

## 1. 서언

1964년 일본 Niigata지역에서 발생한 지진(지진 규모 7.5)은 사면과 항만시설 및 주변건물들에 치명적인 피해를 일으켰다. 이 피해의 원인이 액상화 현상이라는 것이 밝혀지면서 액상화 현상에 대한 관심이 높아졌고 이에 대한 많은 연구가 수행되었다. 또한 1995년 일본 고베지역에서 발생한 Hyogo-Ken Nanbu지진(지진규모 6.9)은 성토지반에 대규모의 액상화 현상을 일으켜 지진시 발생하는 액상화 피해에 대한 관심을 가중시켰다. 우리나라에서는 1978년 홍성에서 발생한 지진(지진규모 5.2) 이후 크고 작은 지진들이 수 차례 발생하면서 우리나라도 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아니라는 인식이 확대되었다. 1996년 영월에서 발생한 지진(지진규모 4.5)은 홍성지진 이후 가장 큰 규모의 지진으로 주변에 상당한 피해를 일으켰으며 지진에 대한 공학자들의 관심을 고조시켰다.

최근 국내에서는 협소한 국토사정으로 공항, 공업단지 등의 대규모 건설부지마련을 위해 연약지반이나 매립지에 대한 개발이 증가하고 있는 추세이다. 느슨한 사질토로 지반을 매립할 경우, 작은 규모의 지진에 의해서도 액상화 현상이 발생하여 큰 지진피해가 발생할 수 있음이 많은 지진 피해자료에 의해 알 수 있다. 따라서 연약한 매립지반에 구조물을 축조할 경우 해당지반의 지진 및 지역특성을 고려하여

\*1 정희원, 연세대학교 토목공학과, 교수

\*2 정희원, 삼성건설기술연구소, 수석연구원

\*3 정희원, 연세대학교 토목공학과, BK21 계약교수

액상화 현상을 예측하고 이에 대한 안전성을 검토하며 이러한 결과를 바탕으로 내진설계기준을 수립해야 한다. 우리나라는 발생 가능한 지진특성이 미국, 일본과는 크게 다름에도 불구하고 액상화 가능성 평가시 미국 및 일본 규정을 수정 보완 없이 그대로 이용하는 경우가 많다. 이것은 구조물의 설계 및 시공하는데 있어서 매우 비효율적이고 비경제적인 결과를 초래할 것으로 판단된다. 그러므로 액상화 가능성을 평가 할 때는 우리나라의 지진특성에 맞는 해석을 하는 것이 중요하며 이를 바탕으로 액상화 현상에 대한 평가기준 및 개선방안을 마련해야 한다.

본 강좌에서는 앞에서 언급한 점을 고려하여 액상화현상의 정의에 대하여 언급하였으며, 이 이론들을 기초로 최근 국내에 널리 소개된 바 있는 액상화 판정기법들을 요약·정리 하였다. 또한 국내의 지진특성을 고려한 액상화 평가기법을 소개하였으며, 그 이론을 적용하여 국내 매립지반의 액상화 평가 예를 정리하였다. 끝으로 향후 액상화 분야의 연구 방향을 간단히 언급하고자 한다.

## 2. 지반의 액상화

### 2.1 액상화발생 메커니즘

고체상의 흙이 간극수압의 상승에 의해서 액체와 같은 상태가 되어, 외력에 대한 저항을 잃는 현상이

액상화이다. 액상화는 저항력이 줄어든다는 점에서 보통의 건설재료의 파괴와 큰 차이가 없지만 유효응력 저하에 의한 파괴라는 흙의 고유현상이다. 그리고 느슨한 모래와 같이 입자간 결합력이 약해지는 부의 다일러턴시가 현저한 흙에서는 점성토와 조밀한 모래와 다르게 유효응력이 0의 상태에서 저항력도 완전히 잃게된다.

이처럼 흙의 액상화에는 유효응력의 감소가 따르며 그 원인은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- i) 침투류: 사질지반 내를 흐르는 상향 침투류의 동수경사가 그 한계값을 넘으면 이른바 보일링이 생기고 지중의 세립모래가 지상으로 분출된다.
- ii) 정적전단: 골격구조가 불안정한 흙은 초예민성이라고도 말할 수 있고 약간의 정적 자극에도 액상화 상태가 되기 쉽다. quick sand가 그 전형적인 예이다.
- iii) 동적(반복)전단: 매립지반과 같이 퇴적연대가 극히 짧고 그다지 다져지지 않은 모래지반이 진동을 받으면 모래의 부의 다일러턴시에 기인한 액상화가 발생한다. 그리고, 급속한 수위변동에 의해 해저사질지반에 액상화가 발생한다.

액상화를 초래하는 외력으로써의 분류는 이상과 같지만 본 강좌에서는 ii) 정적전단(단순증가하중)과 iii) 동적전단(반복하중)에 대해 구체적인 실내시험결과의 실례를 인용하면서 그 메커니즘을 설명하고자 한다.

2.1.1 단순증가하중의 경우

우선 매우 느슨한 포화모래의 특징을 보이는 느슨한 모래의 CU시험 예를 그림 2.1에 나타내었다. 이것은 최대간극비,  $e_{max}=0.838$ 의 모래를 이용, 삼축시험시의 간극비를 0.835로 하여 압밀비배수전단을 수행한 결과이다. 그림은 전단시의 유효응력경로를 나타낸 것이지만 4.0 kgf/cm<sup>2</sup>으로 부터 시작한 응력경로는 전단응력의 최고점을 통과한 후에도 좌측을 향하여 진행하고 결국 원점까지 도달하고 있다. 이 상태에서는 유효응력이 0이기 때문에 모래는 이

미 저항을 잃고 액체상태 즉 액상화가 발생한다. 또한 그림에 의하면 유효내부마찰각  $\phi' = 30^\circ$  가 되지만 이  $\phi'$ 이 완전히 발휘되는 것은 전단저항의 최고점을 지나서 액상화에 가까운 상태에서 주의를 요한다. 결국 이러한 모래에서는 그림에서 기입한  $\phi'_p = 16.1^\circ$ 에서 전단저항의 최고점을 보이므로  $\phi' = 30^\circ$ 의 값은 실제로 그다지 의미를 갖지 않는다.

위에서 말한 느슨한 모래의 거동을 조밀한 모래와 비교하여 모식적으로 재현한 것이 그림 2.2이다. 같은 그림 (a)에서는 조밀한 모래의 유효응력 경로가 다일러턴시에 기인하여 좌측으로 향하는 것과 대조적이다. 그림 (b)는 응력-변형률 곡선을 나타내고 느슨한 모래에서는 전단저항의 최고점을 지나고 난 후에도 전단력을 계속 가하면 전단저항의 감소가 계속되고 결국 잔류강도가 0이 되는 것이 특징이다.

