

초고층 구조물과 지반계수



김 성 수
(주)성진구조 안전기술단 소장

고층 구조물설계의 첫 단계는 내진 규정에 따른 제반 Parameter를 결정하는 일이다. 이중에 하나가 지반계수이다. 그러면 지반계수의 의미는 무엇인가?

지반조건은 구조물의 응답에 대단히 중요한 역할을 한다. 토사나 암반은 진앙지로부터 전달되어 오는 지진운동을 증폭할 수도 있는 특정한 성격을 갖는다.

1960년대에 베네수엘라 지진시, 연약지층에 건축된 중·저층 빌딩에 많은 영향을 미침으로써 지반조건은 중요하게 인식되어 졌다. 동일한 규모에서 연약 토사층 위의 구조물이 암반상의 구조물보다 더욱 심각하게 파손되었다.

단단한 암반위에 있는 구조물보다 연약한 지반에 있는 구조물이 지진동에 대하여 큰 영향을 받는다. 지진 발생 시 연약한 지반일수록, 기반암에서 전달되어지는 지반 진동을 많이 증폭 시켜서 상부의 구조

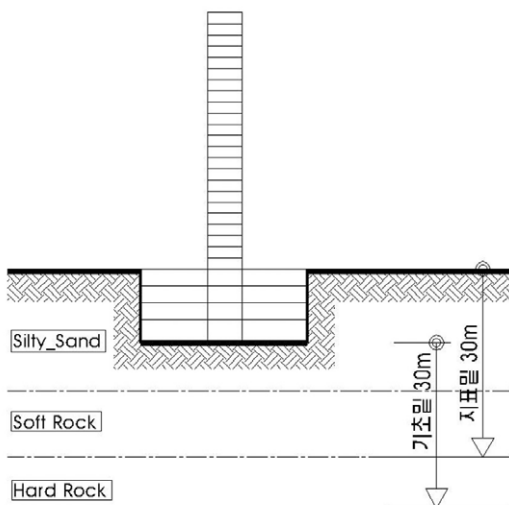
물을 심하게 뒤흔든다고 보는 것이다.

연약지반상의 구조물은 지반 진동이 연약지반을 통과하면서 그 위에 있는 구조물을 암반상의 구조물에 비하여 Rocking 또는 Sway의 거동에 의하여 더 많이 진동이 증폭된다. 이 증폭의 영향을 설계에 반영하기 위하여, 규준에서는 “상부지반 30m”가 어느 정도 단단한지를 따지도록 되어있다. 이때 “상부 30m”가 논란의 쟁점이 된다. 상부 30m란 기초 Level에서 30m인지 아니면, 1층 도로 Level에서 30m인지 불분명하기 때문이다. <그림1>참조

STARCITY-2의 기초 Level은 GL-26.2m 이고, 연암의 Level은 GL-17m이다. 기초저면은 보통암에 정착되어 있고 지하층을 둘러싸고 있는 토사는 풍화도 내지는 매립토 정도의 연약층이다.

따라서 도로 Level에서 지반계수를 따지면 지반계수는 S_c 가 되고, 기초 바닥에서 따지면 S_A 가 된다. 이를 밀면전단력으로 계산하면 S_A 의 경우 $V_b=1913\text{ton}$, S_c 의 경우 $V_b=2869\text{ton}$ 이어서 S_c 는 S_A 에 비하여 150% 큰 밀면전단력이 되고, 추가되는 철근량을 계산하면 15% 정도 영향을 미칠 것으로 추정한다. STARCITY-2의 경우 전체 Tower 철근량이 13000 ton 정도라고 하면, 지반계수를 무엇으로 하느냐에 따라 1950 ton 이 콘크리트 속에 덧없이 묻혀버리게 되는 상황인 것이다.

이와 같이 “상부 30m” 규정의 기준점을 지표로 하느냐 또는 기초저면으로 하느냐에 따라 내진 설계 과정과 시공비 등이 확연히 달라지게 된다. 이렇게 지반계수 선택에 Trouble이 발생하는 이유는, 본 건의 경우처럼 기초는 암반상에 정착되고 지하층 주변 지반은 연약층인 경우에 대한 명확한 근거 규정이 없기 때문이다. 그러므로 당연히 기술자 마다 다른 해석을 하는 것이다.



