

국내 발생 지진규모를 고려한 액상화저항강도 산정

Evaluation of Liquefaction Strength Based on Korean Earthquake Magnitude

신 윤 섭^{*1}
Shin, Yun-Sup

박 인 준^{*2}
Park, Inn-Joon

최 재 순^{*3}
Choi, Jae-Soon

김 수 일^{*4}
Kim, Soo-II

Abstract

The purpose of this study is to utilize conventional procedures for evaluation of liquefaction potential and to compare the results obtained by modified detailed method based on Korean earthquake magnitude ($M=6.5$). Liquefaction potential is assessed by comparing liquefaction strength of soil and cyclic shear stress generated in the soil layers during earthquakes. The cyclic shear stress is computed from the earthquake response analysis, and liquefaction strength of soil is evaluated by using results from cyclic triaxial tests. The cyclic triaxial tests are performed on many different conditions of sample; relative densities(50%, 60%, and 70%), initial effective confining pressures (70kPa, 100kPa, and 150kPa), and fine contents(10%, 20%, and 30%).

From the result of comparing the conventional procedure with the modified detailed method, it is found that the modified detailed method tends to evaluate larger safety factor against liquefaction in the weak sand site($FS \leq 1.5$). Therefore in this case, it is suggested that liquefaction potential should be evaluated by using the modified detailed method based on cyclic triaxial tests. It is also found that in modified detailed method based on earthquake magnitude 6.5, critical depth where liquefaction can be generated is around 15m from the ground surface.

요 지

본 연구에서는 기존의 액상화 평가방법과 국내의 지진규모($M=6.5$)를 고려한 수정 상세예측법을 비교 분석하였다. 액상화 발생 가능성은 흙의 액상화 저항강도와 지진에 의해 토층내에 유발되는 전단응력을 비교하

*1 연세대학교 대학원 토목공학과 석사과정

*2 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사후 과정(Post Doc.)

*3 연세대학교 대학원 토목공학과 박사 과정

*4 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

여 평가하였다. 지진에 의한 전단응력은 지진응답해석을 이용하여 산정하며 흙의 액상화 저항강도는 진동삼축시험결과를 이용하여 산정한다. 진동삼축시험은 상대밀도(50%, 60%, 70%)와 초기유효구속압(70kPa, 100kPa, 150kPa) 그리고 세립분함유량(10%, 20%, 30%)을 변화시키며 시료를 재성형하여 수행하였다.

기존의 액상화 평가방법과 수정 상세 예측법 결과를 비교해 볼 때, 수정 상세 예측법은 연약한 사질토 지반($FS \leq 1.5$)에서 액상화 안전율을 기존 평가방법에 비하여 크게 산정하는 것으로 나타났다. 본 연구결과를 토대로 액상화 발생가능성 판정시, 진동삼축시험에 기초한 수정 상세 예측법을 이용하도록 제안하였다. 또한 국내 발생 지진규모 6.5를 고려한 수정 상세 예측법에서의 액상화가 발생할 수 있는 최대심도는 약 15m인 것으로 나타났다.

Keywords : Liquefaction, Cyclic shear stress, Liquefaction strength of soil, Cyclic triaxial test, Relative density, Initial effective confining pressure, Fine content

1. 서 론

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 있다. 따라서 연약한 매립지반에 구조물을 축조할 경우 해당지반의 지진 및 지역특성을 고려하여 액상화 현상을 예측하고 이에 대한 안전성을 검토하며 이러한 결과를 바탕으로 내진설계기준을 수립해야 한다. 우리나라는 발생 가능한 지진특성이 미국, 일본과는 크게 다름에도 불구하고 액상화 평가시 미국 및 일본 규정을 수정 보완 없이 그대로 이용하는 경우가 많음에 따라 이를 기초로 한 구조물의 내진설계 및 시공은 매우 비효율적이고 비경제적인 결과를 초래할 것이라 판단된다. 따라서 국내 지반에 대한 액상화 평가는 우리나라의 지진특성과 지반의 증폭특성을 고려해야 하며 본 연구에서는 중진도 지진규모 6.5를 기준으로 국내 액상화 현상에 대한 평가기준 및 개선방안을 제시하였다.