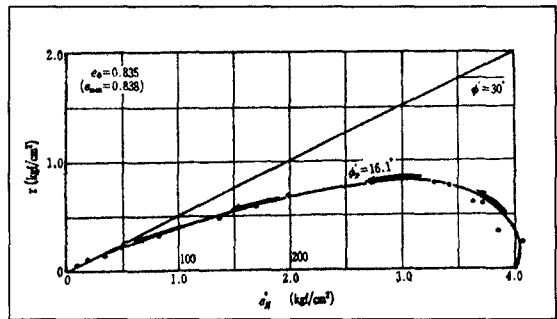


그림 2.1. 느슨한 모래의 CU시험의 예

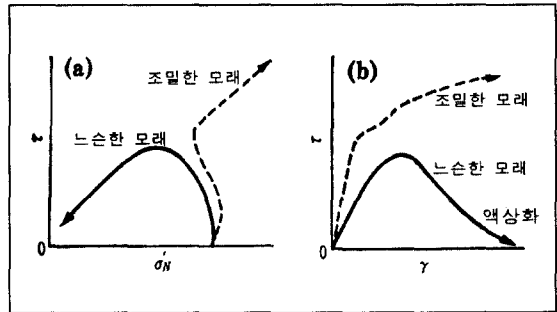


그림 2.2 (a) 유효응력경로 (b) 응력-변형률 관계

### 2.1.2 반복하중의 경우

2.1.1절에서 설명한 것은 단순히 증가하는 하중을 포화모래에 가할 때의 예 이었다. 그런데 안정된 골격구조를 이루고 있는 지반에 전단 변형과 응력을 단순히 증가시키는 것만으로는 액상화에 이르지 않는 흙에서도, 비배수상태에서 반복변형을 가하면 액상화가 발생하는 경우가 많다. 이것은 모래의 고유한 부의 다일러턴시에 의해 특히 전단방향에 몇 번이고 바뀐다면 과잉간극수압이 축적되고 유효응력이 0으로 접근하기 때문이다. 이러한 예를 반복전단시험의 결과를 이용하여 나타내었다.

그림 2.3은 느슨한 모래의 반복전단시험의 기록이다. 시험조건은 반복전단력  $\tau_d = 0.35 \text{ kgf/cm}^2$ 을 일정하게 작용하고, 상대밀도  $D_r = 50\%$ , 초기유효연직응력  $\sigma'_{v0} = 5.0 \text{ kgf/cm}^2$  및 주기는 1Hz이다. 그림 (a)는 가한 전단응력의 시간적 변화, 그림 (b)는 그때 발생하는 과잉간극수압의 증가를 나타내고 있다. 이 시험에서는 24 cycle에서  $\sigma'_{v0} = 5.0 \text{ kgf/cm}^2$ 의 값과 거의 같아지며 초기액상화가 발생하고 있다. 또한, 그림 (c)는 반복재하중의 변형을 이고 24cycle을 넘으면 변화량이 급증하는 현상이 명료하게 보인다.

시험의 기록으로부터 읽어낸 포화모래의 거동은 위의 결과와 같지만 이것을 유효응력의 입장에서 조금 상세히 검토해보자. 그림 2.4는 그림 2.3의 기록을 바탕으로 하여  $\tau - \sigma'_v$  좌표상에 그린 유효응력 경로와 파괴포락선이다. 이 그림에 의하면 연직응력  $\sigma'_v$ 가 일정한 상태에서 몇 번이나 방향을 바꾸는 주기적 전단응력을 받으면 과잉간극수압이 축적되기 때문에 유효연직응력  $\sigma'_v$ 은 서서히 감소하여 그 유효응력경로는 좌측으로 진행하고 결국 파괴포락선에 도달하여 액상화 발생에 이르는 경로를 볼 수 있다. 이 때 초기 유효연직응력  $\sigma'_{v0}$ 이 작을수록 또 응력진폭  $\tau_d$ 가 클수록 쉽게  $\sigma'_v = 0$ 의 상태가 될 수 있기 때문에 액상화의 추이를 나타내는 지표로서 응력비  $\tau_d / \sigma'_{v0}$ 가 쓰인다.

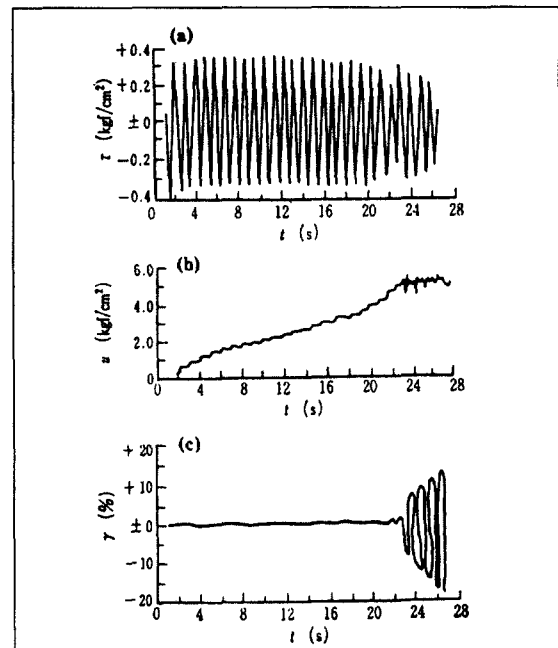


그림 2.3 반복단순전단시험의 예

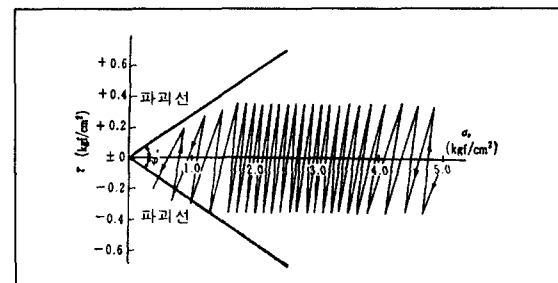


그림 2.4 반복재하시의 유효응력경로

### 2.1.3 Cyclic mobility

느슨한 모래에서는 반복단순증가하중에 의해서 액상화가 발생한다는 것을 앞 절에서 설명 하였다. 본 설명을 통해 조밀한 모래가 비배수상태에서 단순증가재하를 받으면 그림 2.2에서 나타낸 것 같은 그림 (a)의 점선의 유효응력경로를 그린다. 또한 변형이 증가하면 전단저항도 증가하여 액상화가 발생하지 않는다 (그림 (b)).

