은 적절한 주입압을 통해 지중에 약액을 침투시켜야 하므로 수압파쇄 등의 문제가 발생되지 않게 하기 위해서는 현장의 지반조건에 부합되는 적정압력을 선정하는 것이 중요하다. 그라우팅의 주입압에 대한 연구로는 국내 그라우팅 재료별 특성에 따른 설계사양에 대한 연구가 수행되었고(천병식 외 2002), 지반보강 그라우팅 적정주입압력에 관한 실험적 연구를 수행하였다(박종호, 2003; 홍성수, 2002). 또한 질리 거칠기와 간극 변화에 따른 그라우트 유동과 주입압에 대한 수치해석적 연구가 수행되었다(전기환 외, 2010).

이 때 주입압의 크기는 적어도 토질의 간극수압이상이어야 주입이 가능하므로 일본 국철 설계와 시공지침에서는 간극수압이상, 간극수압의 3~5배이내의 값으로 제한하고 있다.

주입압이 클수록 약액의 침투범위가 넓게 분포되어 지반개량효과가 커질 수 있으나 주변의 간극수압이 상승하여, 지반의 연약한 부분이 파괴됨으로 인해 맥상주입의 형태가 될 수 있다. 또한 상부에 구조물이 존재할 경우 구조물에 좋지 않은 영향이 있을 수 있으며, 이에 대한 연구는 상부에 교각이 존재할 때 하부에 터널굴착을 위한 보강방법으로 마이크로시멘트에 의한 그라우팅을 실시할 경우 교각이 파손될 가능성이 있는 것으로 보고되었다(황철성, 2010).

본 연구는 도심지하차도 하부를 가로지르는 터널을 시공하기 위해 터널상부의 연약지반을 LW공법으로 보강하던 중 지하차도 중앙기둥에서 전단파손이 발생한 사례를 통해 이의 원인을 밝히고 지반개량공법의 안전시공을 위한 제안을 하고자 한다.

2. 조사 및 분석

2.1 시공조건

본 연구의 분석대상인 터널공사와 관련하여 지하차도 하부를 교차하여 통과하는 구간은 Fig. 1과 같이 강관추진(TR&T공법)에 의한 터널구축공법으로 설계되어 있으며, 터널굴착에 앞서 강관(Ø 1,500mm)을 추진하여 인력굴착에 의한 터널단면의 형상으로 설치된 상태에서 강관설치단면 내부의 토사를 제거하여 터널을 구축하는 시공구간은 연장 83.0m구간으로 강관의 추진을 위하여 양측에 작업구(발진기지, 도달기지) 2개소를 설치하였으며, 추진구간의 상부에는 지하차도와 터널 구조물이 직상부에 근접하여 교차하고 있다.

지하차도의 하부 슬래브는 주변하천의 하상보다도 더 깊은 위치에 있으며, 지하차도 하부지반은 퇴적층, 풍화토, 풍화암층이 층서로 수직분포하고 있고 Table 1과 같은 토질분포를 나타내고 있다.

또한 하천과 근접되어 우기시 하천의 하천수위는 지하수위에 직접적인 영향을 미치는 조건이다.

따라서 강관추진에 의한 인력굴착과정에서 막장면의 자립과 지하수의 유출현상의 발생이 예상되는 지층조건으로서 막장면의 자립과 지하수의 유출현상을 최소화하고 지하차도의 융기 및 침하에 의한 손상을 최소화하면서 터널을 굴착하기 위해서는 강관을 추진하기 전에 지반고결 및 지수를 목적으

Fig. 1. Layout of the tunnel construction

Table 1. Distribution of soil layer

지층	깊이	특징
퇴적층	~ GL -18.0 M	- 중립-조립질 모래 - 소량의 실트 함유 - 보통조밀 - N치는 20/30~50/26
풍화토	GL-18.0 M ~18.8 M	- 와헤시 실트질 모래 - 암편포함 - 중립~조립질
연암	GL-18.8 M~	- 편마암의 연암 - 보통풍화내지 심한풍화

로 한 그라우팅의 선행이 필수적인 조건이다.

