

# 조립질 토목재료 강도평가를 위한 대형 일면전단시험기 개발

이대수<sup>\*1</sup>, 김경열<sup>\*2</sup>, 홍성연<sup>\*3</sup>

## 1. 배경

“조립질 토목재료”라 함은 쇄석 또는 자갈 등을 일컫는 말로써, 국내의 많은 건설현장에서 사용되고 있는 기본재료이기도 하다. 우선 본 재료들이 사용되고 있는 곳들을 대표적으로 살펴보면 국책사업의 일환인 댐, 항만시설, 원자력폐기물 저장소, 철도노반 및 도로 등을 들 수 있다.

하지만 이처럼 사용되고 있는 분야가 방대한 반면에 조립질 토목재료들의 특성 규명을 위한 시험절차 및 장치의 개발은 매우 미미한 실정이다. 국내에서는 설계에 필요한 조립재료의 물성값들을 시험에 의존하기 보다 외국에서 수행된 경험치들과 참고문헌에 의존하여 설계를 수행하고 있어 구조물의 안정성에 대한 정확한 판단을 하기가 어렵고 과대안전축의 설계가 이루어질 가능성이 많다. 반면 외국의 경우는 항만시설, 대형 댐 및 도로 성토 등과 같은 곳에 사용되는 조립질 토목재료는 반드시 특성시험을 실시하여 그 특성값들을 바탕으로 설계를 수행하고 있다.

한편, 조립재료는 다른 기반재료와는 공학적특성에 있어 많은 차이를 나타내는 것으로 나타나고 있는데, 모암의 종류, 입자의 크기(scale effect), 시료 밀도 및 다짐에너지에 따른 입자의 파쇄 등에 의해 실제 조립재료가 갖고 있는 것과는 많은 차이를 보인다. 조립재료를 포함하는 지반의 거동은 큰 입자의 영향에 의해 기존의 토질역학 이론으로는 그 특성을 설명하기 곤란하며, 기본적인 성질에 대한 자료가 부족한 경우가 많아 이에 대한 실험적 연구가 더욱더 필요한 실정이다. 더불어, 조립재료와 같은 큰 입자의 영향을 파악하기 위해서는 그에 맞는 대형시험이 필수적이라 하겠다.

이에, 한국전력공사 전력연구원과 (주)연엔지니어링은 조립질 토목재료들에 대한 강도특성을 규명하기 위해 국내 최대규모의 대형 일면전단시험기를 개발하였고, 본 지면을 통해 이 시험기의 특징, 시험절차 및 시험결과 등을 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 국내외 현황

조립질 토목재료에 대한 최초의 시험법은 1930

\*1 한국전력공사 전력연구원 구조연구실 책임연구원  
(dslee@kepri.re.kr)

\*2 한국전력공사 전력연구원 구조연구실 선임연구원

\*3 한국전력공사 전력연구원 구조연구실 일반연구원



년대에 독일에서 댐건설재료에 대한 시험을 위해 개발한 직접전단시험법이 최초이며, 1940~50년대에 들어 미국의 공병단과 개척국 및 독일의 일부 대학에서 조립 재료에 대한 특성 시험을 수행하기 시작하였다. 일본에서는 1960년에 일본의 Kansai 전력에서 댐 제체의 건설재료에 대해 시험을 실시하였으며 이후로 일본내 각 건설기관에서는 대형전단시험기외에 대형삼축압축시험기 등 여러 대의 시험장비를 이용하여 조립 재료에 대한 시험을 수행하였다. 특히, 1980년에 이르러 일본에서는 토질공학회 주관으로 “조립재료의 시험에 관한 연구위원회”를 조직하여 삼축압축시험과 일면전단시험 결과를 바탕으로 각종 시험요인의 영향과 시험상의 문제점 및 시험결과와 상호관계를 검토하여 조립재료의 공학적특성을 명확히 규명하고자 노력하였다. 이밖에도 영국, 호주, 이태리, 멕시코 및 태국 등 여러 국가에서 본 재료에 대해 많은 시험을 수행하고 있다.

표 1은 현재까지 조립재료의 변형특성 연구를 위

해 외국에서 보유하고 있는 대형전단시험기와 그 시험기를 이용하여 시험을 수행한 후 설계에 반영된 내용을 요약한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 조립질 재료가 안착되는 전단상자의 규모는 대략 1.13m에서 3.3m 까지 다양한 형태를 보이고 있으며, 전단상자의 길이와 높이의 비는 평균 2:1 정도로 나타나고 있다. 시료의 최대입경은 200mm 내외이나 실제 시험에 사용되는 입경은 약 60mm 정도의 골재가 가장 많이 사용되는 것으로 나타났다.

일본에서 보유하고 있는 전단상자의 크기는 주로 길이가 1.5m 급 이상의 대형시험기이며, 약 10여대 이상이 지금까지 운용되고 있는 실정이다.

한편, 국내에서 대형전단시험기를 이용하여 조립질 토목재료에 대한 특성시험을 수행한 실적은 한국수자원공사에서 수행한 남강댐, 용담댐, 밀양댐 및 임하댐 등과 같은 사력댐의 설계에서 활용한 것이 대부분이다. 아울러, 국내에서 보유중인 대형전단강도시험기는 한국수자원공사의 대형삼축압축시험기(공시체 크기  $\phi 30\text{cm} \times H60\text{cm}$ )와 (주)연엔지니어링의 대형전단시험기(전단상자  $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 0.6\text{m}$ ) 등이 유일한 대형시험장비이다.

표1. 외국의 대형전단시험기 제원

구분	전단상자 (m)	시료최대입경 (mm)	적용댐
일본	2.0×2.0×0.3	200	Kuzuryu
	2.5×2.5×0.6	200	Nikappu
	3.3×2.5×0.6	-	-
	2.0×2.5×0.55	200	Misakubo
	1.13×1.48×0.85	150	Terauch
	1.5×1.5×0.63	100	Arakawa
	1.5×1.5×0.3	-	Takase
	1.5×1.5×0.6	-	Shirakawa
미국	2.8×2.8×0.9	300	South-Holston
	1.8×1.8×0.9	180	Lewis Smith
	1.8×1.8×0.9	180	Jocassee
	1.2×1.2×0.8	200	Ramganga
	0.6×0.6×0.3	100	-
인도	0.5×0.5×0.15	50	-

### 3. 대형 일면전단시험기의 개발 및 특징

#### 3.1 제원

대형 일면전단시험기가 위치한 건물은 단층 철골 구조방식으로 신축되었으며, 내부 면적은 약 80평이다. 시험실 내부에는 시험기를 제어할 수 있는 계측실과 공구보관실이 위치하고 있으며, 시험실 외부에는 시료를 야적해 놓을 수 있는 야적장이 별도로

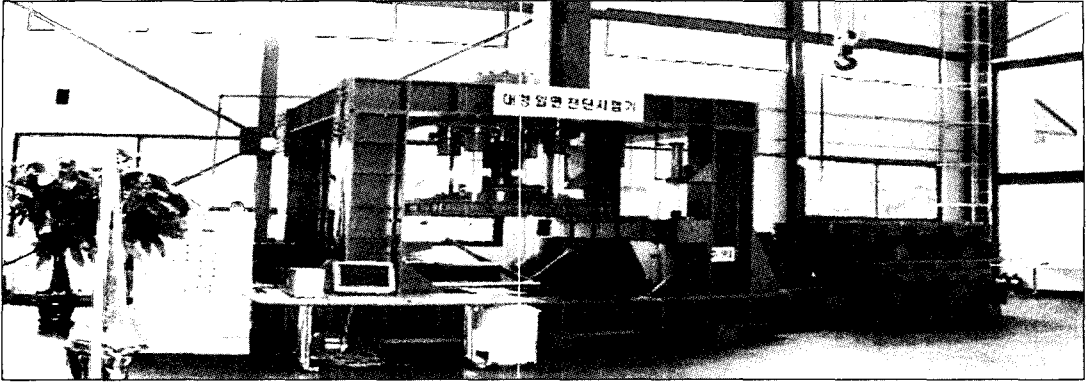


그림 1. 대형 일면전단시험기 전경

표 2. 대형 일면전단시험기 사양

시험 장치의 구조	전단 부의 구조	전단 상자	상부상자크기(cm)	150×150×30
		하부상자	하부상자크기(cm)	150×150×30
	수직 가압관	전단상자 사이 간격 (cm)	1.0	
		길이×폭×두께(cm)	148×148×31	
재하 부의 구조	수직력 재하	수직하중의 고정형상	고정	
	수평력 재하	이동상자와 구속방식	하부상자 수평이동	
수평이동에 대한 마찰저감 방식		하부 전단상자 하단 및 상·하부 전단상자 사이에 롤러베어링 설치		
계측 항목	수직방향	하중	로드셀 1점 (max 200ton)	
		변위	LVDT 3점 (max 300mm)	
	수평방향	하중	로드셀 1점 (max 300ton)	
		변위	LVDT 1점 (max 300mm)	

위치하고 있다(그림 1).

아울러, 본 시험기는 국내 자체 기술로 제작한 장비로 특수 설계된 구조프레임을 이용해 조립재료의 최대허용입경이 150mm 인 시료까지도 시험이 가

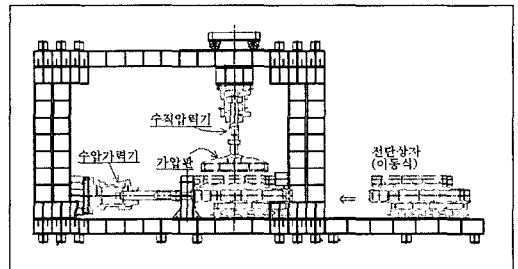
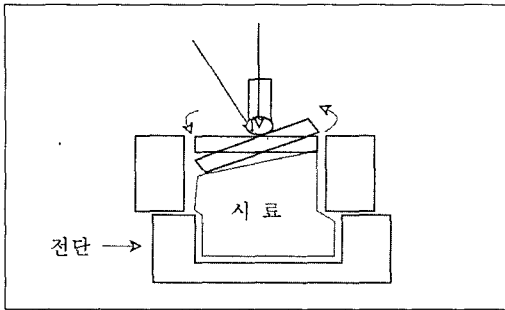
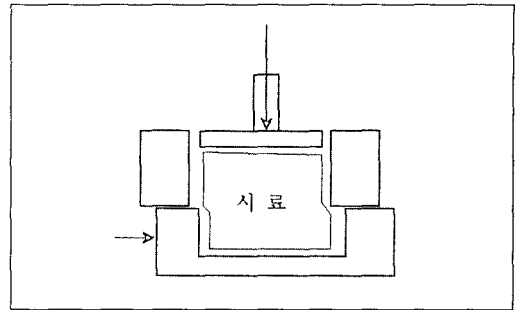


그림 2. 대형 일면전단시험기 단면도

능하도록 제작되었다. 본 시험기의 메인 프레임은 길이 8.5m, 높이 4.4m, 폭 2.8m의 크기로 직사각형 형태이다. 직접적으로 조립재료를 담아 전단을 시키게 되는 전단상자의 규모는 1.5m(W)×1.5m(W)×0.6m(H)로써 국내 최대규모이다. 시료에 가해지는 수평 및 수직하중은 유압 서보 방식을 채택하여 하중 제어의 정밀도를 높였으며, 수직 및 수평 최대하중은 각각 200ton과 300ton까지 가력이 가능하다. 시료의 변위를 측정할 수 있는 변위계는 총 4분으로 수평변위계 1개와 수직 변위계 3개이다. 이 변위계의 최소 측정변위량은 0.1mm이며, 최대 300mm까지 변위측정이 가능하다. 기기별 상세 사양은 다음과 같다(표 2).



(a) 가압판고정 안됨



(b) 가압판 고정

그림 3. 가압판 고정 유무

### 3.2 기존 전단시험기와의 차이점

현재까지도 국내에 널리 보급되어 있으며 한국산업규격 KS F2343 “압밀배수조건에서 흙의 직접전단시험방법”에 규정되어 있는 직접전단시험기는 ① 가압판이 가압기에 고정되어 있지 않기 때문에 전단중에 기울어지며 ②수직, 수평변위계는 각각 1개의 다이얼게이지를 이용하여 정확한 변위측정의 정밀도가 떨어지며 ③전단시 전단상자 내부에 발생하는 정(+) 또는 부(-)의 체적팽창이 상부에 작용하는 수직하중을 변화시키는 단점이 있다. 이번에 개발된 대형일면전단시험기는 이러한 단점을 보완하여 시험의 신뢰성을 높이고자 하였으며 그 상세별 특징은 다음과 같다.