다음에 조밀한 모래에 비배수상태에서 반복재하를

표 2.1 각 액상화 평가방법의 개요 (김수일, 1998)

$\tau_a/\sigma'_v = 0.65 \times a \times \alpha_v \times r_d / (g \times \sigma'_v)$ $a$ : 지표면 최대가속도 $r_d$ : 응력감소계수 $\alpha_v$ : 전상재압 $\sigma'_v$ : 유효상재압	세립분함유율별 액상화 저항응력비 산정곡선 및 지진규모 고려	지진자료분석 액상화 인자 (N치, 세립분함유분) 고려
$\tau_a/\sigma'_v = a \times \alpha_v \times r_d / (g \times \sigma'_v)$ $a$ : 지표면 최대가속도 $r_d$ : 응력감소계수	$R = R_1 + R_2 + R_3$ $R_1 = 0.0882(N/(\alpha'_v + 0.7))^{0.5}$ $0.19(0.02 \leq D_{50} \leq 0.05)\text{mm}$ $R_2 = 0.25 \times \log_{10}(0.35/D_{50})$ $(0.05 \leq D_{50} \leq 0.6)\text{mm}$ $-0.05(0.6 \leq D_{50} \leq 2.0)\text{mm}$ $R_3 = 0.004FC - 0.16 (FC \geq 40\%)$ 기타의 경우는 0	Iwasaki와 Tatsuoka 이론에 기초 진동삼축시험 결과 자료분석에 기초 액상화 인자인 N치, 세립분함유율 (FC), 평균입경( $D_{50}$ ) 고려
$\tau_a/\sigma'_v = C \times a \times \alpha_v \times r_d / (g \times \sigma'_v)$ $C$ : 지진규모 보정계수 (= 0.1(M-1)) M: 지진규모 $a$ : 지표면 최대가속도 $r_d$ : 응력감소계수	지진규모 7.5 기준의 이종전단변형률 별 액상화 평가곡선 제안	Seed와 Idriss 이론에 기초 지진의 전단응력비 산정시 지진규모 보정계수 사용
$\tau_a/\sigma'_v = 0.65 \times a \times \alpha_v \times S / (g \times \sigma'_v)$ $S$ : 지반계수 $a$ : 국가별 지반가속도	Seed와 Idriss와 동일 지진규모 보정계수는 Seed와 Idriss의 방법과 차이	Seed와 Idriss 이론에 기초 국가별 가속도 기준 지반계수 이용 감소계수 사용안함 허용안전율 1.5

계속 가하면 전단응력의 반전에 의해서 조금씩이지만 정(+)의 과잉간극수압이 축적된다. 그 때문에 그림 2.5내의  $\sigma'_{v0}$  으로부터 시작한 유효응력의 경로는 결국 화살표로 나타난 쉐기모양을 보이고 일시적으로  $\sigma'_v = 0, \tau = 0$  의 상태가 출현해도 후속 반복재하에 대해서는 전단저항이 충분히 발휘된다.

이렇게 일시적으로  $\sigma'_{v0}$  이 0이 되어도 계속되는 반복재하에 대해서 유한한 작은 변형밖에 발생하지 않는 현상은 cyclic mobility라고 부르고 액상화현상의 일부분으로 정의하고 있다.

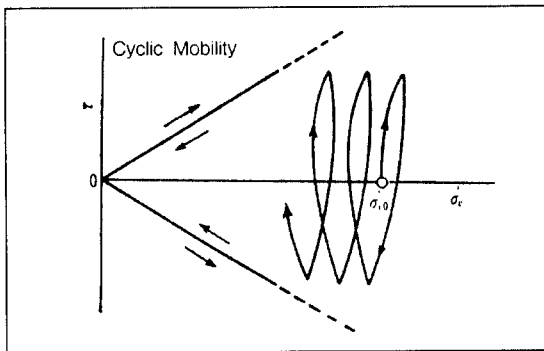


그림 2.5 cyclic mobility의 설명

## 2.2 액상화 평가 간편법

미국, 일본, 그리고 유럽의 내진설계기준에서 제안하고 있는 액상화 평가방법은 경험식 및 도표를 통해 산정된 지진에 의한 전단응력과 지반의 저항응력을 비교하여 액상화 안전율을 산정하는 간편법을 주로 이용하고 있다. 미국의 여러 규정, 일본 건축물 시방서 및 Eurocode8 (1998)의 액상화 평가방법에 근간이 되는 Seed와 Idriss의 이론과 일본의 도로교 시방서에 이용되는 Iwasaki와 Tatsuoka의 이론을 간략하게 나타내면 다음의 표 2.1과 같다. 표 2.1의 지진에 의한 전단응력 산정내용을 보면, Seed와 Idriss의 방법에서는 최대전단응력의 65% 수준의 정현하중으로 지진을 고려하는 등가전단응력개념에 준하여 지표면 최대가속도에 계수 0.65 곱하는 반면, Iwasaki와 Tatsuoka의 방법에서는 지표면 최대가속도를 이용하는 최대전단응력개념을 이용하고 있다. 또한, 표 2.1에서 언급한 Seed와 Idriss 및 Eurocode8 (1998)의 액상화 저항응력비 산정곡선은 그림 2.6과 같으며 일본 건축물 시방서 (1988)에서 이용하고 있는 액상화 저항응력비 산정

곡선은 그림 2.7과 같다.

그림 2.6은 Seed 등(1983)이 전세계의 지진자료 를 토대로 작성한 것으로 지진규모 7.5를 기준으로 세립분 함유율별로 액상화 저항능력비를 나타내고 있다. 그림 2.7은 지진규모 7.5 기준으로 지반의 이중전단변형률(Double shear strain) 수준별로 액상화 저항능력비를 나타낸 것으로 세립분 함유율을 고려한 수정 N치( $N_{60} + \Delta N$ )를 통해 5% 수준의 곡선을 이용할 것을 권장하고 있다. 이는 그림 2.6의 세립분 함유율 5%미만 곡선과 유사한 형태를 나타 내고 있다. 지반상태가 매우 밀한 경우에는 10% 수 준의 곡선을 이용하고 매우 중요한 구조물의 경우에

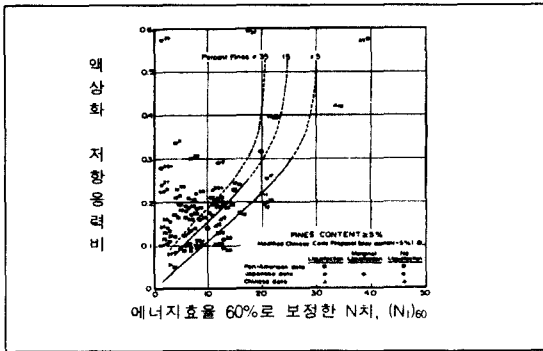


그림 2.6 액상화 저항능력비 산정곡선 (Seed 등, 1983)

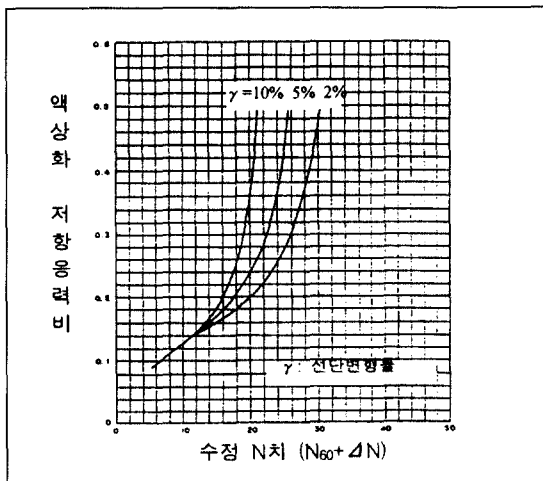


그림 2.7 1998년 일본 건축물시방서의 액상화 저항능력비 산정 곡선 (PHRI, 1997)

는 2% 수준의 곡선을 이용하여 지반의 액상화에 관 한 안정성을 검토할 것을 제안하고 있다. 전반적으 로 Seed와 Idriss 이론에 기초한 방법(Seed와 Idriss, 일본 건축물시방서, Eurocode)에서 이용되 는 액상화 저항능력비 산정곡선은 지반이 일정수준 의 표준관입저항치를 보유하게 되면 액상화 발생가 능성이 거의 없는 지수함수형태인 반면, 진동삼축시 험결과를 토대로 제안된 Iwasaki와 Tatsuoka 방 법에서는 액상화 저항능력비 산정식 중 영향이 큰  $R_1$  산정식이 제곱근 함수형태를 나타내고 있다. 즉, Seed와 Idriss의 방법에서 액상화 저항능력비는 표 준관입저항치 20 수준을 경계로 초기 선형적 증가 후, 급격한 증가를 나타내며 Iwasaki와 Tatsuoka 방법에서는 표준관입저항치가 낮은 수준부터 급격 한 증가를 보이다가 변화정도가 완만하게 된다.