기존의 지하차도는 저판폭(B=29.78 M)의 BOX형 구조형식으로서 지중 GL-3.5 M ~ GL-11.0 M깊이에 위치하고 있으며 강관압입설치 예정위치로부터 약 6.255 M 정도 이격되어 있는 상태이다.

지하차도 통과구간은 터널굴착에 따른 영향을 최소화 하기 위해 퇴적층과 풍화토층을 대상으로 터널전단부 강관삽입 지층을 고결하기 위하여 Fig. 1에 표현된 바와 같이 지하차도 구조물의 바닥면으로부터 약 5.0 M정도 깊이로 수평천공하여 L.W공법에 의한 152공의 선진수평그라우팅을 7층으로 중첩 시공하는 것으로 계획되어 있다.

중앙기둥의 파손시기까지 시공된 그라우팅은 Fig. 1에서 빗금으로 표현된 바와 같이 매립층과 풍화토층에 대해서 최외측 라인을 따라 커텐그라우팅 형식으로 1차 그라우팅을 실시하였으며 2차 그라우팅부터는 전단부의 우측 영역에 대해서 중점적으로 그라우팅을 실시하여 총 152공중 42공에 대해서 그라우팅을 실시하였다.

그라우팅의 방법으로는 이중관 룯드(Φ40~50 mm)의 선단에 비트를 장착하여 계획심도까지 천공한 상태에서 주입호스 및 주입펌프를 연결하여 step(50 cm)씩 인발 주입하는 자천공(Self-boring) 주입방식과 80~100 mm케이싱 천공에 의한 계

Fig. 2. Damage of P13 and P14 column

확심도까지 천공한 다음 주입관(맨체트튜브)을 설치 후 실링에 의한 케이싱을 제거하고 주입관 내부로 패커를 설치하여 인발 주입하는 방식 중 현장조건에 맞게 선정하는 것으로 하였으며, 2차 그라우팅때부터는 36.0 m/공의 심도를 일시에 천공한 후 연속주입방식에 의하여 그라우팅을 실시하였다.

이때 그라우팅압력은 0.3~1.0 MPa 범위내에서 실시하며 주입속도는 5~20 l/min을 기준으로 하였다.

2.2. 파손현황

지하차도의 하부를 통과하기 위한 터널의 중심은 지하차도의 P11과 P12의 기둥 중간에 위치하며, 최상단 1열의 그라우팅 후 터널중심의 우측(P12~P13구간)에 그라우팅이 집중적으로 이루어졌다. 이 과정에서 지하차도 구조물 P8~P10 및 P13~P17의 기둥 및 벽체에 균열이 발생되었으며, 이는 Fig. 1에 표기되어 있다.

전반적인 균열양상이 P11과 P12의 기둥을 중심으로 V형 사방향균열이 발생된 것으로 보아 그라우팅에 의한 집중하중으로 인해 전형적인 전단균열이 발생된 것으로 판단된다. 특히 터널의 직상부의 P11에서는 균열이 거의 발생되지 않았으며, P12에서 미세균열만이 발생된 것으로 보아 수직방향의 작용력으로 인해 전단력이 거의 작용되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

2차 그라우팅 작업은 P12~P13구간에서 집중되었으며, 그라우팅균의 형상이 곡면을 이룸에 따라 그라우팅 작업에 의한 합력이 상부에 수직력만으로 작용되지 않고, 수평력을 동반하였다. 이에 따라 측면방향의 하중에 상대적으로 취약한 기둥, 특히 하중작용 부근의 기둥(P13~P16)에 큰 손상이 나타난 것으로 판단된다.