#### (1) 가압기에 가압판 고정(정체적 시험 가능)

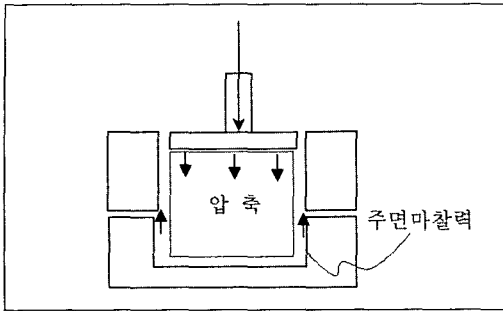
가압기에 가압판이 고정되지 않은 상태에서 수직하중을 재하하고 전단을 실시하게 되면 전단상자내의 시료는 체적팽창을 일으켜 가압판을 전단방향으로 밀어 올리게 된다(그림 3의 (a)) 이때 작용하는 수직하중은 편심으로 작용하게 되어 실제 재하하는 수직응력이 불균일하게 되어 오차가 발생하는 원인으로 작용한다. 이러한 문제점을 보완하고자 가압판을 가압기에 고정하여 가압판의 변형에 따른 수직하

중의 편심작용을 사전에 차단하도록 하여, 보다 정확한 수직하중을 재하할 있도록 하였다(그림 3의 (b)) 특히 본 시험기의 가압판은 임의로 구속 또는 비구속을 설정할 수 있어 시험조건에 따라 여러 가지 시험이 가능하다.

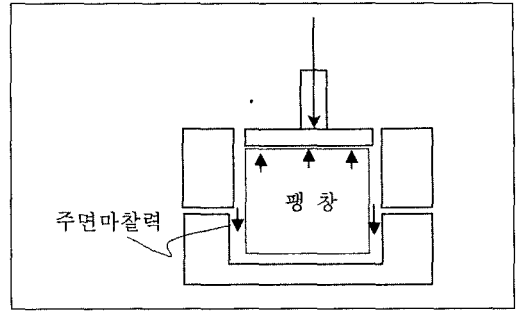
#### (2) 전자식 변위계(LVDT) 사용

기존의 변위계는 외부 노출고정형 다이얼게이지식으로 변위측정시 육안으로 눈금을 읽어 수기하는 방식이 일반적이다. 이러한 방식은 육안판측자에 따라 데이터의 오차가 매우 큰 단점이 있다. 그러나, 최근 들어 전자식 변위계가 급속히 발달함에 따라 기존의 다이얼게이지식 변위계는 전자식 변위계로 대체되고 있는 추세이며, 마찬가지로 본 시험기에서도 수직 및 수평변위계는 전자식 변위계를 채용하여 변위의 측정정확도를 높이고자 하였다. 설치 방식도 기존의 외부 노출 고정방식이 아닌 비노출 내부고정 방식을 채용하여 가력과 일체로 거동할 수 있도록 설계하였다. 이 방식은 변위계와 가압기가 일체형으로 움직이게 되므로 시험기의 제어에 있어 보다 더 정확한 변형률제어를 수행할 수 있는 장점이 있다.

#### (3) 자동 수직하중 유지(auto load servo) 기능 (정압시험 가능)



(a) 부(-)의 체적팽창



(b) 정(+))의 체적팽창

그림 4. 체적팽창과 주면마찰력의 영향

수직하중을 재하한 후 시료를 전단시키면 전단상자 내부에서는 정(+) 또는 부(-)의 체적팽창과 더불어 주면마찰력이 발생하게 된다(그림 4). 이것은 전단면의 수직응력을 증감시키는 원인으로 작용하기 때문에 시험결과 얻어지는 강도는 과대 또는 과소가 된다. 그림 4의 (a)에서 보는 바와 같이 부(-)의 체적팽창은 공시체가 압축하는 경우로써 수직하중과 반대방향으로 주면마찰력이 발생하여 전단면상의 수직력을 감소시키고, 정(+)의 체적팽창은 이와 반대 현상을 일으키게 된다. 이러한 단점을 보완하고자 본 시험기에서는 전단시에도 동일한 수직하중을 지속적으로 유지할 수 있는 기능을 삽입하여 체적팽창에 따른 수직하중의 변화를 최대한 억제토록 하였다.

### 3.3 시험절차

대형일면전단시험은 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 소형전단시험기와는 규모 및 재료특성 등에 있어 매우 다른 부분이 많기 때문에 대형 시험기 고유의 시험절차가 새로 수립되어야 한다. 더불어 대형 전단시험을 수행하기 위해서는 몇가지 선행 검토되어야 할 요건(재료적, 기계적 측면)들이 있는데,

그 내용은 다음과 같다. 더불어 대형 일면전단시험의 절차도를 그림 5에 나타내었다.

#### (1) 재료적인 측면

##### ① 시험 최대입경의 선택

직접전단시험이 가능한 시료의 최대입경은 전단상자 길이의 1/(14~15) 또는 전단상자 높이의 1/(5~6)의 값중 작은 값을 최대입경으로 선택한다.

##### ② 시험 입도 (곡률 및 균등계수)

시험에 사용되는 재료의 입도조제법으로는 상사 입도법과 전두입도법이 사용되고 있으며, 최근에는 입경가적곡선을 상사율만큼 평행이동하여 시험 입도를 구하는 상사입도법이 많이 사용되고 있다. 전두입도법은 시험이 가능한 최대입경보다 큰 입자는 골라내서 시험입도를 구하는 방법이다.

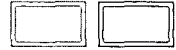
##### ③ 시험 밀도

밀도는 사용되는 재료의 강도에 직접적인 영향을 주는 인자이므로 시험전 요구되는 밀도에 맞는 시험 밀도의 선정이 중요하다.

#### (2) 기계적인 측면

##### ① 전단속도

시험에 사용되는 전단법은 주로 변형을 제어방식



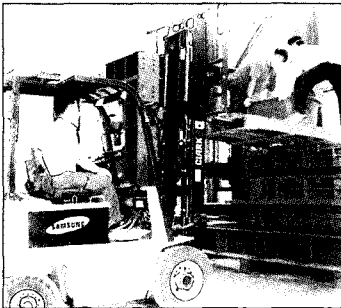
시료 준비



체 분석



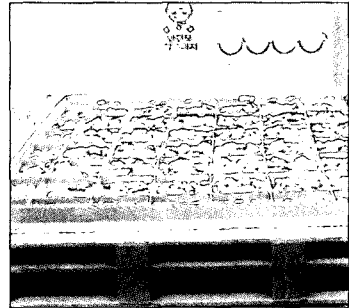
시료 조제



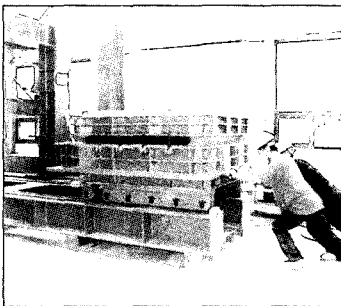
시료 넣기



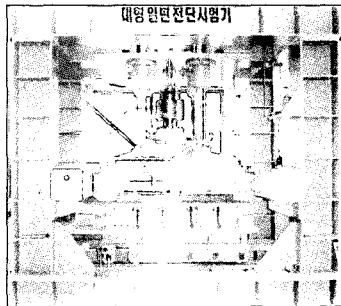
층별 다짐



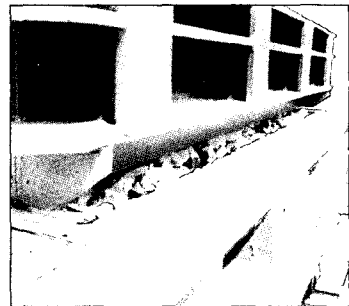
시료 제작 완료



전단상자 이동



하중재하 및 전단  
그림 5. 시험 절차



전단 완료

을 이용한 전단법이 주로 사용되고 있으며, 이때의 전단속도는 전단상자길이의(0.5~1%)/min로 설정한다.

② 수직하중 크기는 시험조건에 맞는 수직하중 또는 일률적 1, 3, 5 kg/cm<sup>2</sup>의 수직하중을 주어 시험한다.

③ 시험밀도 또는 최대, 최소 건조밀도를 구하기 위해서는 다짐장비와 방법의 선택이 중요하며, 시험 밀도는 전단상자를 3층으로 층을 나눈후 각 층별 밀도에 맞는 다짐에너지를 가해 밀도를 맞추는 방법이 이용되고 있다.

**(3) 대형일면전단시험과 관련한 시험절차**

그림 5는 대형일면전단시험과 관련한 시험절차를 간략하게 그림으로 나타낸 것이다.

- ① 시험대상이 되는 시료를 준비한다.
- ② 체분석(150, 106.6, 76.3, 50.8, 38.1, 25.4, 19.1, 9.52, 4.75, 2.0mm)을 실시해 입도분포별 시료를 분리한다.
- ③ 시험에 맞는 입도(균등계수)로 시료를 제조한다.
- ④ 전단상자에 3층으로 나누어 시료를 넣는다.
- ⑤ 충격식램머(자중 90kg)를 이용하여 층별 다짐을 실시한다.
- ⑥ 시료제작이 완료되면 전단상자를 시험위치로 이동시킨다.
- ⑦ 상부에 소요 수직하중을 가한다.
- ⑧ 소요 수직하중에 도달한 후, 일정시간이 지나면 전단하중을 가한다.
- ⑨ Peak강도 발생 후 전단변형률 20% 까지 추가 전단을 시킨다.
- ⑩ Peak강도가 없을시에는 전단변형률 15%를 peak강도로 본다.
- ⑪ 전단응력-전단변형률 곡선을 통해 전단강도를 산출한다.

**4. 시험 사례**

본 시험설비를 이용하여 충청남도 금산군 진산지역에서 생산하는 석산골재중 최대입경이 76.3mm 이하인 조립재료에 대한 시험결과를 소개한다. 우선 시험에 사용된 재료의 입경은 최소 2.0mm부터 최대 76.3mm이고, 균등계수는 약 5를 기준으로 재료의 입도분포를 조절하였다. 시험밀도는 1.85 g/cm<sup>3</sup>

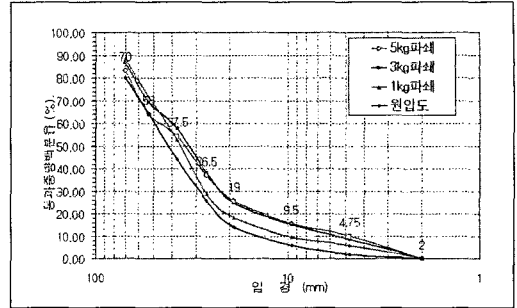


그림 6. 시험전, 후의 입도분포곡선

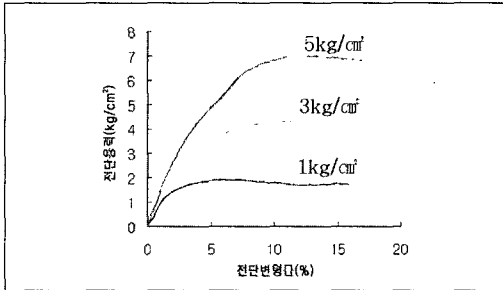
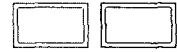
로 맞추어 시험을 실시하였으며, 수직하중은 1, 3, 5kg/cm<sup>2</sup>로 재하하였다. 시험에 사용한 전단속도는 전단상자 길이의 0.75%/min인 10mm/min으로 하였으며, 전단에 의한 입자의 파쇄정도를 확인하기 위해 체가름시험을 전단시험 전후로 수행하여 그림 6에 나타내었다.

그림 6에서 보는 바와 같이 재료의 파쇄율은 시험전의 원입도와 시험후의 입도곡선을 비교해 파악할 수 있으며, 수직하중이 증가함에 따라 파쇄율(11~15%)도 커지는 것으로 나타났다.

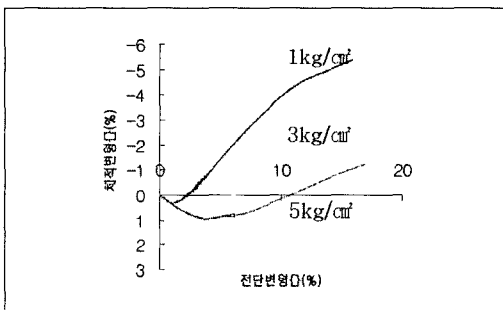
또한, 수직하중이 증가함에 따라 전단응력의 크기도 증가하며, 이때의 체적변형률은 이와는 반대의 현상이 나타난다. 즉, 전단변형률이 작은 영역에서는 체적수축이 일어나다가 전단변형률이 커짐에 따라 체적팽창이 발생하여 조밀한 모래와 유사한 거동을 보인다.

아울러, 충청지역 조립재료의 전단강도(shear strength)는 점착력이 0.6kg/cm<sup>2</sup>, 내부마찰각은 51.6°로 나타났다(그림 7).