표 2.1의 일본 시방서의 내용을 보면, 자국의 지 진특성을 고려하여 지진규모 7.5 기준으로 연구가 수행된 점을 볼 수 있다. 이에 반해 Seed 등(1983) 은 폭넓은 지진연구를 통해 증약진 정도의 지진규모 도 고려할 수 있는 방법을 연구하였다. Seed 등은 지진피해자료 분석을 통해 표 2.2와 같이 지진규모 에 따른 보정계수를 제안하였다. Seed의 이론을 근 간으로 제정된 Eurocode에서는 Seed 등이 제안한 보정계수보다 큰 값을 제안하고 있으며, 특히 Eurocode에서는 허용안전율(1.5)을 제안하고 있는 점이 특징적이다.

표 2.1의 내용을 보면, 각 액상화 평가 간편법에 서는 세립분 함유율에 대해서 별도의 고려를 하고 있는 것으로 정리되어 있다. 그림 2.6의 액상화 저 항능력비 산정곡선에서는 각 세립분 함유율별로 별 도의 곡선을 제시하여 이용의 편의성을 제공하고 있

표 2.2 지진규모에 따른 액상화 저항능력비 보정계수 (Seed 등, 1983 ; Eurocode8, 1998)

구 분	Seed와 Idriss				Eurocode				
	5.25	6.00	6.75	7.50	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50
보정계수	1.50	1.32	1.13	1.00	2.86	2.20	1.69	1.30	1.00

는 반면, 일본 도로교 시방서에서는 세립분 함유율이 40% 이상시의 경우에 대해서만 액상화 저항능력비를 증가시켜주는 식을 제안하고 있다. 반면, 일본의 건축물 시방서(1988)에서는 그림 2.8과 같이 세립분 함유율에 따라 일정분의 N치( $\Delta N$ )를 증가시켜 줌으로써 세립분 함유율 증가에 따른 액상화 저항능력비 증가를 고려하고 있다.

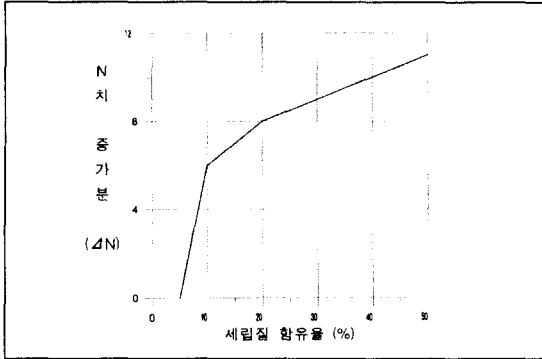


그림 2.8 일본 건축물시방서의 세립분 함유율에 따른 N치 증가분,  $\Delta N$  (PHRI, 1997)

그림 2.8의 내용을 보면, 5% 미만에서는 0, 5-10% 구간에는 증가분의 기울기가 급하고 그 이후에는 다소 완화된 기울기를 적용하고 있다. 이는 그림 2.6의 세립분 함유율 5%미만, 15%, 그리고 35% 곡선의 변화폭과 유사한 것으로 판단된다.

### 2.3 실내시험에 기초한 액상화 상세예측법

일본에서는 현재까지도 진동삼축시험(Cyclic triaxial test) 및 비틀림전단시험(Torsional shear test)의 수행을 통한 내진연구가 활성화되어 있다. 특히, 내진규정에서도 액상화 간편해석결과, 안전치 못할 것으로 예상되는 경우에는 진동삼축시험 및 비틀림전단시험의 수행을 통해 추가적인 검토를 수행할 것을 제안하고 있으며, 실제 장비의 보유량도 상당한 수준에 있는 실정이다. 미국에서는 주로 지진자료분석과 더불어 진동전단시험(Cyclic shear test) 및 진동삼축시험, 그리고 진동대시험과 유사

한 대형진동전단시험(Large cyclic shear test)의 수행이 많은 편이다. 국내의 경우, 진동대시험장비 및 진동전단시험기는 보유대수가 손에 꼽을 정도로 실험적 연구수행기반이 부족한 실정이다. 그러나, 진동삼축시험기의 경우, 장비특성상 진동삼축시험 외에도 여러 토성파악시험이 가능함에 따라 여러 연구소 및 대학, 그리고 기업체에서도 이를 보유하고 있다. 따라서 지진자료가 매우 부족한 국내의 경우, 진동삼축시험을 통한 지반의 동적거동을 분석하는 실험적 연구가 필요하다.

진동삼축시험에 기초한 액상화 상세예측법도 지진에 의한 전단응력비와 지반의 액상화 저항능력비를 각각 산정하고 이를 비교하여 액상화 평가안전율을 산정하는 것으로써 지진에 의한 전단응력비는 2.2절에서 소개한 방법과 동일한 방법을 이용한다. 그리고, 지반의 액상화 저항능력비는 3회이상 진동하중변화에 따른 진동삼축시험과 시험결과의 현장상태로의 보정을 통해서 등가진동 재하횟수-액상화 저항능력비의 상관곡선을 도출한다 (항만 및 여항시설의 내진설계표준서, 1999). 일본의 경우는 지진규모 7.5 기준의 등가진동 재하횟수를 20회로 정하고 액상화 저항능력비로 산정하는 반면, Seed 등 (1983)은 그림 2.9의 지진자료분석을 통해 나타난 등가진동 재하횟수의 평균값을 이용하여 표 2.3과 같이 지진규모별 등가진동 재하횟수를 제안하였다.

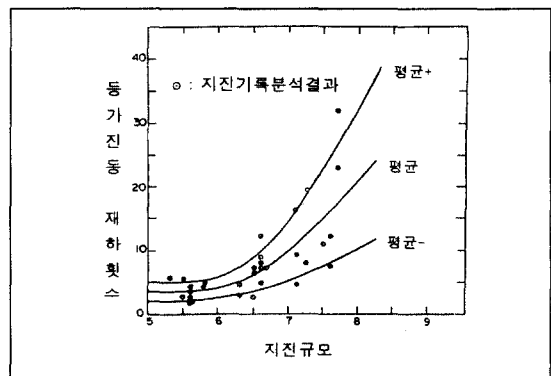


그림 2.9 지진피해자료 분석결과 (Seed 등, 1983)

표 2.3 지진규모별 등가진동 재하횟수 (Seed 등, 1983)

진동재하횟수	2-3 회	5-6 회	10 회	15 회
--------	-------	-------	------	------

그림 2.10은 진동삼축시험에 기초한 액상화 저항 응력비 산정과정은 전반적으로 나타낸 것이다.