3. 파손원인의 해석적 고찰

3.1. 구조물의 수치해석 모델링

지하차도의 손상원인을 파악하기 위해 설계검토를 실시하

Fig. 3. Analysis model

Table 2. Material properties of soil

물성치	토사	토사 (Grout)	풍화토	연암	단위
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

물성치	크기	단위
콘크리트 설계강도	28	MPa
콘크리트 탄성계수	23000	MPa
철근강도	400	MPa

Table 4. Sectional properties of central column

물성치	크기	단위
단면폭	50	cm
단면높이	100	cm
철근량	116.13 (H22-10EA+H22-5EA)	cm ²
극한축력	13020	KN
극한전단력	684	KN

고, 지반, 지하차도 및 그라우팅 시공과정의 3차원 단계적 모델(Fig. 3)을 통한 해석을 수행한다.

지반은 Solid요소를 사용하며, 구조물은 Solid요소를 사용하고, 기둥은 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.

지반의 물성치는 해당지반의 지반조사 보고서를 참조하여 정하였으며, 사용값은 다음과 같다.

해석프로그램은 지반-구조물의 시공단계별 해석이 가능한 Pentagon-3D를 이용하였으며(Emeraldsoft, 2009), 해석단계는 Table 5와 같다.

해석과정은 1차 해석을 통해 주입압의 크기를 변화시켜 중앙기둥부에 작용하는 부재력이 극한하중을 초과하는 부재와 외관조사 결과에 나타난 실제 파손된 부재와 일치하는 조건을 하중조건을 구하고, 파손된 부재의 해석단계를 포함한 모델을 재구성한다.

Table 5. Construction stages and applied loads

구조해석 단계	하중
1. Initial Stage	초기지반상태
2. Construction Stage 1	터파기 및 지하차도 설치
3. Save Residual Stage 1	터파기에 의한 굴착상당력 계산
4. Load Stage 1	굴착상당력 작용
5. Construction Stage 2	되메우기
6. Load Stage 2	되메우기에 의한 하중작용
7. Construction Stage 3	전진기지 설치
8. Save Residual Stage 3	터파기에 의한 굴착상당력 계산
9. Load Stage 3	굴착상당력 작용
10. Construction Stage 4	그라우팅홀 천공
11. Save Residual Stage 4	그라우팅홀 주변의 굴착상당력 계산
12. Load Stage 4	굴착상당력 작용
13. Construction Stage 5	1차 뒷채움
14. Load Stage 5	1차 그라우팅 압력작용
15. Construction Stage 6	2차 그라우팅홀 천공 및 뒷채움
16. Load Stage 6	2차 그라우팅 압력작용
17. Construction Stage 7	기둥파손에 의한 기둥 물성치 변화
18. Save Residual Stage 7	기둥부 여력 계산
19. Load Stage 7	기둥부 여력 작용
20. Construction Stage 8	기둥보강 Pile 설치
21. Load Stage 8	보강 Pile의 Jack-up

2차 본 해석은 구조물의 시공, 전진기지의 설치 및 그라우팅시공을 포함한 단계별 해석을 통해 기둥의 파손단계에 이르는 작용력을 구하고 (Save Residual Stage 7), 파손된 기둥의 물성치를 변화(Construction Stage 7) 시킨 후 기둥에 가해졌던 여력을 적용(Load Stage 7)하여 기둥의 파손 후에 대한 구조물의 거동을 구한다.

3.2 해석결과

Fig. 4는 2차 그라우팅의 작업후의 종방향 단면에 대한 연직지반응력을 보여주고 있으며, 그라우팅에 의한 주입압이 지하차도 하부로 직접 전달되고 있음을 보여준다. 즉 시공과정에서 작용하는 주입압이 하부의 암반층에 의해 구속됨에 따라 주변지반에 직접 전달되고, 특히 지하차도에 직접적인 영향을 주고 있음을 보여준다.

Fig. 5는 3차원 모델의 중앙기둥부의 횡단면에 대한 응력분포도이며, 1차 및 2차 그라우팅의 압력 작용 위치 및 방향에 따라 주변기둥에 직접적인 영향력 작용되고 있음을 보여준다. 2차 그라우팅에 의하여 P13~P16 주변의 응력이 증가되므로 P13 ~ P16의 기둥부에 손상이 집중된 외관조사결과와 일치한다. 1차 시행한 Jack-up력은 그라우팅에 의한 수직응력을 상쇄하는 효과가 있는 것으로 나타난다.

