

Karl Terzaghi 의 발자취

황선근*

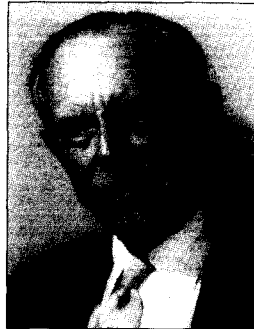


사진 1. 1958년 6월의 카알 테르자기

브리티시컬럼비아 주에서의 도전

테르자기는 기초의 문제점을 해결하여 확고한 명성을 쌓았다. 이러한 명성은 저명한 공학자 H. A. 시몬즈(H. A. Simons)를 위하여 브리티시컬럼비아 주에서 아주 까다로운 공장의 기초공사를 계속해서 맡아서 연구할 때에도 지속되었다. 공사장 일부에는 수면 가장자리 아래에 발견되지 않은 점토 퇴적층이 존재하여 건물이 절반쯤 건설된 후에 공장 부

지를 다시 지정하여야 하는 일이 생기는 경우에도 테르자기는 무엇을 살펴야 할지, 문제를 어떻게 처리해야 할지 확실히 알고 있었다.

전성기 시절에 테르자기의 용기를 시험에 빠뜨린 기술 업무는 주로 빙하 작용을 받은 캘리포니아 산맥과 관련된 것이었으며, 특히 브리티시컬럼비아가 그 중 대표적인 곳이었다. 테르자기의 공학 업적이 돋보인 부문은 수력이었으며, 그가 반세기 이상 명성을 유지할 수 있게 해 준 것도 수력부문이었다. 그는 안전하게 공사를 수행하려면 어떤 일을 해야 할지 잘 알게 된 경지에 이르렀지만 성공 여부는 언제나 확실하지 않았다. 그러나 지질상의 퇴적물의 한계와 특성의 파악에 수반되는 불확실성은 분명하였다.

이러한 문제점은 캘리포니아 주 시에라레바다 산맥에 있는 모노(Mono) 강에서 1949년부터 1956년 사이에 건설된 버밀리온(Vermilion) 댐에서 겪은 경험에도 잘 나타나 있다. 버밀리온(Vermilion)은 브리티시컬럼비아에서 테르자기가 맡은 더욱 까다로운 작업에 비하면 일종의 예행연습이었다. 약 60m 깊이까지 모노(Mono) 강 협곡을 가득 메우고 있는 빙하기 퇴적물은 주로 투수성이 높은 사력층이었다. 그러나 지표면에서 불과 9m 깊이에 실트질의 방수 퇴적층이 연속적으로 이어져 있는 것으로 보였기 때문에 실트질층과 뒷채움된 도랑으로 형성된 수직차단로를 연결하면 지반으로 물이 침투하는 것을 막을 수 있겠다는 희망을 가지게 되었다. 존형의 흙댐을 건설하려면 불투수성 핵심부 아래에 차단 트렌치를 설치시키는 것이 전통적인 방식이었으나, 테르자기는 차단 도랑을 댐 상류 범면선단 아래에 설치하면 더욱

* 한국철도기술연구원 시설연구부 책임연구원(skhwang@krri.re.kr)

경제적으로 실트층까지 연결될 수 있을 것이라고 권고하였다.

하지만 차단 도랑을 파는 동안, 댐 중심선의 동쪽 부분 가운데에 모래로 채워진 하상이 약 122m 길이로 펼쳐져 있어서 실트층이 그곳에서 끊긴 것이 발견되었다. 시험공을 11개 뚫어 보았으나, 트랜치를 연결시킬 수 있는 불투수성이 더 낮은 층을 발견되지 않았다. 따라서 댐의 지반으로 침투하는 물을 막기 위한 방어선에 심각한 결함이 발생하게 되었다. 시험공을 추가로 15개 더 뚫어 본 결과, 모래 하상이 댐 아래에서 집수와 배수가 누수현상을 조장하고 있다는 사실이 확인되었다.

서던 캘리포니아 에디슨 회사(Southern California Edison)의 기술 감리회사인 벡텔(Bechtel) 회사는 저수지 바닥 가운데 모래 하상이 있는 곳에 불투수성 블랭킷을 설치하라고 건의하였다. 테르자기는 이에 반대했다. 그가 연구한 바에 의하면 그와 같은 블랭킷으로는 누수를 막을 수 없었기 때문이었다. 테르자기의 반대에도 불구하고 블랭킷을 깔았다. 그러나 저수지 수위가 올라가면서 누수 현상이 심각하게 보이기 시작하였지만 배출되는 물줄기는 기적적으로 가늘어졌다.

현재 관찰하고 있는 상황의 근본적인 물리적 현상을 정확하게 파악하지 않고서는 저수지 수위가 더욱 상승할 때 일어나는 사태의 연관성을 이해하지 못할 것이라는 이유로 테르자기는 동원할 수 있는 자료를 모두 동원하여 이러한 현상을 설명하려고 애썼다. 테르자기가 제시한 해석에 따르면 모래하상 위에 깔은 실트질의 블랭킷에서 일어나는 재료의 침식과 재퇴적작용으로 인하여 모래 하상이 위로 떠올라 투과성이 점점 낮아지고 있다는 것이었다. 그는 그런 연유로 운 좋게도 문제의 주요 부분을 해결할 수 있는 정확한 해법을 우연히 발견하게 된 것이라고 하였다.

버밀리온(Vermilion) 댐에서 지질학적으로 설명하기 힘든 이변이 발생한 일은 꺼림칙하였으나 댐은 자체적으로 치유되었다. 하지만 테르자기는 브리티시컬럼비아에서 연속적으로 고되고 힘든 일과 맞닥뜨렸고 그 가운데 일부 작업은 전혀 가망이 없다고 이미 판정을 받은 현장에 댐을 건설하는 일이었다.

도전의 가속도는 세튼(Seton) 호숫가에 있는 브리지 리버(Bridge River) 발전소에서 시작되었다. 이 발전소에서는 완공된 직후부터 터빈 받침대에 균열이 가기 시작하였다. 관찰결과 발전소가 침하하고 기울어지며 호수 쪽으로 이동하는 동시에 터빈으로 물을 끌어들이는 수압관 터널이 늘어나면서 균열이 생긴 결과였다.

컨설팅 지질학자 빅터 돌미지(Victor Dolmage)가 이 문제를 진단하였는데 그는 발전소 부지가 고대에 산사태가 발생한 지대 위에 놓여있다고 판단하여 테르자기에게 사람을 보내어 도움을 요청했지만 테르자기가 브라질에서 작업을 마칠 때까지 기다릴 수밖에 없었다. 1950년 말 현장을 처음 방문하였을 때 테르자기는 발전소 부지 위쪽을 제외하고 세튼(Seton) 호수 북부 연안에 잇달아 간빙기나 빙하기 후대의 토양 위에 숲이 우거진 높은 단구가 펼쳐져 있는 것을 보았다. 선사시대에 그곳에서 단구와 그 밑에 깔려있는 점토 퇴적층이 침식되어 호수 아래로 150m 가량 미끄러져 내려갔을 것이라고 추측했다. 테르자기는 이 가설을 확인하기 위하여 새로운 탐사공과 탐사장비를 아주 많이 준비하라고 요구하였다.

발전소 지반에는 딱딱하게 굳은 청점토층 사이에 실트층이 겹쳐져 있다는 사실은 과거에 실시한 조사를 통해서 이미 밝혀졌다. 게다가 청점토층 위에서 대규모의 퇴적물이 노출되어 일반적으로 호수 쪽으로 가라앉는 것과는 정반대로 육지 쪽으로 45° 기울어져 가라앉는 것이 발견되었다.

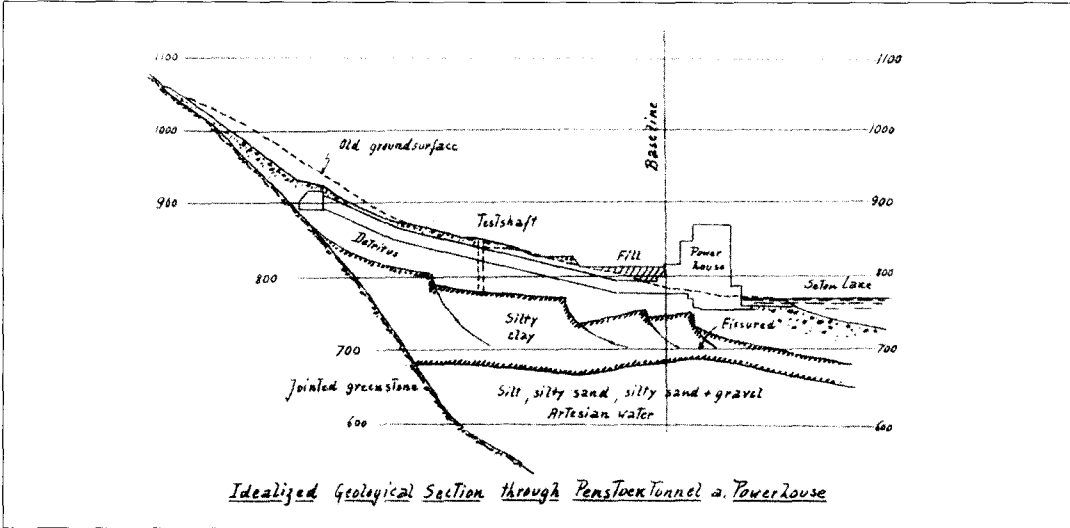


그림 1. 브리지 리버(Bridge River) 발전소 아래의 지질 조건을 보여주는 지질 단면도. 1951년 8월 18일 테르자기가 작성한 "브리티시컬럼비아 주, 세튼(Seton) 호수에 있는 발전소 및 수압관 터널의 성과에 관한 보고서"에서 인용. 본래 축척 1인치 = 100 피트. 고도는 피트로 표시.