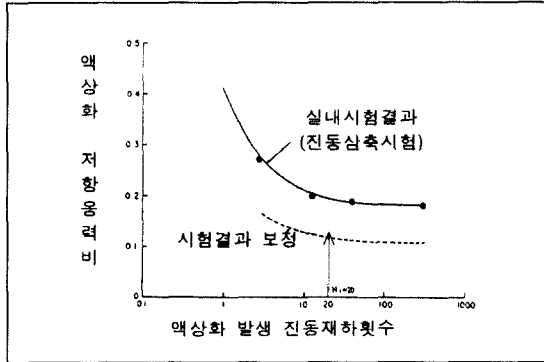


그림 2.10 진동삼축시험에 기초한 액상화 저항응력비 산정과정 (PHRI, 1997)

그림 2.10에서 진동삼축시험결과를 보정하는 것은 진단상태와 현장상태로의 보정을 함께 수행한 것으로 이에 대한 연구결과를 정리하면 표 2.4와 같다.

표 2.4 진동삼축시험결과 보정 (PHRI, 1997)

보정 계수	보정계수 = $C_r / 0.65$ ( $C_r$ : 0.57( $K_0=0.4$ ) ~ 0.9 or 1.0 ( $K_0=1.0$ ))	보정계수 = $0.9 / C_k \times$ $(1 + 2K_0) / 3$ 1. Ishihara $C_k = 0.55$ (충격형: 최대전단응력의 60% 수준의 파가 3회 미만) or 0.7 (진동형: 3회 이상) 2. Iwasaki: $C_k = 0.63$
내용	내부마찰각 30° 고려시 보정계수범위는 0.92~0.95 수준	내부마찰각 30° 고려시 보정계수범위는 0.86~1.09 수준(Ishihara), 0.95(Iwasaki)

### 3. 국내 지진규모를 고려한 액상화 평가 방법

#### 3.1 국내 설계지진규모

기상청에 조사된 20세기 제기진계측자료를 보

면, 지진규모 5이상 발생한 사례는 총 4회로 36년 쌍계사 (지진규모 5.1), 78년 홍성 (지진규모 5.0), 78년 속리산 (지진규모 5.2), 그리고 80년 삭주 (지진규모 5.3)이며 90년대 이후 연평균 지진발생빈도가 증가하고 있는 추세이다. 표 3.1은 기상청 지진 자료를 토대로 국내 및 일본의 연평균 발생빈도를 정리한 것이다.

표 3.1 국내 및 일본의 연평균 지진발생빈도 (기상청자료)

지진규모 3 이상	9회/년	1,200회/년
지진규모 4 이상	1.3회/년	400회/년
지진규모 5 이상	0.2회/년	100회/년
지진규모 6 이상	-	10회/년

표 3.1의 지진통계자료와 더불어 일반적인 구조물의 수명을 고려할 때, 국내 설계지진규모는 외국기준인 지진규모 7.5보다 작게 선정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 그러나, 이러한 설계지진규모의 결정은 지진에 대한 대책의 안전성과 더불어 구조물의 평균수명을 포함한 경제성이 모두 고려되어야 함으로 많은 통계분석을 통해 결정되어야 할 것으로 판단된다. 현재, 국내에서는 서울대학교에 설립된 지진공학연구센터에 소속된 지진학자들이 이에 관한 연구를 집중적으로 수행하고 있다.

#### 3.2 국내 액상화 평가방법

본 강좌에서는 미국 및 일본의 설계기준 지진규모 7.5보다 크지 않은 최근의 국내 지진력을 고려하기 위하여 Seed와 Idriss의 방법에 대한 수정보완을 통해 국내 액상화 간편법 및 상세예측법을 소개하였다. 본 수정 Seed와 Idriss 방법은 이미 「항만 및 어항시설의 내진설계표준서」 등에 소개된 내용을 정리한 것이다.

##### 3.2.1 액상화 평가를 하지 않아도 되는 경우

미국 및 일본의 내진시방서에서는 액상화 예비평가를 우선적으로 제시함으로써 합리적인 내진설계

절차를 정립하고 있다. 각 내용을 종합분석하여 국내 여건 및 발생지진규모에 적합하도록 액상화 평가를 하지 않아도 되는 경우를 정리하면 다음과 같다.

- 지진구역 II에서의 내진 2등급 구조물
- 지하수위 위의 지반
- 표준관입저항치(N)가 15이상인 지반 (신윤섭 등, 1999)
- 평가대상지반심도가 20m이상인 지반
- 소성지수(PI)가 10이상이고 점토성분이 20% 이상인 지반
- 현장상대밀도가 80%이상인 지반
- 경암, 연암, 보통암 또는 조밀한 사질토 지반

### 3.2.2 지진의 전단응력비 산정

2.2절의 여러 평가방법에서 국내 적용에 가장 적합한 방법은 Seed와 Idriss 방법이다. (김수일, 1998) 그러나, 표 2.1의 Seed와 Idriss 방법에서 지진에 의한 전단응력비 산정시 이용되는 응력감소계수의 일반적인 값의 범위는 다음의 그림 3.1과 같다.

그림 3.1은 지표면을 기준으로 지반심도가 깊어 질수록 지진의 전단응력이 감소되는 비율을 나타낸 것이며 이들의 평균값을 점선으로 표현하고 있다. 특히, 표 2.1의 응력감소계수 산정식은 평균값의 내용을 이용하고 있다. 그러나, 그림 3.1에 나타난 바

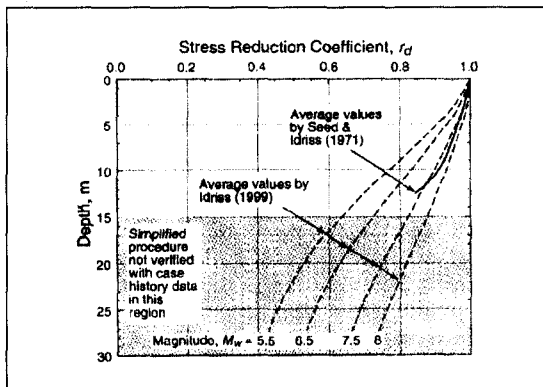


그림 3.1 응력감소계수의 범위 (Andrus 등, 2000)

와 같이 평균값이 전반적인 경향을 표현하기에는 부족한 면이 많아 해석의 신뢰도를 낮추고 있다. 따라서, 본 강좌에서는 지표면 최대가속도와 응력감소계수 등을 통해 해당지층의 전단응력을 계산하는 Seed와 Idriss의 간편법보다 정확하게 해당지층의 전단응력을 산정하고자, 지진응답해석을 통해 산정된 평가대상지층의 최대가속도( $a_{depth}$ )를 이용하는 방법을 채택하였으며 그 산정식은 다음과 같다.

$$\frac{\tau_e}{\sigma'_v} = 0.65 \times \frac{a_{depth}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (1)$$

여기서,  $a_{depth}$ 는 지진응답해석을 통해 산정된 평가대상지층의 최대가속도이다.