조사 결과 2차 그라우팅 작업 후 기둥의 파손이 발생되며, 외관조사 결과와 일치하는 주입압(간극수압제외)의 크기를 추정하기 위해 기둥부를 보요소로 모델링하고, 그라우팅의 주입압을 0.025 MPa단위로 증가하여 0.05 MPa 에서 0.15 MPa 까지 해석을 수행한 결과가 Table 6과 Table 7에 정리되어

Fig. 4. Distribution of vertical ground stresses on longitudinal section along P12 section after grouting (Max.: 0.089 MPa, Min: -0.135 Mpa)

Fig. 5. Distribution of vertical ground stresses on transverse section along central columns after grouting (Max.: 0.163 MPa, Min: -0.159 Mpa)

Fig. 6. Axial force diagram along central columns after grouting(Injection pressure: 0.125Mpa) by beam model (Max.: 275.75 KN)

있으며, 기둥의 축력은 극한축력(-13,020 KN)을 초과하는 부재가 없는 것으로 나타나며, 최대축력은 0.15 MPa가 작용되었을 경우 P12에서 -296.37 KN으로 극한축력의 2.3%정도로 나타난다(Table 6, Fig. 7).

기둥에 작용하는 전단력은 주입압이 0.10 MPa이상에서 극한전단강도를 초과하는 부재가 발생하며(Table 7, Fig. 9), P7~P10과 P13~P16의 기둥에서 파손이 발생한 외관조사 결과와 가장 근접한 조건은 1차 및 2차 그라우팅압이 각각 0.125 MPa~0.15 MPa정도로 계산된다.

따라서 부재의 파손원인은 중앙기둥에 작용하는 전단력의 과다로 인한 것으로 판단되며, 이는 현장조사에서 결과인 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 전형적인 전단파단의 결과와 일치한다. 부재의 파손원인은 1차 그라우팅의 단면형상이 곡면을 이루도록 시공함으로서 그라우팅에 의한 부등하중으로 기둥열에 과다한 전단력을 유발하며, 특히 그라우팅영역의 단부주위의 단면력 변화가 크게 나타난다. 또한 2차 그라우팅을 한곳에 집중 시공함으로서 부등하중에 의한 전단력의 발생을 가중시킨 것으로 판단된다.

Table 6. Comparison of axial force on central columns to estimate the injection pressure (unit: KN)

위치	작용압력 추정값(간극수압 제외) 초기값 + 1차 + 2차					기둥의 극한 축력
	0.05MPa	0.075MPa	0.1MPa	0.125MPa	0.15MPa	
P1	-121.05	-121.48	-121.90	-122.33	-122.75	-13020
P2	-168.81	-169.04	-169.26	-169.49	-169.71	-13020
P3	-168.99	-168.12	-167.24	-166.37	-165.49	-13020
P4	-165.02	-161.12	-157.22	-153.32	-149.42	-13020
P5	-159.22	-152.25	-145.27	-138.30	-131.32	-13020
P6	-152.62	-142.95	-133.27	-123.60	-113.92	-13020
P7	-154.43	-145.56	-136.68	-127.81	-118.93	-13020
P8	-165.23	-161.06	-156.88	-152.71	-148.53	-13020
P9	-175.49	-177.59	-179.69	-181.79	-183.89	-13020
P10	-189.16	-198.09	-207.01	-215.94	-224.86	-13020
P11	-202.93	-218.38	-233.83	-249.28	-264.73	-13020
P12	-213.87	-234.50	-255.12	-275.75	-296.37	-13020
P13	-213.48	-233.53	-253.58	-273.63	-293.68	-13020
P14	-188.85	-198.15	-207.45	-216.75	-226.05	-13020
P15	-166.77	-162.37	-157.97	-153.57	-149.17	-13020
P16	-146.37	-134.22	-122.07	-109.92	-97.77	-13020
P17	-148.03	-135.48	-122.93	-110.38	-97.83	-13020
P18	-154.42	-146.02	-137.62	-129.22	-120.82	-13020
P19	-164.96	-160.49	-156.01	-151.54	-147.06	-13020
P20	-168.36	-167.39	-166.41	-165.44	-164.46	-13020
P21	-168.41	-168.36	-168.31	-168.26	-168.21	-13020
P22	-121.09	-121.49	-121.89	-122.29	-122.69	-13020