2. 액상화 현상 및 액상화 평가방법

2.1 액상화 현상

포화 사질토의 경우, 외력이 작용하기 전에 토립자들은 상호접촉상태에 있으며 입자간의 상호접촉을 통해 외력이 전달된다. 사질토 지반은 이와 같은 원리로 전단 저항력을 가지게 된다. 지진과 같은 급속재하 하중에 의해 발생된 전단력은 사질토체에 변형을 일으킨다. 그러면 본래 수직방향으로 지지하던 접촉점들이 분리되며 간극수압이 발생하게 된다. 이와 같은 현상을 액상화라 한다. 이 상태가 되면 전단저항을 잃은 사질토는 포화사질토의 단위중량을 가지는 액체와 같이 거동하게 된다. 액상화가 발생한 이후, 토립자는 재구성되고 간극수압은 감소하여 토체는 다시 안정화를 이룬다(post-liquefaction). 이때 체적변화는 소산된 간극수의 체적과 같다. 토체의 이와 같은 변화과정을 그림 1에 도시하였다.

그림 1 (a)는 지진력이 가해지기 전에 느슨한 사질토지반을 나타내고 있으며 (b)는 지진력이 가해졌을 때 지반에 전단변형이 일어나며 과잉간극수압이 발생하는 순간, 즉 액상화가 발생한 순

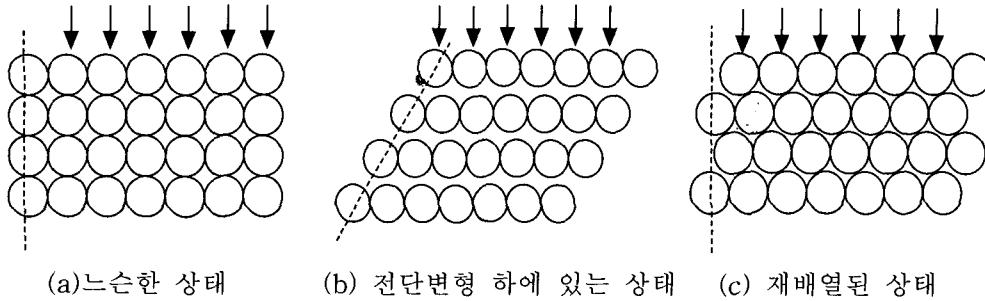


그림 1. 액상화 발생과정에 따른 사질토 입자배열변화 모식도

간의 모습을 나타낸 그림이다. (c)는 액상화발생 후 과잉간극수압이 소산되고 지반침하가 발생하여 다시 강도를 회복한 상태를 나타내었다.

2.2 액상화 평가 방법

일반적으로 미국, 일본의 액상화 평가방법은 많은 지진자료 및 실내시험을 토대로 개발되었으며 현재도 계속적으로 수정보완하고 있다. 지진자료가 부족한 국내의 경우, 실내시험에 기초한 액상화 평가의 도입은 해석의 신뢰성과 더불어 여러 평가 방법 및 여러 액상화 영향인자에 대한 분석이 가능하다. 본 연구에서는 가장 보편적으로 이용되고 있는 액상화 실내시험인 진동삼축시험에 기초한 액상화 상세예측법의 내용을 요약하여 도시한 것이다. 그림 2에서 지진시 발생하는 전단응력비는 설계지진 가속도 및 동적물성을 바탕으로 한 지진응답해석을 통해 산정하며 지반의 액상화 저항강도비는 표준관입저항치 $N_{1(60)}$ 치를 이용하여 액상화 저항강도비를 구한다. 지진응답해석은 반무한 수평지반의 지진충폭현상을 분석할 수 있는 SHAKE91을 이용하였다. 액상화 평가는 지진시 전단응력비와 지반의 액상화 저항강도비를 비교하여 액상화에 대한 안전율을 산정함으로써 수행된다. 표준관입