지진응답해석은 입력된 지반의 동적물성(변형률 수준별 전단계수 및 감쇠비)을 토대로 파의 전파특성을 해석하는 것으로 1972년 개발된 1차원 해석프로그램인 Shake는 1991년 Shake91 프로그램으로 수정완료되어 널리 이용되고 있다. 최근에는 Shake91 프로그램에 기초한 여러 범용 프로그램이 입출력부분의 시각화를 통해 사용자 편의위주로 개발되고 있는 실정이다. 지진응답해석 프로그램을 이용한 지반 내 지진의 거동변화를 정확하게 해석하여 이를 토대로 지진에 의한 전단응력비를 산정하는 것이 합리적으로 액상화 평가의 정확성을 크게 높일 것으로 판단된다. 특히, Hyogoken-Nanbu 지진피해(1995)의 경우, 연안의 매립지반에서 지반 내 큰 지진증폭현상에 기인한 액상화 피해가 발생한 점에 기인하여, 국내에서도 화강풍화토로 구성된 내륙지역보다는 연안의 매립지반에서의 액상화 발생가능성이 높을 뿐만 아니라 대부분의 매립지반이 지진증폭이 활발한 연약지반 위에 조성된 점이 고려되었다.

지진응답해석의 입력자료로는 일반적으로 실시간 이력 또는 인공지진시간이력을 이용하는데, 본 강좌에서는 「항만 및 어항시설의 내진설계표준서」에서 언급한 장주기 특성 및 단주기 특성의 실지진 시간



이력에 대한 지진응답해석을 수행하였으며, 선택된 실지진 시간이력은 일본 항만기술연구소에서 이용하고 있는 장주기 (Hachinoe 지진) 및 단주기 (Ofunato 지진) 특성의 실지진 시간이력이다. (PHRI, 1997)

### 3.2.3 간편법에 의한 액상화 저항능력비 산정

그림 2.6의 액상화 저항능력비 산정곡선은 Seed 등이 미국, 중국, 일본 등에서 발생한 지진규모 6 이상의 지진자료분석을 통해 지진규모 7.5 기준으로 작성한 것으로 실내시험결과분석을 토대로 제안된 방법보다 신뢰성이 높다. 최근, 국내 지진력을 보면, 국내 발생가능 지진규모가 7.5 수준보다 작을 것으로 예상되므로 이에 대한 보정을 수행하여야 한다. 본 강좌에서는 우선적으로 그림 2.6의 액상화 저항능력비 산정곡선의 사용과 함께 지진자료통계를 토대로 Seed 등이 제안한 표 3.2의 지진규모 보정계수를 사용할 것을 제안하며, 일시적으로 지진규모 6.5를 국내 설계지진규모로 선택하고 이에 대해 보정계수를 산정하였다. 지진규모 6.5에 해당하는 지진규모 보정계수는 1.17이며 표 3.2는 본 강좌를 통해 제안된 국내 액상화 평가 간편법에 대한 내용을 나타내고 있다.

표 3.2 국내 액상화 평가 간편법

$\tau_a/\sigma_v = 0.65 \times a \times \alpha_v \times r_d / (g \times \alpha_s)$ a: 장주기 및 단주기 특성을 포함한 실지진 시간이력에 대한 지진응답해석결과, 산정된 평가지층 최대가속도	그림 2.6의 액상화 저항능력비 산정곡선 적용 후 지진규모 보정계수 1.17를 곱하여 산정	지진응답해석프로그램 이용 해당지층 최대가속도 산정 (감소계수 사용안함) 허용안전율 : 1.5
--	--	---

### 3.2.4 상세예측법에 의한 액상화 저항능력비 산정

진동삼축시험에 기초한 액상화 상세예측법은 간편법 해석결과, 허용안전율 1.5 미만으로 안전성이 확실치 않거나 해석대상지반이 내진 1등급과 같은

중요 구조물이 건설될 지반에 대해 적용하는 것이 경제적이며 합리적인 해석방법일 것으로 판단된다. 액상화 상세예측법에서 지진에 의한 전단응력비는 간편법과 동일하게 산정하며, 액상화 저항능력비는 진동하중으로 재하하는 전단응력비 수준을 3회이상 변화시켜가며 진동삼축시험을 수행한 후, 표 2.4의 Seed와 Idriss의 보정내용을 이용하여 산정한다. 진동삼축시험시 시험대상시료의 경우, 비교란시료의 채취가 매우 어려울 뿐만 아니라 경제적 지출도 크므로 현장지반의 상대밀도를 고려한 재생형시료를 이용하는 것도 무방할 것으로 판단된다. 표 3.3은 액상화 상세예측법의 액상화 저항능력비 산정에 관한 내용을 정리한 것이다.

표 3.3 국내 액상화 상세예측법 (최재순 등, 1999)

표 3.2의 내용과 동일	진동 전단응력비 0.15-0.35 범위에서 3회의 진동삼축시험 수행 후, 시험결과보정을 통해 도시된 발생 진동재하횟수 재하하중 전단응력비 곡선상의 재하횟수 10회시의 값을 지진규모 6.5시의 액상화 전단응력비로 산정
---------------	--

### 3.2.5 안전율 산정

최종적인 액상화 평가는 안전율을 산정함으로써 수행된다. 일본의 경우, 액상화 평가시 약간의 발생 가능성에 대해서도 진동삼축시험 및 진동대시험의 수행을 통해 해당지반의 액상화 현상을 검토한다. 이를 국내 적용할 경우, 지진발생규모를 비교해 볼 때, 큰 경제적 손실이 예상됨에 따라 간편법 및 상세예측법에서의 허용안전율 규정을 통해 합리적인 평가를 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 본 강좌에서는 간편법의 경우, Eurocode8(1998)에서 채택하고 있는 1.5의 값을 사용하고 상세예측법의 경우, 선행된 간편법 평가에 따른 추가적인 평가수행이므로 1.0의 값을 사용하는 것이 경제적이며 합리적일 것으로 판단되며, 이 내용은「항만 및 어항 시설의 내진설계표준서」에 액상화 안전율 산정에 적용하고 있다.

### 4. 국내 매립지반의 액상화 평가에

본 강좌에서는 국내 적용성 여부를 분석하고자 국내 00지역의 매립지반에 건설될 흙 구조물을 대상으로 선정하고 3장에서 소개한 지진규모 6.5 기준의 액상화 평가방법과 Seed와 Idriss의 평가방법을 이용하여 액상화 평가를 수행하였다. 해석에 이용된 흙 구조물 및 지반형태와 지반조건은 그림 4.1과 같으며 이때, 지하수위는 액상화 발생가능이 높은 지표에 위치한 것으로 정하였다.

