

동적시험에 의한 동적지반특성 평가

Evaluation of Dynamic Soil Properties Using Dynamic Tests

이	·	명	·	재*	·	신	·	종	·	호**
Lee,		Myung		Jae		Shin,		Jong		Ho
강	·	기	·	영***	·	전	·	준	·	수****
Kang,		Ki		Young		Chon,		Chun		Su

Abstract

The representative tests in this study are performed at a selected site which has the soil layers to analyze the safety and economy of the dynamic analysis for the variable soil conditions. Crosshole test and downhole test of small strain level tests and triaxial test of large strain level test are performed in the soil layers, and in the rock layers, crosshole test and downhole in-situ tests and laboratory sonic test are performed to measure the dynamic shear modulus, damping ratio, and Poisson's ratio of the soil and the rock.

The correlations between the dynamic soil properties from the tests and the basic soil properties are determined through the regression analysis. The representative design value of the soil is determined by probability analysis of the test results. It is determined from the nonlinear stress-strain model in soils, and the value at small strain level is computed in rocks according to the distribution of the type of soils and the affecting variables. The constitutive value is systematized to be utilized in the analysis of the test results, and computation of the input soil data.

요 지

본 연구는 다양한 지반조건에 따른 동적거동해석의 안정성 및 경제성을 분석하기 위하여 토사지반을 포함하는 시험부지를 선택하여 토사지반에서는 미소변형율의 crosshole test 및 downhole test와 대변형율의 반복삼축시험, 암반에서는 미소변형율에서 현장시험인 crosshole test, downhole test와 실내시험인 sonic test를 실시해 변형율에 따른 지반의 동적전단계수, 감쇠비와 포아슨비 등을 측정하였다.

시험으로 구한 동적지반특성과 기초특성과의 상관관계를 회귀분석을 통하여 분석하였고, 지반의 설계대표치는 시험결과를 토대로 지반별 분포특성 및 영향요인을 고려하여 토사지반에서

*정회원 · (주)대우엔지니어링 기술연구소 대리
 **정회원 · 서울시 한강관리 사업소 시설과 계장
 ***정회원 · (주)대우엔지니어링 지반공학부 대리
 ****정회원 · (주)대우엔지니어링 기술연구소 전무

는 비선형 응력-변형모델로, 암반에서는 미소변형율에서의 동적지반특성을 산정하였다. 상기의 지반구성방정식과 대표치 산정과정은 실제 시험결과 분석, 지반입력 data 산정에 활용 가능하도록 체계화하였다.

1. 서론

동적지반특성의 평가는 “지반의 동적거동을 정의하는데 필요한 지반의 동역학적 성질을 조사하여 동적거동해석의 입력치로 변환시키는 과정”이다. 동적거동해석의 입력치는 해석 Scheme에 따른 수학적 표현방식에 합당해야 할 뿐만 아니라 지반거동을 정확하게 나타낼 수 있는 값이어야 하는데, 비선형해석에서는 변형율의 함수인 동적전단계수, 감쇠비로 동적지반특성의 비선형성을 표현하고 탄성해석인 경우는 지반전체의 동적지반특성을 하나의 대표상수로 나타내야 한다. 이와같이 동적지반특성을 평가한다는 것은 시험자료로부터 해석의 입력치 결정이라는 단순한 차원을 넘어 해석을 염두에 두고 필요한 입력치를 미리 고려하여 지반조건 설정, 시험방법의 선택, 시험실시, 시험결과 분석, 해석의 입력치로의 변환에 이르는 대상부지의 동적거동특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 값을 결정하는 일관성 있는 합리적인 공학적 판단과정 전부를 의미한다.

또한 동적시험은 지진하중시 지반변형조건을 재현하기 위하여 시험의 하중조건을 대략적인 지반거동해석으로부터 결정하게 되고, 이 시험결과를 이용하여 반복해석으로 지반변형율에 일치되는 동적지반특성을 대입하여 최종응답을 산정하게 된다. 이와같이 지반의 동적거동을 정확하게 나타낼 수 있는 값을 결정하기 위하여 시험조건과 해석입력자료 선정을 서로 상호보완적으로 이용해야 하나, 일반적으로는 입력지진과 대체적인 지반조사를 근거로 시험방법을 선택하고, 그 결과를 분석하여 해석입력치를 산정하는 순차적인 과정에 의한다.

동적지반특성의 평가는 지반 profile, 지반특성치 등의 결정을 통한 지반모델링이 첫단계로서, 지반 이상화 및 지반특성의 대표치를 산정하는 과정이다. 지반이상화는 지반의 단순화를 통한 것이므로 합리적인 판단 및 경험을 필요로 하며, 이로 인해 실제 문제와는 차이를 갖게 되고, 시험재료 scatter,

지반특성의 공간적변환(spatial variation)으로 인해 지반대표치도 불확실성을 갖게 된다. 이 과정을 통해 산정된 지반대표치는 각 시험결과와 상관분석 및 자료조사를 통하여 해석에 적용할 설계곡선 및 설계치로의 변환을 하여야 하는데 이 두번째 평가 과정은 지반의 비선형성을 적절하게 나타내야 하고, 시험과 해석의 상관성 뿐만 아니라 입력치를 적절히 설계목적에 맞게 scale해야 하는 이론과 경험의 양면성을 요구한다.

본 연구에서는 시험결과와 자료처리와 대표치 산정을 통계적 처리를 통하여 객관성과 합리성을 부여하고, 일반적인 설계과정에 적용할 수 있도록 평가과정의 각 단계별로 상세히 고찰한다. 그러나, 동적지반특성의 분포특성, 동적시험법 등에 관한 많은 부분이 아직 일반화 되지 못했거나, 부족한 점이 많으므로 본 연구의 평가범위는 지반이상화, 시험자료의 통계처리와 입력치 산정과정 등에 국한된 내용으로 한다.