<그림1> 상부지반 30m의 기준

STARCITY-1(포스코 시공분)은 설계 초기에 이것이 논란이 되었다. 국내의 대부분의 기술자들은 “상부 30m”의 기준점을 지표면으로 기준하고 있었던 터라 이에 대한 외국사의 의견이 매우 궁금하였다. T사는 관련 전문가의 협의를 거쳐서 최종적으로 [“상부 30m”는 기초저면을 기점으로 하는 것이 적합한 것]으로 결론을 지었고, 이에 따라 지반계수는 $[S_A]$ 로 하였다. (참고로 T사는 전 세계적으로 초고층 설계 실적이 많은 미국 뉴욕 소재 구조자문회사임.)

그로부터 2년후 STARCITY-2(금호건설 시공분)의 설계를 수행하면서 또다시 이 문제가 논란이 되었다. 홍콩의 A사에서는 불확실성을 고려하여 지반계수를 보수적으로 판단하지는 주장을 하였다. 그들은 파묻임 구조물(EMBEDED STRUCTURE)에서 주변 연약토사의 거동을 정확히 파악하려면 많은 비용과 시간이 소모되므로 S_C 를 선택하지는 것이었다.

이쯤 되면 홍콩사와 미국사의 의견이 판이하게 엇갈리는 상황이라 할 수 있다. 그러면 미국의 T사는 어떤 연유로 지반계수를 S_A 로 선택한 것일까?

STARCITY-1의 설계는 종료하였지만 여전히 이에 대한 의문이 남아 있어서 T사에게 이에 대한 추가 해명을 요청하였고 T사는 아래와 같이 답신하였다.

“지반계수는 구조물에 횡력을 전달하는 지점의 하부 지반을 고려하여야 한다고 이해하고 있다. 당사는 전 세계의 초고층 구조물에 대하여 이렇게 설계하였다.

극단적인 예를 들면 물속이나 연약토층을 뚫고 향타한 경사파일을 보면 물이나 연약토층이 지반계수와 무관하다는 것을 이해할 수 있을 것이다.

만약 이러한 관점에서 지진동으로 인하여 구조물이 주변토사의 거동을 구속한다면 다소 수정이 필요하겠으나, 주변 토사의 압축성이나 응력의 흠 변형 등을 고려하면 구조물에 그다지 큰 힘으로 작용하지는 않는다고 본다.

규준에서는 이 같은 관점이 너무도 당연하고 대부분의 구조물이 지하층이 없는 구조물이어서 특별히 언급하지 않은 것이다. 본건의 경우 지하 구조물은 하나의 거대한 상자로서 거동하여 횡력의 일부는 기초 마찰력으로 또 일부는 지진력과 평행한 지하 외벽의 마찰력으로 저항한다고 본다. 따라서 기초 저면의 조건은 지반계수와 가장 밀접한 관계가 있으며 주변 연약토사는 혼자서 자립하는 것으로 여겨진다. 규준에서는 이와 같은 접근이 너무도 상식적이고 대부분의 구조물이 지하층이 깊지 않아서 이에 대하여 특정하지 않은 것이다.”

여러 구조 기술자들은 위와 같은 T사의 설명에 대체로 동감은 하지만 한편으로는 주변토사가 구조물에 상당한 진동의 증폭을 전달하는 매체가 되리라고 의심을 하였다.

국내의 여러 사례를 보면 초고층 구조물은 대부분 넓은 면적의 지하 구조물에 접속되어 있으며, 지하구조물은 사면이 큰 강성의 콘크리트 옹벽으로 둘러 싸여 있다. 이러한 조건의 구조물이 주변 연약 토층의 지진 진동에 의하여 전체 구조물의 Rocking 변형을 유발하고 타위의 진동을 증폭하는 현상은 예상되지 않을 것이다.

따라서 본건에 대하여 두 가지 경우를 비교한 해석적인 접근은 주변 토사의 역할을 가늠하는데 상당히 유용할 것으로 여겨진다.