Fig. 7. Axial force distribution on central columns

그라우팅에 의해 지반의 부등응기현상은 Fig. 10에 나타나 있으며, 1차 그라우팅에 의해 중앙부의 응기가 발생한 반면 2차 그라우팅에서는 우측지반에 편향되어 최대 응기량이 발생되고, 이는 기둥의 파손에 직접적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

그라우팅공의 배치에 따른 영향을 파악하기 위해 그라우팅 공의 배열을 수평으로 배치한 경우에 대한 검토를 수행한다. 이를 위해 그라우팅의 범위는 실제 사례와 동일한 폭으로 하고, 깊이는 최상부의 그라우팅공과 동일한 깊이로 하여 각

Fig. 8. Shear force diagram along central columns after grouting (Injection pressure: 0.125 Mpa) by beam model (Absolute Max.: 1098.6 KN)

Table 7. Comparison of shear force on central columns to estimate the injection pressure (unit: KN)

위치	작용압력 추정값(간극수압 제외) 초기값 + 1차 + 2차					기둥의 극한 전단력
	0.05MPa	0.075MPa	0.1MPa	0.125MPa	0.15MPa	
P1	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	684
P2	25.8	38.8	51.8	64.8	77.8	684
P3	50.8	78.3	105.8	133.3	160.8	684
P4	97.8	149.1	200.3	251.6	302.8	684
P5	162.1	245.9	329.6	413.4	497.1	684
P6	244.3	368.3	492.3	616.3	740.3	684
P7	325.7	489.2	652.7	816.2	979.7	684
P8	367.7	552.5	737.2	922.0	1106.7	684
P9	353.7	530.7	707.7	884.7	1061.7	684
P10	275.8	413.3	550.8	688.3	825.8	684
P11	133.8	200.6	267.3	334.1	400.8	684
P12	-50.5	-76.3	-102.0	-127.8	-153.5	684
P13	-248.1	-372.6	-497.1	-691.6	-746.1	684
P14	-392.9	-589.7	-786.4	-983.2	-1179.9	684
P15	-438.6	-658.6	-878.6	-1098.6	-1318.6	684
P16	-391.3	-587.3	-783.3	-979.3	-1175.3	684
P17	-293.9	-441.9	-589.9	-737.9	-885.9	684
P18	-195.0	-295.3	-395.5	-495.8	-596.0	684
P19	-118.1	-179.9	-241.6	-303.4	-365.1	684
P20	-64.5	-98.8	-133.0	-167.3	-201.5	684
P21	-31.6	-47.9	-64.1	-80.4	-96.6	684
P22	-1.9	-2.7	-3.4	-4.2	-4.9	684

시공단계별 거동을 구한다. 그라우팅의 주입압을 0.025 MPa 단위로 증가하여 0.05 MPa에서 0.15 MPa까지 해석을 수행한 결과가 Table 8와 Table 9에 정리되어 있으며, 기둥의 축력은 P13에서 최대 391.4 KN으로서 곡면배치된 경우에 비해 다소 증가하였으나 최대축력은 0.15 MPa가 작용되었을 경우 P13에서 -391.48 KN으로 극한축력의 3%정도로 계산되어 극한축력에는 충분한 안전성을 확보하는 것으로 나타난다. 최대 축력이 곡면배치할 경우 P12에서 발생됨에 비해 수평배치의 경우 P13에서 발생되는 것은 2차 주입압의 작용이 직접 상향력으로 작용됨을 보여주고, 이는 Fig. 13에서 기둥의 축력 분포도에서 확인할 수 있다.