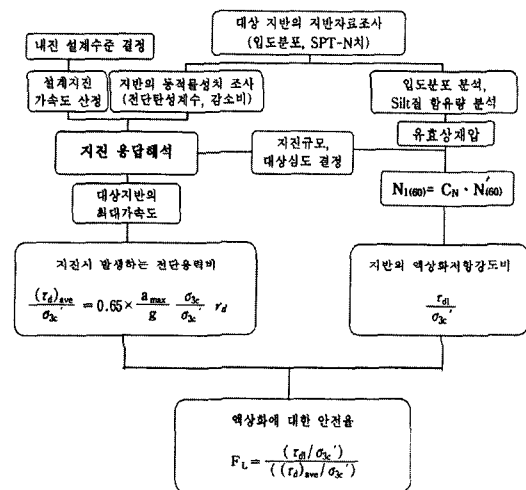


그림 2. 진동삼축시험에 기초한 액상화 상세예측법 저항치를 식 (1)을 통하여 보정하여 에너지 효율 60%를 기준으로 한 환산 N치를 산정한다.

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot N \quad (1)$$

여기서, $(N_1)_{60}$ 은 환산 N치이고, C_N 은 유효응력에 따른 보정계수로 다음의 식 (2)를 통해 산정한다

$$C_N = \sqrt{\frac{10}{\sigma_{3c}'}} \quad (2)$$

여기서, σ_{3c}' 은 평가대상지층의 유효상재압이며 단위는 ton/m^2 이다.

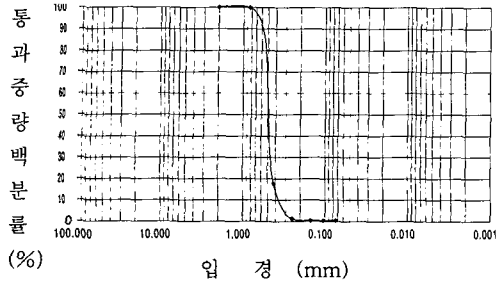


그림 3. 주문진표준사의 입도분포 곡선

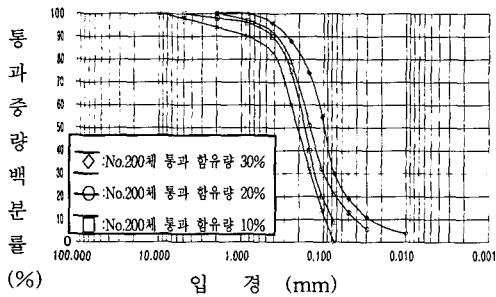


그림 4. No.200체 통과 함유량에 따른 현장시료의 입도분포 곡선

3. 시험시료의 기본물성

진동삼축시험을 수행하기 이전에 시료의 공학적인 기본물성을 파악하는 것이 중요하다. 시료의 기본적인 공학적 성질을 규명하기 위해서 주문진표준사와 현장시료에 대한 입도분포시험 및 기본물성에 대한 시험 결과를 표 1, 표 2와 그림 3 그림 4에 각각 나타내었다.

현장시료는 No.200체 통과함유량에 따라 평균입경이 0.1~0.21mm, 균등계수가 2.57~4.44 그리고 곡률계수가 1.08~1.74로 입도분포가 양호하며 불균질한 입자분포를 나타내고 있다.

4. 결과분석

4.1 진동삼축시험 결과

본 연구에서는 액상화 평가시 지반의 액상화 저항강도를 산정하기 위해 진동삼축시험을 수행하였

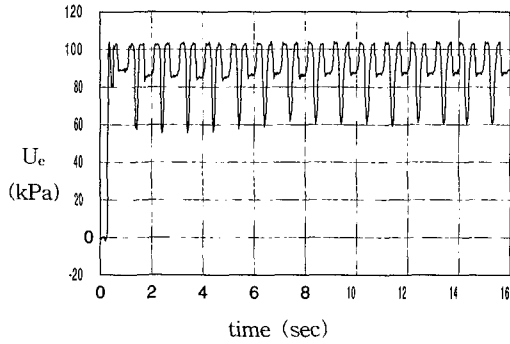
표 1. 주문진표준사의 입도분포시험 결과

입도분포		물성
최대입경 (mm)	D_{max}	0.84
최소입경 (mm)	D_{min}	0.074
통과중량백분율 10% 입경	D_{10}	0.37
통과중량백분율 60% 입경	D_{60}	0.50
평균입경	D_{50}	0.49
균등계수	C_u	1.35
곡률계수	C_c	1.14