지반과 구조물의 상호작용을 고려한 구조해석 (Soil Structure Interaction)

기반암에서부터 전달되어 오는 지진동이 구조물에 어떠한 영향을 미치는지, 지하층을 둘러싸고 있는 연약토사는 구조물에 어떤 영향을 미치는지 추정하려면, 지반과 구조물을 동시에 고려하여 해석하는 기법, SSI(Soil Structure Interaction)를 이용하는 것이 바람직하다.

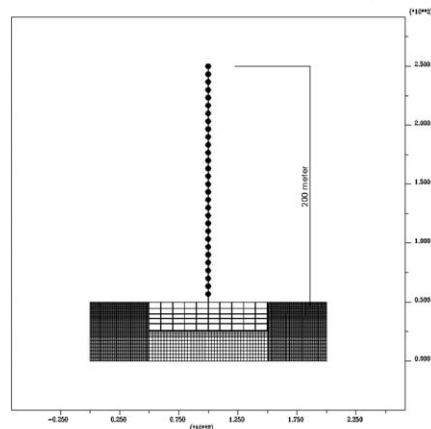
STARCITY-2 와 같이 땅속에 박혀있는 구조물(Embedded Structure)의 지반 진동시 거동에 대하여는 SSI를 이용한 많은 해석적 연구와 실험모형 실험이 보고되고 있다.

예를 들면 아래의 <그림2>처럼 구조물과 지반을 지진동에 대하여 동시에 고려하여 구조물의 거동을 관찰하는 것이다. 이것은 지반계수 설정이 불확실한 경우 정량적으로 문제에 접근할 수 있는 방법으로 생각된다.

1. SSI 해석의 개요

지하층 주변이 연암으로 둘러싸여 있으면 지반계수는 논란의 여지 없이 1층 도로면에서 부터 30m의 지반을 고려하여 지반계수는 S_A 가 된다. 이와 반대로 기초는 암반위에 있어도 지표면 근처가 연약 토

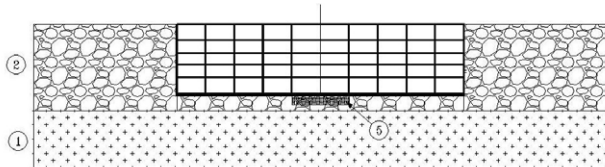
<그림2> 해석모델의 Geometry



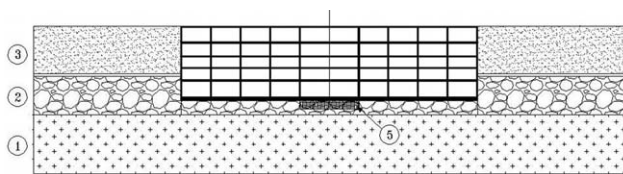
사로 되어 있으면 1층 도로면에서부터 30m를 계산하는지, 아니면 기초 저면에서부터 30m를 계산하는지 불분명하다. 위의 두 가지 경우에 덧붙여서 고층부 하부가 연약하여 고층부 하부만 내림기초로 한 경우에 대하여도 해석을 수행하였다.

각 사례별 지반 조건

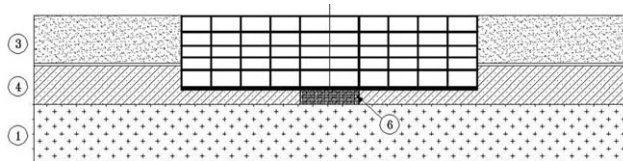
- Case "A": 도로면에서부터 연암이어서 연암을 굴착하여 지하층을 축조한 경우를 가정하였다. 규준에 따라 지반계수=SA로 구분되는 경우이다.
- Case "B": STARCITY-2의 경우처럼 도로면에서 17m까지는 연약 토사이고 그 하부에 연암이 나타나는 경우이다. 지표면을 기준하면 지반계수=SC가 되고 기초저면을 기준하면 지반계수=SA로 구분된다. 지반계수 설정에 많은 논란이 있었던 사례이다.
- Case "C": 기초지반이 풍화토 또는 풍화암 지층이어서 고층부 Mat 하부만 연암까지 Con'c Grouting 처리한 경우이다. 이와 같은 지반 조건은 실무에서 많이 나타나고 있는 사례이다. 초고층 구조물은 대부분 넓은 지하층에 접합되어 있다. 이때 일부가 연약층에 걸쳐 있으면 지반계수 선택이 여간 혼란스러운 것이 아니다. 담당 실무자로서는 철근 물량증가를 감수하고서 안전측으로 판단할 수밖에 없는 상황이 된다.