2. 동적지반시험의 구성

2.1 조사개요

본 조사에서는 내진설계시 필요한 동적지반특성을 측정, 분석 및 평가하고, 내진해석에 구현하기 위하여 대표시험을 계획하였으며, 다양한 지반조건에 따라 동적지반특성을 심층분석하고 동적지반특성의 비선형성을 고찰하기 위하여 토사 및 암반을 포함하는 시험부지에서 미소변형율의 동적시험과 대 변형율의 동적시험을 조합하여 대표동적시험을 구성하였다. 대표시험은 부지의 지질구조 및 지반의 물리적 성질을 파악하기 위하여 시추조사, 함수비시험, 비중시험, 액·소성시험, 입도분석시험 및 흡수율 시험을 수행하였다. 또한 동적지반특성과 비교하기 위한 정적지반특성치 시험으로 표준관입시험, 공내수평재하시험(pressuremeter test), 일축압축시험을 실시하였으며, 동적지반특성을 분석하기 위하여 현장탄성과 조사인 crosshole test 및 down-hole test, 실내시험으로 sonic test 와 반복삼축시험

표 1. 대표시험 구성

시험종류	토 사	암 반
동 적 시 험	현장 · Crosshole Test (V_s, V_p) · Downhole Test (V_s, V_p)	· Crosshole Test (V_s, V_p) · Downhole Test (V_s, V_p)
	실내 · Cyclic Triaxial Test (E, ϵ, D)	· Sonic Test (V_s, V_p)
정적시험	· SPT (N)	· RQD · 일축압축시험 (E_s, σ_s, ν_s) · Pressuremeter (E_p)
기 초 토성시험	· 함수비 · 간극비 · 비 중 · 액·소성 · 입도분석	· 함수비 · 간극비 · 흡수율 · 비 중

표 2 동적지반시험의 적용변형률

시험	측 정 동특성	적용전단 변형률범위 (%)	전단변형률(%)						
			10^5	10^4	10^3	10^2	10^1	1	10
In-Hole Geophysical Test	G, E, ν	$10^5 \sim 5 \times 10^4$	[범위 표시]						
Sonic Test	G, E, ν	$10^5 \sim 5 \times 10^4$	[범위 표시]						
Cyclic Triaxial Test	E, D, 동적거동	$10^2 \sim 5$	[범위 표시]						
지진 변형률			[범위 표시]						

(cyclic triaxial test)을 수행하였으며, 지반종류에 따른 시험항목 및 내용을 표1에 정리하였다.

동적지반특성은 지반의 이방성, 비균질성과 동하중이 조합되어 복잡한 양상을 보이며 일반적으로 강한 비선형성의 특징을 나타낸다. 그러므로, 동적응답해석시에 동하중의 변형률과 일치하는 범위에서 지반의 응력-변형 특성을 결정해야 한다. 지진하중으로 인한 지반변형률은 $10^{-3} \sim 0.5\%$ 정도의 넓은 범위에 발생하므로 단일 동적시험장비로는 원하는 결과를 얻기 힘들며, 표2에 나타난 것처럼 본 대표시험에서는 미소변형률과 대변형률에서의 동적시험을 결합하여 전변형률 구간에 걸쳐 동적지반특성

표 3. 토사의 기초토성

Type of Test	Unit	Range	Average
Water Content	%	7.0-20.0	14.0
Plasticity Index	%	N.P	
Specific Gravity		2.62-2.66	2.65
Wet unit weight	t/m ³	1.90-2.11	2.0
USCS		SP-SW,SM	

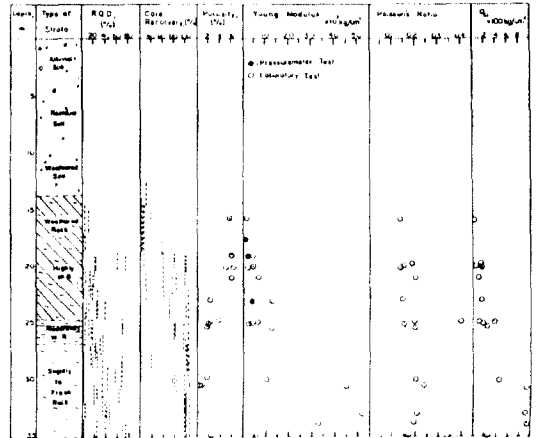


그림 1. 지반 Profile 및 암반의 공학적 특성

을 유추한다.

2.2 기초토성

본 시험부지는 지표면에서 10m까지는 토사층, 10-25m까지는 풍화토 및 연암층, 그리고 25-40m까지는 경암층으로 토사의 종류 및 암반의 풍화정도에 따라 동적지반특성을 결정할 수 있는 지역이며, 토사와 암반의 기초토성을 표3, 그림1에 나타내었다.

3. 동적지반시험

3.1 공내탄성파시험(in-hole geophysical test)

(1) 기본원리

공내탄성파시험중 공간탄성파시험(crosshole test)은 인접해 있는 두개 이상의 시추공 내의 동일심도에 탄성파를 발진시킬 수 있는 장비를 각각 설치, 작동하여 발진공에서 수신공까지 전달되는데 소요되는 전달시간을 측정하고 정밀한 공극측정기를 사용하여 전달거리를 구한다. 또한 downhole test는 지표에서 탄성파가 발생되도록 충격을 가하여 수신공에서 파 도달시간을 측정하고 전달거리를

계산하여 파속도를 구한다. 이와 같은 방법으로 구해진 탄성파속도(P파, S파)를 이용하여 동적탄성계수(dynamic Young's modulus, E), 동적전단계수(shear modulus, G), 동적포아슨비(dynamic Poisson's ratio, ν) 등의 원위치(in-situ) 동적지반특성을 파악하였다.