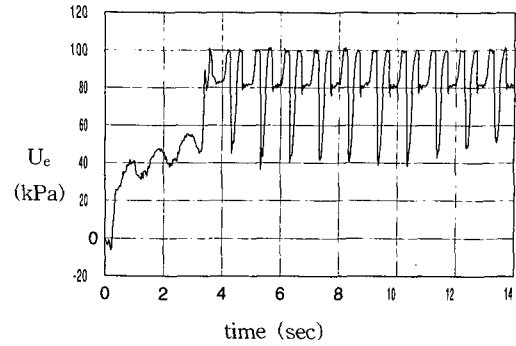
표 2. No.200체 통과 함유량에 따른 현장시료의 입도분포시험 결과

입도분포	No.200체 통과함유량	0% 10% 20% 30%			
		0%	10%	20%	30%
최대입경 (mm)	D_{max}	10.0	5.0	2.0	2.0
최소입경 (mm)	D_{min}	0.074	0.074	0.03	0.01
통과중량백분율 10% 입경	D_{10}	0.095	0.074	0.04	0.027
통과중량백분율 60% 입경	D_{60}	0.25	0.19	0.18	0.12
평균입경 (mm)	D_{50}	0.21	0.17	0.15	0.1
균등계수	C_u	2.63	2.57	4.5	4.44
곡률계수	C_c	1.08	1.39	1.39	1.74
Atterberg Limits (%)	LL	N.P	N.P	19.6	19.1

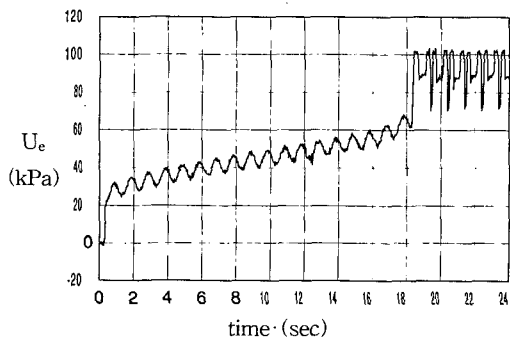
으며 현장상태를 충분히 고려하기 위해 여러 시험조건을 변화시켰다. 본 연구에서 사용된 진동삼축시험기는 C. K. Chan type의 자동화 진동삼축시험기로 여러 가지 현장조건을 재현하여 시험을 수행할 수 있다. 이 시험기는 Chan, C. K.가 처음 개발한 자동화 삼축시험기(automated triaxial testing system)이다. 시험기는 각각의 압력과 변위 및 체적변화를 5개의 변환기(transducer)로 측정하여 컴퓨터로 자동 저장시키는 자료저장 부분과 언어진 자료값에 따라 다시 컴퓨터에서 압력을 조절하여 축압과 축차응력을 제어하는 부분, 그리고 실제로 시험이 실시되는 실행부분으로 구성되어 있다. 이러한 시험기를 이용하여 우선, 중간 및 조밀한 사질토가 동적거동에 큰 차이를 나타내는 점을 고려하기 위해 시험시료의 상대밀도를