Fig. 9. Shear force distribution on central columns

Fig. 10. Displacement of ground along central columns after grouting (Injection pressure: 0.125 MPa)

기둥 파손의 원인으로 판단되는 기둥의 전단력은 곡면배치를 한 경우에 비해 단면력 크기의 최대·최소의 범위가 비교적 고른 분포를 나타내고, 최대값의 크기가 주입압의 예상값인 0.125MPa에서 635.6KN으로서 곡면배치의 경우 1098.6KN임에 비해 57.9%정도의 값으로 나타난다. 따라서, 주입공의 배치는 상부기둥의 거동에 큰 영향을 미치므로 그라우팅의 설계시 주입공의 배치에 대한 영향을 고려해야 하는 것으로 판단된다.

3.3. 파손의 원인 분석

기시공된 선진 그라우팅 42공 완료 후 지하차도의 기둥 및 벽체에 손상이 발생되어 그라우팅작업 중단하였다. 구조검토에 의하면 선진수평그라우팅공을 실시하는 하부지층이 풍화토 및 연암층으로 구성되어 있어 매립층에 시공된 그라우팅의 압력은 전부 상향으로 분산되는 것으로 나타났으며 거의 대부분이 그라우팅에 의한 토립자의 유효응력이 지하차도의 하부에 전달되는 것으로 나타난다.

구조검토를 통한 지하차도의 손상을 유발시킨 가장 큰 원인은 다음 2가지의 요약할 수 있다.

첫째, 커튼그라우팅 형식을 취한 1차 그라우팅 시공영역을 원형으로 계획하여 지하차도의 슬래브 하면에 작용하는 압력

Table 8. Comparison of axial force on central columns (In case of horizontal arrangement) (unit: KN)

위치	작용압력 추정값(간극수압 제외) 초기값 + 1차 + 2차					기둥의 극한 축력
	0.05MPa	0.075MPa	0.1MPa	0.125MPa	0.15MPa	
P1	-118.00	-116.90	-115.80	-114.70	-113.60	-13020
P2	-167.41	-166.94	-166.46	-165.99	-165.51	-13020
P3	-171.09	-171.27	-171.44	-171.62	-171.79	-13020
P4	-154.27	-145.00	-135.72	-126.45	-117.17	-13020
P5	-145.92	-132.30	-118.67	-105.05	-91.42	-13020
P6	-128.37	-106.57	-84.77	-62.97	-41.17	-13020
P7	-118.13	-91.11	-64.08	-37.06	-10.03	-13020
P8	-171.13	-169.96	-168.78	-167.61	-166.43	-13020
P9	-217.19	-240.14	-263.09	-286.04	-308.99	-13020
P10	-216.06	-238.44	-260.81	-283.19	-305.56	-13020
P11	-214.68	-236.01	-257.33	-278.66	-299.98	-13020
P12	-231.07	-260.30	-289.52	-318.75	-347.97	-13020
P13	-246.08	-282.43	-318.78	-355.13	-391.48	-13020
P14	-232.00	-262.88	-293.75	-324.63	-355.50	-13020
P15	-150.77	-138.37	-125.97	-113.57	-101.17	-13020
P16	-106.32	-74.15	-41.97	-9.79	22.38	-13020
P17	-126.83	-103.68	-80.53	-57.38	-34.23	-13020
P18	-146.42	-134.02	-121.62	-109.22	-96.82	-13020
P19	-156.96	-148.49	-140.01	-131.54	-123.06	-13020
P20	-172.51	-173.61	-174.71	-175.81	-176.91	-13020
P21	-169.26	-169.64	-170.01	-170.39	-170.76	-13020
P22	-116.84	-115.12	-113.39	-111.67	-109.94	-13020

Fig. 11. Axial force distribution on central columns (In case of horizontal arrangement)

이 터널 중심을 정점으로 점차 작아지므로 증산지하차도에 부등응기를 유발하였고, 2차이후의 그라우팅을 한곳에 집중함으로써 추가적인 부등응기를 유발하였으며 이로 인한 과도한 전단력이 기둥에 작용하게 되어 기둥파손이 발생하였다.