〈그림3〉 Case "A"의 지반조건



〈그림4〉 Case "B"의 지반조건

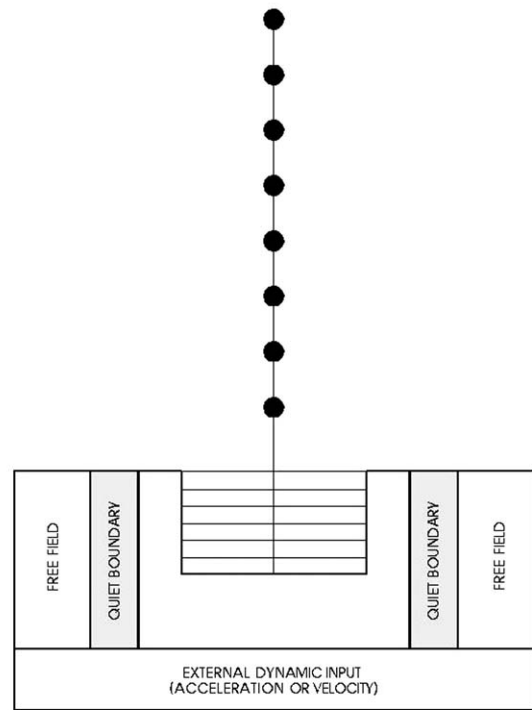


〈그림5〉 Case "C"의 지반조건

- ① Hard Rock ④ Weathered Rock
- ② Soft Rock ⑤ Tower Mat Foundation(t=3000mm)
- ③ Silty_Sand ⑥ Conc Grouting(t=5000mm)

2. 해석 S/W

SSI를 수행 할 수 있는 S/W 로는 SASSI, FLAC 등이 있다. 여기에서는 국제적으로 많이 사용되고 있는 ITASCA에서 개발한 FLAC 5.0(DYNAMIC OPTION) 을 사용하였다. FLAC 에서는 지진동 해석시 경계면에서 의도되지 않은 진동파가 반사되지 않도록 하기 위하여 Free Field 개념을 도입하고 있다. 〈그림6〉 참조



〈그림6〉 경계면의 Free Field 개념

3. MODELLING

- Mesh size : Mesh 의 크기는 작을수록 유리하지만 계산부하가 커지고, 반대로 Mesh의 크기가 커지면 계산상 정밀도를 유지할 수 없으므로 정밀도에 영향을 주지 않는 범위의 Mesh 크기를 결정하는 것이 중요하다. 참고로 본 해석에서 1개 모델에 소요되는 Running Time은 160시간이었다. FLAC에서는 수치해석 정밀도를 유지하기 위하여 지반의 Mesh 의 크기를 Wave Length의 1/10 이하로 하도록 권고하고 있다.

$$\Delta L \leq \lambda/10$$

ΔL : Mesh Size

λ : Wave Length

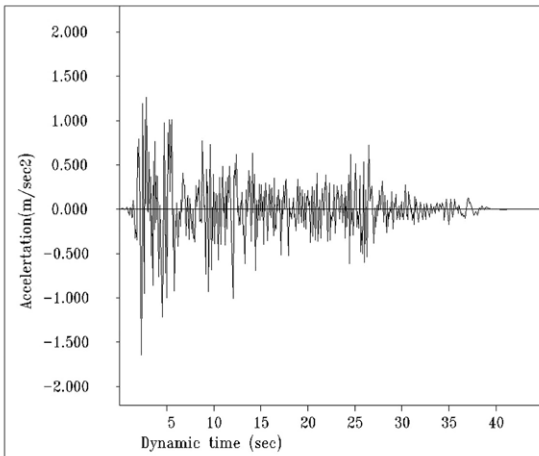
- 고층부 Tower의 변환 : Tower 구조체는 해석목적에 적합하도록 동등한 강성과 질량과 단위 폭을 갖는 Stick Model로 변환하여 Modelling 하였다. SSI 해석에서 타워 구조물을 Stick Model로 변환하는 것은 일반화된 기법으로, 복잡한 건축 구조물