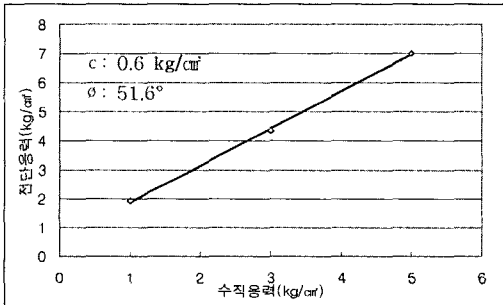
일본의 경우 구조물 설계를 위한 조립재료의 강도 정수의 산출이 여러 가지 여건상 불가능할 경우, 점착력은 0~0.2kg/cm<sup>2</sup>, 내부마찰각은 35~41° 정도의 값을 인용할 수 있다고 보고되고 있다(참고문헌 2, 3). 그러나, 금번 대형시험에서 산출된 전단강도



(a) 전단응력-전단변형률곡선



(b) 체적변형률-전단변형률 곡선



(c) 전단응력-수직응력 곡선

그림 7. 충청지역 석산골재 전단시험결과

는 종래의 문헌상의 값보다 20%이상 증가될 수 있는 여지를 보여주고 있다.

한편, 필댐설계시 조립재료의 내부마찰각은 동일한 안전율에서 5° 변화함에 따라 사면구배가 0.4만 큼씩 변화한다고 보고하고 있는데(그림 8, 참고문헌 4), 이는 조립재료의 강도정수가 구조물의 단면을

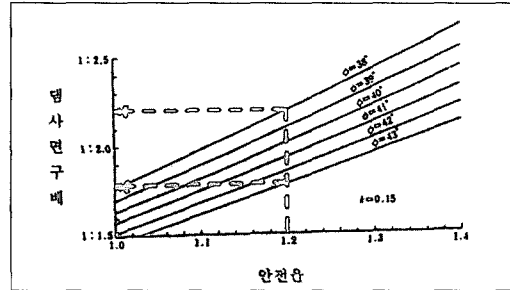


그림 8. 조립재료의 내부마찰각과 안전율과의 관계

결정하는 것파도 관계가 있음을 나타내는 말이다. 즉, 내부마찰각이 커지면 구조물의 단면은 축소되어 경제적인 설계가 가능하다 할 수 있다.

## 5. 향후 시험계획 및 활용

현재 한국전력공사 전력연구원에서는 전국을 5개 권역(경기, 충청, 강원, 호남, 경상 지역)으로 나누어 국내의 석산골재에 대한 강도특성시험을 수행중에 있으며, 산업부산물중의 하나인 재생골재에 대하여도 특성시험을 계획하고 있다. 향후 시험이 완료됨에 따라 도출될 내용들은 다음과 같다.

- (1) 조립재료의 파쇄율과 전단강도와의 관계 규명
- (2) 최대입경과 입도분포가 전단강도에 미치는 영향 규명
- (3) 입자의 흡수율과 파쇄율과의 상관관계 규명
- (4) 국내의 대표적인 조립재료의 전단강도 특성 규명

앞으로 본 시험이 완료되면 국내에서 생산되고 있는 석산골재에 대해 물리적, 공학적특성을 제시할 수 있는 DB가 확보되고, 대형 토목공사에 활용될 조립재료들에 대한 합리적인 강도특성을 산출할 수



## ●● 기술기사

있는 기틀이 마련되어 신뢰도 높은 설계를 수행하는데에 일익을 담당할 것으로 판단된다. 또한, 향후에 본 시험기에 대해 국제공인시험인증(KOLAS)자격을 획득하여 시험결과와 신뢰도를 한층 더 높일 계획이며, 본 시험장비가 국내의 산학연 모두에게 연구와 실무분야에 있어서 유익한 정보를 제공할 수 있기를 기원해 본다.

### 참고문헌

1. 日本土質工學會(1982), Rockfill의材料 試驗設計強度
2. 日本土質工學會(1985), 組立材料의 變形強度
3. 日本港灣技術研究所(1991), 港灣技術資料 No. 699
4. KOWACO(1999), Standardization of Large Scale Shear Tests for Rock Materials of a Rockfill Dam

## 회비 납부 안내 (지로 및 온라인)

학회 사무국에서는 연중 수시로 학회비를 수납하고 있사오니, 회원여러분의 적극적인 협조를 부탁드립니다. 문의사항이 있으면 사무국으로 연락하여 주시기 바랍니다.

### • 은행 무통장(타행) 입금

국민은행      계좌번호 : 534637-95-100979      예금주 : 한국지반공학회

### • 지로용지 납부

2003년 5월 20일부로 금융결제원에 승인을 받아 한국지반공학회 회비도 지로용지 납부를 할 수 있게 되었습니다.

### • 지로용지 기입시 유의점

- 지로 장표상의 금액과 납부자 관련정보(회원번호, 성명, 납입금 종류 등)는 흑색볼펜으로 글씨체는 정자로 표기해 주시기 바랍니다.
- 납부금액란에는 정확한 위치에 정자로 아라비아 숫자만 기입합니다.  
납부금액 앞뒤에 특정기호(W, -, \* 등)를 표시 할 수 없습니다.)

※ 지로용지를 못 받으신 분은 지반공학회 사무국(02-3474-4428/양윤희)으로 전화주세요

# Karl Terzaghi<sup>에</sup> 발자취



황선근\*

## 15. 미국에서 발 빠른 행보를 보이다. (1940년대 이후)



사진 1. Terzaghi at Harvard, Spring of 1940

방위산업에서 일할 수 있는 비밀 취급 허가를 받은 후, 테르자기는 1943년 3월 1일 미국 시민이 되었다. 그는 이 날을 생애 가운데 가장 행복한 날이라고 하였다. 그리고 3개월 뒤 그는 미국 여권을 손에 쥐었다.

Adolph Ackerman이 아주 열심히 노력하지 않았다면 이러한 일은 성사되지 않았을 것이다. 적재적소에 있는 친구들이 보낸 추천서들도 강력한 지원이 되었다. 추천서를 보낸 사람 가운데에는 비엔나에서 암울하던 시절에 사귀던 국무부의 John C. Wiley도 있었다. 이제 그는 자신의 풍부한 생활양식을 총동원하여 다방면에서 전속력을 내어 내달렸다. 논문과 책 쓰기, 기술 실무, 강연과 강의, 그리고 편지 쓰기, 대개 이러한 순서로 왕성하게 활동을 벌였다. 그는 학계에 전념하려는 생각은 없었다. 컨설팅 기술자로서 자신이 꿈꾸던 바로 그 일을 하고 있고, Bosphorus 운둔지에서 시작된 자신의 창작품이 이제는 한 세대의 기술진 전체를 움직이게 되었다는 생각을 하면서 엄청난 만족감을 느꼈다.

가정사는 모두 Ruth에게 맡겨졌다. 에릭(테르자기의 아들)의 별명은 “스퀴직스(Squeezix)”에서 “스키퍼(Skipper)”로 바뀌었고, 1941년 5월 그에게는 페기라는 어린 동생이 생겼다. 페기는 테르자기가 텍사스에서 강의하고 있는 동안 태어났다. 테르자기가 죽은 딱갈나무와 진달래가 무성한 윈체스터에서 집을 빌려 동지를 틀었는데, 그곳이 너무 마음에 들어 영원히 정착하기로 결심하였다. 그래서 1941년 미스틱(Mystic) 호수가에 있는 토지를 매입하고 건축계약을 맺었다. 그 결과, 식당으로 겸용하는 널찍한 거실이 있고, 바닥에는 무늬목이 깔리고, 남 몰래 미끄럼을



사진 2. Eric(Skipper) and Peggy Terzaghi, May 1946

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

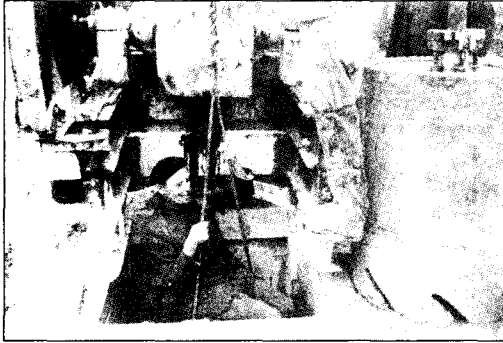


사진 3. Preparing to inspect an auger hole, February 1939

타고 싶은 충동을 불러일으키는 나선형 계단이 있고, 호수와 정원이 전면에 펼쳐지는 커다란 창문이 달린 현대식 주택이 완성되었다. 테르자기는 자녀들과 함께 놀이를 하고, 수영을 하고, 산보하면서 커다란 기쁨을 느꼈다. 집에 있는 동안에만 느낄 수 있는 기쁨이었다. 아이들이 좀 더 성장하자, 그는 아이들에게 보트를 만들어 주었다. 만족감이 최고조에 이른 시기였다. 가족은 완전히 안정감을 느끼고, 메인주 황무지에 있는 가족 휴양지에 통나무집을 지을 계획도 세우기 시작했다. 그곳의 가을 색상은 비엔나 숲이 상대적으로 빈약하게 보일 정도로 아름다웠다.

루드(Ruth)와 테르자기는 동료들과 학계 내방객들을 접대하고, 이따금 집에 묵게 하였다. 그러나 두 사람은 주로 전쟁 뉴스를 듣고, 전쟁 영화를 보면서, 다른 미국인 가족들처럼 처음에 느끼던 공포는 어느새 기대로 바뀌고, 마지막으로는 의기양양한 기분을 느꼈다. 테르자기의 충성심은 의심할 여지가 없었다. 미국은 이제 그의 고국이다. 전쟁의 전망이 암담하던 초기에는 프랑스가 너무 빨리 함락되어 충격을 받은 나머지, 뉴잉글랜드 지방도 곧 침략 당할지 모른다는 두려움이 생겼다. 그는 러시아가 6주일 내에 붕괴될 것이라고 예상했으나, 러시아가 기적적으로

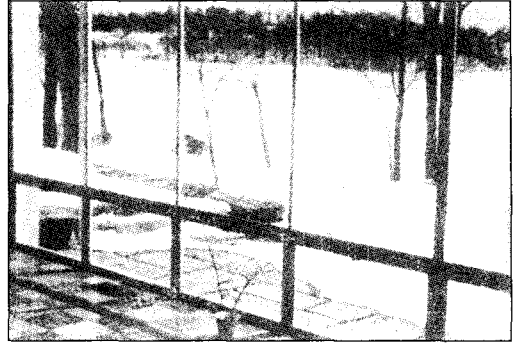


사진 4. The view over Mystic Lake from the Terzaghis' living room Winchester, Massachusetts

저항할 수 있다면 독일이 불운한 운명에 빠질 것이라고 생각했다. 미국 청년들이 아주 잘 싸울 능력이 있다는 것을 알고 그는 매우 놀랐다. 독일군이 패하자, 그는 조마조마한 마음으로 방송에 매달려, 독일 국민이 봉기하여 국민을 괴롭히는 정신병자들을 모두 제거할 것이라는 자신의 예견이 실현되기를 기다렸다.

테르자기는 루스벨트가 서거하였다는 소식을 듣고 충격을 받았으나, 적절한 시기에 그에게 죽음이 닥친 것이라고 판단하고 이렇게 기록을 남겼다. “루스벨트는 세계의 희망을 구현하였으며, 자신의 입지가 좁아지기 전에 죽었다.” 1945년 5월 유럽에서 전쟁이 끝났다는 기쁜 소식이 날아들었으나, 인류의 고통, 대량 학살, 파괴에 대한 수치심은 유럽에서 편지가 많이 도착하기 시작하자 더욱 더 강해졌다. 그는 자신의 저서 “응용지질학”이 불태워졌다는 소식을 들었고, 공동으로 저술했던 유대인 레드리쉬(Redlich) 교수가 강제수용소에서 석방되기를 기다리던 중에 사망했다는 소식도 들었다. 테르자기는 이러한 처사를 “도덕적 광기”이라고 불렀다.

나치 당원이던 하쓰(Hass) 교수에게 오스트리아의 정치 지도자 중 한 사람으로 옹립하는 것을 지지하는 글을 쓰면서, 테르자기는 다음과 같은 이유를

내세웠다. “하쓰(Hass)는 이상주의자로서, 독일과 오스트리아 국민들은 강력한 가부장적 중앙정부가 필요하다고 믿었고, 나치당은 이러한 정부를 그들에게 줄 수 있는 도구라고 생각했다. 그는 잔인성이 나치당을 지배하리라고 예측하지 못했고, 나치의 대외 정책이 중부 유럽의 독일인을 통일시키겠다고 공언한 목적을 벗어나리라고는 단 한 순간도 예측하지 못했다. 나치당의 극단적인 반유대주의 선전에 대한 그의 의견은 유대계 신사이자 오스트리아 전직 비엔나 관할 검사이던 호프라트 한스 바크스만(Hofrat Hans Wachsmann)에 대하여 깊은 존경심을 가지고 진정한 우정을 나누던 점을 보면 알 수 있다.” 아마도, 테르자기는 오랜 동료이자 친구인 그와 공감하였던 것 같다. 그 자신도 똑 같은 이데올로기의 탓에 빠질 유혹을 느꼈기 때문이었다.