둘째, 2차 그라우팅부터는 단계주입을 실시하지 않고 연속주입을 실시하였을 뿐만 아니라, 인접된 영역에서 다수의 그라우팅공에 동시 주입을 실시하였으며, 공극수압을 정확히 파악되지 않은 상태에서 주입재가 지중에 주입될 때까지 압력

Table 9. Comparison of shear force on central columns (In case of horizontal arrangement) (unit: KN)

위 치	작용압력 추정값(간극수압 제외) 초기값 + 1차 + 2차					기둥의 극한 전단력
	0.05MPa	0.075MPa	0.1MPa	0.125MPa	0.15MPa	
P1	-9.6	-14.7	-19.8	-24.9	-30.0	684
P2	-6.5	-9.7	-12.8	-16.0	-19.1	684
P3	5.3	10.1	14.8	19.6	24.3	684
P4	31.5	49.6	67.7	85.8	103.9	684
P5	70.9	109.1	147.2	185.4	223.5	684
P6	129.4	196.0	262.5	329.1	395.6	684
P7	200.9	302.0	403.1	504.2	605.3	684
P8	230.4	346.5	462.6	578.7	694.8	684
P9	198.7	298.2	397.7	497.2	596.7	684
P10	132.3	198.1	263.8	329.6	395.3	684
P11	55.1	82.5	109.9	137.3	164.7	684
P12	-30.4	-46.1	-61.8	-77.5	-93.2	684
P13	-129.5	-194.7	-259.9	-325.1	-390.3	684
P14	-220.3	-330.8	-441.2	-551.7	-662.1	684
P15	-253.4	-380.8	-508.2	-635.6	-763.0	684
P16	-203.0	-304.9	-406.7	-508.6	-610.4	684
P17	-128.1	-193.2	-258.3	-323.4	-388.5	684
P18	-65.2	-100.6	-135.9	-171.3	-206.6	684
P19	-25.2	-40.5	-55.8	-71.1	-86.4	684
P20	-3.0	-6.5	-10.0	-13.5	-17.0	684
P21	8.0	11.6	15.1	18.7	22.2	684
P22	10.6	16.1	21.6	27.1	32.6	684

Fig. 12. Shear force distribution on central columns (In case of horizontal arrangement)

을 상승시킴으로 인해 주입압력이 지중에 축적되면서 증산지 하차도의 부등응기를 유발하였고 이로 인한 과도한 전단력이 기둥에 작용하게 되어 기둥파손을 유발하였다.

4. 결 론

본 연구는 도심지하차도 하부를 가로지르는 터널을 시공하기 위해 터널상부의 연약지반을 LW공법으로 보강하던 중 지하차도 중앙기둥에서 전단파손이 발생한 사례의 원인을 밝히기 위해 현장조사를 통한 자료분석과 시공단계별 해석을 수

Fig. 13. Comparison of axial force on central columns to injection arrangement (Injection pressure: 0.125 MPa)

Fig. 14. Comparison of shear force on central columns to injection arrangement (Injection pressure: 0.125 MPa)

행한다.

LW공법은 지반개량공법 중 비교적 저압으로 시공되는 방법임에도 불구하고 구조물이 파손된 이유는 1,2차 그라우팅의 시공과정에서 작용하는 주입압이 하부의 암반층에 의해 구속됨에 따라 주변지반에 직접 전달되고, 특히 지하차도에 큰 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

파손당시 시공현장에서의 주입압은 통상적인 설계기준인 0.3~1.0 MPa 범위내에서 실시하며 주입속도는 5~20 l/min을 기준으로 수행하였으며, 간극수압이 최대 0.165 MPa임을 고려하면 순수주입압은 0.135 MPa~0.8355 MPa의 범위에서 시공되었다.