이들 동적지반특성은 탄성론으로부터 유도된 아래식으로 부터 얻을 수 있다.

$$G = \gamma \cdot V_s^2 / g$$

$$E = 2(1 + \nu)G$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{V_p^2 - 2V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right)$$

여기서, G: 동적전단계수
 E: 동적탄성계수
 ν : 동적포아슨비
 γ : 단위중량
 V_p : 압축파 속도
 V_s : 전단파 속도

(2) 시험방법

공내 탄성파시험은 4m 간격으로 동서로 배열되어 있는 S1, R2, R3공과 남북으로 배열되어 있는 S2, R1, R2 공에서 탐사가 수행되었으며 crosshole test에서 S1, S2 공을 발진공으로 R1, R2, R3 공을 수신공으로 이용하였다. Downhole test는 S1, S2공의 지표에 설치된 concrete block에 hammer로 충격을 가하여 R2, R3공, R1, R2공에서 각각 탄성과 속도를 측정하였다. 공간탄성과 탐사에 이용한 장비는 에너지 원으로 사용하는 shear wave hammer (Bison model 1465-1)와 기록장치인 12 channel signal enhancement seismograph (Bison model 8012A) 및 수신장치인 geophone (Bison model 1462)으로 구분할 수 있다. 측정방법은 우선 shear wave hammer를 원하는 심도까지 투입한 후 유압을 가하면 piston에 의하여 hammer의 몸체가 공벽에 부착된다. 이때 수신기도 발진기로부터 각각 4m, 8m 떨어진 수신공 내에 발진기와 동일한 심도까지 삽입한 후 수신기에 부착되어 있는 고무주머니(packer bladder)에 질소가스를 주입 팽창시켜 공벽에 밀착시킨다. 이들 기기가 고정된 것을 확인한 후 hammer에 부착되어 있는 sliding weight의 자중에 의한 하향 타격이나 인력에 의한 상향 타격을 가하면 발생된 탄성파는

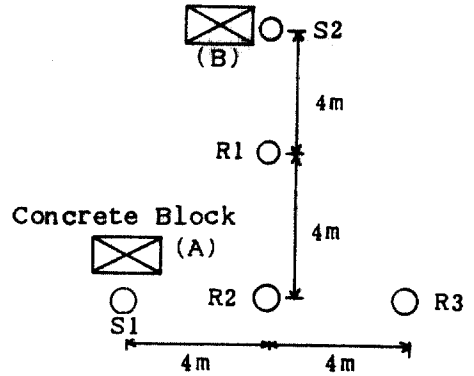


그림 2 공의 배치상태 및 간격

수신기를 통하여 seismograph에 부착된 oscilloscope에 기록된다. 이와 같은 방법으로 한 지점에 대한 측정이 끝나면 다음 탐사 깊이로 이동하여 측정을 계속한다.

발진기로 사용한 shear wave hammer의 직경은 70mm이고 수신기로 사용한 geophone의 직경은 64mm이다. 기존 시추작업시 굴착 casing은 NX type (76mm)을 이용하였기 때문에 수신공으로 사용하는 것은 어려움이 없으나 발진공은 PVC casing 삽입시 내경이 70mm 이하가 되어 발진기 삽입이 곤란하므로 발진공 S1, S2 공은 100mm 직경으로 확공작업을 실시하고 모든 slime을 제거하고 내경 85mm의 PVC를 고정시킨후 grout pipe을 설치하고 토질층에서 건조단위 중량이 1.8-1.9 t/m³이 되도록 bentonite 450g, 시멘트 450g 그리고 물 2.3kg의 비로 혼합하여 grouting 하였다. 발진공과 수신공 사이의 정확한 수평거리를 결정하기 위하여 magnetic drop multishot instrument (Eastman Whipstock 사)로 공곡을 측정하여 공의 수직배열상태를 결정하였다.

(3) 시험결과

각 공의 3m마다 측정된 수직변위 및 그 정도에 대한 공곡측정자료를 이용하여 각 공간의 실제거리를 계산하였고, 시험에서 구한 도달시간으로 나누어 전단파속도 및 압축파 속도를 구했다. 공간탄성과 탐사로 부터 얻은 각 공간의 탄성과 속도와 깊이와의 관계는 그림3에 보여주고 있는데 토사층에서 S파는 300m/sec, P파는 1,000-1,700m/sec를 얻을 수 있었다. 전반적으로 깊이가 증가함에 따라 탄성파속도는 증가하는 경향을 보여 주고 있으며 이들 탄성파 속도를 이용하여 얻은 동적탄성계수

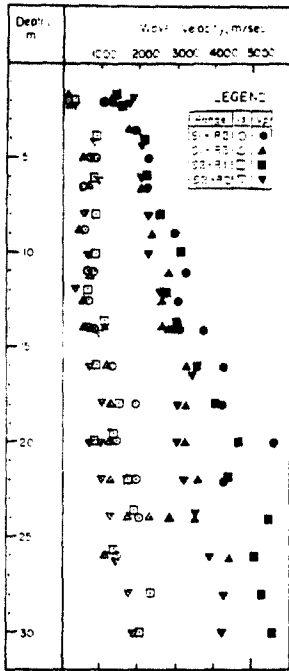


그림 3. 깊이에 따른 속도분포

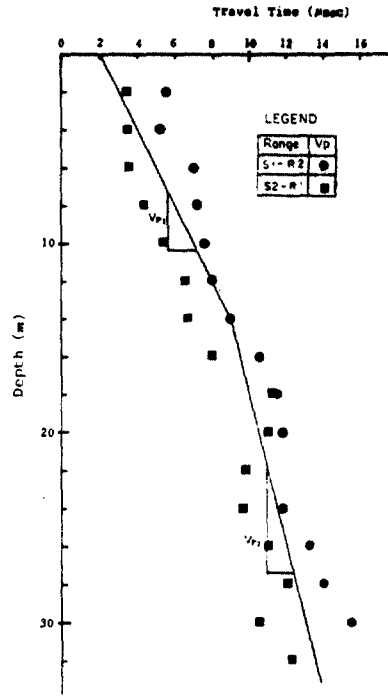


그림 4. 압축파 도달시간과 깊이의 상관관계

표 4. Inhole Geophysical Test의 결과분석

깊이	V_s (m/s)		V_p (m/s)		G (kg/cm ²)		ν	
	$E[V_s]$	$\sigma[V_s]$	$E[V_p]$	$\sigma[V_p]$	$E[G]$	$\sigma[G]$	$E[\nu]$	$\sigma[\nu]$
0~14m	437	0.23	1,957	0.11	3,900	0.43	0.47	0.03
14~32m	1,178	0.14	2,450*	0.15	34,700	0.28	0.35*	0.23

및 동적전단계수는 표 4와 같다.