〈표 1〉 해석에 사용된 토질 정수

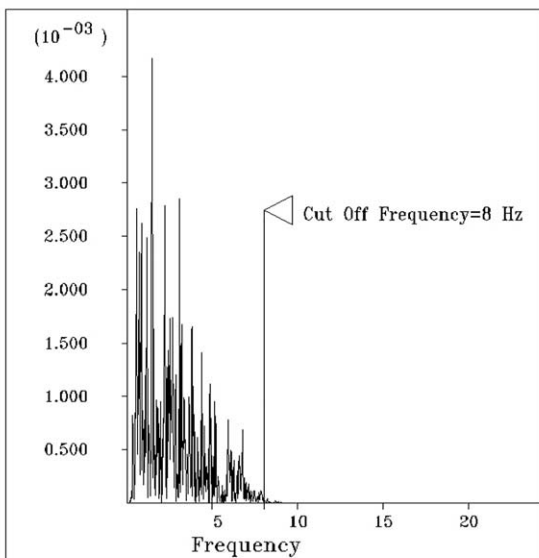
구분	심도(m)	Density(kg/m ³)	내부마찰각(Deg)	Bulk Modulus(Pa)	Shear Modulus(Pa)	Cohesion(Pa)	비고
Silty Sand	-14m	1900	25.0	2.27e7	7.4e6	0.0	
Weathered Rock	-17m	2100	33.0	8.3e7	3.84e7	3.0e4	
Soft Rock	-30m	2300	40.0	8.3e8	5.0e8	8.0e4	
Hard Rock		2600	42.0	3.84e9	2.42e9	2.0e5	

〈표 2〉 해석 결과 요약

	Case A	Case B	Case C
주변지반	연암	Silty Sand	Silty Sand
하부지반	연암	연암	풍화암/Conc Grout
Mot(KN · M)	103800 @4.17sec	98800 @ 4.17sec	99350 @4.18 sec
Vbase(KN)	3730 @5.2 sec	3740 @ 5.2 sec	3610 @5.22 sec



〈그림7〉 Input Ground Acceleration



〈그림8〉 FFT에 의한 Power Spectrum

의 구조요소를 생략함으로써 계산시간을 단축하고 Modelling과정에서 발생할 수 있는 Human Error를 방지할 수 있는 장점이 있다. 특히 Shear Wall이 모든 지진력을 지지하는 고층 구조물에서는 Stick Model이 효과적인 Modeling 기법으로 알려져 있다. Tower의 하부는 전단벽의 크기를 감안하여, Tower의 회전 변형이 기초지반에 전달될 수 있도록 Modelling 하였다.

- 입력 지진파 : FLAC Manual에 소개된 지진파를 사용하였고, 그 속성은 다음과 같다.

PGA(최대 입력가속도) : 0.15 G

Cut_Off Frequency : 8 Hz

FFT(Fast Fourier Transform)에 의한 Power Spectrum을 보면 대부분의 에너지가 8Hz 이하 부분에 집중되어 있어서 Cut_off Frequency를 8Hz로 하였다.

4. 해석 결과 요약

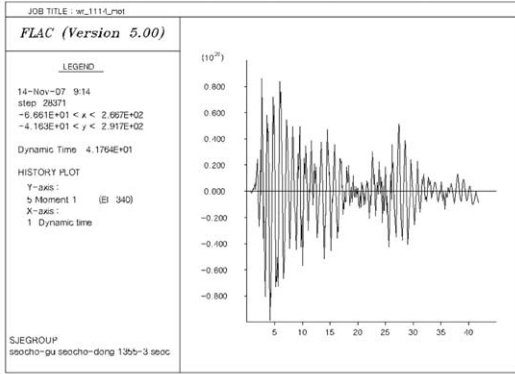
가. Case "B"는 Case "A"에 비하여 Mot(Over-Turning Moment)가 95%정도로 나타났다.

Case "A"는 주변이 단단한 연암층이다. 따라서 횡변형에 대한 저항력이 커서 지하층 구조물을 강하게 구속하고 더욱 Stiff 하게 만들어서 Overturning Moment가 증가하는 현상을 보여주고 있다. 반대로 주변 지반이 연약하면 찰고무 같은 완충재로써 역할을 하여 구조물의 Mot.가 감소하는 효과를 보여주고 있다.

