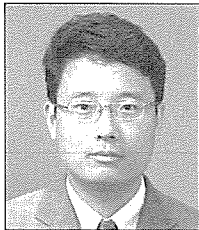
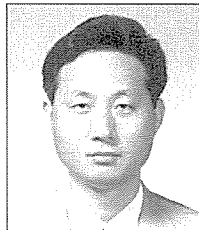


싱가포르 Nicoll Highway 개착식 터널 붕괴 사례 보고



삼성중공업 건설사업부 차장
이철주¹⁾



삼성중공업 건설사업부 차장
김지성²⁾

지난해 4월 20일 오후 3시 30경 싱가포르 도심의 new circle line 지하철 공사 구간인 Nicoll highway 인근 개착식 터널굴착 공사현장에서 도심도의 가시설이 붕괴하는 큰 사고가 발생하여 네 명의 근로자 및 공무원이 사망하는 사건이 발생하였다. 굴착면의 붕괴는 전체 굴착예정 심도 33m 가운데 약 30m를 굴착했을 때 발생하였다. 불행 중 다행으로 터널의 붕괴는 작업자 20여 명이 휴식을 취하기 위해 외부로 나와 있었던 시점에서 발생하여 대규모의 인명피해는 피할 수 있었다. 또한 붕괴 당시 인근의 도로를 주행하던 차량이 없어서 대규모 교통사고 역시 없었다. 천운이라고 해야 할 것이다. 목격자들의 증언에 따르면, 붕괴 당시 마치 대규모 가스폭발이나 지진이 발생한 듯한 느낌이었으며, 사고현장의 굴착면을 지지하던 강재 구조물들이 옛가락이나 대나무처럼 휘어지고, 토사가 굴착면을 향하여 물처럼 흘렀다고 한다. 이 붕괴 사고로 가시설이 파괴되고, 전체적으로 80m 정도의 구간에서 붕괴가 발생하여, 결과적으로 인근 지반에 큰 변위 발생을 유발하였다. 이는 유래를 찾을 수 없을 정도의 대규모 붕괴로서(붕괴면적: 100×130m), 주변 직경 약 100m에 최대 15m의 함몰이 발생하였다(그림 1, 2 참조). 또한, 싱가포르의 주요 도로인 Nicoll highway 일부의 파손과 더불어, 수도파이프 및 전기선의 파손에 의한 정전 및 가스누출에 의한 화재 발생 등 막대한 피해를 발생시켰다.

지중연속벽(diaphragm wall, DW)을 이용한 가시설의 설계 및 시공은 일본과 싱가포르의 합작회사인 Nishimatsu construction-Lum Chang(NCLC)이 일괄적으로 맡았고, 가시설의 설계에는 유한요소 해석 프로그램인 Plaxis를 사용하였다. 지층의 구성은 1950년대에 실시된 매립에 의한 지표면의 매립층 및 그 하부에 존재하는 37-40m의 해성점토(marine clay), 그리고 조밀한 silty sand로 구성된 충적층(alluvium)으로 구성되어 있다. 베



그림 1. 붕괴면의 전경 1



그림 2. 붕괴면의 전경 2

인시험을 통해 산정한 해성점토의 비배수 전단강도는 약 20-40kPa, 예민비는 약 2-4 정도의 값을 보이며, 과압 밀비는 1.0-1.5 정도로 거의 정규압밀에 가깝다고 할 수 있다. 사고 현장의 설계 굴착고는 33m, 폭은 20m이고, 굴착 예정면의 하부에 히빙을 방지하기 위한 제트 그라우팅을 굴착 이전에 실시하여 지하 28m에 두께 1.5m, 33.5m에 두께 3.0m의 2개의 슬래브를 형성하였고, 그 아래에 히빙 방지 말뚝(heave resisting piles)을 타설하였다. 슬래브는 해당설계 심도에서 고압력의 시멘트 그라우

우팅을 실시하여 형성하였다. 말뚝은 조밀한 silty sand 지반에 근입되어 있다. DW의 심도는 38.1-43.2m, 두께는 0.8-1.0m로서 스트리트로 굴착면을 지지했는데, 스트리트의 수평 간격은 4-5m, 수직 간격은 3m로 전체 10단 가운데 1-9단의 스트리트를 시공하였다. 굴착면 바닥 부근의 그라우팅 슬래브는 스트리트 및 방수의 역할을 하는 것으로 설계가 되었다(그림 3). DW의 시공에 사용된 공법은 선단부를 해성점토 층에 설치하는 일명 'floating DW 공법'으로 심도와 지반조건을 고려할 때 싱가포르에서 일반적으로 적용되는 공법은 아닌 것으로 알려져 있다. 가시설의 붕괴는 지하 30m까지 굴착이 진행되었을 때 발생했는데 현장 조사에 의하면 9단의 스트리트 부근에서 가장 먼저 파괴되었고, 이에 의한 토압의 증가를 다른 스트리트가 제대로 분배하지 못하여 점진적으로 발생한 것으로 알려져 있다. 전체적인 붕괴는 약 1시간 이내에 발생했을 정도로 매우 급속하게 진행되었다. 터널 붕괴발생 이후 주변건물에 대한 안정성을 검토한 결과 다행히 큰 문제가 없는 것으로 나타났으나 침하계, 경사계 등 각종 계측기를 설치하여 안정성을 지속적으로 모니터링 하였다. 한편 붕괴 사고 발생 이후 new circle line의 모든 지하철공사 중단하고 가시설 설계에 대한 재검토를 실시하였다.