이 같은 현상은 거대한 후방으로의 활동체의 활동으로 인하여 일어날 수 있는 것이었다. 새로운 조사를 통하여 발전소 아래 점토층에 단층이 발생되어 균열되면서 전단강도를 크게 떨어뜨리는 미끄러운 표면(단층마찰면)에 에워싸이게 되었다는 사실이 확인되었다.

1950년 이후 실시된 새로운 조사를 통하여 점토 단층 아래에 물을 머금은 투수성 실트 사력층이 있다는 사실이 밝혀졌다. 이 조사를 통하여 호수 수면 위로 약 24m 높이까지 솟아오를 만큼 과다한 간극 수압이 이 지층에 존재하고 있다는 사실을 입증하는 성과를 거두었다. 갈라진 녹암 저판의 지하수 압력은 훨씬 더 높아서 호수 수면 위로 60m 까지 솟구칠 압력을 가지고 있었다. 온타리오에 있는 마라톤(Marathon) 공장 현장의 경우와 마찬가지로 물을 운반하는 암반의 절리부분과 그 위에 쌓인 점토층 때문에 투수성의 블랭킷 역할을 담당하였다.

호수 가장자리 아래 있는 퇴적물의 안정상태에 대한 테르자기의 연구결과는 투수성 지대 위에 있는 점토층과 그 위에 덮인 퇴적층의 무게가 근본적인 양압력과 거의 꼭 같다는 점을 보여주었다. 이것이 야말로 정말 물에 떠있는 지반이었다. 게다가 발전소와 육지 쪽에 놓인 부설철도 매립층의 하중은 공장 전체의 안전을 위협에 빠뜨릴 만큼 위험한 수준의 평균 전단응력을 초래하였다.

이런 상황을 바로잡는 데에는 두 가지 방법이 있다. 투수성 단층에 우물을 뚫어 단층에서 수압을 빼내거나, 활동을 방지하기 위하여 호수 바닥에 흠 제방을 건설할 수 있다. 우선 제방을 쌓는 해법을 선택하였다. 자갈 단층이 너무 실트성이어서 배수용 우물이 효과가 없고, 더구나 배출구로 물이 들어갈 수 있는 통로를 실트가 막아버릴 수 있기 때문에 이 방법을 택한 것이었다. 탐사용 시추공을 뚫으면서 겪었던 크나큰 어려움이 증명하였듯이 높은 동수경사

아래 있는 실트층의 침식이 실질적인 위협이 되었다. 탐사용 시추공 가운데 한 시추공에서는 지표가 갈라진 틈으로 5주일 동안 거칠게 물이 분출되어 약 122m³의 실트가 쌓였다. 대응 매립층을 건설하여 발전소와 수압관의 변형을 막고 성공적으로 문제를 해결하였다. 그 뒤 수압 배출 우물장치를 성공적으로 고안하여 시행하였다.

그런데 발전소 소유자인 B. C. 전기철도회사는 발전소를 확장해야 할 필요가 있었지만 발전소 확장에 적합한 부지를 선정하는데 또 다른 어려움이 있었다. 발전소를 향후 확장할 것을 예상하여 당초 설계를 하였던 것이다. 안정성이 더 높은 장소를 택하는 것이 확실히 바람직하였지만 분명히 대체부지로 적합한 곳으로 보이는 곳에서도 시험공을 뚫어보면 간극수압이 더 높게 나타났다. 실제로 이 지점의 압력은 너무 높아서 테르자기의 예측에 따르면 지반을 필요한 만큼 굴착하면 필요한 깊이에 도달하기도 전에 기초가 떠올라 기존 공장이 손상되거나 파괴될 것이다.

카사그란데가 본래 공장의 설계회사인 몬트리올에 있는 샤휄니건(Shawinigan) 엔지니어링 회사에 자문을 하였다는 사실이 밝혀지면서 발전소 확장을 위한 대체 부지를 선택하는 문제는 테르자기와 그의 고객회사에게 미묘한 문제가 되었다. 카사그란데는 굴착공사를 하는 동안 발생한 초기 팽창후 재압축된 점토층이 발전소 변형의 원인이라고 보았다. 그는 간극압이 존재할 가능성에 주의를 기울였지만 이것을 더 이상 탐사하자고 주장하지는 않았다. 카사그란데는 얇은 층으로 되어 있는 청점토 표본에서 단

층이 변형되었다는 사실을 인식하였지만, 그 원인을 표본 채취용 샘플러를 관입하는 과정에서 생긴 교란으로 생각했다. 테르자기는 즉시 변형된 단층이 활동으로 인한 것이라고 확인하였지만 카사그란데에게 공정성을 가한다면 테르자기가 더 나은 표본을 구했었다.

테르자기는 카사그란데에게 너그러운 태도를 취하며 고객회사에 확신을 가지고 편지를 썼다. “하층토의 상태는 기술자 100명 가운데 다섯명 만이 겨우 발견할 수 있을 만큼 교묘하게 파놓은 함정과 같습니다... 교량이 무너졌다면 설계자의 잘못입니다. 하지만 구조물을 건축하기 위한 부지가 예상과 다른 것으로 판명된 경우에는 다른 척도를 사용하여 잘잘못을 가려야 할 것입니다.” 그는 고대에 산사태가 발생하여 쌓인 변형되고 연약한 퇴적물 위에 건축을 하는 동시에 유난히 높은 간극수압을 처리해야 하는 일이 우연히 겹치는 경우는 매우 특이한 경우로서 그 자신이 과거에 실무를 하면서 경험하지 못했던 경우라고 생각했다. 그럼에도 불구하고 발전소 소유회사는 새로운 발전소 설계를 샤휄니건(Shawinigan) 회사 대신 B. C. 인터내셔널 엔지니어링회사에게 맡기기로 결정하였다.

세튼(Seton) 호수 전력공사는 힘든 작업이었지만 복잡하기로는 가리발디(Garibaldi) 화산 부근에 건설하는 치카무스(Cheakamus) 댐에 비하면 아무것도 아니었다. 이 공사는 테르자기가 B. C. 전기회사를 위해서 뛰어 넘어야 할 두 번째 장애물이었다.¹⁾ 치카무스(Cheakamus) 강 아래 깊은 계곡의 강바닥은 화강암질 기반으로 되어 있으나 1세기 전에 크

1) 치카무스(Cheakamus) 댐의 사례 역사는 <보스턴 토목공학자학회 회보> 1960년 제47권 64-94쪽에 실린 테르자기의 논문 “산사태 잔해 위에 세운 저수 댐”에 기재되어 있다. 이 작업에 관한 그의 첫 번째 컨설팅 보고서 (1954년 4월 12일자 “브리티시컬럼비아 주, 치카무스(Cheakamus) 강에 있는 스틸워터 하류 호수 남쪽 저수 댐 건설 계획에 대한 보고서”는 <테르자기 문집> 395-408쪽으로 재 출판되었다.

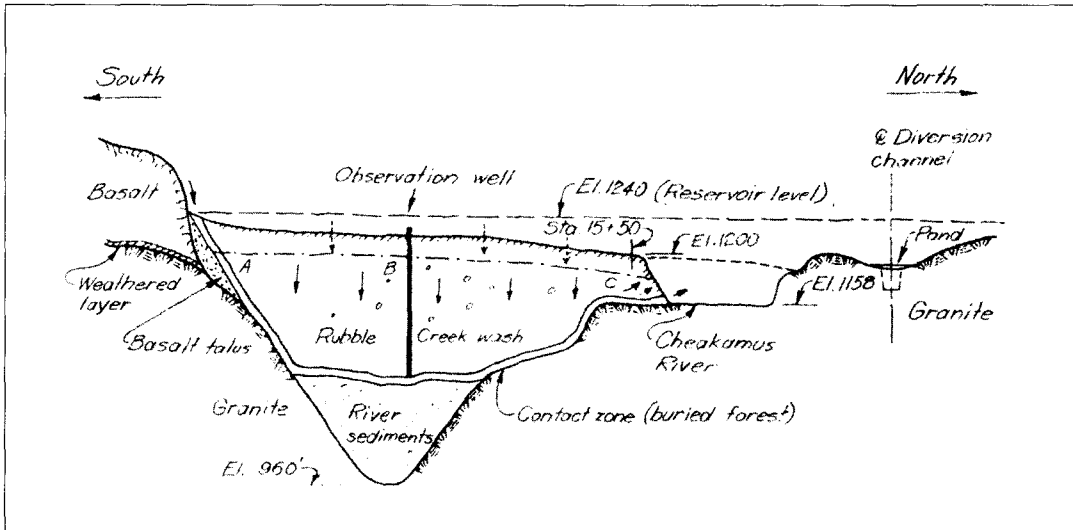


그림 2. "강자갈흐름"의 바닥에 접한 지역을 표시한 치카무스(Cheakamus) 댐의 단면도. 1955년에 작성되어 테르자기의 논문 "산사태 잔해에 세워진 저장 댐"에 포함되었다. <보스턴 토목공학자학회 회보> 1960년 1월, 제47권 64-94쪽. 현재 축척: 수평, 1인치 = 310피트, 수직 1인치 = 155피트.