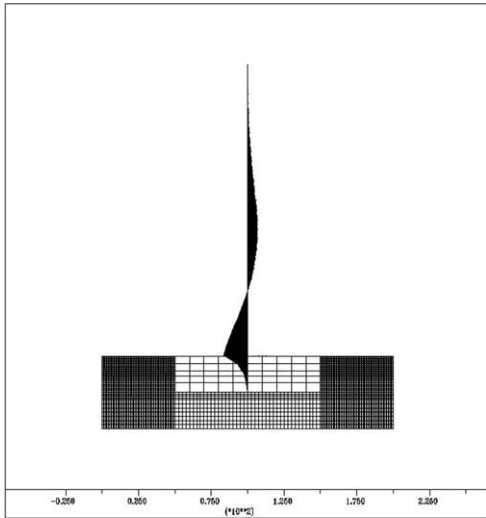
저층부는 풍화암 위에 있고 고층부만 기초하부를 Con'c Grouting한 경우(Case "C")는 Case "B" 보다 0.55 % 크며 대체로 유사한 결과를 보이고 있다.

위의 결과에서 보면 주변의 연약토사는 위와 같은 주변 조건에서 구

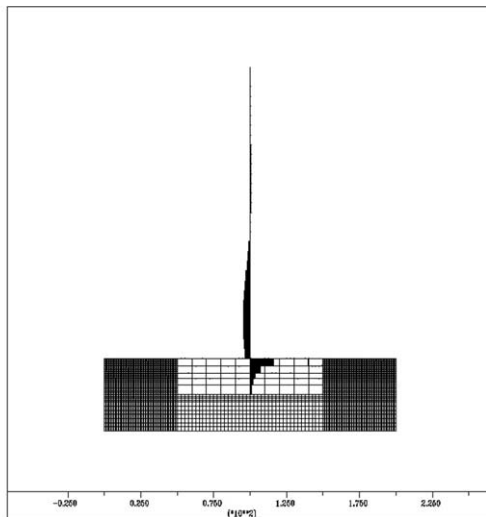
조물의 Mot.를 증가시키는 요인으로 작용하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 지하층을 둘러싸고 있는 주변토사가 연약지층인 경우 위와 같은 조건하에서 “상부지반 30m”의 기준점은 기초 저면이 적절한



〈그림9〉 Tower의 Mot 응답 Spectrum



〈그림10〉 Moment Diagram(@ Dtime=4.188sec)

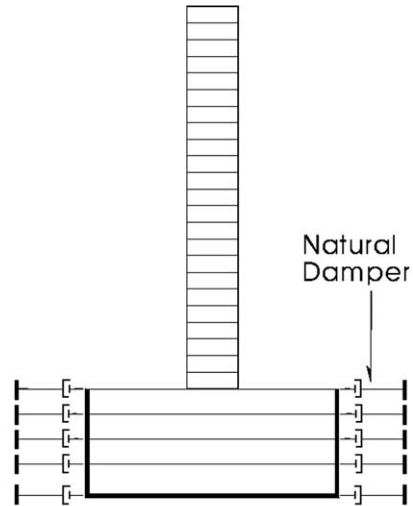


〈그림11〉 Story Shear Diagram(@ Dtime=4.188sec)

것으로 사료된다.

Kellezi교수(Denmark Tech University)는 그의 저서에서 다음과 같은 말을 하고 있다.

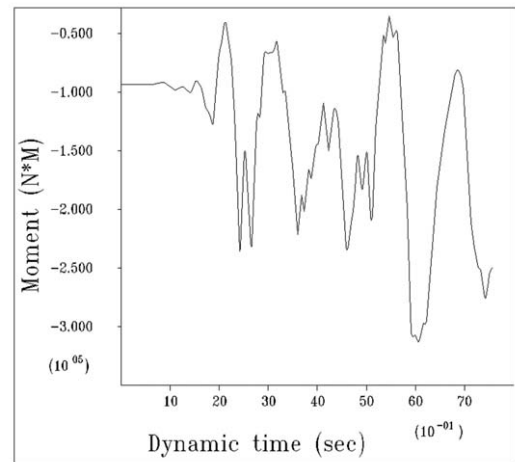
“지하층을 둘러싸고 있는 연약토사는 그 속에 묻혀있는 Stiff한 구조물에 대하여 천연 댐퍼로서 거동을 한다.”