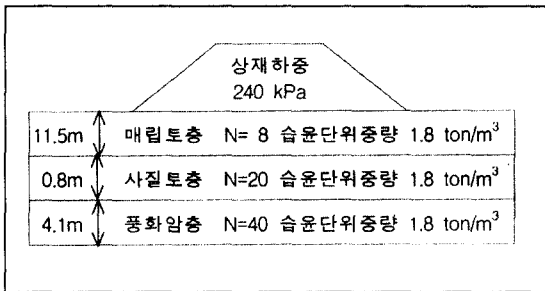


그림 4.1 해석대상 구조물의 형태 및 지반조건

그림 4.1의 해석단면을 대상으로 지진에 의한 전단응력비 산정시 이용되는 해당지층별 최대가속도를 Shake91 프로그램을 이용하여 산정하였으며, 이때 실지진 시간이력(3.2.2절)을 입력하였다. 보통 암에서의 최대가속도 수준은 건설교통부 주관으로 제정된 내진설계기준(Ⅱ)의 내용을 토대로 붕괴방지 내진 2등급 수준을 적용하였다. 이때, 이용된 자료는 그림 4.2의 재현주기 500년 주기시의 지진재해도로 울산지역의 가속도수준은 0.09이다. 또한, 입력자료로 사용되는 변형률 수준별 동적물성은 실제 원지반에서의 탄성과 탐사와 실내시험인 공진주 시험 및 진동삼축시험을 토대로 입력하는 것이 원칙이나 대개의 경우, 이에 대한 많은 시험결과를 분석하여 여러 조건별 변화곡선을 제안한 연구결과를 사용하는 것이 일반적이다. 본 강좌에서는 Shake91에서 기본적으로 제공하고 있는 Seed의 연구결과를 입력하였다.

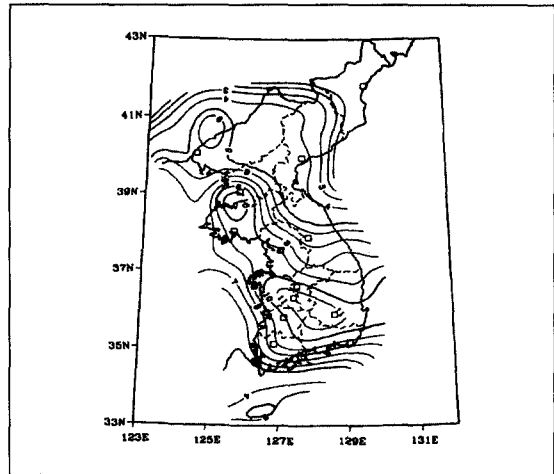


그림 4.2 평균재현주기 500년의 지진재해도 (건설교통부, 1997)

(50년내에 발생확률 10%에 해당하는 가속도계수(%g)) 점선:도경계 도법:UTM

□ : 도시 (청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천, 서울, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)

그림 4.3은 Shake91을 이용한 지진응답해석 결과를 나타내고 있으며, 그림 4.4는 그림 4.3의 결과 중 최대값을 입력하여 구조물의 중심부와 끝단부에 대해 각 지층별로 산정한 액상화 평가안전을 나타내고 있다.

그림 4.3의 결과들을 보면, 최대가속도가 0.09g로 입력된 지진이 전반적으로 매립토층에서 증폭현

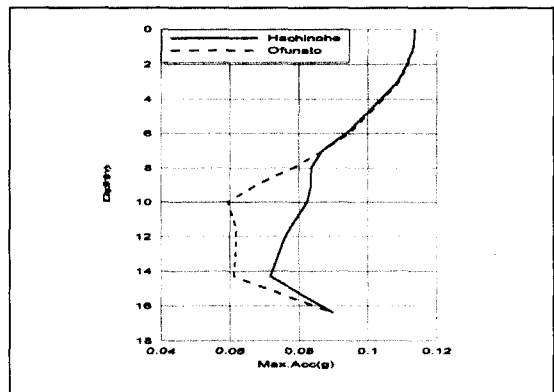


그림 4.3 Shake91 프로그램의 지진응답해석결과

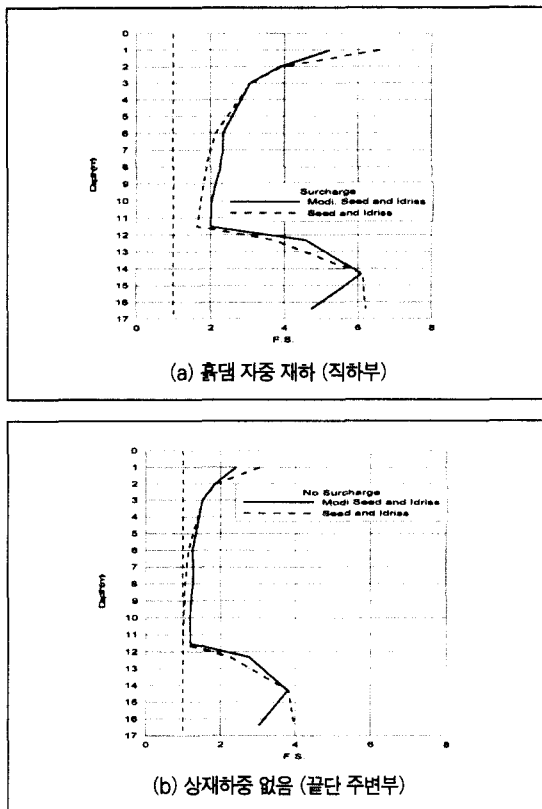


그림 4.4 액상화 간편법 평가안전율

상이 일어나 최종적으로 25%가량 증폭하여 지표면에서는 약 0.11g로 나타났다. 주기특성별 지진증폭 예측결과를 보면, Ofunato 항 지진이력이 전반적으로 매질에 따른 변화정도가 심하였으며 특히, 풍화암에서 크게 감소되었고, 지표부터 지표하 6m에서는 두 지진의 증폭현상이 유사한 경향을 나타내었다.

그림 4.4는 구조물 직하부와 끝단주변부에 대해 액상화 평가를 수행한 결과로 각 그림에서 곡선은 지진응답해석결과에서 각 지층별 최대가속도값을 식(1)에 입력한 결과와 지표면 최대가속도와 감소계수를 이용하는 기존 Seed와 Idriss 방법에 의한 결과를 나타내고 있다. 그림 4.3의 각 지층별 결과를 보면, 11m 부근의 매립토층 및 사질토층 결과는 유사한 경향이 나타난 반면, 풍화암에서의 결과는

반대의 경향을 보여주고 있다. 이는 기존 Seed와 Idriss의 방법에서는 감소계수를 통해 평가대상지층이 깊어짐에 따라 지표면 최대가속도를 일률적으로 감소시키나 지진응답해석에서는 지반 내의 지진파의 거동변화를 정량적으로 분석할 수 있기 때문이다. 또한, 액상화 발생가능성이 높은 매립토층의 평가결과를 보면, 본 평가방법의 평가안전율이 기존의 평가결과보다 다소 크게 산정되었다. 따라서, 본 평가방법은 지진응답해석의 이용에 기인한 평가의 신뢰성 향상과 더불어 내진 안전성에 기초한 경제적 비용지출에 있어서도 양호할 것으로 판단된다.