테르자기는 원자탄 발표가 생애 가운데 가장 환상적인 사건이라고 생각했다. “독일이 만일 우리보다 앞섰다면, 암흑기가 다시 돌아왔을 것이다.” 그는 러시아에 대하여 우려를 나타내며, 친구인 폰 카르만(von Karman)에게 이렇게 털어 놓았다. “가장 큰 걱정거리는 러시아가 점령하는 지역에 살고 있는 사람들에게 대한 것이네. 러시아는 점령국가들 가운데 원하는 것이 무엇인지 정확하게 아는 유일한 나라기 때문에, 신속하고 무자비하게 행동할 수 있는 능력을 가지고 있어서, 어느 나라가 그 뒤를 쫓든지, 강력한 일당 독재체제를 확립하고 반대파가 될 가능성이 있는 사람은 말끔히 없애버릴 절세. 나는 소비에트 러시아가 이러한 목적을 달성할 수 있는 기술에 대한 완벽한 개념을 가지고 있는 것을 충분히 목격하였네.”

연구보고서와 책을 쓰느라고 장시간 씨름하는 동안 위층에 있는 테르자기의 서재는 담뱃진과 연기에 찌들었다. 토질역학과 기초공학에 관한 저서 첫째

권을 마쳐야 한다는 생각은 강박관념이 되었으며, 이제 필룽거(Fillunger)의 악몽과 나치 치하의 오스트리아에서 벗어났으니, 더 이상 변명거리도 없었다. 이 책을 완성한 후에는 응용토질역학, 암반 터널 공법, 그리고 토사 터널공법에 관한 책을 쓸 계획이었다.

토질역학과 기초공학에 관한 저서를 두 권으로 쓰라는 카사그란데의 건의를 받아들여, 테르자기는 토질역학의 이론적 개념을 첫째 권에 한정시키고, 두 번째 권에는 난해한 수학이 개입되지 않은 응용법만 신게 되기를 바랐다. 처음에는 학생들에게 맞는 수준으로 책을 쓰려고 하였으나, 알 커밍스(Al Cummings)와 펙이 초안을 각 장별로 검토해 주어도 수준을 맞추기가 어려웠다. 1943년 5월에 등장한 책, <이론적 토질역학(Theoretical Soil Mechanics)>는 참고문헌과 같은 측면도 있어서, 예전에 저술한 <토질역학(Erdbaumechanik)>이 연필로 대충 스케치한 것이라면, 이 책은 채 20년도 되기 전에 거의 완벽한 그림을 그려 색칠한 것이었다.

테르자기의 친구 슈미트(F. E. Schmitt)의 문체는 윤이 나뉘 유려해서 테르자기의 편지 문체가 따분하게 보일 정도였는데, 테르자기는 조지 버나드 쇼에 버금갈 정도로 자신을 비하하면서 그에게 이런 편지를 보냈다. “자네에게는 증정본을 보내지 않았네. 그 책이 별로 중요하거나 흥미롭지 못하다고 생각했기 때문일세. 그 책은 주로 내 머리 속에서 아직 소화시키지 못한 조각 지식을 꼬집어내기 위해서 나 자신을 위해서 쓴 것일세. 그런데 놀랍게도 그 책이 성공을 거두었네... 취미는 다양각색인 모양일세.” 그의 성공을 해석하는 데에 있어서 친구들은 그다지 너그럽지 않았다. 피츠휴(FitzHugh)는 테르자기가 수학 덧셈을 표시할 때 그리스 대문자 시그마( $\Sigma$ )를 이따금 쓰는 것을 지적하면서 이렇게 편지를 보냈

다. “나는 이 문자가 무엇을 의미하는지 기억하고 있습니다. 그러나 30년 이상 이 문자를 쓰지 않았기 때문에, 사는 동안 다른 일거리가 하도 많아서 이 동물을 다시 다룰 수는 없다고 결론 내렸습니다.”

〈이론 토질역학〉 서문에서 테르자기는 실제 토질의 속성과 실제로 응용할 때 나타나는 토질의 거동을 설명할 두 번째 권을 쓰지 않고서는 이 주제에 관한 저술은 완성된 것이 아니라고 말했다. “자연은 이론의 광범위한 응용을 방해하고 있네.” 그는 슈미트(Schmitt)에게 이렇게 말하면서 “진짜 중요한” 두 번째 권이 거의 곧 이어 나오게 될 것이라고 약속했다. 이 책의 첫 번째 초고인 〈토질역학 개론 (Introduction to Soil Mechanics)〉을 이미 후배 공동저자인 펙에게 보내어 “편집과 윤문”을 맡긴 상태였고, 등사판으로 만들어 그 당시 일리노이 대학에 개설된 해군 강좌에서 교과서로 사용하고 있었다.

테르자기가 “편집과 윤문”이라고 한 말은 펙이 어떠한 일에 협력하고 있는지 단적으로 보여주었다. 테르자기는 일부 내용은 공백으로 남겨 놓고 숫자도 거의 기입하지 않는 채 초고를 넘겨주었다. 펙은 공백부분과 누락된 내역을 채워 넣고, 사례를 추가로 집어넣고, 영어를 완벽하게 다듬었다. 나중에 그는 골치 아픈 지시사항을 한 가지 더 추가했다. “내 표현방식에서 너무 벗어나지 말게.”

불행스럽게도, 저술 계획 때문에 테르자기는 작업하는 진도에 맞추어 펙이 편집한 내용을 검토해 볼 여유가 없었다. 그래서 펙은 1943년 1월 20일 완성된 원고만 보냈다. 그는 이 원고를 완성해 놓고, 만족감과 성취감에 가득 부풀어 있었다. 그런데 역을

하게도 테르자기는 그 원고를 퇴짜 놓으면서, “성숙한 원고”가 아니고, 때때로 2류 시험 답안지 수준으로 떨어지는 “조잡한 초고”라고 답장을 보냈다. 테르자기는 시간이 더 걸리더라도 수준을 더 끌어 올리라고 지시하였다. 테르자기는 〈이론 토질역학〉을 쓸 때, 900쪽에 이르는 원고를 한 쪽을 완벽하게 쓰는 데에 평균 다섯 시간씩 소비했다고 주장했다.

이렇게 무자비하고 충격적인 대접을 받고 풀이 죽었지만, 펙은 내면적인 힘을 조금씩 되찾아 가며 계속했고, 테르자기는 그 후 좀 더 따스한 어조로 격려하였다. 편집과 수정 작업 과정이 질질 시간을 끌었고, 원고에 대한 두 사람 사이의 논쟁의 주제는 영어 용법에서 토질역학의 중대한 논점으로 옮겨 가면서, 이들은 진행 과정이 언어 때문에 지연되고 있는 것이 아니라, 토질역학의 미완성 상태에 대한 좌절감으로 인해 지연되고 있다는 점을 인식하기 시작했다. 테르자기는 이렇게 설명했다. “나로서는 책을 쓰는 과정은 일종의 정신적인 집안 청소이다. 내가 가지고 있는 작은 재고품을 모두 하나씩 점검해야 하는 작업이다. 그 중에는 가치 없고 버려야 할 것도 많이 있다.” 한 해 두 해 지나가면서 다시 쓰고, 다시 검토하고, 변경하는 과정이 질질 오래 끌자, 테르자기와 펙은 자신들이 만들어 놓은 관찰방법론에 갈혀 버린 죄수가 되었다.

1946년에 이르러서야 책이 거의 완성단계에 이르렀다. 그 책은 이제 단순히 토질역학 개론서가 아니라, 토질역학의 전례와 유익한 요소를 바탕으로 토질을 다루는 공학에 관한 요약서가 되었다. 책 제목은 〈기술 실무상의 토질역학 (Soil Mechanics in

1) 14년 후, 테르자기는 독자 중 많은 사람이 실무 기술자들이었다고 말했다. “대학 교수는 이러한 점을 외면하는 것 같다.” 그는 1962년 12월 17일 친구 글로소프(Glossop)에게 이렇게 편지를 썼다. “그 이유는 명확하다. 그들은 자신들이 알고 있는 것이 거의 없다는 사실을 광고하고 싶지 않은 것이다.” 메스리(Mesri) 교수를 공동 저자로 추가한 제3권이 1997년에 출판되었다.

2) 1944년 8월 10일자 일기 내용. 테르자기와 펙의 비판에도 불구하고, 테일러가 쓴 책 〈토질역학의 기본원리〉도 윌리 출판사에서 1948년에 출판되어, 그 분야의 큰 대들보가 되었고, 출판 측면이나 공학측면에서 모두 성공을 거두었다.

Engineering Practice))라고 붙였다. 1948년 마침내 이 책이 출판되어, 이내 토목공학 교육의 주요 기둥으로 확고한 자리를 잡았다.<sup>1)</sup>

두 저자는 이제 상호 신뢰하고 일체가 되어 대학 교육에 있어서 점차적으로 토질의 이론적이고 진수라고 생각하는 부분에 의기투합하였다. MIT. 공대의 도널드 테일러(Donald Taylor) 교수가 보낸 원고에 대한 비평문에서 꽤이 묘사하였듯이, “이론을 맹목적으로 적용하면 곤장 재앙을 만나게 된다. 이러한 자세 때문에 토질역학을 거의 파괴시킬 뻔했으나, 최근에 이르러서야 비로소 테르자기를 비롯한 소수의 사람들이 최선의 노력을 기울인 덕분에 올바른 길로 전진할 수 있게 되었다.” 테르자기는 불쌍한 친구 테일러(Taylor)에게 자신이 책임을 떠맡은 토질역학의 희생자가 되었다고 기술했다.<sup>2)</sup> 이러한 토질역학의 그 당시 추세로 인해 테르자기의 복음주의적 열성에 다시 불이 붙어, 응용지질학에 관한 책을 저술할 계획을 수립하였다. “응용지질학으로 산보를 떠나서 얻게 되는 실질적인 결과가 토질역학을 붙들고 했던 작업의 실질적인 결과에 비해 덜 비극적인 것이 되기를 바란다.” 그는 친구 슈미트(Schmitt)에게 편지를 쓰면서 이렇게 덧붙였다. “이 분야에서 인쇄되고 있는 저작물에 대해서 나도 일말의 책임이 있다는 것을 생각하면 얼굴이 붉어진다네.” 다른 사람에게는 이렇게 쓰기도 했다. “나는 응용지질학은 너무 이론적이어서 지반에 관한 실질적인 문제를 풀 수 없는 접근방식에 특효가 있는 필수적인 해독제라고 생각합니다.” 그러나 그는 응용지질학이 “과충류의 껍질처럼 매끌매끌하고 이상하게 정의를 내리기 어려운 주제라는 것을” 알게 되었다. 그의 책과 허버

드에서 가르친 강의 내용으로 인해서 공학의 실용범위는 풍부해졌고, 지질학자는 “신탁을 받은 예언자”가 아니라, 탐사현장에 대한 가설을 만들어 내고, 각기 다른 지층의 속성과 상태를 추론하는 자원이라는 인식을 확립하게 되었다. 적어도 터널공법에 관한 한, 이 임무를 시작하는 데에 편리한 수단이 1945년 1월 굴러들어 왔다. 그 수단이란 다름 아닌 커머셜 쉬어링 앤드 스탬핑(Commercial Shearing and Stamping) 회사의 부사장이자 총지배인 프록터(R. V. Proctor), 바로 그 사람이었다. 암석 터널과 흙 터널 공사 현장에 강철 지지대의 판매를 촉진시키려는 노력의 일환으로, 프록터와 그의 구조기술자 톰 화이트(Tom White)(라자러스(Lazarus)의 친척은 아님)는 강철 지지대의 지하공사 사용법에 관해서 책을 쓰고 있었다. 그들은 20년 이상 약 300개의 터널에 강철 세트를 판매한 경험이 있었으나, 응용지질학에 대해서는 완전히 백지였다. 프록터(Proctor)는 그 문제에 관해서 테르자기와 대화만 나눌 생각으로 찾아 왔으나, 두 시간이 지나자 배울 점이 훨씬 더 많다는 것을 알았다. 테르자기에 의하면, “우리는 둘 다 같은 나라에서 오랫동안 살았지만, 높은 벽을 사이에 두고 서로 반대편에 살았다는 느낌을 갖게 되었다.”