Crosshole test 및 downhole test의 결과를 분석해 볼 때 탄성파의 크기는 비슷하나 일반적으로 crosshole test 결과가 상향 분포한다. 토사층의 결과는 전단파 속도 300-600m/sec, 포아슨비 0.45 정도로 일반적인 토사의 분포특성과 잘 일치한다. 또, 암반에서의 결과는 전단파 속도의 분포는 1,100-1,700m/sec로 합리적이거나 암반에서의 포아슨비의 값이 0.4-0.45 정도로 일반적인 분포경향(0.3-0.35)보다 크며, 이 결과를 토대로 볼때 압축파가 과대 평가된 것으로 추측된다.

3.2 Sonic Test

주: *는 축소조정

$E[\cdot]$ = Mean of

$\sigma[\cdot]$ = Coefficient of variation of

(1) 기본원리

Sonic test는 압축 혹은 전단의 초음파를 보내 이를 piezoelectric transducer로 받아 파의 도달시간을 측정하며, 이미 알고 있는 시료거리로 부터 파의 전파속도를 구할수 있고, 이 값으로부터 아래식으로 동적탄성계수, 동적전단계수와 포아슨비 등을 결정한다.

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$$

$$G = e \cdot V_s^2$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

(2) 시험장비

사용된 기기는 new sonic viewer(OYO model 7217A)로서 시험편의 상하단이 수평이 되도록 성형하여 0.1mm의 정확도를 갖도록 길이를 측정하고 양면에 탄성과 측정에 적합한 수신, 발신 P파 및 S파 transducer를 놓고, 수신 transducer 상단에 2kg 정도의 사하중을 가하여 transducer와 시편의 부착을 원활하게 한다.

(3) 시험결과

암반 core의 sonic test를 위해 15개의 시편을 풍화정도에 따라 각 공당 3개씩 실내 sonic test를 수행하였고, 그 결과는 표 5와 그림 5에 요약하였다.

그림 5에 나타낸 바와같이 겉보기 비중은 전반적으로 암석의 종류와 풍화정도에 지배를 받으며 풍화가 심할수록 작아지는 분포경향을 보인다. 또한 탄성파속도(V_p , V_s), 동적전단계수(G), 동적탄성계수(E)는 RL-3(R1 공)의 시료를 제외하고는 대체적으로 풍화정도에 반비례하여 증가하나 동적포아슨비(ν)는 RL-8, RL-12 시료를 제외한 모든 경우에 0.3-0.4 범위에 분포되어 있다.

3.3 반복삼축시험(cyclic triaxial test)

(1) 기본원리

반복삼축시험은 그림6에 나타낸 바와 같이 시료의 등방압밀 혹은 부등방압밀 상태에서 일정량의 축차응력을 시료에 가하여 다시 제거하는 과정을 연속적으로 수행하여 동적 응력-변형특성을 구한다. 반복삼축시험중 응력제어방법은 비배수 상태에서 일정한 동적축하중을 가하여 주기수의 변화에 따라 축변형, 축하중과 간극수압을 측정하여 그림7에 나타낸 바와 같이 동적탄성계수(E), 감쇠비(D)와 동적전단계수(G)를 아래와 같이 산정한다.

$$E = \frac{\Delta \sigma_y}{\epsilon_y}, \quad G = \frac{E}{Z(1+\nu)}$$

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\text{area of hysteresis loop}}{\text{area of the triangle OAB}}$$

(2) 시험방법

본 시험장비는 geotechnical digital system, Ltd. (GDS)에 의하여 개발된 것으로 2개의 digital pressure volume controller(DPVC)가 Hew-

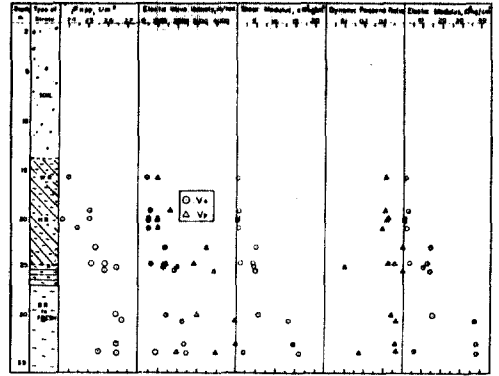


그림 5. Sonic Test로 구한 암반의 동적지반특성 분포

표 5. Sonic Test의 결과분석

V_p (m/sec)			V_s (m/sec)			γ_s (t/m ³)		
$E[V_p]$	$\sigma[V_p]$	$\delta[V_p]$	$E[V_s]$	$\sigma[V_s]$	$\delta[V_s]$	$E[\gamma]$	$\sigma[\gamma]$	$\delta[\gamma]$
1224	668	0.55	2469	1392	0.56	2544	0.0662	0.03
G(kg/cm ²)			E(kg/cm ²)			ν		
3.89	4.16	1.07	1.04	95168	0.92	0.34	0.339	1.00
$\times 10^4$	$\times 10^4$	(1.11)	$\times 10^5$		(0.95)			(1.03)

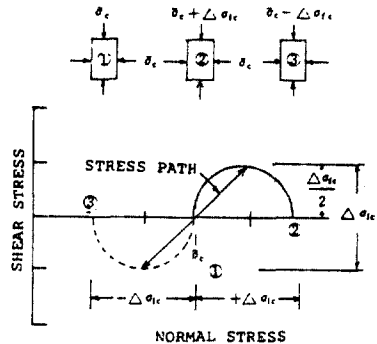


그림 6. 반복삼축시험의 응력상태를 나타내는 Mohr원 (등방압밀시료)

lett packard micro computer와 Bishop cell을 연결하여 시료에 가해지는 구속응력, 간극수압, 축차응력을 자동조절한다. 동적하중 시험시 특정시료에 대한 동적지반특성에 영향을 주는 요소는 단위중량(혹은 간극비), 유효구속응력, 전단변형을, 압밀시간, 과압 밀비, 하중횟수, 초기 전단응력 등이 있다. 본 연구

*주: ()는 시료부족으로 인한 오차를 추가고려
 $\sigma \cdot \delta$ = Standard Deviation of

25회의 표준관입시험으로 부터 얻은 시료의 입도분석결과는 그림 8과 같다.