게 발생한 안산암 유동 산사태에서 유출된 화산 자갈이 약 45m 깊이로 채워져 있었다. 산사태로 흘러 내린 흙은 왼쪽(동남쪽)으로부터 치카무스(Cheakamus) 계곡으로 들어가 하류로 약 4km 뻗어 내려갔다. 산사태 흙더미가 이동하면서 오래된 토양 지평층을 덮어 버리고 그 아래에 나무와 나뭇가지를 쌓아 놓았다. 따라서 오른쪽 강기슭 암벽과 접해있는 구역에는 벌어진 공간이 있어서 투수성이 엄청나게 높을 것으로 예상되었다. 산사태 잔해 속과 그 아래에는 투수성이 매우 높은 원주형의 현무암과 애추로 되어 있는 노두와 기초지대가 있었다.²⁾

1954년 4월 현장을 첫 번째 방문을 하였을 때 테르자기는 다음과 같은 요소를 고려하였다. 화산 자갈이 슬러리 상태로 퇴적되어 있는데 이 슬러리가 군데군데 나무 주위로 곧장 흘러 들어온 것을 볼 때

처음에는 딱딱한 콘크리트와 같은 연경도를 가졌던 것이 틀림없다. 소위 "강자갈흐름(Rubble Creek Wash)"이라고 부르는 이 슬러리는 너무 부드러워서 돌이나 전석이 있더라도 15m 정도는 손쉽게 강철 착암기 파이프를 박아 넣을 수 있었다.

실트가 많아서 사석층에는 파이핑 현상이 일어나기 쉬웠다. 그러나 점토가 없이 크기가 다른 입자들이 혼합되어 있어서 강도가 높고 방수성이 우수하여 보기 드물게 바람직한 결합체를 이룬 재료로 압축되었다. 매우 높은 수분함량과 현저하게 높은 비율을 차지하는 전석을 처리할 수 있다면 제방을 쌓는 데에 아주 만족스러운 재료가 될 수 있었다(전석입자의 20%는 직경이 7.6cm가 넘었다). 테르자기는 관측법을 이용하여 사석(rubble wash)으로 댐을 건설하는 것이 가능하다고 조언해 주었다. 댐을 건설하

2) 원주형 현무암은 캘리포니아 주의 유명한 데빌스 포스트파일 모뉴먼트의 경우에서 보듯이 화산 용암이 냉각되는 동안 주상으로 갈라진 것이다.

는 데에 충분한 양을 이용할 수 있는 유일한 재료였기 때문이 이 방법이 편리하였다.

주된 위험은 사석층 저판에 있는 투수성 접촉 지역을 통해서 파이핑 현상과 누수 현상이 일어날 가능성이 있다. 이 지역은 전체 사석더미 아래에 계속 이어져 있어서 물이 댐 아래나 댐 주위로 빠져나갈 수 있는 지름길이 될 수도 있었다. 특히 댐 아래 침투 통로가 짧은 곳에 있는 오른쪽(북서쪽) 암벽과 접촉된 곳에서 그럴 가능성이 더욱 컸다. 테르자기는 댐 중심선을 재배치하고 방향을 다시 잡아서 모든 침투수 통로를 봉쇄하거나 배수구나 필터를 설치하여 침투수를 차단시킬 수 있도록 하였다. 오른쪽 암벽의 투수성 접촉 지역에는 트렌치를 만들고, 댐 하류로 물이 흘러나올 가능성이 있는 곳은 모두 사석을 다져 넣었다.

테르자기는 공사 기간 동안 현장을 총 16회 방문하면서, 1954년부터 1959년까지 보고서와 의견서 형식으로 건의사항을 보고하고 각 단계별 변화에 대하여 제안을 하였다. 이러한 변화 대부분은 투수성 접촉 지역의 신비를 벗기는데 느린 속도에 기인한 것이었다. 전석이 차지하는 비율이 예상한 것보다 훨씬 많았기 때문에 그 양을 조절하기 위하여 사용 가능한 최대 암석의 크기와 두께를 늘리고 상류 제방 경사를 완만하게 만들어야 했다(댐은 각 층별로 다지기작업을 하였다). 이 같은 사정으로 테르자기는 거의 변명조의 글을 쓰게 되었다. “치카무스(Cheakamus) 댐 공사는 불안전하고 비경제적인 건축물을 얻게 될 위험을 무릅쓰지 않고서는 설계와 공사가 서로 분리될 수 없는 작업 중 하나입니다.”

이 공사의 문제점은 비단 현장 지질에서 발생될

뿐 아니라 인간관계에서도 발생되었다. 테르자기는 조사와 공사 굴착구간에서 드러난 사실에 따라 복잡하게 상술하여 설계상에 안정성을 보장하였다. 그러나 안정성이란 시공 상태가 그의 수준 높은 시방서에 미치지 못하면 환상에 불과한 것이었다. 그는 건설업자가 경험이 없고 부적합하다고 이의를 제기하고 더 나은 작업을 하기 위하여 의견서 교환 전쟁을 벌였다. 테르자기는 주야로 검사할 수 있도록 검사요원을 확충하라고 요구하고 건설업자의 실수를 적발하고 시정작업을 감독하는 일을 전담할 검사기술자를 배치해 달라고 요구했다.

테르자기는 자신을 보좌할 개인 검사원을 지원해 달라고 요청하여 마크 올슨(Mark Olsen)을 배속받아서 매주 그에게 보고하도록 하였다. 테르자기는 올슨의 직무에 대하여 “충실하고, 신뢰할 수 있어야 하고, 양심적이어야 하며 B. C. 엔지니어링³⁾ 마치 테르자기가 입회하고 있는 것처럼 그를 지독한 방해물로 여길 것이기 때문에 소극적인 저항이 있더라도 정보를 얻을 수 있어야 한다”고 규정하였다. 그는 올슨에게 공사 전방에 관하여 측정된 결과를 상세하게 보고하라고 요구하고 기술자가 두려워해야 할 한가지 일은 자신이 예상하지 못했던 상황이 공사 현장에서 전개되는 것이라고 설명하였다. “공사 도면은 그저 소망하는 꿈을 그려 놓은 것에 불과하다. 댐 붕괴사고는 대부분 부주의한 공사로 인하여 발생하는 것이지 설계 결함으로 인한 것이 아니라고 나는 생각한다.”

이 현장에 댐을 건설하는 일이 가능하다고 테르자기가 처음에 판단하게 된 근거는 누수율을 1초 당 11.5m³ 이하로 유지시킬 수 있다는 확신하기 때문

3) 치카무스(Cheakamus) 댐을 설계한 회사. B. C. 엔지니어링은 후버(Huber)가 대표로 있는 B. C. 인터내셔널 엔지니어링과 B. C. 전기철도회사가 합병하여 설립된 회사이다. 합병된 후에 새로 설립된 회사는 더 이상 인터내셔널 엔지니어링이나 그 모회사인 모리슨 낫센(Morrison Knudsen)과 직접적인 관계를 갖지 않았다. B. C. 전기철도회사는 짧게 줄여 B. C. 전기회사가 되었다.

이었다. 결과적으로는 누수율이 1 초 당 0.7m³ 이하에 불과하였다. 산사태에서 발생한 축축하고 전석과 실트가 섞인 사석으로 된 재료를 전례 없이 제방 축조하는 데에 사용하기로 했던 결정은 현명한 결정이었다. 최대 15cm 돌과 재료를 섞어 다진 결과는 만족스러웠으며 물이 아주 빨리 빠져서 토취장에서 축조 현장까지 운반하는 동안 충분히 건조되었다.⁴⁾

테르자기의 모험가 기질에 한 단계 더 어려운 도전장을 내민 것은 밴쿠버 급수 저수지 공사였다. 1952년 7월 “클리블랜드 저수지” 부지에서 불도저로 정지 작업을 시작하자 활동현상이 촉발되어 심한 머드플로우가 발생하였다. 그날 마침 테르자기는 브리티시컬럼비아 대학에서 강연을 하기 위하여 우연히 밴쿠버를 경유하게 되었는데, 현장을 방문해서 조언을 해달라고 요청을 밴쿠버 광역급수청 청장으로부터 받았다. 테르자기는 활동현상 그 자체는 “하찮은” 것이라고 조사 결과를 보고하였다. 그러나 댐의 왼쪽 교대를 형성하는 재료에서 나타나는 거동이 댐 하류에 있는 가파른 교대에서도 유사한 거동이 나타날 것이라는 경고하였다. 테르자기는 저수지에 처음으로 물을 채울 때 교대를 매우 주의 깊게 지켜 보라고 댐 소유회사에게 조언했다.

그가 간단한 보고서에서 지적한 내용은 파이핑 현상으로 말미암아 활동현상이 진행되고 있다는 점이었다. 저수지 바닥의 길이가 18m 되는 구간에서 이탄이 상당량 파헤쳐졌다. 아래쪽에서 맑은 물이 올라와 이탄이 제거된 빈 공간에 곧바로 채워졌다. 며칠 후 비가 오기 시작하더니 몇 시간 동안 폭우가 쏟아져서 물은 진흙탕으로 변하고 조금 떨어진 언덕

경사면에서 부서지고 머드플로우가 흐르면서 활동이 통나무와 전석을 굴러 내리게 하여 상당한 피해를 입혔다.