다음 날, 테르자기는 그들에게 관대한 제안을 했다. 그는 강철 지지대의 디자인과 터널 지질의 관계 가운데 주요부분을 개발하여 책으로 쓰기로 하였다. 거의 1세기를 거슬러 올라가 살펴보면, 터널에 관하여 다양한 서적과 논문이 있었지만, 각기 다른 유형의 지반의 상태에 따라 강철 지지대를 선정하고 사용하는 데에 관련해서는 체계적인 근거가 전혀 없었

3) 테르자기의 “터널 지질학 개론”이 들어 있는 프록터(Proctor)와 화이트(White) 공저 <강철 지지대를 이용한 암반 터널공사> 쉬어링 앤드 스탬핑(Shearing and Stamping) 회사 (1946년), 그리고 같은 공동 저자가 쓴 <강철 지지대를 이용한 흙 터널 공사> (지질 조사와 지반 하중에 관한 부분은 테르자기가 작성한 것이라는 주석이 붙어 있다).

# Karl Terzaghi의 발자취

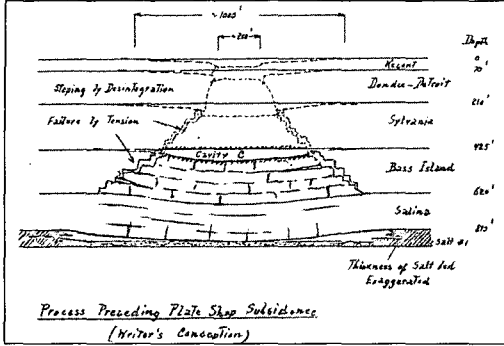


사진 5. Terzaghi's explanation of the subsurface mechanisms responsible for large settlements of the "Plate Shop" at the Wyandotte Salt Works. From "Confidential Memorandum concerning the subsidence of Brine Fields", to Wyandotte Chemical Corporation, by Karl Terzaghi, Dec. 30, 1950

다. 그는 이 주제에 관한 연구를 하게 되어 매우 기뻐했으며, 특히 그들이 자신을 기술 고문으로 대우하고 자신의 연구와 저술에 대하여 대가를 지불하기로 해서 매우 기분이 좋았다.

테르자기는 이 두 사람이 형편없는 저자라고 생각했으나, 화이트(White)는 "토질역학에 대하여 충분하고 직관적인 지식"을 가지고 있었으며, 프록터(Proctor)의 지각도 상당히 명확했다. 그는 사물에 대해 호기심이 있어서 훌륭한 관찰력이 있었다. "암석 지질학과 상호 연관된 터널공사 운영에 관하여 전체적인 그림을 제시하는 첫 번째 책이 혼돈 속에서 자라나는 듯 했다." 이 협력의 산물로서 강철 지지대를 사용한 암석 터널과 흙 터널 공사에 관한 책 두 권이 그 회사에서 발간되었다.<sup>3)</sup> 불행스럽게도, 테르자기 측의 잘못은 아니었지만, 흙 터널공사에 관

한 두 번째 책의 출판은 오랫동안 지연되었다가, 저자의 사후에 등장하였다.

암석 터널공사에 사용하는 강철 지지대를 선정하는 테르자기의 방식은 이 책에 제시된 내용과 같이, 자신의 직접적이고 논리적인 사고력에 대한 적절한 증거물이었다. 암석에 관한 일반론과 암석에 적용된다고 상상하는 복잡한 이론을 본문에 가득 집어넣지 않고, 그는 단순히 지하에서의 암석의 거동에 관한 가장 기본적인 질문에 대한 답을 구하였다. 지지대를 설치하지 않거나 지지대를 불완전하게 설치하면, 터널에 있는 암석에 어떤 일이 벌어질까? 이 책은 설계사를 위한 규칙과 절차뿐만 아니라, 부산물로 계속 사용 중인 터널 지반에 대한 현실적인 분류 방안을 제시하였고, 반세기 뒤에는 터널 부문이 아닌 다른 부문에도 확대 적용되었다. 그러나 응용지질학에 관한 책의 나머지 부분을 저술하는 일에는 그의 손이 미치지 못했다. 시카고와 클리블랜드에서 진행되는 업무를 수행할 때, 테르자기는 전쟁기간 동안 종종 펙과 함께 일했고, 1942년 펙이 일리노이 대학교 교수가 된 후부터 테르자기는 펙을 만나기 위해 어바나(Urbana)를 자주 방문하였다. 대학 측에서 테르자기의 방문객 신분을 유익한 방향으로 정리화 하려고 한 것은 당연한 일이었다. 1945년 4월, 토질역학에 관심을 가지고 있던 학과장 헌팅턴(W. C. Huntington)은 테르자기를 객원연구교수로 임명하도록 주선하였다. 연봉 1,500달러에 하루에 만나질씩 근무하는 연구조교를 2명 지원하는 조건이었다(각 조교는 테르자기의 지휘 아래 2년씩 근무하는 조건이었다). 테르자기는 그가 풍부하게 보유하고

4) 전쟁 기간 동안, 카사그란데는 스탠리 월슨을 데리고 와서 비행장 과정을 가르치도록 했다. 월슨은 전쟁이 끝난 후에도 하버드에서 하급 교수진에 머물렀다. 펙에 의하면, 카사그란데와 테르자기는 모두 그에게 상당히 의존하였다. 특히 현장 계측기 개발에 대한 의존도가 매우 높았다. 테르자기는 스탠리를 격려하여 경사계라고 알려진 아주 성공적인 경사측정기를 개발하였다. 이 계측기는 널말뚝의 경사도를 측정하기 위하여 체보타리오프가 개발한 장치를 개량한 것이었다.

있는 사례를 이용하여 토질과 지질학에 관련된 문제를 푸는 접근방식을 보여주면서 간헐적으로 강의를 하여 그 대학의 교육과정을 더욱 보강해 해 달라는 요청을 받게 되었다. 테르자기는 이 임명이 그 대학과 20년 동안 맺은 관계를 공식화하는 것에 불과하다고 생각했다. 그러나 카사그란데는 이를 질투하며 다른 시각에서 보았다.

카사그란데는 테르자기에 대해서 본래 독점욕을 느끼고 있었다. 어찌 되었든, 테르자기가 미국으로 다시 돌아오게 된 것은 주로 그의 노력 덕분이었기 때문이다. 게다가, 그는 정말 테르자기가 하버드에 있는 것이 필요했다. 단지 교수진을 보강하는 인물에 지나지 않는 것이 아니라, 응용토질역학과 응용지질학을 가르치기 위해 그가 필요했다. 테르자기가 없으면, 카사그란데는 거의 혼자 감당해야 했다.<sup>4)</sup> 1939년 체보타리오프(Tschebotarioff)가 테르자기의 프린스턴 강의를 전문과정으로 승격시켰을 때, 카사그란데는 그 러시아인이 테르자기와 하버드의 제휴관계를 피하기 위해 큰 고통을 감수한다고 투덜거렸다. 테르자기가 텍사스 대학에서 비정기 교수직에 임명되었을 때에는 별로 상심하지 않은 듯했으나, 일리노이 대학에 자리가 마련되자 공학자들이 테르자기가 하버드와 맺고 있는 관계를 무시한다고 격분했다.

카사그란데는 두 사람 사이의 협력관계가 약해지고 있다고 테르자기에게 불평하였다. 이번이 처음으로 불평하는 것은 아니었다. 1941년 테르자기는 카사그란데에게 이런 편지를 썼다. “두 사람이 차라리 서로 다른 행성이 사는 게 낫겠네. 각자 바쁘기도 하

지만, 우리는 서로 사고방식이 기본적으로 다른 것 같네. 자네 성격도 자네의 과학 활동 분야에 전반적으로 배어 있네. 자네는 보수적이고, 자네 의견은 확신으로 발전하는 경향이 있네. 내 생각은 20년 전이나 지금이나 매 한가지로 유동적인 상태고, 내가 가지고 있는 재고품 가운데 유일하게 영구적인 품목은 탐욕스러운 호기심뿐이네.” 테르자기는 지난날과 마찬가지로 최소한 관찰한 결과를 서로 주고받을 수 있도록 교류를 유지하기 바랐다.

로맨스 소설의 줄거리를 이끌어가는 고전적인 수법인 사랑의 삼각관계 같은 일이 전개되고 있었다. 카사그란데는 테르자기를 아버지처럼 사랑하였고, 문제와 사람을 떠나서 그와 꼭 붙어 있는 것을 좋아했고, 그의 독일식 억양과 고국에 대한 지식을 사랑했고, 그의 순수 음악, 예술, 그리고 문학에 대한 안목도 사랑했다. 카사그란데는 내성적인 성격이어서, 테르자기가 사람과 당국과 쉽게 사귀는 방식이 점차 많아 없어지기를 바랐는지도 모른다. 두 사람 사이에 긴장관계가 생긴 원인 중 하나는 한 때 카사그란데의 스승이자 고용주였다는 사실을 잊어버리지 않으려고 했던 테르자기의 태도였다. 이 긴장관계는 때때로 슬픈 유모에 접근하기도 하였다. 테르자기가 아직 법적으로 적국의 외국인이었을 때, 허가도 받지 않고 하버드에서 특별과정을 수강하는 군 장교 25명을 임의로 접대한 적이 있었다. 카사그란데는 이 당시 자신의 아내도 적국의 외국인으로 간주되었기 때문에 자신의 집에서 접대한다는 일은 불가능하다고 생각했던 일 이었다.<sup>5)</sup> (웨스트가드(Westergaard) 학장은 아내에게는 군사비밀을 말하지 말라고 군 장교들에

5) 전쟁 기간 동안 약 100개의 공군기지 부대가 창설되었고, 각 부대마다 토목 기술장교가 한 명씩 배치되었다. 이 장교들을 훈련하기 위해 카사그란데는 하버드 대학에서 7주 과정을 운영하여 전쟁에 크게 기여하였다. (1996년 4월 5일 랄프 파덤(Ralph Fadum) 교수와의 면담 내용) 어떤 사람들은 카사그란데가 구축한 독일군의 노르웨이 잠수함 기지를 공격할지도 모를 폭격기를 배치할 공군기지 건설에 카사그란데가 관련되었다는 사실이 아이러니라고 말한다.



# Karl Terzaghi

## 의 발자취

게 알리기만 하면 된다고 카사그란데에게 말했다) 카사그란데는 이때에, 테르자기에게 그 규칙을 알려 주었다. 두 사람은 언제나 친구지만, 근본적으로 성격이 서로 달랐기 때문에 갈등이 다시 고개를 들곤 했다.

한편, 펙은 술 대신 레모네이드를 마시고 가족이 식탁에 모여 기도 드리는 중서부지방의 경건한 가정에서 성장한 탓인지 상당히 달랐다. 정직하고, 친절하고, 처음에는 다소 융통성이 없어 보였던 것 같다. 테르자기는 펙에 대해서 슈미트(Schmitt)에게 이렇게 묘사했다. “뻗뻗한 셔츠 깃을 곧추 세우고, 계란에 구멍을 뚫었다고 간단히 말하면 될 일을 주목하고 있는 청중에게 계란의 정점에 개구부를 만들었다고 설명하는 사람을 연상하면 되네. 그래도 그는 내가 지금까지 거두어들인 제자 가운데 제일 훌륭한 제자이네. 적어도 그는 내가 하는 말에 귀를 기울이고, 배우고, 다시 생각하려는 의지를 보여주고 있지.”

명문이 된 하버드의 토질공학 연구진에 매년마다 입학하는 대학원생들은 카사그란데와 테르자기 사이에 거리가 벌어지고 있는 것을 알지 못했다. 테르자기는 학기별로 강의를 맡는 일 이상 교수진에 깊이 참여한 적이 없지만, 잘 짜여진 하버드 교과과정은 두 교수가 서로 밀착하여 보여주는 멋진 쇼라고 인정받았다. 테르자기의 하버드 대학 강의에는 수강생도 많았고, 하버드 공학부 학생뿐만 아니라 MIT 학생에게도 많은 영향을 주었다. 그가 주력하는 일은 컨설팅 엔지니어였지만, 1940년대에 이어 1950년대에도 학계에서는 테르자기를 교수로 대우하며 경의를 표했다. 1946년, 테르자기의 요청에 따라 하버드 대학은 그의 직함을 토목공학실무교수라고 변경했다. 이러한 직함으로 그가 빈번히, 때로는 학기 내내 자리를 비워도 그 사유가 정당화되었다. 반면, 카사그란데는 꾸준히 자리를 지키고, 행정업무를 처

리하는 한편, 명쾌하고, 완벽하고 열성적인 강의를 하여 충성스런 제자들을 거두어 들였다.