붕괴사고 직후 피해가 발생한 인근 운하로부터의 해수 침수를 차단시켰으며, 주변의 지반과 사면을 보호하기 위한 적절한 조치를 취하였다. 또한 균열이 발생한 주변 지반에 그라우팅을 실시하여 지하수의 유입을 차단시켰다. 붕괴사고 직후 foam 콘크리트를 붕괴면에 투입하여 안정성을 확보하였다. 이때 저강도의 콘크리트를 사용하여 나중에 제거가 용이할 수 있게 하였다. 콘크리트 타설 후 표면에 흙과 시멘트의 혼합체를 타설하여 작업을 위한 작업장 확보했다. 사고직후 사고의 원인을 분석하기 위하여 수많은 전문가들이 1년여 동안 정밀검토를 실시하여 사고

분석 보고서가 올해 5월에 완성되었다. 붕괴사고 발생 후 신속한 응급조치, 설계, 시공 및 붕괴원인조사 등 철저하게 진행된 사고원인 조사의 과정이나 완벽하게 작성된 사고조사 보고서를 보면 '과연 싱가포르는 다르구나' 라는 감탄을 금할 길이 없다.

Nicoll highway 터널의 사고발생 이후 싱가포르 Mass Rapid Transit(MRT)의 circle line의 모든 공사에서는 개착식 터널의 시공이 전면적으로 금지되었다. 그에 대한 대안으로 터널이나 top-down 공법에 의한 시공만을 허용하기로 한 것이다. 당초의 시공사인 NCLC는 1.8km의 두개의 터널을 당초 노선의 남쪽으로 이동시켜 시공할 예정이다. NCLC는 감독기관인 LTA(Land transportation authority)에 의해 승인된 새로운 설계 및 시공방법을 개발하였다. 시공이 진행될 예정 부지의 지반조건은 당초 사고가 발생한 곳과 유사한데 1950년대에 실시된 매립층 하부에 50-60m 두께의 연약 해성점토층이 존재하고 있다. 새로운 노선에는 지하 25m의 심도에 두 개의 나란한 터널이 터널 보링머신 (boring machine)에 의해서 시공될 예정이다. 한편, 개착식으로 시공될 예정이었던 Nicoll highway 역 또한 당초의 개착식 굴착에서 top-down 공법으로 시공될 예정이다. 새로운 터널의 시공은 올 여름에 착공되어 현재 진행중인 것으로 알려져 있다.

조사위원회에서 제출한 최종 사고조사 보고서에 의하면 가시설 붕괴의 주요원인은 크게 두 가지로 가시설이 과소하게 설계된 것과 띠장과 스트러트의 연결부에 대한 과소설계이다. 이러한 두가지의 오류로 인하여 9단의 띠장 및 스트러트의 연결부가 파괴되면서 전체적인 가시설의 붕괴를 발생시키게 되었다. 붕괴에는 이러한 사실만이 아니라 몇가지 추가적인 원인이 있는 것으로 분석되었다. 붕괴가 다가오고 있다는 수많은 징후가 있었으나, 이러한 사실들이 심각하게 고려되지 못하거나 은폐되었던 것

로 알려졌다.

가시설의 설계에 사용한 유한요소 해석 프로그램인 Plaxis을 이용한 해석에 있어서 해석점토층에 대해 배수 조건에서의 물성치를 사용하였다. 해성점토층은 소성이 높고 투수성이 낮기 때문에 배수조건을 해석을 통해서 합리적인 해석결과를 얻을 수 없었을 것이다. 그 결과 가시설에 가해지는 토압이 과소하게 산정되어 결과적으로 가시설을 지지하는 지보가 과소하게 설계되었다. NCLC