(3) 시험결과

단위중량은 최대습윤단위중량(2.1t/m³)과 최소습윤단위중량(1.95t/m³)으로 구분하고, 유효구속응력은 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.4kg/cm²인 상태에서 24시간 동안 등방압밀을 실시하였다. 반복하중횟수는 10, 20, 30 회로, 간극비는 0.38-0.53으로, 함수비는 138-163%, 축재응력은 0.05, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.5로 변화시켜 시험조건에 따른 동적지반특성의 영향요인을 분석하였다. 반복삼축시험은 변형율에 따라 동적탄성계수, 감쇠비와 동적전단계수를 산정하였다. 그 결과는 표 6에 나타내었다. 시험결과는 변형율의 증가에 따라 동적전단계수는 감소하고 감쇠비는 증가하였다. 또한 초기전단응력이 증가할수록 동적전단계수는 감소하고 감쇠비는 증가하였다. 유효구속응력은 그림 9와 그림 10에 나타난 것처럼 유효구속응력의 증가에 따라 동적전단계수는 증가하고 감쇠비는 감소한다.

4. 동적지반특성의 평가

4.1 시험결과와의 상관분석

동적지반특성과 지반의 정특성치나 기초토성과의 상관관계를 분석하기 위하여 지금까지의 연구예와 경험식을 토대로 같은 형태의 수식으로 표현가능하도록 선형회귀분석을 실시하였다.

(1) crosshole test

crosshole test는 토사와 암반에서 모두 실시되었

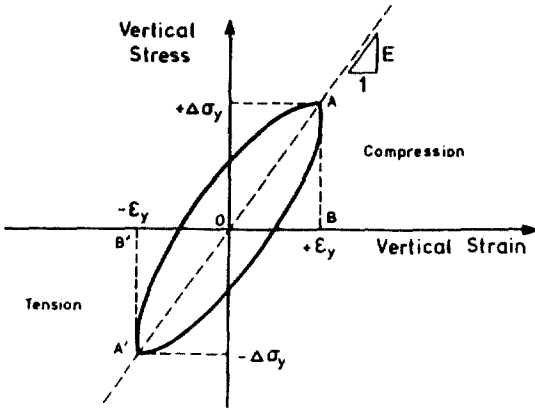


그림 7. 반복삼축시험의 대표적인 응력-변형 곡선

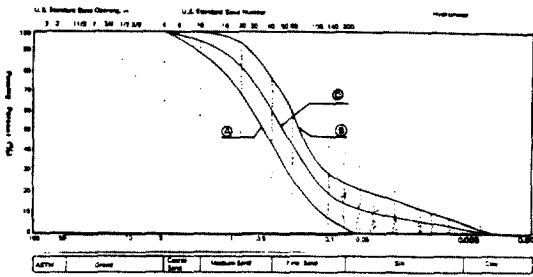


그림 8. 입도분포

에서는 이들 중 중요한 영향인자인 단위중량, 유효 구속응력, 하중횟수의 변화 및 전단응력의 크기 등이 동적지반특성에 미치는 영향을 분석하였다.

표 6. 반복삼축시험 결과분석

변형율(%)	E(kg/cm ²)			D(%)			G(kg/cm ²)			ν
	E [E]	σ _S [E]	σ _T [E]	E [D]	σ [D]	σ _T [D]	E [G]	σ [G]	σ _T [G]	
10 ⁻² < γ < 10 ⁻¹	571	48	0.08	9.8	2.7	0.27	197	19	0.10	(crosshole Test결과)
3.16 × 10 ⁻¹	336	112	0.33	13.2	4.1	0.31	116	39	0.34	
1	187	54	0.29	21.9	4.0	0.18	64	19	0.29	
3.16	137	47	0.34	20.7	4.1	0.20	47	16	0.35	