테르자기는 계속 1년에 두 번씩 일리노이를 불쑥 방문하여, 90분짜리 강연을 연거푸 세 차례씩 하며 정력을 과시하였다. 그는 대규모 청중에게 풍부한 사례를 제시하고 때로는 핵심을 전달하기 위하여 장난기 어린 수단도 동원해서 청중을 멋지게 사로잡는 연사였다. 이 기간 동안, 시카고 지하철공사, 노르만 디호 인양작업, 자선병원공사, 그리고 철광석 야적장 공사 이외에도, 토목공학 분야의 탐정과 설계자로서 테르자기의 기술이 필요한 작업이 늘어나고 있었다. 그는 하트포드(Hartford)에서 붕괴된 제방 재건공사를 돕고, 멕시코에서는 예전에 붕괴된 준설도둑(hydraulic fill dam)을 세웠다. 그는 슈퍼리어(Superior) 호수 주위에 부분적으로 조성한 기초지반이 활동을 일으켜 붕괴될 것이라는 점을 정확하게 예견했다. 그는 뉴욕에 있는 한 고등학교에서 발생한 침하현상과 미시건에 있는 소금광산 지표면에서 발생한 함몰현상에 대한 원인을 규명하기도 했다. 알래스카에서는 공군기지 지반공사를 위하여 동토의 물리적 특성을 연구하기도 하고, 스웨덴에서는 점토층에 공군기지 부지를 마련하는 일에 반대하였다. 그는 퀘벡 주의 점토층 활동, 멕시코 점토층의 대규모 침하현상, 캘리포니아 롱비치의 지속적인 함몰(subsidence)에 대한 조사와 처음으로 인연을 맺기도 했다. 또한 브리티시컬럼비아 주, 프랑스, 인도, 이집트, 북 아프리카, 브라질 등지에서 새로운 프로젝트를 시작하였다.

1941년 7월 하트포드(Hartford)에서는 오래된 제방과 나란히 제방을 새로 축조한 곳에서 바깥 쪽 제방이 갑자기 18미터 이상 밀려나면서 바로 뒤에 있는 매립성토가 연달아 밀려나 두 제방 사이에 움푹 파인 곳을 수압으로 흘러보낸 모래를 채워 고속

도로용 둑을 건설하였다. 채워진 모래층은 호상점토층(빙하기 호수에 실트층과 점토층이 겹겹이 쌓인 지층) 바로 위에 있는 모래와 실트 지층 위에 형성되었다. 공병대의 시험공 자료를 이용하여, 테르자기는 산사태 발생 이후의 지질을 보여주고 표층 단면을 해석하였으며, 붕괴 진행과정을 시기별 공간별로 연역하였다. 그는 활동이 호상점토층에서 시작되었고, 경미한 움직임이 발생한 후, 실트와 모래층을 관통하는 하수관의 연결부위 위에서 파이핑 현상이 시작되었다는 점을 입증하였다. 시간이 경과함에 따라 공동이 형성되고, 공동이 결국 붕괴하여 호상점토층에 갑자기 대규모 운동이 발생한 것이다.

점토 덩어리는 대부분 이러한 변형에 영향을 거의 받는다. 그래서 공병대는 단순한 안정성 분석결과를 토대로 하여 제방을 복구하라고 제안하였다. 그러나 테르자기는 공병대가 실제 붕괴 과정이 암시하는 점을 간과하였기 때문에, 제방은 공병대가 단언한 정도로 그렇게 안전하지 않다는 사실을 보여 주었다. 마침내 그가 요구한 대로 중대한 간극압을 측정할 결과를 참고하면서 관찰법을 채택하여 제방을 천천히 수리하였다.

하트포드(Hartford) 제방이 붕괴된 후, 활동이 발생한 지역 후면에 인접한 콜트(Colt) 무기공장에 균열이 생기기 시작했다. 테르자기는 균열의 형태로 보아 활동과 관련성이 있다고 설명할 수 있다고는 생각하지 않았다. 균열을 일으킨 주요 원인은 지하수가 높은 수위를 유지하는 동안 다른 하수관 연결부위에서 누수로 인한 파이핑 현상이 발생하여 바닥 아래에 있는 공동이 붕괴된 때문일 것이라고 생각했다. 피해를 입은 바닥 아래에 시험공을 48개 뚫어본 결과, 그의 생각이 절대적으로 옳았다고 입증되었다.

기술적인 결론을 끄집어내기 전에 적절한 지질학적 상황을 한데 종합하는 테르자기의 솜씨는 뉴욕

시, 브롱크스 지역에 있는 태프트(Taft) 고등학교에서 1946년에 수행한 작업에서도 발휘되었다. 신축한 건물이 심하게 침하되어, 시당국은 레이먼드(Raymond) 회사가 시공한 말뚝이 지정된 지반층, 즉 모래와 자갈로 이루어진 단층에 제대로 닿지 않았다고 주장하였다. 테르자기는 말뚝의 한계항타조건(Refusal)이 엄청나게 다양하고, 말뚝 집단을 각기 다른 “한계항타조건”에 따라 더 작은 단위로 다시 분류할 수 있다고 말했다. 또한, 시간 대비 침하 면적은 전형적인 형태로 나타나 테르자기는 전적으로 점토의 압밀현상과 관련이 있는 것으로 결론을 내려야 했다. 말뚝 대부분이 모래와 자갈로 된 지지층에 대부분 설계대로 박혔지만, 말뚝 끝부분 아래에 있는 점토층에 빈 공간이 일부 있다고 그 이유를 설명하였다.

지질사학자의 상상력을 동원하여, 테르자기는 수정한 지층 단면도를 설명하기 위하여 빙하의 진퇴, 해수의 유입과 후퇴 등 일련의 과정을 재구성하였다. 그 자료를 가지고 고등학교 건물의 침하 부분에 있는 지반은 정확히 고대에 기반암 계곡을 채우던 수면의 가장자리 부분 위에 놓여 있다는 점을 보여 주었다. 그는 자신이 상상 속에서 그려낸 이 수수께끼의 주변을 감싸던 바다 절벽이 폭풍우에 깎이고, 80년 전에 어떻게 댐이 형성되어 호수의 인근 단층에 모래와 거친 입자의 침전물이 운반된 과정을 설명하였다. 더 오랫동안 존재했던 브롱크스 호수의 연안을 따라 형성된 모래와 자갈층도 이와 비슷한 과정을 거쳐 호수 바닥으로 씻겨 내려갔다. 그래서 공식적인 지층 단면도에는 그 지역이 모래와 자갈이 균일하게 깔리고 급격히 변하는 경계를 가진 단층으로 표시되어 있지만, 측면적으로나 수직적으로 아주 복잡하게 변화된 자갈과 점토로 되어 있고, 빈 공간과 켜기 모양의 지층이 있는 것으로 바꾸어야 한다.

# Karl Terzaghi

의

## 발자취

그 건물 신축공사에서 입수된 자료로 이러한 주장이 옳다는 것이 증명되었다. 저명한 빙하기 지질학자 리처드 포스터 플린트(Richard Forster Flint)는 테르자기의 연구보고서를 읽으면서 존경심을 느꼈다고 테르자기의 지질학적 추론에 관한 비평에 썼다. 테르자기는 레이먼드(Raymond)를 대변하여 설계 기술자들이 정확한 조사방법도 없이 지질에 관하여 단순히 추측만 하였다고 증언하였다. 이들의 잘못으로 말미암아 부적절한 설계와 규격이 만들어지게 된 것이다. 배심원은 30분 간 심의한 결과 만장일치로 테르자기의 주장을 옹호하였다.

1943년 테르자기는 루드와 함께 멕시코에 가서, 준설토(hydraulic fill)로 건설된 오래된 댐의 안전도를 평가하였다. 60미터 높이의 제방은 1909년 공사가 90% 완료되었을 때 전체적으로 붕괴되었다. 그 후 수리를 하여 전력 생산을 위해 지속적으로 사용해왔다. 문제는 전력회사가 이 저수지에 계속 의존해도 좋은가 하는 점이었다. 활동이 발생한 이유를 해독하는 일은 부분적으로 지질학에 속하는 문제였다. 성토재는 각기 다른 두 가지 종류의 채석장에서 가져 온 것인데, 그 중 이송장치를 통해 제방의 최종 위치로 이동한 한 종류의 성토재만이 점토층을 치환할 만큼 조밀하였다. 테르자기는 붕괴로 말미암아 활동의 원인이 되었던 연약한 물질이 모두 댐에서 제거되었다는 점을 보여줄 수 있었다. 그는 댐은 안전하고 만족스러운 상태라고 결론을 내었으며 댐 소유회사에게 댐의 높이를 3미터 더 올릴 수 있는 방법도 알려 주었다. 이 방법에 따라 그 후 댐은 성공적으로 증축되었다.

멕시코로 가기 위한 여권과 비자를 받는 일이 지연되었기 때문에, 테르자기는 자신이 그곳으로 여행할 수 있을 때까지 멕시코인을 보조원으로 네카하 현장에 배치하기로 결정했다. 도슨(Dawson) 교수

가 텍사스 대학에서 테르자기의 강의를 수강한 적이 있다는 학생 한 명을 추천하려고 애썼으나, 테르자기는 그를 기억할 수 없어서 좀 더 상세한 정보를 추가로 달라고 요청하면서 이렇게 썼다. “만일 그 학생이 내가 말을 일 가운데 한 가지 작업을 위해서 작년에 채용했던 대학 교육을 받은 보조원 가운데 한 사람처럼 멍청하고, 비실용적이고 전혀 도움이 안 된다면, 멕시코 보건당국과 대립하게 될 것입니다. 맨손으로 그 녀석을 죽여서 네카하 수원지에 시체를 던져 버릴 테니까요.” 여기서 언급한 “대학 교육을 받은 보조원”이라는 말은 테르자기를 화나게 만들었던 용어임에 틀림이 없다. 일년 뒤에 그는 자신의 크로아티아 시절을 빈정거릴 때나 쓰던 식으로 계속 비꼬아서, “그가 받은 교육은 자연이 그에게 준 상식을 모조리 뿌리째 뽑아 없애버렸다”고 썼다. 그 학생은 해고된 후, 그의 모교에서 토질역할 강사를 맡아 달라는 제의를 받았다. 그는 이미 이론적인 지식과 실무 경험을 겸비하였기 때문이었다. 오래지 않아서 그가 “기초 연구” 분야를 공략할 것이라는 점은 의심할 나위가 없을 것이다.

네카하(Necaxa) 공사로 인하여 테르자기는 멕시코에 알려졌으나, 멕시코 시의 문제를 그가 보게 된 계기는 1943년 말경 정련소 건설예정지에 대한 지반 연구였다. 현재 이 거대한 도시가 들어서 있는 위치에서 아즈텍 부족은 16세기 초 스페인 사람들이 그 호수의 물을 뺏다가 다시 채울 때까지 호수 안에 있는 한 섬에서 살았다. 지표 아래로 뚫은 시험공은 두께가 300미터 이상 되는 몬모릴로나이트(Montmorillonite) 점토층을 관통하였다. 이 점토층은 화산지대에서 흔히 볼 수 있는 종류의 점토로서, 그 분자구조는 막대한 양의 물을 빨아 들여 부드러워질 수 있는 속성을 가진 것이었다. 멕시코 시 지하에는 지역적으로 이 토질층에 점토의 광물질 부피보

다 10배 이상의 수분이 들어 있다. 모래층은 지표 아래 100 미터 깊이에서 존재하였는데, 이 모래층으로 말미암아 연약한 점토에서 물이 배출될 수 있게 되어, 점토층이 압밀하고 그 결과 땅이 꺼지고 있었던 것이다. 그러나 지반 아래에서 있는 과도한 간극압력이 없어진 후에도, 침하현상은 이른바 “이차 압밀 현상”이라고 알려진 현상을 보이며 다소 일정한 비율로 지속되고 있었다.

멕시코 시 건물의 침하도는 20세기에 들어서면서 하수도가 건설되자 증가하였고, 우물을 통해서 모래층에서 발생하는 피압수압이 빠지자 더욱 급상승하였다. 건물만 주저 않는 것이 아니라, 함몰현상으로 인하여 하수도시설의 경사가 줄어들어 더 이상 단순한 중력만 가지고서는 더 이상 작동 할 수 없는 지경에 이르렀다. 다른 도시에서는 기초를 깊이 파서 대형 건물의 유효하중을 줄일 수 있고, 이러한 방법으로 침하현상을 극소화할 수 있다. 테르자기는 자신의 고객에게 멕시코 시에서는 이러한 효과를 쉽게 달성할 수 없을 것이라고 지적했다. 지하를 파는 동안 기초가 최고 1미터씩 올라가고, 지하층 벽에서 지하층 바닥 중심부까지 손상의 차이가 생겨 피해를 초래할 수 있기 때문이었다. 하중을 올려놓아도 비슷한 비율로 침하될 것이다.