주변 경사면에 노출된 흩은 빙하기 실트와 점토가 수평으로 쌓인 지층과 빙하기에 흘러들어 퇴적된 사력층으로 이루어져 있었다. 건설업자가 굴착한 구역에는 투수성 사력으로 된 단층이 드러났는데 이 단층에서 빗물이 스며 나오고 있었다. 이 단층을 통해서 침투된 물은 미세한 모래나 실트를 씻어 내리고 표층수로 형성하였다. 이렇게 침식된 지지경사면의 바닥에서는 붕괴가 시작되었다. 테르자기는 아이다호에 있던 싱커(Sinker) 댐이 유사한 징후를 보인 후에 약 10년만에 붕괴된 사실을 언급했다. 그 댐에서도 맑은 물웅덩이가 갑자기 혼탁해지더니 약 15분 후에 댐이 무너졌던 것이었다. 이와 똑같은 사태가 클리블랜드 댐에서도 발생할 수 있다고 그는 조언하였다.

5년 후인 1957년, 그 회사의 컨설팅 기술자 찰스 리플리(Charles Ripley)가 강력히 권하여 테르자기는 밴쿠버 광역수자원위원회 특별자문역으로 임명되었다. 이 당시 댐은 이미 완공된 상태였으나 테르자기가 정확히 예측했던 문제로 골치를 썩고 있었다.

테르자기는 집무를 시작하면서 포괄적으로 검토할 수 있도록 방대한 자료를 분류하여 정리해 달라고 찰리 리플리(Charlie Ripley)에게 요청하였다. 이 자료를 가지고 테르자기는 “대략적이기는 하지만, 아주 훌륭한 층서 현황도”를 만들어 내고 기념비적인 보고서도 저술하였다.

4) 이 작업에 대해서는 아직도 여러 가지 문제가 제기될 수 있다. 우선, 테르자기가 수년에 걸쳐서 세세한 부분까지 일일이 꾸준하게 철저한 관심을 집중하지 않았다면, 다른 결과, 아마도 안전하지 못한 결과가 초래되었을지도 모른다. 두 번째, 일부에서는 계곡의 사석(Rubble Valley Wash)을 발생시킨 산사태가 재발할지 모른다는 무서운 가능성을 테르자기가 고려하지 않은 이유가 무엇인지 의문을 던진다. 가리발디(Garibaldi) 하류 호수의 저반의 장벽에서는 거대한 유동 활동이 발생하여 계속적으로 극도의 지질적 위험을 초래하였으며, 치카무스(Cheakamus) 댐을 건설하면 저수지가 그 배출 경로에 위치하게 되어 사태가 더욱 악화될 수도

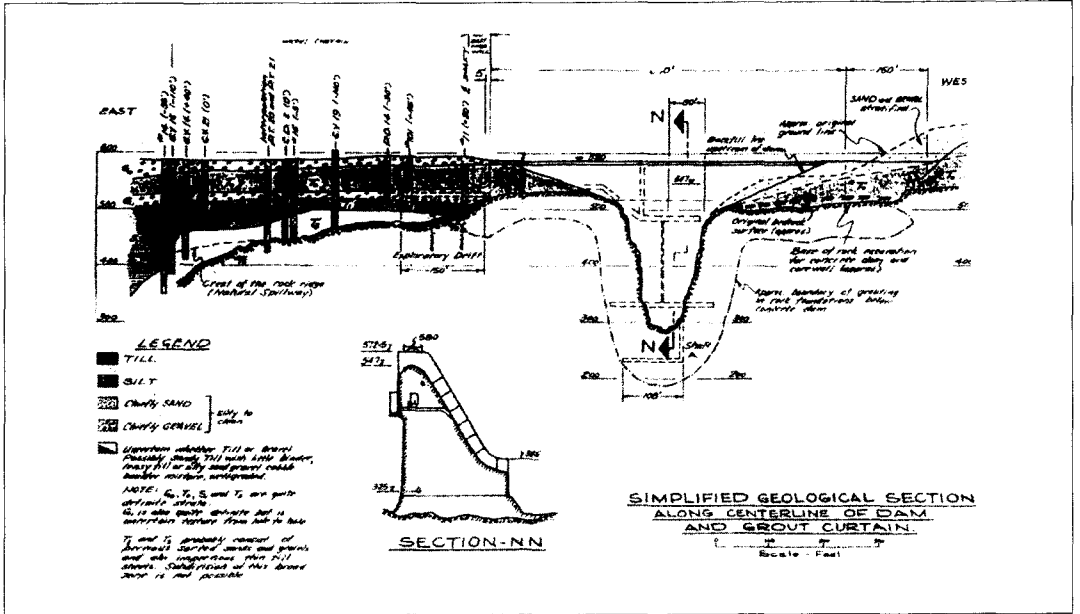


그림 3. 클리블랜드 댐 전 구간과 교대를 하류(남쪽)에서 본 지질 단면도

카필라노(Capilano) 강에 있는 클리블랜드 댐은 화강암질 기반암층이 갈라져 생긴 가파른 협곡을 막아 물을 채우기 위해서 만든 약 91m 높이의 콘크리트 중력댐이다. 이 협곡은 빙하기 후대에 좁은 기반암층 사이에 생긴 것으로서 흙이 위에 덮이고 양쪽 계곡이 거의 평행선을 달리며 갈라졌고 퇴적물이 쌓여 있었다. 댐의 하류에서는 카필라노(Capilano) 수로가 급하게 왼쪽으로 꺾여서 그 결과 저수지 연안쪽에 길이 30m가 넘는 연안이 좁은 산등성이의 상류 경사면에 있고 일부 지역에는 부분적으로 침식성과 투수성이 높은 퇴적층이 있었다.

이 산등성이의 가파른 하류 경사면에서는 저수지의 침투수가 퇴적층에 유입되면서 퇴적물이 흘러나오고 있어서 세 가지 심각한 위험에 대하여 주의 기울여 대처하는 일이 필요했다. 첫 번째 위험은 파이프 현상, 즉 미세한 모래와 실트가 침식되면서 파이프형의 공동이 자연적으로 형성되어 위쪽으로 발

달하는 현상이었다. 두 번째 위험은 누수 현상, 즉 저수지에서 현저한 양의 물이 빠져 나가는 현상이었다. 세 번째 위험은 가파른 경사면 아래의 높은 수압으로 인하여 유효응력이 감소함에 따라 야기되는 활동현상이었다. 이 경우 댐의 송수관이 하류 경사면 가운데 중간 능선을 따라 부설되어 있기 때문에 활동현상 위험이 다른 현상을 위험만큼 증대하였다.

원편 산등성이를 통해서 위험한 침투수 현상이 발생할 가능성을 인지하고 저수지에 물을 처음 채울 때부터 연이어 저수지를 가동하는 동안 침투수 현상은 면밀히 연구되었다. 설계회사인 B. C. 인터내셔널 엔지니어링 회사는 왼쪽 교대를 관통하는 침투수 경로를 막기 위하여 댐의 콘크리트 교대 옹벽 가장 자리를 넘어 길이 약 166m에 이르는 그라우트 커튼을 시공한 적이 있었다. 그러나 그라우트 커튼은 전혀 효과가 없다는 사실이 나중에 테르자기의 연구 결과로 밝혀졌다. 이 문제를 해결하는 데에 도움이

된 방법은 저수지 연안에서 약 213미터 거리가 되는 바닥에 투수성 사력층이 깔려 있는 저수지 취수 지역에 방수 토양을 깔고 다져서 블랭킷을 덧씌우는 방법이었다.

흙의 복잡한 거동으로 인하여 침투수 문제를 해결하는 일은 더욱 어려웠다. 계곡에 채워진 퇴적물 위에는 빙하기에 퇴적된 밀도가 높은 “빙력토(till)”가 연속적으로 덮여 있고 아래에는 투수성이 매우 높은 사력층이 위치해 있었다. 그 밑에는 온갖 종류의 퇴적물이 거의 예측할 수 없을 정도로 뒤엉켜 있었다. 이 퇴적물은 빙하기 말기에 빙하가 퇴적물 위에 덮치기도 하고 퇴적물을 어지럽히고 아주 복잡하게 퇴적물을 퇴적시켜서 생긴 것이다. 맨 밑바닥에는 기반암 아래까지 더 오래된 빙하기와 간빙기에 쌓인 밀도가 높은 불투수성 퇴적층이 있었다.

충분한 탐사를 하고 터널을 파보고 난 뒤에야 그동안 종잡을 수 없었던 지층의 비밀이 아주 조금 드러났다. 좀 더 구체적으로 상황이 파악되자 테르자기는 1959년 5월 보고서를 전면적으로 다시 작성하고 지질에 관한 부분을 대폭 늘렸다. 그러나 엄청나게 놀랄 일은 아직 대기 중이었다.

1954년 샘이 솟는 곳과 물이 눈에 뜨이게 관측되는 축축하게 젖은 지점에 배수터널을 여러 개 뚫기로 결정하였다. 이 터널 가운데 하나인 470호 터널은 2.4m 두께의 빙력토층의 바닥 가까이 뚫었다. 약 82m를 뚫어 그라우트 커튼에서 약 18m 못 미친 지점에 이르렀을 때, 터널 보강체가 무너지기 시작하고 터널 막장이 사력층에서 실트층으로 바뀌어서 더 이상 터널을 뚫는 일은 불가능하게 되었다. 터널 막장을 봉쇄하고 격벽으로 지지하고 나서 터널 막장과 8m 뒤에 설치한 두 번째 격벽 사이 공간을 세립의 자갈로 채웠다. 터널 입구 밖으로 물을 빼내기 위하여 파이프 두개를 설치하고 나서 저수지에 물을

다시 채웠다.