*주: ()는 시료부족 오차 추가 고려

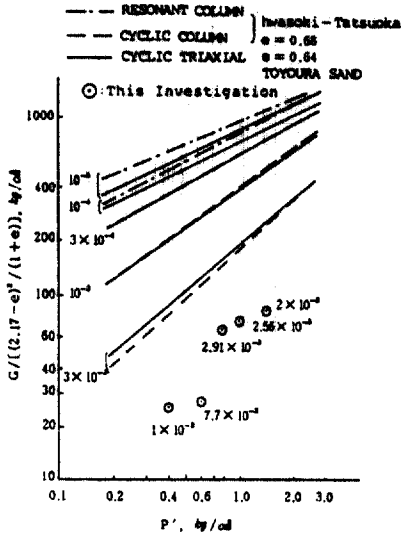


그림 9. $G/(2.17-e)^2/(1+e)$ 와 유효구속응력의 상관관계

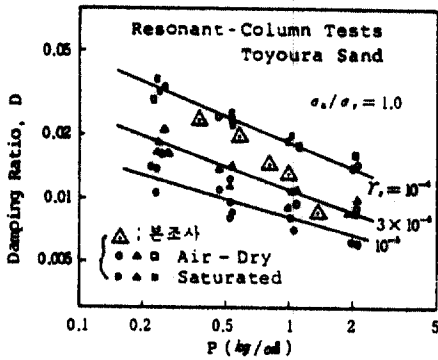


그림 10. 감쇠비와 구속응력의 상관관계

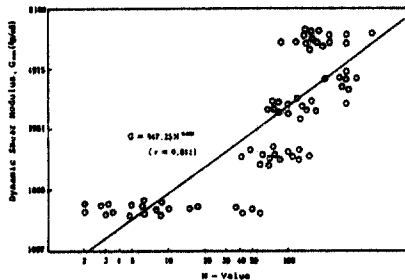


그림 11. 동적전단계수(Gmax)와 N치의 상관관계

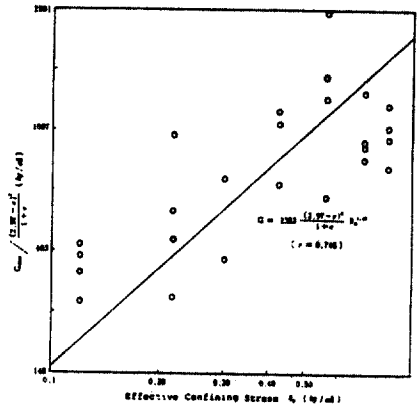


그림 12. 간극비, 유효구속응력과 동적전단계수 (Gmax)의 상관관계

으므로 토사에서는 N치, 간극비와 구속응력 등과 동적전단계수와의 상관관계를 분석하고, 토사와 암반의 전구간을 대상으로 깊이와 전단과 속도와의 상관관계를 분석했다. 0-14m의 토사에서 구한 동적전단계수와 N치는 전대수지 상에서 선형관계를 갖으며 73개의 N치 자료와 25개의 crosshole test 결과를 선형회귀 분석하면 아래 식으로 표현가능하며 상관계수(correlation coefficient)는 0.811이다.

$$G = 847.25N^{0.38}$$

여기서, N=SPT횟수

G=최대 동적전단계수(kg/cm²) ($\gamma \leq 10^{-4}\%$)

동적전단계수를 지반의 기초토성으로 부터 쉽게 구할려는 노력의 일환으로 간극비, 구속응력, 상관관계를 분석한 경험식의 연구예가 많다. 본 연구에서는 0-14m의 토사를 대상으로 간극비의 기본함수 형태를 고정시키고 구속응력과 간극비로 정규화시킨 최대 동적전단계수와의 상관관계를 분석하였으며, 전대수지 상에서 선형관계를 나타내었다. 상관계수는 0.746으로 그 기본식은 아래와 같이 표현된다.

$$G = 2383 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \bar{\sigma}_0^{-1.18}$$

여기서, $\bar{\sigma}_0$ =평균 유효구속응력(kg/cm²)

$$= \frac{1}{3}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)$$

(2) 반복삼축시험

0-14m의 토사구간에서 채취된 시료를 대상으로 실내에서 구한 동적지반특성은 앞절에서 언급한 바와 같이 구속응력, 간극비, 내부마찰각 등 여러가지

표 7. 동적지반특성과 기초토성과의 상관관계

시 험	관 계	관 계 식	상관계수	적용변형율	대상지반
Crosshole Test	동적전단계수	$G = 847.3N^{0.318}$ N=SPT횟수 G=동적전단계수(kg/cm ²)	0.811	$r \leq 10^{-4}\%$	토사
	동적전단계수 - 구속응력, 간극비	$G = 2383 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \bar{\sigma}_c^{1.18}$ $\bar{\sigma}_c$ =평균 유효구속응력(kg/cm ²) e=간극비	0.746	$r \leq 10^{-4}\%$	토사
	전단파속도 - 깊이	$L_n V_s = 5.667 + 0.049D$ D=깊이(m) V_s =전단파속도(m/sec)	0.899	$r \leq 10^{-4}\%$	토사및암반
Sonic Test	동적전단계수 - 일축강도	$G = -6333 + 166.67\alpha_0$ α_0 =일축강도(kg/cm ²)	0.966	$r \leq 10^{-4}\%$	암반
	전단파속도 - 깊이	$V_s = 2.02D^{0.98}$	0.780	$r \leq 10^{-4}\%$	암반
Cyclic Triaxial Test	동적전단계수 - 전단변형율	$G = 76.3 - 97.5 \log r$ r =전단변형율(%)	0.863	$r \geq 10^{-1}\%$	토사
	감쇠비 - 전단변형율	$D = 19.87 + 9.17 \log r$ D=감쇠비(%)	0.672	$r \geq 10^{-1}\%$	토사

영향요인으로 인해 종합적인 분석이 요구된다. 대

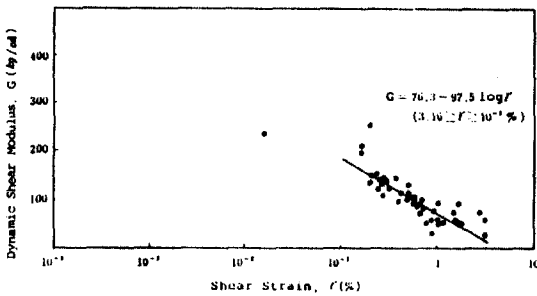


그림 13. 전단변형율에 따른 동적전단계수

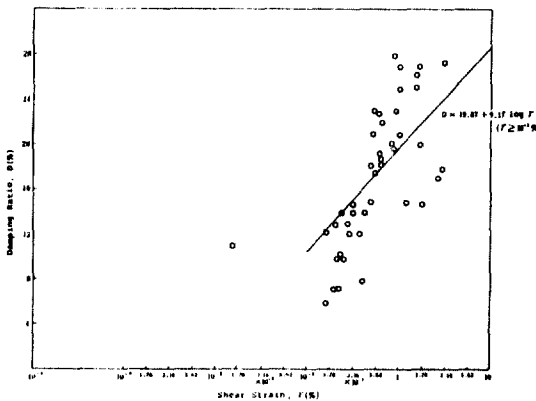


그림 14. 전단변형율에 따른 감쇠비

표시험에서 상기의 영향요인들을 분석하였으므로 여기서는 변형율과 동적지반특성의 상관관계에 국한하여 조사한다. 동적전단계수는 반대수지 상에서 변형율의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내고 그 대표곡선은 역 S자 형태이나, 본 실내시험의 변형구간 ($r > 10^{-1}\%$)에서는 관계곡선을 직선으로 가정하여 동적전단계수와 변형율과의 상관관계를 조사하였다. 상관계수는 0.863이며 그 관계식으로 아래와 같다.

$$G = 76.3 - 97.5 \log r$$

여기서, r =전단변형율($10^{-1}\%$ 이상)

동적지반특성과 기초토성과의 상관관계를 회귀 분석한 결과를 대상지반과 적용변형율에 따라 표 7에 정리하였다.