테르자기는 오페라 극장인 팔라치오 데 벨레스 아르테스(Palacio de Belles Artes)와 관련된 건설팅 요청을 받았다. 그 극장은 1900년부터 1925년 사이에 건축된 건물이었다. 건물 부지는 지반에 콘크리트를 부어 넣을 때 8센티미터 침하하였고, 건축기간 동안 강철 기둥이 추가로 침하되어 기둥을 잵으로 밀어 올려야 했다. 건축회사는 1910년과 1920년 사

이에 그라우팅 공법으로 침하를 중지시키려고 노력했으나 허사였다. 테르자기는 침하를 중지시킬 수 있는 유일한 방법은 언더피닝 공법으로 건물의 하중을 기초 깊숙이 이동시키는 것이라고 조언했다. 그는 1944년에 작성한 연구보고서에 이 공법을 사용하기 위한 계획을 수립하는 방법을 기술하면서 이러한 경고를 하였다. “제안하는 바와 같이 사전 조사를 하지 않고 침하를 중단시키려고 시도하는 것은 무책임한 도박이 될 뿐이다 나는 이런 종류의 도박을 많이 목격하였기 때문에, 개인적인 경험에 비추어 볼 때 불충분한 사전 조사로 인하여 얻게 되는 절약효과는 재정적인 위험 부담과 전혀 균형이 맞지 않는다고 말할 수 있다.” 6년 후, 그는 언더피닝 작업을 지도하기 위해 그곳에 돌아왔다. 지역적인 지하수 저하로 인하여 그 당시 문제는 더욱 악화되어 건물은 심각한 뒤틀림 상태에 직면하고 있었다. 이러한 원인으로 발생한 지역적 함몰현상은 땅에 균열을 일으켰으며 크랙과 교차하는 건물을 모두 파괴하였다. 그는 이 문제에 대하여 건물 주인들이 지역적인 공략방안을 수립해야 할 때라고 주장하였다.

그가 멕시코에서 겪은 경험 가운데 가장 심각한 기초공사 실패작은 아마도 에스쿠엘라 노르말(Escuela Normal)에서 발생한 것이 될 것이다. 그 학교의 높은 중앙탑은 30미터 깊이로 박은 선단지지 말뚝 위에 세우고, 다른 건축물은 표층(부력) 기초 또는 천층의 마찰말뚝 위에 세워져 있었다. 또한, 인장지대(tension zone)가 강당을 관통하고 있었다. 에스쿠엘라 노르말(Escuela Normal) 학교를 건축한 지 2년 안에 부동침하현상이 아주 심해서 구조물이 거의 붕괴 직전이 되어 모두 대피해야 할 형편이

6) 1941년 2월 19일자 테르자기에게 보낸 카사그란데의 편지. <토질역학>에 기술된 테르자기의 이론에 따라, 카사그란데는 <보스턴 토목공학자학회>에 게재된 그의 1932년 논문에서 해수에 퇴적된 실트와 점토 침전물의 느슨한 “봉소구조”의 형성에 관하여 논하였다.

었다.

특이하면서 유해한 작용을 하는 점토층에 의한 지역적인 문제는 멕시코에서만 국한해서 발생하는 일이 아니다. 취성의 상태에서 거의 액체에 가까운 연경도의 상태로 갑자기 연약해 지는 점토는 대서양 양안의 북부 연안에 있는 만과 강어귀는 물론 다른 지역을 채우고 있다. 예를 들어, 노르웨이, 스웨덴, 그리고 퀘벡 주에서는 연약화현상의 일부로 단단한 흙이 갑자기 액체상태로 변하여 농장 전체가 떠내려가는 엄청난 흐름 활동이 발생한 적이 있다. 1941년에 이미 카사그란데는 보스턴 청점토(blue clay)가 매우 취성의 성질을 가졌으나 때로는 잘못 다루어지면 갑자기 액체의 연경도 상태로 변하게 된다는 것을 테르자기에게 보여주었다. 그는 이러한 특성이 염수에서의 초기 퇴적물에 기인한다고 하였다.<sup>7)</sup>

테르자기가 매우 예민한 퀘벡 점토층과 처음으로 접하게 된 것은 세인트 로렌스 강물을 보아르노아(Beauharnois) 부근에 있는 발전소로 끌어 들이는 제방시설의 안전도를 검토할 때였다. 제방을 6미터 높이로 쌓은 운하의 거의 모든 부분에서 균열이 관측되었고, 수 미터씩 이동 후 갑자기 붕괴가 발생하였다. 붕괴된 후에는 일부의 재료는 제방의 선단부에서 파형을 형성하면서 수면 위까지 상승하였으며 측방으로 45미터 이상 되는 거리를 유동하였다. 일단 시작된 측방유동은 불교란 지대까지 도달하였다. 테르자기는 <토질역학> 저서에서 이 물질을 거의 설명할 수 있는 경지에 도달하기는 했지만, 솔직히 이해하지 못했다. 해양 점토층에 나타나는 극단적으로 예민한 특징은 곧 일리노이 대학과 하버드 대학에서

연구과제로 채택되었다.<sup>7)</sup>

거대한 침하현상과 지표 붕괴현상의 문제를 해결하는 것은 업계 실무에 관여하는 부작용으로 인하여 단지 토질뿐만 아니라 암석에 대해서도 테르자기가 해결해야 할 몫이 되었다. 1940년대 말, 그는 미시건 주에 있는 와이언도트(Wyandotte) 염수지대와 캘리포니아에 있는 윌밍턴(Wilmington) 유전지대에서 발생하는 심각한 지표 함몰현상에 관련한 연구를 하게 되었다.

와이언도트 화학(Wyandotte Chemical)회사는 1896년부터 미시건에 있는 깊은 암염층에서 소금을 캐내고 있었다. 이 회사는 현장에서 소금을 녹여서 소금물을 퍼내는 방법을 사용하였다. 1947년 테르자기가 현장에 도착했을 때, 땅은 광산 건물 아래 있는 지표에서 약 1.5미터 가라 앉아 있는 상태였다. 그의 생각은 침하현상의 주된 원인은 지하수를 퍼올려서 점토층이 압밀된 때문이라는 펙의 의견과 달랐다. 침하범위가 너무 광범위하였고, 회사의 역사 자료를 분석한 결과 함몰현상의 중심지는 폭이 약 183미터에 이르는 깊은 소금물 공동인 것으로 드러났다. 문제는 이러한 함몰현상으로 말미암아 석회암 지대의 경우와 마찬가지로 지표면에서 전체적인 붕괴가 발생하게 될 것인가 하는 점이었다. 일부 암반으로 채워진 공동의 간극률을 측정한 결과, 그는 약 30미터 높이에 이르는 공동을 완전히 폐쇄된다 해도 지표까지는 전혀 미치지 않고, 석회암 공동이 생기거나 지표가 붕괴되는 일은 없을 것이라고 결론을 내렸다. 그러나 동료 컨설턴트인 펙과 카알 베이츠(Carl Bays)가 이에 완전히 동의하지 않았기 때문

7) 1953년경에 이르러서야 비로소, 이반 로센키스트는 노르웨이 토목연구소에서 그러한 현상은 점토판의 구조적 붕괴에서 비롯된다는 사실을 보여주었다. 점토입자가 초기의 가장자리와 표면이 맞닿은 배열에서 좀 더 밀도가 높은 평행 배열로 빠르게 변화하여 마치 카드로 지은 집이 무너지듯이 붕괴된다는 것이다. 카사그란데가 추측한 바에 따르면, 소점토판의 초기 불안정한 배열은 해수에 침전하면서 더욱 발전하여, 신선한 물이 점토층의 간극수 대신 들어가면 구조가 불안정상태에 이르게 된다. 로센키스트가 <토목공학(Geotechnique)> 제3권 195-200쪽에 발표한 논문 "노르웨이 킷점토의 민감성에 관한 연구."

에, 가능성은 없지만, 회사 건물 아래에 석회암 공동이 발생하는 것을 막을 수는 없을 것이라고 공동보고서를 작성하여 회사 경영진에게 제출하였다.

테르자기는 이 공동보고서에 서명하였으나, 공장 건물이 갑자기 격렬하게 진동할 조짐을 자신의 고객이 직면하게 되게 내버려 둘 수는 없었다. 그래서 그는 솔베이(Solvay)회사로부터 사례 내력에 관한 자료를 추가로 입수하여 이 문제에 관하여 좀더 깊이 연구하였다. 솔베이(Solvay)회사는 제법 많은 광산에서 석회암 공동이 형성되는 현상을 경험한 적이 있었다. 이 정보를 상세히 분석하면서 테르자기는 각 지반 붕괴 사건별로 지질 조건과 물리적 조건을 분석하여, 석회암 공동이 재앙을 초래할 가능성이 있는 매커니즘을 분류하였다. 이 지식을 와이언도트(Wyandotte)의 염수 공장의 특성에 적용하여, 그는 거의 위험성이 없다는 사실을 회사 경영진에게 알리게 되었다. 그러나 1954년 온타리오 주, 윈저(Windsor)에 있는 강 맞은편에서 비극적인 석회암 공동현상이 발생하였다. 이 재앙은 <Life> 잡지 표지에 보도되었다.

그 당시 서부지역이 안고 있는 주요 지반 문제가운데 한 가지는 캘리포니아 주, 롱비치에 있는 윌밍턴(Wilmington) 유전지대에서 함몰현상이 가속화되고 있는 문제였다. 1930년대에 석유 생산이 시작된 직후부터, 땅이 가라앉기 시작하여, 1952년에 이르러서는 가라앉은 깊이가 약 4.8미터에 이르렀고, 이에 수반하여 수평 거리 30미터마다 약 11.4센티미터씩 수평으로 단축되었다. 1952년 10월 13일자 <월 스트리트 저널> 신문에 의하면, 조수가 도크와 해안가에 있는 공장에 덮치는 것을 방지하고, 지속적인 문제에 대응하기 위해서 지출하는 금액이 매월 수백만 달러에 이르렀다. “정부와 민간기업이 그동안 벌인 항만 구조작업은 아마 역사상 가장 큰 항

만구조작업이 될 것이다.” 매년 수백만 톤의 암석을 카탈리나 섬에 있는 채석장에서 운반하여 제방을 쌓고 저지대를 메우는 한편, 항구 바닥에서는 150만 톤의 퇴적토를 매년 준설하였다. 그 원인은 석유 채굴이었다. 1932년부터 약 6백만 배럴의 원유를 채굴하면서, 2백만 배럴의 물과 엄청난 양의 천연 가스를 함께 뽑아 올렸다.

조수는 시가지와 산업시설을 침범하기 시작했다. 해군은 7.2킬로미터에 이르는 콘크리트 구조물을 건설하여 조선소를 보호하고, 롱비치 시당국은 추가로 3천만 달러를 투입하여 계속 교량, 도로, 부두, 그리고 건물을 교체하거나 수리하였다. 한편, 침하로 인한 수평방향 압축으로 인하여 일부 건물의 기둥이 부서지고, 철도 궤도가 좌굴되며, 교량 탑이 기울어 가 하면, 수평 인장력이 미치는 지역에서는 도시 수도관이 파열되었다. 1949년에는 가동 중이던 유정 200개소에서 단층작용으로 인하여 유정 파이프가 파열되면서 33센티미터 이동하였다. 단층작용은 함몰로 인한 변형과 연관된 것이었다. 1954년에 또 지각운동이 발생하여 68개소의 유정이 파열되었다. 서던 캘리포니아 에디슨(Southern California



사진 6. Terzaghi with grouting contractors with whom he worked in the 1930s(left to right): Ischy, Daxelhofer, and Radio. Photo taken in Zurich, 1949.

# Karl Terzaghi

의

## 발자취

Edison)회사는 이러한 문제를 예민하게 받아 들었다. 이 회사는 롱비치 항구에 있는 터미널 섬에 넓이가 17.4헥타르에 이르는 증기발전소를 소유하기 있었는데, 그 발전소는 정확히 함몰구 중심부에 자리 잡고 있었다. 1952년에는 함몰현상으로 인한 수평 압축작용으로 냉각수 설비를 교체해야 했다. 전체적인 함몰현상의 강도가 증가하면서 발전소는 홍수의 위험에 노출되어 발전소 경계 주위를 완전히 감싸는 제방을 건설해야 했다.

제방을 어떤 높이로 쌓아야 할지는 지반이 얼마나 더 함몰될지에 달려 있다. 롱비치 항 당국에서는 종합적인 복지대책에 투입할 추산액을 발표하였으나, 각 석유회사의 전폭적인 협조가 없이는 그 추산액의 정확성을 신뢰할 수도 없었고, 석유회사의 협조도 없었다. 이러한 상황을 개선하기 위하여, 1948년 9월 21일 서던 캘리포니아 에디슨(Southern California Edison)센터에서 회의가 개최되어, 각 석유회사의 대표, 롱비치 시청, 유니온 패시픽(Union Pacific) 회사, 그리고 스탠포드 연구소가 이 회의에 참석하였다. 후자는 전문가를 여러 명 초청하였는데, 테르자기도 포함되었다. 이 회의를 계기로 테르자기는 함몰현상을 야기할 가능성이 있는 원인을 검토하여 서던 캘리포니아 에디슨사(Southern California Edison)에게 보낼 비공식 보고서를 작성하였다. 이 보고서에서 그는 터미널 섬에서 발생하고 있는 사태를 설명할 수 있는 유일한 원인은 원유를 생산하는 층에서 유체 압력이 감소함으로 인한 퇴적층의 압축이라고 단언하였다.