1955년 6월에는 저수지 수위가 터널높이 보다 23.7m 위까지 상승하여 주로 맑은 물의 유량이 1분 당 0.15m^3 내지 0.23m^3 로 점차 증가되었다. 그런데, 1955년 8월 8일부터 대략 1955년 9월 5일까지 이 기간 동안에는 저수지 수위는 더 이상 증가하지 않는데 유량은 극적으로 증가하여 1분 당 약 0.53m^3 가 흐르고 진흙탕으로 바뀌었다. 그와 동시에 약 198m 떨어진 고도 442지점에 있는 경사면의 샘에서 흘러나오는 유량이 거의 10배로 증가하고 이 물도 진흙탕으로 바뀌었다. 일종의 자연 현상에 의하여 터널이 자체적으로 고도로 효과적인 배수구로 바뀌어버린 것이었다.

이러한 사태에 관한 기록을 연구한 끝에 테르자기는 침투수의 힘으로 인하여 터널 위에 있는 빙력토층이 자연적으로 붕괴된 것이 틀림없다고 결론지었다. 처음에는 이 붕괴로 인하여 저수지와 자유롭게 연결되는 고도 약 500 지점에 있는 모래층과 과거에는 별도의 불연속적인 렌즈와 같은 거동을 보이던 터널의 사력층 사이에 수압 통로가 생기게 되었다.

터널의 자체적인 배수기능과 성공적으로 뚫은 수직 배수갱 (E2) 덕택에 경사면 안정성의 문제는 줄어들었지만 침식이라는 새로운 문제가 등장하였다. 고체성 물질이 470호 터널에서 1주일에 약 0.14m^3 씩 흘러나오는 물에 씻겨 없어졌다. 이러한 현상이 얼마나 오래 지속될까? 직접적으로 위험요소는 터널 구조 그 자체였다. 그렇지만 파이프링 현상에 의한 붕괴 위험도 있나?

배수 터널을 계속 유지하는 데에는 많은 비용이 들어서 설계를 개선하여 터널을 하나 더 추가로 만들자고 제안하였다. 이에 따라 저수지 수위를 낮추고 위에서부터 470호 터널 안으로 침투된 물의 주요 근원지였던 밀도 높은 투수성 사력층에 505호 터널

을 뚫었다. 505호 터널은 처음 약 61m 깊이까지 470호 터널과 거의 평행으로 일직선으로 이어지다가 상류 끝부분 위와 얼마 떨어지지 않은 지점에서 470호 터널 정면에서 방향을 바꾸었다.

505호 터널을 만든 의도는 470호 터널로 물이 유입되는 것을 차단하여 470호 터널 위에 있는 실트층으로 물이 관통하여 침식작용이 일어나고 미립분이 유실되는 것을 막기 위한 것이었다. 저수지 수위가 505호 터널의 수준보다 올라가게 하면 470호 터널의 유량이 줄어들고 예상했던 대로 505호 유량이 증가한다. 후자는 수위가 마지막 2.1m 상승하기 전까지는 기본적으로 깨끗하였다. 그러나 저수지 수위가 고도 563에서 고도 570(최고 수위)까지 상승하면 505호 터널의 유량이 극적으로 1분 당 1.89m³ 이상으로 증가하였다. 게다가 모래가 많이 유출되면서, 최악의 경우에는 하루에 약 1.98m³의 모래가 쌓였다.

테르자기는 이러한 진전은 전혀 예상치 못했던 것이고 다소 심상치 않은 일이라는 점에 동의하였다. 그는 활발한 파이프링 현상의 관측 신호와 내부 침식작용(세굴)의 관측신호를 구분하기 위하여 각종 유체역학 이론을 인용하여 아주 세심하게 자료를 분석하였다. 전자는 재앙을 야기할 수 있으며, 후자의 경우에는 미세한 모래가 사력층 혼합물에서 빠지면서 단지 누수만 증가될 것이다. 그런 이유로 테르자기는 파이프링 현상이 일어나지 않을 것이라고 장담했지만 리플리(Ripley)는 실제로 두려움을 느끼고 있었다.

한편 수자원위원회 운영진은 클리블랜드 댐 배수에 막대하게 투입되는 유지비로 인해 점점 초조하게 느끼면서 이러한 관측방법이 정말 옳은 것인지 미심쩍어 했다. 리플리(Ripley)는 테르자기의 관측방법이야말로 지질이 너무 복잡해서 사전에 알아낼 수 없는 현장에서는 가장 경제적인 건설방법이라고 설명하였다. 아무도 우발적으로 일어날 것으로 예상되

는 사태에 대하여 사전에 모두 대비할 수는 없을 것이다.

1963년 중반 505호 터널의 모래 침식작용이 다소 진정되었으나 여전히 매우 높은 수준이었다. 80회 생일이 눈앞에 다가오고 건강도 좋지 않았지만 완고한 테르자기는 걱정할 필요 없다는 태도를 굽히지 않았다. 그런 사태가 발생한 가능성이 있다는 점은 테르자기도 인정하였으나 물이 실제로 저수지로 향하여 파이프를 침식시킬 가능성은 거의 없었다. 가장 그럴듯한 해석은 사력 지층에서 모래 일부가 씻겨 내려가는 세굴현상이었다. 그러나 테르자기는 누수가 경제적 변수가 된다 하더라도 단지 물을 끌어 모아 저수지로 도로 퍼 넣으면 그만이니까 세굴은 전혀 문제가 되지 않는다고 생각했다.

하지만 모든 사람의 신경을 진정 시켜려면 실제로 파이프링 현상이 도래하면 갑자기 재앙이 닥칠 수 있으므로 터널 막장에 아주 강력한 철근 콘크리트 라이닝을 씌우고 바닥에는 구멍을 내지 않기 제안하였다. 그의 생각은 자연현상으로 인하여 파이프의 출구가 막혀 자연적으로 퇴적 필터층이 형성되어 안정을 되찾을 때까지 라이닝이 지탱할 것이라는 것이었다. 그는 이렇게 빈정대었다. “철근 콘크리트 라이닝을 설치하는 비용은 비행기로 헤아릴 수도 없이 장거리 여행을 하였지만 처음 비행기 여행을 시작할 때 생명보험에 가입하던 때가 생각나게 한다. 나는 비행기가 추락하지 않는 한 그 돈은 낭비한 것이라는 사실을 알게 되었고 내가 탄 비행기는 한 번도 추락한 적이 없었다.”

테르자기는 브리티시컬럼비아 지방을 방문하기를 무척 좋아했다. 그는 그곳이 지구상에서 가장 아름답고 매력적인 지역 가운데 하나라고 생각했다. 클리블랜드(Cleveland) 댐의 경우와 같이 그가 직면했던 문제에 거의 죽는 날까지 최선의 노력을 쏟아

부어야 했기 때문에 그곳을 좋아했던 것은 천만다행이었다. 마지막 임무였던 미션(Mission) 댐 건설공사를 그는 전 생애를 통틀어 가장 어렵고 위험한 일로 인정했다.

그 공사는 브리티시전력회사에서 발주한 공사였다. 그 회사는 약 18.2m 높이의 록필로 건설된 기존의 브리지(Bridge) 강 우회댐에 미션(Mission) 댐이라는 약 54.8m 높이의 구조물을 추가로 건설하여 세튼(Seton) 호수가 있는 브리지 강에서 전력을 추가로 생산하려고 하였다.

예비 배치도에는 우회댐과 새로 건설하는 댐을 통합하여 더 높게 댐을 건설하는 안으로서 우회댐의 필요성이 반영되었다. 기존 댐은 카사그란데 교수의 기술 자문에 따라 샤휐니건(Shawinigan) 엔지니어링이 설계하고 1947년에 완공되었다. 1955년 미션 댐에 대한 작업을 착수하면서 테르자기는 카사그란데가 처음부터 이 작업에 참여할 수 있는 권리를 요청하기로 결심하였다. 테르자기는 공사의 더욱 광범위하고 아주 골치 아픈 문제에 전념하고 카사그란데에게는 새로운 댐의 예비 설계를 수행하도록 할 계획이었다.

“골치 아픈”이란 형용사는 딱 들어맞는 표현이었다. 사실 건설한지 8년된 우회댐은 이미 1.8m까지 침하하고 핵심부가 침식되어 움푹 파인 속으로 표면이 붕괴되면서 싱크홀이 발달되고 있었다. 그것으로도 모자라 댐 지반에서는 통제할 수 없을 정도로 누수현상이 심화되고 있었다. 18m 높이의 댐이 이렇게 절망적인 상태에 있는 것을 보고 도대체 어느 누가 감히 54.8m 높이의 댐을 새로 건설하려고 할 수 있겠는가? 그는 1928년에 작성된 신규 댐의 설계에서 치명적인 결함을 발견하였다. 1954년 후버

(Huber) B. C. 엔지니어링이 제안한 두 번째 설계에 대해서 테르자기는 아주 신랄하게 비꼬았다. 댐에 물을 채우지 않는 한, 그 댐은 건재할 터이니 첫 번째 설계에 비하면 좀 나은 설계라고 그는 편지에 적었다.