4. 2 현장시험과 실내시험의 합성

동적지반특성의 설계곡선을 제시하기 위해서는 영향인자, 적용변형율 범위, 자료의 신뢰성, 자료갯수 등의 변수들을 체계적으로 분석하여 이 결과를 토대로 해석 scheme에 맞는 설계곡선형태로 변환하여야 한다.

본 응용연구에서 택한 대표시험은 토사의 경우에는 crosshole test, downhole test와 반복삼축시험이 행해졌고, 암반에서는 crosshole test, downhole test와 sonic test가 실시되었으므로 각각의 결과를

하나의 설계곡선으로 취합하여, 전체지반의 대표치를 가중치 방법이나 평균치 방법으로 추정한다. 토사에서는 전 변형율 구간에서 설계곡선을 완성해야 하므로 $10^{-4}\%$ 이하의 전단변형율에서는 crosshole test와 downhole test 결과를 이용하고 $10^{-2}\%$ 이상에서는 반복삼축시험 결과를 토대로 동적지반특성을 산정하나, $10^{-4}\% < \gamma < 10^{-2}\%$ 의 변형율 구간에서는 그 gap을 상관분석을 통하여 추정한다. 이 상관분석은 유사지반의 자료분석에 의한 통계처리 방법이나, 기존 동적응력-변형 모델을 근거로 한다. 암반의 경우에는 미소변형율에서의 동적지반특성이 설계치이므로 현장과 실내시험 결과를 자료의 신뢰성에 따라 가중치를 부여하여 적용하여 방법이나, 현장시험 결과를 기준으로 하는 방법 등을 검토한다.

(1) Seed - Idriss

Seed와 Idriss(1970)는 변형율에 따른 동적전단계수와 감쇠비의 분포경향을 여러자료의 통계처리를 통하여 구하였으며, 이 대표곡선을 이용하여 본예제의 토사지반에서 구한 동적전단계수는 그림 15에, 감쇠비의 분포특성은 그림 16에 수록했다.

(2) Hardin - Drnevich

Hardin - Drnevich의 경험식은 아래와 같은 표현되며,

$$G/G_{max} = \frac{1}{1 + \gamma_h}$$

$$D/D_{max} = \frac{\gamma_h}{1 + \gamma_h}$$

$$\gamma_h = \{1 + a \cdot E_{eq}(-b \cdot \frac{\gamma}{r})\} \cdot (\frac{\gamma}{r})$$

$$r = 10^{-2}\%$$

사질토의 특성에 따라 ab 값을 산정하면 동적전단계수 산정시에는 $a = -0.2, b = 0.16$ 이고, 감쇠비 산정시에는 $a = -0.53, b = 0.12$ 이다.

(3) 紫田 - Soelarno

紫田 - Soelarno는 사질토의 동적전단계수를 구속응력과 변형율의 함수로 아래와 같이 제안하였다.

$$G/G_{max} = \frac{1}{1 + 10 \cdot \gamma / \sqrt{\sigma_0}}$$

여기서, γ = 전단변형율(%)

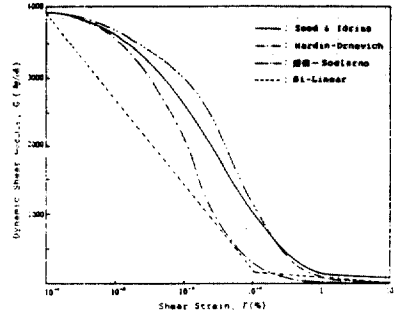


그림 15. 변형율에 따른 동적전단계수

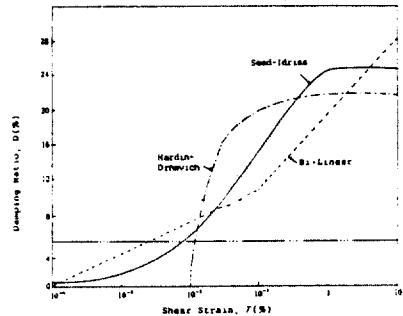


그림 16. 변형율에 따른 감쇠비

σ_0 = 유효구속응력(kg/cm²)

(4) Bi-Linear

대표시험 결과중 실내시험에서 얻은 자료를 선형회귀 분석한 결과를 앞절에서 표현한 바 있으나, $10^{-1}\%$ 이상의 변형율에서만 적용가능하므로 동적전단계수는 최대 동적전단계수와 $10^{-1}\%$ 의 값을 선형으로 연결하고, 감쇠비는 원점과 $10^{-1}\%$ 값을 선형으로 연결하여 Bi-Linear 관계식으로 지반의 동적지반특성을 산정했다.

표 8. 동적지반특성

	$\gamma \geq 10^{-1}\%$	$10^{-1} < \gamma \leq 10^{-4}\%$
동적전단계수 (kg/cm²)	$G = 76.3 - 97.5 \log \gamma$ ($\gamma = -0.863$)	$G = -1,068 - 1,242 \log \gamma$
감쇠비(%)	$D = 19.87 + 9.17 \log \gamma$ ($\gamma = 0.672$)	$D = 3.57 \log \gamma + 14.27$

표 8, 그림 15, 그림 16에 동적지반특성의 대표치를 수록하였다.