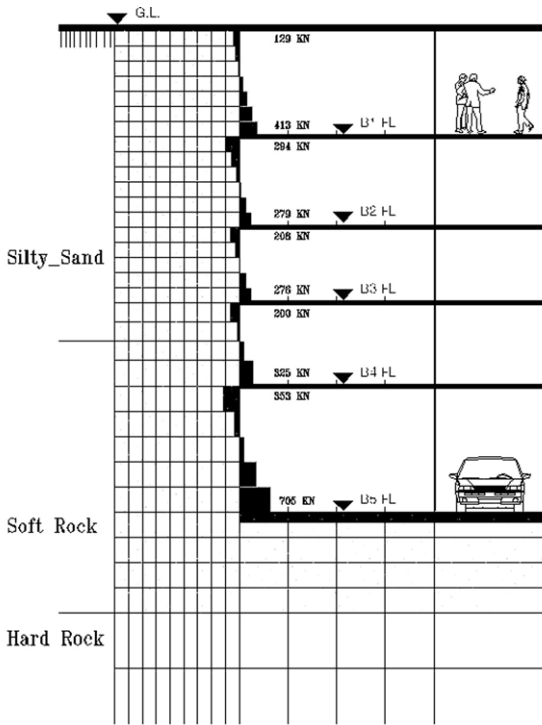
〈그림12〉 주변지반의 Damper 거동

나. 지하층 주변 토사의 역할

지하층 외벽에 발생하는 모멘트 응답 Spectrum을 보면 최대 Moment는 6.05초에 발생되고 있다. 타워에 최대 모멘트 발생시점이 4.17초 이므로 기초로부터 전달된 진동이 타워에 최대 모멘트를 발생시킨 후 2초 경과하여 지하외벽에 가장 큰 모멘트를 발생시킨 것이다. 암반상에 위치한 타워의 기초는 Input Motion을 가장 빠른 시간에 감지하여 진동을 타워에 전달하나, 주변의 연약한 토사는 이



〈그림13〉 지하 외벽 Moment 응답 Spectrum



〈그림 14〉 지하외벽의 Shear Force Diagram(@ Dtime = 5.95sec)

보다 2초 정도 늦은 시점에 진동을 지하 외벽에 작용 시키는 것이다.
즉, 타워의 진동을 유발하는 힘이 시간적으로 분산되어서 타워의 구조에 작용되어지고 있는 것이다.

결과적으로 지하층을 둘러싸고 있는 토사는 2개의 역할을 하고 있는 것을 알 수 있는데, 첫 번째는 구조물의 자유로운 횡변형을 억제하는 구조적인 완충재로서의 역할이고 두 번째는 기반암에서 발생한 진동을 일정량 증폭하여 지하외벽에 전달하는 역할이다.

주변 토사가 단단한 암반이면, 지하 외벽에 전달되는 진동의 크기는 적지만 구조물을 Stiff 하게 만드는 경향을 보인다. 반대로 연약토 사이면, 지하 외벽에 전달되는 진동의 크기는 크지만 타워 구조물을 유연하게 하고 구조물의 진동에 대한 Damper로써 역할을 하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- Ref 1 : K. Ankino et al, "Experimental Studies on Embedment Effect on Dynamic Soil Structure Interaction, 1996"
- Ref 2 : Jonathan P. Stewart "Implementation of Soil-Structure Interaction Models in Performance Based Design Procedures, 2004"

Ref 3 : Itasca Flac Manual

Ref 4 : Hiroyuki "Design of Modern High Rise Reinforced Concrete Structure"

Ref 5 : Farzad Naeim "The Seismic Design Handbook 2nd Edition"

Ref 6 : J.P. Sinh "Importance of Seismological-Geotechnical-Structural Handshake In Performance-based Design of Waterfront Structures"

Ref 7 : R.A. Green "Modelling the Dynamic Response of Cantilever Earth-retaining Walls using FLAC"