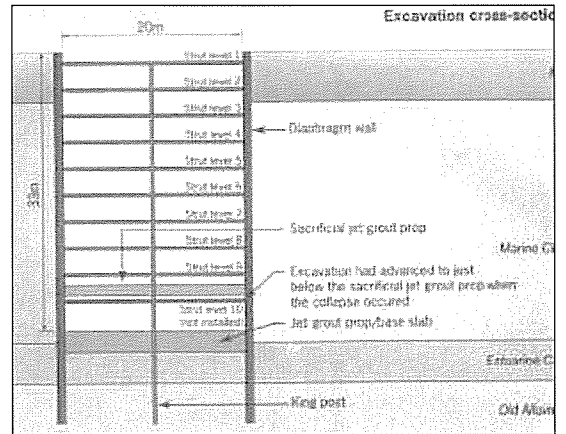


그림 3. 가시설 대표단면

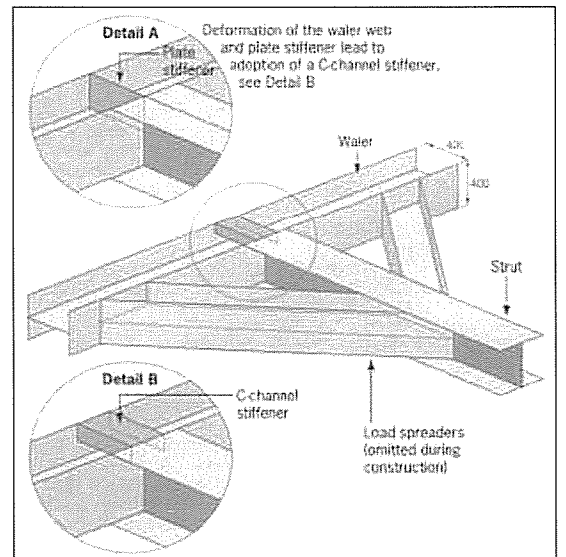


그림 4. 띠장과 스트러트의 결합(load spreader 생략됨)

는 2001년부터 설계방법의 오류를 인식하고 있었으나 정직하지 못하게 이러한 사실을 감추고 설계변경을 실시하지 않은 것으로 알려졌다. 한편, 띠장과 스트러트의 연결부의 설계 및 시공에 있어서 구조적인 오류를 범했다. 일반적으로 띠장과 스트러트 사이를 결합시켜주는 load spreader를 생략하였기 때문에 띠장으로부터 스트러트에 집중하중이 작용하게 되어 지보의 강성이 감소하는 요인으로 작용하게 되었다(그림 4). 결국 굴착면을 지지하는 띠장과 스트러트의 연결부에 대한 설계를 잘못하여 실제 작용하중의 50%의 하중만을 지지할 수 있는 가시설이 시공되었다. 문제는 스트러트-띠장을 보강하는 stiffener를 판형에서 C-channel로 변경하면서 더욱 복잡해지게 되었다. 특히 재료의 부족으로 인하여 고철을 사용하였다고 한다. 결론적으로 이런 설계상의 오류로 인하여 9단의 스트러트가 먼저 파괴되었고, 가시설에 작용하는 토압을 가시설 전체에 대하여 균등하게 분배시키지 못했기 때문에 대규모의 파괴가 발생하게 되었다. 만약 LTA에서 이러한 문제를 알고 있었고, NCLC가 좀더 신중하게 고려했다면 LTA는 공사를 중지시켰을 것이다. 그러나 LTA는 NCLC로부터 그들의 공사를 중단시킬만한 근거가 될 수 있는 자료를 충분히 제공받지 못했다고 한다. 따라서 전체적으로 가시설의 설계가 잘못되었고 토압을 적절하게 지지하지 못하는 가시설이 만들어 지게 된 것이다.

이번 사고는 지반관련 구조물의 설계 및 시공에서 소홀히 다루기 쉬운 부분이 사실은 매우 중요하다는 너무나도 당연한 사실을 보여준 실패사례라고 할 수 있다. 사소한 것처럼 보일 수도 있는 해석상의 오류나 가시설의 구조적인 결함에 의해 결국은 가시설이 붕괴되고 엄청난 피해가 발생하게 된 것이다. 또한 계측결과가 가시설에 과도한 변위가 발생하고 있음을 보여주고 있음에도(붕괴 3일전 최대수평변위: 350mm), 이를 무시내지는 방치한 시공사

의 태도 역시 비난받아 마땅할 것이다. 컴퓨터를 이용한 복잡한 해석의 경우 지반의 특성에 맞는 물성치를 입력하는 것이 얼마나 중요한지 보여주고 있다. 아직까지 사고 조사 위원회 내에서도 지반의 물성치 산정과 관련하여 논쟁이 멈춘 것 같지는 않지만, 가시설의 경우 점토지반에 배수조건의 물성치를 사용하는 해석방법이 공학적으로 맞는 것 같지는 않다. 기술자들의 경우 경우에 따라 수치 해석 결과를 지나치게 신봉하는 경향이 있을 수 있는데, 경우에 따라서는 간단한 이론을 이용한 단순한 손계산이 복잡한 수치해석보다 더 나을 수도 있다는 사실을 명심할 필요가 있다. 다시 말해 프로그램을 이용하여 해석을 실시할 때 이를 사용하는 방법을 잘 아는 것만이 중요한 것이 아니라 지반의 특성을 제대로 파악하여 해석을 실시하는 것, 해석에 관련된 기본 이론을 숙지하는 것, 그리고 해석 결과를 올바르게 분석할 수 있는 능력 등이 반드시 필요하다고 하겠다. 잘못된 지반의 물성치 산정을 통한 해석을 통해서도 결국 잘못된 결과만을 얻을 뿐이라는 진리를 명심해야 할 것이다. 또한 띠장과 스트러트의 결합부 설계 및 시공과 같은 구조적인 부분은 필요시 구조 기술자의 자문을 받아서 안정성에 대한 검증을 받아야 할 것이다.