전반적으로 상재하중이 작용하지 않는 흙 구조물 끝단주변부 지반심도 4-11m의 평가안전율이 본 강좌에서 제안한 허용안전율 1.5보다 작게 나타났으며 구조물 직하부의 경우에는 상재하중의 영향으로 안전율이 전반적으로 1.5보다 크게 나타났다. 따라서, 본 강좌에서는 추가적인 액상화 평가를 위해서 지반심도 4-11m의 유효상재압과 매립토층의 표준관입저항치를 실내시험에 고려하기 위하여 시험시 유효구속압은 평균값 70kPa을 적용하였으며 표준관입저항치 8은 상대밀도 50%로 고려하여 진동삼축시험을 수행하였다. 이때, 표준관입저항치와 상대밀도와의 상관관계는 Gibbs와 Holtz(1957)가 제안한 다음의 식 (2)를 이용하였다.

$$D_r = \left[ \frac{N_{SPT}}{23\sigma'_{3c} + 16} \right]^{0.5} \quad (2)$$

여기서,  $N_{SPT}$ 는 표준관입저항치 N치이며  $\sigma'_{3c}$  유효상재압으로 단위는  $\text{kg/cm}^2$ 이다. 본 강좌에서는  $N_{SPT}$ 의 에너지효율을 60%로 고려하였으며 이는 박용원(1994) 등이 연구한 결과에 따르면 일반적인 도넛햄머의 에너지효율 50%보다 크게 고려한 것으로 안전측의 결과를 줄 것으로 판단된다. 기타 진동삼축시험시 제반사항은 표 4.1에 나타난 바와 같으며 이때, 실내시험결과에 대한 보정계수는 표 2.4의 내용을 토대로 안전측의 값인 0.9로 정하였다.

표 4.1 진동삼축시험시 제반사항

	1.3mm
	1.35
	1.14
	포화비배수
	수중침강
	응력제어 정현하중
	1Hz
	C.K.Chen Type

진동삼축시험결과를 보정한 후, 재하횟수와 전단 응력비와의 관계를 나타내면 다음의 그림 4.5와 같으며 최종적으로 산정된 상세예측법 평가안전율은 다음의 표 4.2에 나타난 바와 같다.

상세예측법 결과, 평가안전율이 허용안전율 1.0 이상인 것으로 나타남에 따라 최종적으로 본 해석대상지반은 지진규모 6.5 수준의 지진발생시 액상화에 대해 안전할 것으로 판단된다.

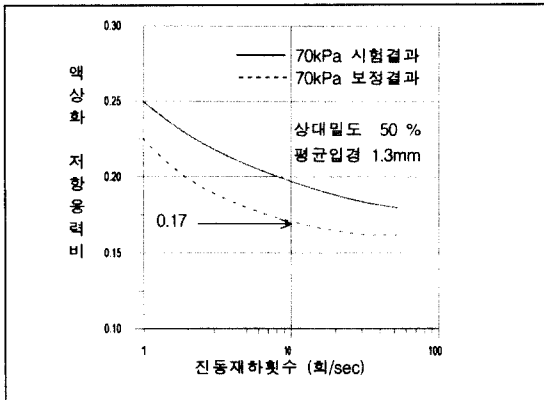


그림 4.5 진동삼축시험결과를 토대로 작성한 액상화 저항응력비 산정곡선

표 4.2 액상화 상세예측법 평가결과

	유효구속압 70kPa
	상대밀도 50%
	0.104 ~ 0.137
	( $d_{depth}$ : 0.080~0.105)
	지진규모 6.5를 고려한
	진동재하횟수 10회 : 0.17
	1.24~1.63

## 5. 결론 및 향후 액상화연구 방향

본 강좌에서는 미국, 일본, 그리고 유럽의 액상화 평가방법에 대한 문헌연구를 통해 각 방법의 특징들을 분석하고 지진규모 고려가 가능한 Seed와 Idriss의 방법을 수정보완하여 국내 여건에 적합한 액상화 평가기법을 소개하였다. 본 강좌를 통해 소개된 방법은 지진응답해석을 토대로 산정한 지진에 의한 전단응력비와 간편법 및 상세예측법의 해석결과인 액상화 저항응력비를 각각 비교하여 안전율을 산정한 것이다. 특히, 상세예측법의 적용은 중요 구조물인 경우와 간편법 평가안전율이 허용안전율 1.5미만인 경우로 제한함으로써 합리적인 액상화 평가절차를 통한 내진설계의 안전성을 도모하였다.

향후 국내 액상화연구의 발전방향을 정리하면 다음과 같다.

- 유효응력개념의 액상화평가기법 및 해석 프로그램의 개발,
- 국내 매립지반에 대한 GIS를 이용한 액상화 재해도 구축,
- 액상화 후의 지반강도특성 변화에 대한 연구 등이다.

### 참고문헌

1. 건설교통부(1997), 내진설계기준 개발 연구(II), pp. 29-41.
2. 김수일 (1998), 국내 액상화 현상의 평가 및 대책 ; 초청강연, 1998년도 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 3-30.
3. 박용원, 이호춘 (1994), 표준관입시험의 해머별 에너지 비교, 1994년 학술발표회 논문집(I), 대한토목학회, pp. 821-824.
4. 신윤섭, 박인준, 최재순, 김수일 (1999), 국내 발생 지진 규모를 고려한 액상화저항강도 산정 ; 韓國地盤工學會論文集, 한국지반공학회, 제 15권 제 6호, pp. 307-318.

5. 최재순, 박인준, 김수일 (1999), 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가 : 1999년 춘계 학술발표회, 한국지진공학회, pp. 77-84.
6. Andrus, R. D. and Stokoe, K. H. (2000), Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.109, No.3, pp. 458-482.
7. European Committee for Standardization (1998), Eurocode 8.
8. Gibbs, H. J. and Holtz, W. G. (1957), Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing, Proceedings Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
9. Idriss, I. M., and Sun, J. I. (1992), User's Manual for Shake91, NISEE.
10. Kramer, S. L. (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, pp. 348-422.
11. Port and Harbour Research Institute (1997), Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, A. A. Balkema. pp.31-117, pp. 239-267.
12. Seed, H. B., and Carter, D. P. (1988), Liquefaction Potential of Sand Deposits under Low Levels of Excitation, EERC, UCB, EERC-88/11. pp. 101-133.
13. Seed, H. B., and Idriss, I. M. (1971), Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.97, No.9, pp. 1249-1273.
14. Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, I. (1983), Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.109, No.3, pp. 458-482.

## 회비 납부 안내

학회 사무국에서는 연중 수시로 학회비를 수납하고 있으나 회원여러분의 적극적인 협조를 부탁드립니다. 문의사항이 있으면 사무국(담당 : 양윤희)으로 연락하여 주시기 바랍니다.

### ① 은행 무통장(타행) 입금

- ◆ 한국주택은행
- ◆ 계좌번호: 534637-95-100979
- ◆ 예금주: 한국지반공학회

※ 입금시 보내시는 분의 성명, 회원번호, 송금명세를 기입해서 납부하시기 바랍니다.