기둥의 파손범위에 대한 수치해석적 분석을 통해 순수주입압을 예측하면 0.125 MPa~0.15 MPa정도로 계산되었다. 이는 설계기준의 최저수준의 주입압으로서 정상적인 그라우팅 시공에서 구조물의 손상이 발생할 수 있음을 보여준다.

구조물의 직하부에 그라우팅이 시행될 경우 하부암반에 의한 구속에 의해 주입압이 직접 구조물에 전달되고, 구조물 손상의 직접적 원인이 된다. 또한 이번 사례를 통해 나타난 바와 같이 상부 구조물이 기둥과 같이 축력을 지지하도록 설계되었을 경우 전단력에 취약하므로 주입압이 구조물에 횡력으로 작용할 경우 구조물에 큰 손상을 일으키게 된다. 따라서 연속된 상부구조물 하부에 커텐그라우트 형식의 배치를

할 경우 기둥의 전단력을 감소하기 위해서는 그라우팅공의 수평적 배치가 바람직하며, 주입순서는 국부적인 압력에 의한 전단력의 증가를 방지할 수 있도록 분산하여 실시하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 단 구조물의 하부에 터널의 안정성을 위한 그라우팅을 실시할 경우 그라우팅의 수평적배치가 터널구조물에 유해한 영향을 줄 수 있으므로 이를 고려한 주입공의 배치가 필요할 것으로 판단된다.

지반개량을 위한 그라우팅의 설계시 주입압에 의한 지반의 거동 및 구조물의 안전성에 대한 검토과정이 반드시 포함되어야 한다. 특히 암반층 상부의 보강시에는 주입압이 직접 지하차도에 영향을 미칠 수 있으므로 주입압의 설정 및 관리가 매우 중요하며, 이를 위해 간극수압의 체계적인 선행 파악이 필요하다. 또한 그라우팅공의 배치를 부등용기를 최소화할 수 있도록 하며, 그라우팅공의 주입 순서에 따른 영향을 분석하여 구조물에 유해한 외력이 발생하지 않도록 하여야 한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 경원대학교 교내연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김지환, 김준정, 조국환 (2011) N.D.S공법과 S.M.I공법을 이용한 지반차수 방법에 관한 연구, **한국방재학회논문집**, 제11권, 제2호, pp. 87-92.
- 박종호, 이상익 외 (2003) 가압 그라우팅 구근의 강도특성에 관한 실험적 연구, **대한토목학회 논문집**, 제23권, 제4호, pp. 221-229.
- 전기환, 류동우 외 (2010) 절리 거칠기와 간극변화에 따른 그라우트 유동과 주입압에 관한 수치해석적 연구, **한국암반공학회지**, 제20권, 제2호, pp. 82-91.
- 조영웅 (2003) 물유리계(L.W) 그라우팅에 의한 지반보강시 차수효과에 관한 연구, 제주대학교 대학원, 석사학위논문.
- 천병식 (1998) **최신지반주입-이론과 실제**-, 원기술, pp 61-73, 107-120.
- 천병식, 김진춘 외 (2002) 국내 그라우팅 재료별 특성에 따른 설계사양에 관한 연구, **한국지반환경공학회 논문집**, 제3권, 제3호, pp. 67-79.
- 홍성수 (2002) 지반 보강 그라우팅 적정 주입압력에 관한 실험적 연구, 명지대학교 대학원, 석사학위논문.
- 황철성 (2010) 지반보강용 마이크로시멘트의 주입압이 상부구조물에 미치는 영향, **구조물진단학회지**, 제14권, 제4호, pp. 70-77.
- Emeraldsoft (2009) **Pentagon-3D Manual**.

© 논문접수일 : 11년 07월 11일
 © 심사의뢰일 : 11년 07월 19일
 © 심사완료일 : 11년 10월 06일