5. 결 론

본 연구의 대표시험에서는 crosshole test, down-

hole test의 현장시험과 암반시료를 대상으로 한 sonic test, 토사를 대상으로 한 반복삼축시험 등의 실내시험으로 구성하여, 동적지반특성을 측정하였으며 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 동적전단계수 및 감쇠비의 측정결과는 일반적인 지반별 분포특성에 잘 일치하고 포아슨비도 잘 일치하나, 암반의 포아슨비는 일반적인 분포경향보다 큰 경향을 나타내었다. 이는 현장시험에서 구한 압축파 도달시간이 암반층에서 빨라져 상대적으로 기록의 정확성이 낮아진 데 기인한 것으로 분석된다.

(2) Crosshole test와 결과는 downhole test결과보다 약 30% 정도 큰 값을 나타냈으며, sonic test의 측정 파속도는 현장시험결과보다 약 10% 정도 큰 값을 나타냈다.

(3) Crossole test는 파도달기록의 분석에 불확실성이 많았으며, downhole test가 파도달기록은 비교적 명료하나 파도달경로의 결정에 불확실성이 많았다. 또한, 현장시험은 경계조건의 불확실성, 이질층, triggering time 보정 등의 여러가지 영향요인의 추가적인 고려가 요구된다.

(4) 토사지반에서는 반복삼축시험으로 구한 동적전단계수가 전단변형율의 증가에 따라 감소하면 같은 지반의 현장시험 결과의 1/15 정도로서 변형율의 변화에 따른 토사지반의 큰 비선형성을 알 수 있다. 또한, 감쇠비는 변형율의 증가에 따라 증가하며 1% 정도의 대변형율에서는 20%의 큰 재료감쇠특성을 나타냈다.

(5) 토사지반에서 동적지반특성의 주된 영향요인은 변형율, 구속응력, 간극비 등이며 반복삼축시험으로 관찰한 동적지반특성의 영향요인은 변형율, 구속응력, 전단응력 등이었다. 동적전단계수는 구속응력의 증가에 따라 증가하였고 감쇠비는 감소하는 경향을 보였으며, 전단응력의 증가에 따라 동적전단계수는 감소하였고 감쇠비는 증가하는 경향을 보였으나, 시료 수의 한계로 인해 상대밀도(간극비)의 영향은 규명하기 어려웠다.

(6) 동적지반시험 결과와 기초토성과의 경험적 상관관계는 간단하게 동적지반특성을 결정할 수 있는 효과적인 방법으로, 적용에 한계는 있으나 적절한 공학적 판단을 동반한다면 설계에 유용하게 이용할 수 있다.

(7) 토사지반에서 동적지반특성의 비선형성을 조사하기 위한 미소변형율의 현장시험과 대변형율의 실내시험 결과를 종합하면, 동적전단계수의 경우는 Seed-Idriss 식과 紫田-Soelarno식의 분포가 유사하고 Bi-Linear 식이 가장 낮은 분포를 보이거나 4가지식 모두 동적전단계수의 비선형성을 적절하게 나타낸다.

감쇠비의 경우 Bi-Linear 식이 대변형율에서 Seed-Idriss 식보다 낮은 값을 나타내나 분포 형태가 비슷하고 Hardin-Drnevich 식으로 결정된 감쇠비는 미소변형율 구간에서 지반특성을 반영할 수 없으므로 지반의 감쇠특성을 합리적으로 표현할 수 없다.

감사의 글

본 연구는 (주)대우엔지니어링과 한국전력공사의 공동연구과제인 “동역학적 지반특성치의 평가 및 응용에 관한 연구” 결과의 일부이며 연구에 협조를 아끼지 않으신 한국전력공사 토건연구실의 최중범 실장, 이광주 부장, 이종림 과장께 심심한 감사를 포함합니다.

참고 문헌

1. Anderson, D.G. and Woods, R.D., “Comparison of Field and laboratory Shear Moduli,” Proceedings of the Conference on Insitu Measurement of Soil Properties, *Geotechnical Engineering Division (ASCE) Specialty Conference, Raleigh*, North Carolina, June 1-4, 1975, Vol. 1, pp. 69-92.
2. Ballard, R.F., Jr. and McLean, F.G., “Seismic Field Methods for In Situ Moduli,” Proceedings of the Conference on Insitu Measurement of Soil Properties, *Geotechnical Engineering Division (ASSCE) Specialty Conferenec, Rayleigh*, North Carolina, June 1-4, 1975, Vol. 1, pp. 121-150.
3. Hardin, B.O., and Drnevich, V.P., “Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects” *Journal of the Soil Mechanics and foundations Division, ASCE*, Vol. 98, No. SM6, Pro. Paper 8977, June 1972, pp. 603-624.
4. Hoar R.J. and Stokoe, K.H., II, “Generation and Measurement of Shear Waves In Situ,” *Dynamic Soil and Rock Testing in the Field and Labora-*

- tory for Seismic studies, ASTM STP, Symposium Held Denver, June 1977.
5. Moore, P.J., "Analysis and Design of Foundations for Vibrations," A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1985.
 6. Ohsaki, Y., and Iwasaki, R., "On Dynamic Shear Moduli and Poisson's Ratio of Soil Deposits", *Soils and Foundations*, Vol. 13, No. 4, 1973, pp. 61-73.
 7. Schmertmann, J. H., "Use the SPT to measure Dynamic Soil Properties? - Yes, But...!" ASTM Symposium on Dynamic Field and Laboratory Testing of Soil and Rock, June 1977.
 8. Silver, M.L., "Laboratory Triaxial Procedures to Determine the Cyclic Strength of Soils," Report No. NUREG-31, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., Dec. 1976, pp. 70.
 9. Stokoes, K.H., II and Hoar R.J., "Variable Affecting In situ Seismic Measurements," *Proceedings of the Conference of Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Geotechnical Engineering Division, ASCE, Pasadena, June 1978, pp. 19-21.
 10. 한국전력공사, "핵연료 가공 공장부지 세부지질조사 보고서," 1985. 12.
 11. 한국전력공사, "동역학적 지반특성치의 평가 및 응용에 관한 연구," 1989. 2.

(接受 : 1990. 2. 27)