이 댐은 테르자기가 겪어 본 댐 현장 가운데 최악의 현장이었다. 일반적으로 문제는 현장의 지질에서 비롯된다. 계곡 퇴적층의 깊이는 약 122m 이상이 될 만큼 엄청났는데 대부분 투수성이 높은 하천 퇴적물이었다. 그러나 투수성 퇴적층 사이에 끼인 투수성이 거의 없는 켜기 모양의 호상점토층도 있었다.⁵⁾ 기존 우회 댐 제방정상부 아래에서 21.3m이던 점토층의 두께가 새로운 댐의 중앙축으로 선정 한 지역 아래에서는 불과 미터에 불과할 정도로 점점 아졌다. 우회 댐 설계회사는 점토층 위에 널말뚝을 박아서 점토층 위에 있는 하천 퇴적물 상층부를 관통하는 표층수의 흐름을 막아 보려고 시도하였다. 이러한 방법으로 댐 바로 아래에서 발생하는 침투수는 제어되었으나, 점토층 아래에 있는 투수성 퇴적층을 관통하는 누수현상에는 효과가 없었다. 테르자기는 새로운 기술인 점토 그라우팅 공법을 이용하여 새로운 댐의 지반을 암반까지 모두 밀봉하지 않으면 과도한 누수현상이 발생하고 누수량은 대략 1초 당 2.83m³ 이상이 될 것으로 추산하였다.

점토 켜기층은 압축성이 강하기 때문에 지반에 엄청난 난제를 안겨 주었다. 앨버타 대학에서 샤휐니건(Shawinigan) 회사를 위해 실시한 시험 결과, 점토가 전례 없이 연약하여 우회 댐이 수 m 침하할 것이라고 나타났다. 우회 댐에 실제로 발생한 침하 정도를 테르자기가 뒤에 역산해 본 결과에 의하면 점토의 압축 지수가 약 1.0으로 나타났다. 이 수치는

5) 호상점토는 다소 실트성이 있는 지층 사이에 매우 얇게 여러 겹 번갈아가며 끼어 있는 점토 퇴적물이다. 이것은 매년 수면에 얼음이 어는 호수의 퇴적물에서 형성된다.

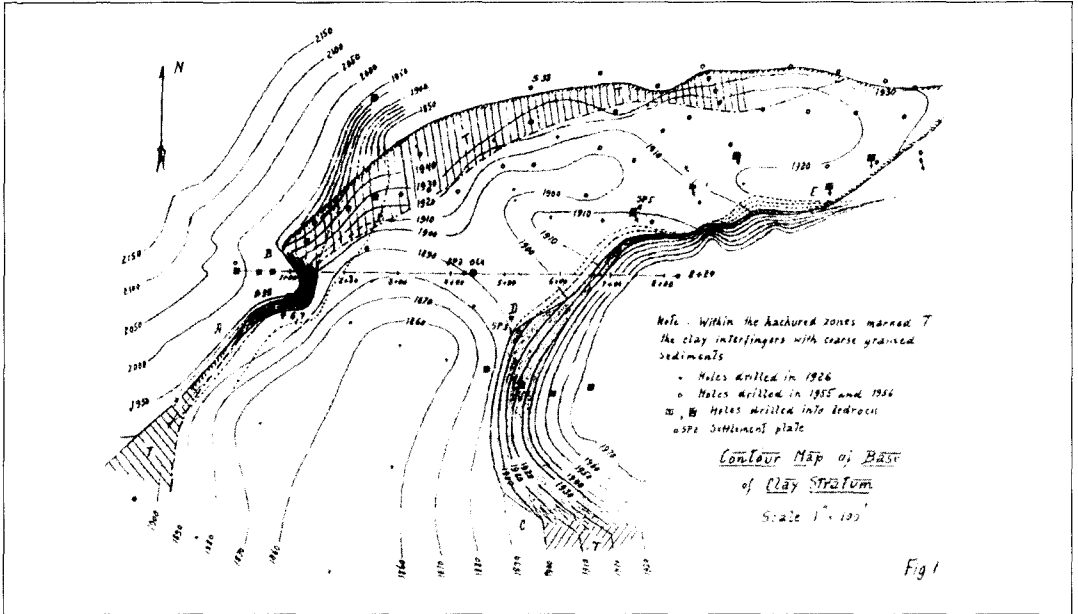


그림 4. 미션(Mission) 댐: 테르자기가 고대 호수의 연안선의 위치를 추론하기 위해 작성한 점토 저판의 등고선 지도. 1957년 2월 25일, 테르자기가 작성한 “브리지(Bridge) 강 댐 건설공사계획을 위한 지반 처리에 관한 예비보고서.”

앨버타 대학 시험 결과보다 몇 배 더 큰 것이었다. 테르자기는 그 정도의 소성을 가진 자연 상태의 점토가 그렇게 높은 압축성을 가진 경우는 예전에 본 적이 없었다고 보고서에 기록하였다.

그는 점토가 아주 연약하기 때문에 새로운 댐에 엄청난 지반 침하, 즉 7.6m에 이르는 침하가 발생하리라고 예측하였다. 최악의 지역은 점토 지층의 썩기 부분이었고 점토층이 비스듬한 방향으로 계곡에 자리 잡고 있어서 댐 안에서 발생할 침하 강도에 엄청난 차이로 인하여 뒤틀림현상, 전단현상, 그리고 응력이 발생할 것이다. 이러한 현상으로 댐에 균열이 가고, 침투수가 균열이 간 곳으로 몰려서 공동 침식현상을 일으켜 싱크홀을 만들어 표면까지 붕괴될 것이다.

싱크홀을 발생시키는 이러한 재료와 조건은 이미 기존 우회 댐의 역사로 증명되었다. 예컨대 1952년

4월, 댐의 제방정상부에서 구멍이 하나 발견되었는데, 그 길이가 약 7.65m, 폭이 약 3m, 깊이가 약 1.2m에 이르렀다. 9월이 되자 그 깊이는 2.4m로 늘어나고, 체적은 두 배 이상 되었다.

이러한 문제 이외에도 골치 아픈 문제가 또 있었다. 협곡에 있는 다소 왼쪽(북쪽)으로 치우친 경사면 측면에 애추로 된 두꺼운 기반암층이 덮여 있었다. 테르자기는 이 기반암층이 암석 바닥까지 똑같이 매우 가파른 각도로 계속 이어지고, 지반에 있는 하천 퇴적층 사이에 중간 층을 이루고 있을 것이라고 확신하였다. 기반암층의 공동은 댐의 밀봉된 지점 주위와 그 밑으로 엄청난 양의 누수를 운반하는 역할을 할 것이다. 더구나 점토층이 기반암층 위에 직접 놓여 있는 곳이 있다면 그 점토층이 공동 속으로 침식되어 커다란 공동과 싱크홀이 생겨서 파이핑 현상에 의해 댐의 완전 유실이 촉진될 것이다.

우회댐을 건설하는 도중에 애추가 발견되었으나 기초에서 애추를 완전히 제거하는 일은 현실적으로 불가능하다고 판단되어 그대로 내버려 두었다. 이 재료 가운데 일부는 “임의매립방식(random fill)”으로 우회 댐 측면에 축조하였다. 새로운 댐은 이 재료 위에 건설될 예정이고 새로운 댐을 건설하는 동안 우회댐을 가동시켜야 하는데 우회댐을 파괴하지 않고서는 이것을 철거할 수 없었다. 테르자기는 새로운 댐의 필터 층 아래에 있는 애추 더미와 록필을 공사 도중 표시해서 미세한 모래를 물에 흘려 집어넣는 방식으로 빈 공동을 채우라고 요청하였다. 우선 노출된 전석층에 모래를 깔고 워터 제트를 사용하여 빈 공동으로 모래를 흘려보냈다. 전석 사이에 모래가 더 이상 들어가지 않을 때까지 모래를 집어넣는 공정을 반복하였다. 테르자기가 시험 수직갱을 확인한 결과 워터 제트의 힘은 전석층 표면 아래 겨우 60cm 내지 90cm 깊이에서 감쇠되었다는 사실이 드러났다. “그 깊이 아래에 있는 빈 공동은 여전히 비어 있는 상태였고 이 문제를 해결할 수 있는 방법이 전혀 없었다. 우리가 만들어낸 것이라고는 고작 천연두 걸린 환자의 피부에 화장품 한번 발라놓는 정도에 불과했다.” 결국, 댐 바닥 아래에 있는 기초에는 품질이 아주 높은 필터층을 깔았다. 이 필터층은 기초 안에 있는 빈 공동으로 댐의 미세한 모래가 씻겨 들어가는 것을 방지하기 위한 것이었다.⁶⁾ 1957년 9월과 10월, 댐에 물을 채워 이 필터층이 물에 잠기기도 전에 필터 표면에 두 개의 싱크홀이 나타났다. 재료를 다져서 물에 흘려 넣는 방식으로 이 싱크홀을 메웠다.

테르자기에게는 이 작업에서 손을 뗀만한 이유가 충분히 있었고 그 작업에서 굉장한 도전과 모험의 기회를 얻지 않았다면 손을 떼었을 것이다. 지질 상황을 확보하는 것이 필수적인 선결과제였다. 그는 점토의 위험성을 제어하기 위해서 공사 범위 내에 포함된 지층을 복잡한 형태와 방향은 물론 다른 퇴적층과 애추와 접촉하는 부분의 정확한 성격에 대한 정보가 필요하다고 판단했다. 지질의 역사를 규명하기 위해서 그는 1927년에 판 시험공까지 거슬러 올라가 약100개의 시험공에서 얻은 자료를 포함하여 과거 탐사를 통해서 수집된 자료를 모두 검토하고 재구성하였다. 그는 자신의 토질공학을 알리기 위해서 다시 한 번 토목지질학 탐정이 되었다.