흙의 압축으로 인한 지표면의 침하현상을 분석하는 방법은 테르자기의 발명품이었다. 그는 유효응력은 토질이 미치는 단위 면적 당 총 하중과 토질의 간극 공간의 유체 압력 사이의 차이라는 사실을 그의 고객에게 상기시켰다. 따라서 토질의 전체 무게가

근본적으로 변화가 없는 상태에서 원유를 뽑아 올려서 간극압이 감소되면, 유효응력은 증가할 수밖에 없다. 눌러있던 지층이 이러한 증가로 말미암아 압축되어 짧아지게 되면, 지반이 함몰하게 되는 것이다. 지반이 모래층인 경우에는, 다양한 지층의 압축성 계수를 정하고 이 계수에 각 층의 유효응력 증가량을 곱하기만 하면 침하량을 예측할 수 있다. 한편, 유전지대가 눌러서 점토층의 간극압이 감소되면, 침하현상이 지연될 것이다. 지연 속도는 이미 토질공학 실무에 일상적이고 널리 받아들여진 테르자기의 압밀이론을 사용하여 계산할 수 있다.

테르자기는 이제 득의의 경지에 올랐다. 그렇지 않은가? 윌밍턴(Wilmington) 유전지대에서는 토층이 아니라 제3기 최신세와 홍적세 퇴적층에서 원유를 생산하였다. 이 퇴적층은 토층과 유사하지만, 그러한 재질에 압밀이론을 적용한 전례가 없었다. 더구나, 원유를 생산하는 지층은 지표면에서 600미터 내지 1,800미터 아래에 있기 때문에 테르자기가 그러한 연구를 하는 데에 사용했던 표본 채취 도구를 사용할 수 있는 범위를 벗어나는 것이었다. 유전지대는 여러 개의 일반적인 단층으로 나뉘어져 있어서, 각기 지질학적 구획으로 갈라져 있었다. 매우 광대한 암반층 내에서도 각 지역마다 각기 다른 양의 원유가 생산되었으며, 테르자기가 일반적으로 요구하는 방식대로 그 암반층에서 표본을 채취하거나, 암반층을 실험한 적이 없었다. 침하 단면은 지표면에서 얻었지만, 수평적 변형률에 대해서 알려진 것이 거의 없었고, 깊이별로 지각운동의 분포에 관해서는 거의 아무 것도 알지 못했다. 게다가, 표층에 대해서 정보를 얻을 수 있다고 해도, 각기 다른 지역의 간극수압 감소에 관해서 수천 페이지에 이르는 조사보고서가 발표되었고, 압축되고 있는 저유지대의 간극은 물 대신, 석유와 가스로 포화상태를 이루

고 있었다.

서던 캘리포니아 에디슨(Southern California Edison) 회사 부사장인 월레스 채드윅(Wallace Chadwick)이 테르자기가 낙관적인 견해를 피력한 1949년 4월 23일자 연구보고서를 읽고 나서 그 문제에 관한 주요 분석을 하도록 그에게 의뢰하였으나, 테르자기 앞에 놓인 작업은 정말 어려운 일이었다. 일을 진행시키기 위해서 테르자기는 엄청난 분량의 조사보고서를 수집하여 소화하기 시작하고, 고객에 역량 있는 석유 기술자인 찰스 닷슨(Charles Dodson)을 채용하도록 했다. 그는 데이터를 수집하고, 자세히 조사하여 테르자기가 필요한 데이터를 제공하는 역할을 맡게 될 것이다. 테르자기가 첫 번째로 큰 결정을 내려야 할 문제는 침하현상을 모래의 경우와 같이 단순한 압축으로 보고 계산할 것인지, 점토의 경우와 같이 시간이 지연된 압밀로 보고 계산할 것인지 하는 문제였다. 함몰현상은 시간이 경과함에 따라 변화할 것은 의심할 여지가 없었다. 그러나 이는 단지 확장되는 지역의 현장 분포, 원유 생산량의 변화, 시간 경과에 따른 가스 함량의 변화를 반영할 뿐, 테르자기가 압밀이론에서 기록한 물리적 현상과 같이 투수율이 낮은 점토층에서 배수 지연으로 인하여 발생하는 물리적 현상을 반영하는

것은 아니었다.

테르자기는 증거물을 판독하여 시간지체 효과는 미미한 것이어서 무시할 수 있는 정도라고 확신했다. 원유는 압축성 모래층에서 생산되는 것이었다. 중간에 끼어있는 단층은 모래와 실트가 바람에 실려 해양에 퇴적된 실트암이었기 때문에 점토가 거의 함유될 수 없는 지층이었다. 이 실트암은 본질적으로 압축이 불가능한 것으로 여겨졌다. 따라서 침하 깊이를 계산하는 일은 단지 단순히 제공한 데이터를 이용하여 각기 다른 생산량에 개별적으로 미치는 압력의 감소를 합산하는 일이 될 것이다. 이 일 자체만으로도 엄청난 작업이어서, 부속서류와 도면을 합하여 테르자기의 보고서는 400페이지에 달하였다. 각기 다른 지층의 압축률과 깊이에 따라 경화되는 법칙을 채택하고, 일정한 위치와 향후 원유 생산비를 가정하여 그는 최고 침하 깊이가 5.2미터 내지 6미터가 될 것이라고 예측하였다. 현장 주변의 추이에 따라서는 최악의 경우 7미터까지 수치가 올라가는 곳도 있을 수 있으나, 그럴 가능성은 거의 없다고 그는 단언하였다. 그래서 테르자기는 6미터 깊이의 함몰사태로 인한 홍수에 적절하게 대비하고, 최악의 경우에는 7미터까지 그 높이를 올려서 제방을 쌓을 수 있도록 설계하라고 서던 캘리포니아 에디슨(Southern California Edison) 회사에 조언하였다.

테르자기 이외에 다른 곳에서도 함몰 깊이에 대한 예상치를 계산하였다. 스탠포드 연구소(Stanford Research Institute)에서는 테르자기의 박사학위과정 제자이던 나보르 카릴로(Nabor Carillo)가 만든 새로운 이론을 이용하여 복잡하게 시도한 수학 모형을 토대로 작성한 연구보고서를 롱비치 시당국에게 제출하였다. 이 연구소는 디지털 컴퓨터와 정확한 이론, 즉 카릴로(Carillo)의 “장력 중심” 이론을 이용하였기 때문에 연구소의 연구결과가 더 낫다고 장담



사진 7. Professor Terzaghi lecturing at Harvard, 1950.



하였다. 스팀포드 연구소는 원유 생산 조업에 관한 자료를 자신 보다 더 많이 입수할 수 있었기 때문에, 테르자기는 연구소가 예측한 함몰현상 형태가 유용하기는 하지만, 연구소측이 함몰 예상치로 제시한 7.3미터는 과장된 것이라고 생각했다. 여하튼, 그 수치는 응용역학이라는 한 분야에서 파생된 잘못된 역학의 산물로서 이 분야 실무자는 주로 “우월감 콤플렉스에 동화되어 있고 기름칠을 잘 해놓은 계산기계들이라고 생각했다.”

테르자기의 두꺼운 보고서는 1950년 10월 말경 제출되었다. 1951년 9월까지 테르자기가 예측한 대로 침하율이 감소하기는커녕, 오히려 매월 5.2센티미터씩 증가하고 있었다. 당신의 해석을 수정할 만한 새로운 변화가 현장에 일어난 것인가요? 테르자기는 이런 질문을 받았다. 서던 캘리포니아 에디슨(Southern California Edison)은 보통주식 80만 주를 매각하기 위해서 주식매각안내서를 발표할 계획이 있어서 함몰률이 계속 증가하면 주식시장에 두려움이 조성되지 않을까 조바심을 냈다. 테르자기는 함몰 깊이는 7미터를 초과하지 않으리라고 자신이 2년 전에 예측하였으며 그 수치를 올려야 할 아무런 이유도 없다는 내용을 담은 회유적인 설명문을 주식매각안내서에 내도록 기고하였다. “그러나, 그의 예상치를 포함하여 모든 함몰 예상치는 각종 가정을 단순화한 것을 근거로 계산할 수밖에 없는 것이고, 추가적인 사실을 입수할 수 있게 되면, 예상치를 수정할 필요가 있을 것이다.” 결국 그렇게 되었다.

1954년 1월, 테르자기는 자신이 예측한 수치 보다 계속 높게 나타나는 함몰 비율을 설명할 수 있는 새로운 보고서를 제출하라는 압력을 받았다. 이때 그는 최상단 유전지대의 함몰 중심지에 있는 유정 아래에서 조사할 수 있는 기회를 얻게 되었다. 상상력을 동원하여 열심히 조사한 결과, 그는 이러한 현

상을 설명할 수 있는 유일한 길은 함몰지역에서 시간 지체현상을 만들어 내는 압밀 효과라는 사실을 증명하였다. 실트암은 처음에 생각했던 것에 비해 압축성이 있었고, 실트암의 낮은 투수성으로 인해 원유 생산 지층 내부와 각 지층 사이의 배수가 억제되었던 것이다. 슬픈 현실은 실제로 궁극적으로 발생할 침하현상은 그가 계산했던 것 보다 “상당히 더 크게” 일어날 것으로 예상되고, 원유 생산을 중단하더라도 침하현상이 계속될 것이라는 사실이었다. 1954년 1월에 제출한 이 보고서에서 테르자기는 두 가지 전망을 제시하였다. 한 가지는 다소 낙관적인 전망이고, 다른 한 가지는 완전히 비관적인 전망이었다. 이 두 가지 전망서는 시간이 경과함에 따라 발생할 가능성이 있는 침하현상을 일괄적으로 다룬 것이었다. 그러나 몇 해가 흐르면서, 실제 침하현상은 가장 최악의 상태 쪽으로 치우쳐서 예상했던 최고 수치를 초과하였다. 증가량은 엄청난 것이었다. 1958년에는 7미터, 1970년에는 10미터, 그리고 1979년에는 11.5미터로 증가할 것으로 예상되었다. 몇 년 뒤 “실트암”이라고 가정했던 물질의 표본에 대해서 꽤 실지한 압밀 실험과 토질분류실험에 따르면, 이 “암석”은 사실 전형적인 점토질이 충분한 흡으로서, 그러한 점토에 전형적으로 나타나는 압축성과 압밀 속성을 지닌 것으로 판명되었다. 고통스럽게도 지질 해석이 잘못되었던 것이다.

테르자기는 1952년 4월 닷슨(Dodson)에게 농담조로 이런 편지를 썼다. “내가 다시 로스앤젤레스에 가게 되면, 유정 실무 영역에 대한 나의 교육 수준이 상당한 수준으로 향상되었다는 점을 꼭 보여주겠습니다.” 실제로 그는 계속 이 분야에 대한 지식을 얻고 새로운 방법을 도입하였다. 스탠리 윌슨(Stanley Wilson)의 작업을 맡았을 때에는 원유 함몰과 관련이 있는 변형을 측정하기 위하여 시추공 경사 측정

용 경사계를 처음 실무에 도입하여 사용하였다. 시간 지연현상의 물리적 특성이 윌밍턴(Wilmington) 유전지대에서 발생한 함몰과정의 중요하고도 불가피한 요소라는 점을 인식하게 되자, 그는 단순화시킨 가정을 기초했음에도 불구하고, 그 이후로는 정확한 것으로 증명된 예측을 내놓았다. 스탠더드 오일(Standard Oil)회사의 사장에 이르기까지 고위층 인사들과 접촉을 가지며 외교술을 발휘한 덕분에, 그는 베네수엘라에 있는 마라카이보(Maracaibo) 호수 아래 함몰 현장에서 크레올 석유(Creole Petroleum)회

사가 시도하고 있는 압력주입 기술에 관한 정보 가운데 중요한 부분을 공유할 수 있게 되었다. 그래서 테르자기는 결국 함몰현상을 중지시킬 수 있는 방법을 육성하는 데에 가장 쓸모가 있는 사람 중 한 사람이 되었다고 말할 수 있다. 그 방법이란 간극 사이에 물을 다시 집어넣어 원유층의 압력을 다시 높이는 방법이었다. 1953년에 70세를 맞이하였어도, 테르자기는 여전히 배우고 있었다. 이제는 함몰하는 퇴적물에 대해 배우는 것은 물론, 함몰하는 자신의 건강을 다루는 방법도 배우야 하는 때가 되었다.