점토 지층의 상단과 하단의 등고선과 내부 구조를 보고 그는 이야기 줄거리를 만들어 냈다. 점토 지층이 적어도 38m의 깊이로 호수에 퇴적되면서 과거 계곡에 쌓여있던 퇴적물 표면의 빙하작용에 의하여 생긴 골 사이로 점토가 채워졌다. 호수는 약 3,000년간 존재하였다가 7,000년 전 점토층 꼭대기에 굽은 입자의 퇴적물이 쌓이기 시작했다. 왼쪽 연안과 오른쪽 연안에 있는 특정 지점 사이에 점토가 바위에 직접 쌓였을 것이다. 고대에 호수 연안이었던 부분에서 상류 쪽과 하류 쪽에 있던 점토는 투수성 물질에 의하여 분리된 렌즈형 지층과 썩기형 지층이 있는 “변이지대”에서 각 지층 사이에 끼어 층간층을 이루게 된 것이 틀림없다.⁷⁾

그는 변이지대 점토층 사이에 있는 흙이 하천 퇴적층과 흡사하게 생긴 점에 주목하였다. 애추 경사면의 파동작용으로는 이러한 것이 만들어질 수 없었

6) 테르자기가 아스완(Aswan) 댐 공사현장에서 러시아 기술자들의 제안에 그렇게 단호하게 반대했던 이유는 더 굽은 재료로 된 빈 공동 속으로 미세한 모래를 흘려보내는 일에 성공한 일이 거의 없었기 때문이다.

7) 이 상황은 뉴욕, 브롱크스에 있는 태프트 고등학교에서 겪었던 상황과 아주 흡사하였다. 이 고등학교 현장에서 1945년 그는 차가 나는 침하현상으로 인한 피해는 점토와 굽은 입자로 된 퇴적물 사이에 있는 변이지대의 바로 이러한 유형과 진원지의 암갈현상에서 발생한다는 점을 입증하였다.

기 때문에 테르자기는 점토 퇴적이 시작되기 전에 애추 위에 하천 퇴적층이 상당히 연속적으로 있었다고 결론지었다. 이와 같은 연구 가설을 토대로 그는 시험공을 통해서 점토가 애추에 직접 쌓여 있는 곳을 발견하였지만 불행하게도 설계하기에 아주 곤란한 지점에 있었다. 우회댐의 교대 바로 아래 하류에 있었던 것이다.

넓은 댐의 중앙축은 암석 계곡의 좁은 부분에 걸쳐 있었다. 테르자기는 이 좁은 부분의 상류 쪽에 있는 점토층 표면에 표고 1,925 지점에서 파도처럼 굴곡이 있는 것을 보았다. 다른 지역에서는 점토층이 표고 1,960 지점까지 이어져 있었으므로 호수의 물 깊이는 최소한 10.6m가 되었다. “그러한 크기의 호수에서는 물의 속력이 아주 낮기 때문에 하천 삼각주가 점차 발달하면서 호수 바닥에 굽은 입자의 퇴적물이 쌓이게 되었을 것이다. 삼각주의 정점이 호수 상단에 있다. 점토 지층은 삼각주의 맨 밑바닥층을 보여주는 것이다.” 점토층의 윗부분이 실트성이었고 일부에서는 순수한 실트에 근접하고 있다는 사실이 발견되어 이러한 이론에 뒷받침이 되었다. 테르자기는 이렇게 추론하였다. “삼각주 앞부분이 호수 바닥에 있는 한 지점에 가까워지면서 그 지점에 퇴적된 미세한 입자의 퇴적물이 더 굵게 되었다.”

계곡의 좁은 부분(우회댐의 중심선과 가까운 상류)에서 하류를 따라 내려가는 점토층의 표면은 불규칙하였다. 테르자기는 이러한 현상을 삼각주 앞쪽으로 형성된 썩기형 점토층이 삼각주 정점에 쌓인 퇴적물의 무게에 눌러 무너진 것으로 해석하였다. 삼각주가 계곡의 좁은 부분 쪽으로 발달하면서, 퇴적물이 증가하여 점토층에 있는 물에 과다한 간극압을 유발시키면서 점토가 결국 전단되고 연약하게 되었다. 이러한 이론으로 점토의 매우 높은 압축성과 위에 덮인 하천 퇴적물에서 사력층이 있는 썩기형의

점토층에서 실트와 점토가 섞인 혼합물을 발견하게 되는 이유도 부분적으로 설명할 수 있다. 테르자기는 이러한 전체 상황을 통하여 점토 단층의 원상태와 흐트러진 부분의 경계선을 발견할 수 없다고 결론지었다. 따라서 건설 예정인 구조물의 기초 위로 발생할 침하 분포도 정확하게 예측할 수 없었다.

지역의 지질에 관한 이러한 지식은 이 댐 설계와 건설에 대한 테르자기의 후속적인 공학적 접근방식의 토대가 되었다. 세부적인 사항은 각 지점에 따라 달라지게 마련이고 공사 중에 방심하면 위험을 초래할 수도 있다. 그러므로 이 댐을 안전하게 건설하려면 이것저것 조정할 수 있는 권한이 테르자기에게 필요했다. 공사기간 동안 매일 현장에 상주할 수 없기 때문에 현장에 상주하면서 그에게 직접 보고할 사람이 한 두 사람 필요했다. 그는 자신을 대신하여 현장에 상주할 첫 번째 사람으로 마크 올슨(Mark Olson)을 배치하고, 펙의 프랑스 출신 대학원 제자인 이브 라크루와(Yves Lacroix)를 감리단에게 채용하도록 주선하였다. 이 프랑스 출신 학생은 가공할만한 기초 위에 안전한 댐을 건설하는 공사에 관하여 박사학위 논문을 쓸 수 있는 기회라는 점에 매료되어 참여하게 되었다.

이 공사는 B. C. 전력회사가 발주한 공사로서 담당기술자 F. A. 라젠비(Lazenby)는 과거에 치카무스(Cheakamus) 댐에 있는 세튼(Seton) 호수 발전소공사와 이제 이 어려운 미션(Mission) 댐 공사에서도 테르자기가 기여한 특별한 공헌을 충분히 이해하고 높이 평가하였다. 그러나 설계도면을 작성하고 공사계약을 관리하는 감리단 직원들은 이 당시 브리티시 전력회사의 자회사였던 후버(Huber) 소유의 B. C. 엔지니어링에 소속된 직원들이었다. 처음에는 치카무스(Cheakamus) 댐 공사에 그리고 이제 다시 미션(Mission) 댐 공사에 테르자기가 올슨

(Olson)을 현장 검사원으로 배치한 특별한 배려를 이해하지 못하고 그는 테르자기의 독자적인 처사를 참지 못하고 적대적인 태도를 취하며 걸림돌이 되었다. 후버(Huber)는 설계 기술진과 공사 검사원들 사이에서 공사현장에 전통적으로 생기는 시기심을 조장하여 마침내 테르자기가 이를 참지 못하고 폭발하여 후버가 협력하지 않는다면 사임하겠다고 위협하기에 이르렀다. 그때 테르자기는 라젠비(Lazenby)에게 이런 편지를 썼다. "B. C.의 업무범위는 꾸준히 증가합니다만 조직의 정신과 전문가의 자문에 대한 이 회사의 태도는 여전히 경직되어 있고 광신적인 성향에는 변화가 전혀 없습니다. 따라서 주어진 책무와 이행한 성과의 괴리로 말미암아 심각한 결과가 야기되는 것은 시간문제이므로 나는 그 결과에 대해 책임을 져야 할 이 회사에 내 이름이 걸부되어 거론되기를 원치 않습니다."

그 편지는 미션(Mission)댐 공사에서 후버(Huber)에게 큰 타격을 주었고 테르자기는 더 나아가 한 친구에게 이렇게 말했다. "나는 후버(Huber)가 내세우는 협력이라는 개념을 좋아하지도 않았고, 그걸 숨기지도 않았다. 그 결과, 후버(Huber)는 공사 초기에 이란이나 이라크로 활동무대를 옮겨야 했다." 후버(Huber)가 떠나자 테르자기는 사적인 갈등이 끝났다고 생각하며 라크루와(Lacroix)에게 털어 놓았다. "상황을 처리해 나가는 데에 달리 점잖은 방법이 없다면 내가 짓고 다닐 것이라는 걸 그 회사 사람이 이제 모두 알고 있으니 나는 장차 어떤 사태가 발생할지 관심도 없다." 그러나 그는 잘못 생각했다. 공사 운영진과의 갈등이 계속되었고 작업이 끝나기 전에 테르자기는 두 차례 더 사임하겠다고 으름장을 놓았다. 그는 점점 늙고 쇠약해지고, 미션(Mission)댐은 바보들의 손아귀에서 벗어날 수 있어야 안전이 보장될 것이다.

카사그란데는 밀접한 관계를 가지고 테르자기와 일하면서 오랜 세월 함께 나눈 우정의 따뜻함을 느끼기 시작했고 다시 존경심을 갖게 되었다. 그는 "친애하는 카알"이라고 다정한 어투로 편지를 쓰고 작업에 관련된 일 이외에 다른 일도 그에게 털어 놓았다. 그들은 1950년대부터 1963년 초까지 미션(Mission)댐 공사뿐만 아니라, 남부 사스카체완(Saskatchewan) 강 댐 (가디너(Gardiner) 댐) 공사에서도 협력하였다. 공사의 복잡성을 이유로 가디너(Gardiner) 댐 공사에 테르자기를 참여시키도록 추천한 사람도 바로 카사그란데였다.

카사그란데는 1940년대 후반에 샤위니건(Shawinigan) 회사에게 우회댐에 관해 설계상의 조언을 한 적이 있었기 때문에 우회댐에서 발생한 문제로 인하여 심각하게 고민하였다. 테르자기가 우회댐의 하자과 결함을 분석한 기념비적인 연구보고서를 만들었을 때, 카사그란데는 그의 스승으로부터 위로의 말을 들으려고 애를 썼다. 테르자기는 그의 연구보고서에서 카사그란데가 댐의 제방정상부 고도에 1.5m의 침하에 대비한 허용오차를 두도록 건의한 일은 현명한 처사였다고 조심스럽게 지적했다. 테르자기는 카사그란데를 계속 신뢰하면서 기력이 쇠약해져서 더 이상 현장을 방문할 수 없게 된 후에는 카사그란데를 미션 댐의 수석 컨설턴트로 지명하여 직무를 계속 수행할 수 있도록 하였다.

무모한 공사를 안전하게 끝낼 수 있도록 이끈 것은 전적으로 테르자기의 철학이었다. 그는 아스완(Aswan) 댐 현장에서 테르자기의 감독 하에 대규모 그라우팅 시험을 수행했던 회사인 솔레탄체(Soletanche) 회사를 공사에 참여시켰다. 이 회사는 점토 단층 아래에 있는 투수성 퇴적층에서 흘러나오는 누수를 차단할 최신 기술의 그라우트 커튼을 암반층까지 만들 계획이었다 (우습게도, 정부는 그렇

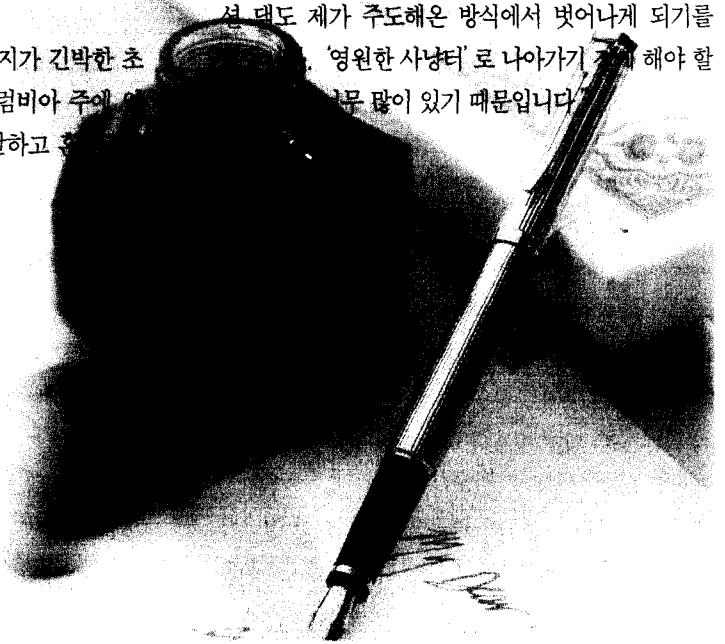
게 해서 절약된 물의 가격에 대하여 세금을 부과할 공리를 하고 있었다). 테르자기는 점토 블랭킹이 구간에 따라 2.4m까지 차이가 나는 침하현상으로 발생하는 응력의 영향을 받지 않게 하려고 PVC 플라스틱 필름을 사용하는 선구적인 방안을 제안하였다.

이 공사에서는 우회댐의 널말뚝의 성능을 개선하기 위한 방법으로 슬러리 트렌치 공법의 응용방법이 북미지역에서 최초로 개발되었다.⁸⁾ 테르자기는 댐이 누수되고 싱크홀이 형성된다 하더라도 신속하게 대처한다면 치명적인 정도로 발전하지는 않을 것이라고 가정하고 댐에 침하판, 경사계, 수압계측기, 관찰벽, 그리고 유량계 등 정밀한 측정장치를 설치하였다. 잔소리를 퍼부어 대며 진행과정에 대한 자료에 주목하고 문제점을 진단하여 적극적으로 대처할 수 있었다. 더구나 1960년에 처음 물을 채운 뒤 저수지의 물을 빼내어 검사와 수리를 하였다. (이러한 작업이 필요하다는 사실이 증명되었다).

1960년에 처음 물을 채운 뒤 저수지가 긴박한 초기 운영단계에 접어들자 브리티시컬럼비아 주에 있는 그 전력회사는 편협성이 절정에 달하고

운 지회계통으로 인하여 혼란기에 빠져들었다. 클리블랜드(Cleveland) 댐에서 발생했던 것과 마찬가지로, 미션(Mission) 댐이 완공된 후 지속적인 지출 전망에 대하여 B. C. 전기회사의 신입 이사회 회장 G. M. 슈림(Schrum) 박사는 의문을 제기하였다. 그는 설계회사가 표준규격을 일단 작성하기만 하면 그 이후에는 잊어버리고 지낼 수 있을 텐데 무슨 이유로 그렇게 하지 못했는지 이해하지 못했다. 테르자기는 이렇게 응수하였다. "슈림(Schrum) 박사는 전직 물리학부 학장이기 때문에, 토목공학에 대한 그의 태도는 놀라운 일이 아니다." 라젠비(Lazenby)에게는 이런 편지를 썼다. "미션(Mission) 댐의 약한 지점을 너무 잘 알고 있기 때문에, 댐에 설치한 관측장치가 전적으로 도움이 된다고 확신할 때까지는 댐에 대한 걱정이 내 곁에서 사라지지 않을 것입니다. 저에게 주어진 시간도 이제는 거의 다 되었으니 미션 댐도 제가 주도해온 방식에서 벗어나게 되기를

'영원한 사냥터'로 나아가기 위해 해야 할 일이 너무 많이 있기 때문입니다."



8) 이 방법에서는 벤토나이트 점토에 물을 섞어 슬러리로 만든 다음, 계속 연결된 트렌치에 붓는다. 작업이 트렌치 바닥에서 진행되는 동안, 높은 슬러리의 밀도로 인해 트렌치의 벽면이 지지된다.

2005년도 정기총회 및 봄학술발표회 · GEO EXPO

2005년도 정기총회 및 봄학술발표회를 아래와 같이 개최하오니 회원여러분께서는 사전등록 일정 및 논문진행 일정을 확인하시고 학회 참여에 지장이 없도록 미리 준비하시기 바랍니다. 또한 해마다 진행되는 GEO EXPO도 참가신청을 받고 있어오니 관련 업체의 많은 참여를 부탁드립니다.

◆ 일 시 : 2005년 3월 25일(금)~26일(토)

◆ 장 소 : 제주 국제 컨벤션센터 (중문)

◎ 학술발표회 등록 안내

1. 등록방법

- ◆ 학술발표회 홈페이지 접속(www.kgshome.or.kr) → 참가등록 신청 → 참가자 인적사항 입력(회원검색, 비회원 직접입력) → 리셉션 참가여부 체크 → 결제방법선택 → 최종입력현황확인 → 결제
- ◆ Off line에서 등록을 할 경우 등록 내용(참가자 인적사항)을 작성 하신 후 fax(02-3474-7379)로 보내주시고 회비는 입금하여 주시기 바랍니다.

2. 등록비 안내

▶ 학술발표회

구분	사전등록	현장등록
정회원	50,000원	80,000원
학생회원	30,000원	50,000원
비회원	80,000원	100,000원

▶ Banquet

Banquet (3/25(금))	사전등록	현장등록
	30,000원	40,000원

3. 논문 진행 일정

- ◆ 2004년 10월 1일(금) ~ 2004년 12월 31일(금) : 논문요지 및 논문전문 작성 및 제출
- ◆ 2005년 1월 1일(토) ~ 2005년 1월 31일(월) : 논문전문 심사 및 사전 등록 실시
(제출된 논문은 모두 발표 기획(구두 또는 포스터) 부여 - 심사를 통해 구두와 포스터 발표 선정 / 사전등록자에 한해 구두발표 기획 제공)
- ◆ 2005년 2월 1일(화) ~ 2005년 2월 28일(월) : 논문전문 수정보완 및 최종본 접수
- ◆ 2005년 3월 1일(화) ~ 2005년 3월 20일(일) : CD논문집 및 인쇄본(구두 및 포스터) 제작
- ◆ 2005년 3월 25일(금) ~ 2005년 3월 26일(토) : 정기총회 및 봄 학술발표회

◎ GEO EXPO 참가신청 안내

- ◆ 일 시 : 2005년 3월 25일(금)~26일(토)
- ◆ 장 소 : 제주 국제 컨벤션센터 (3층 로비)
- ◆ 참가신청 (입금순서 및 전시항목을 고려하여 배치)
 - ① 규격 : 3m×3m
 - ② 가격 : 800,000원 (1 Booth당)
 - ③ 신청기간 : 3월 5일까지 선착순 한정

◎ 입금계좌번호 : 국민은행 468037-01-005039(예금주 : 한국지반공학회)