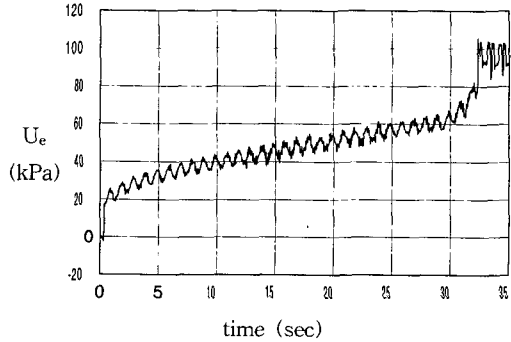
(a) 액상화저항강도비-0.3



(b) 액상화저항강도비-0.19



(c) 액상화저항강도비-0.135



(d) 액상화저항강도비-0.12

그림 5. 상대밀도 50%인 경우 진동삼축시험 결과 과잉간극수압 변화

50%, 60%, 70%로 변화시키면서 시험을 수행하였다. 또한 지반심도가 깊을수록 지반강도가 현저히 증가하는 성질을 고려하기 위해 초기유효구속압을 70kPa, 100kPa, 150kPa로 증가시켰으며 또한, 입도분포에 따른 액상화 저항강도 변화를 분석하기 위해서 주문진표준사에 No.200체 통과 시료를 일정성분 증가시켜 만든 임의의 시료와 영중도 현장시료에 대한 시험을 수행하였다. 다음의 그림 5은 상대밀도 50%, 초기유효구속압 100kPa인 경우, 주문진표준사를 대상으로 한 진동삼축시험결과 중 진동재하횟수에 따른 과잉간극수압의 변화를 나타낸 것이다.

초기유효구속압이 100kPa이기 때문에 진동하중으로 유발된 과잉간극수압이 100kPa까지 올라

간 것을 확인할 수 있다. 과잉간극수압이 초기유효구속압까지 올라간 순간 유효응력은 0이 되며 이때가 초기 액상화가 발생한 시점이라고 할 수 있다. 이러한 시험을 응력비 변화에 따라 수차례 시험한 결과, 액상화 저항강도비와 재하횟수와의 관계를 종합하여 나타내면 다음의 그림 6과 같다.

그림 6은 상대밀도 50%, 60%, 70%에 따른 액상화 저항강도비와 재하횟수와의 관계를 나타낸 곡선이다. 결과에서 볼 수 있듯이 상대밀도가 증가할수록 액상화 저항강도비도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 재하횟수는 발생하는 지진규모와 관계가 있으므로 재하횟수가 증가할수록 액상화 저항강도비는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이 곡선은 실내시험을 통해 나온 결과이므로 진동

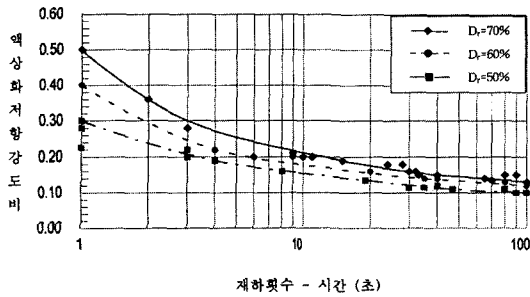


그림 6. 상대밀도변화에 따른 진동삼축시험 결과

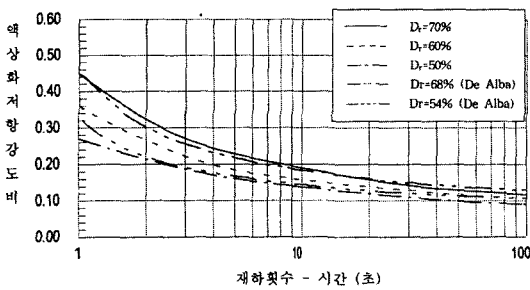


그림 7. 보정 후 상대밀도변화에 따른 진동삼축시험 결과

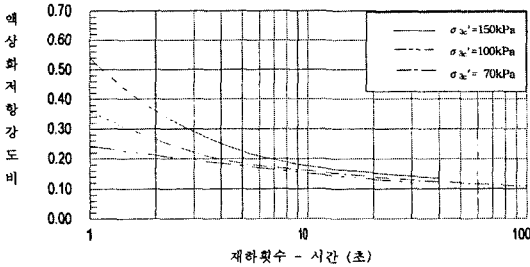


그림 8. 보정 후 초기유효구속압에 따른 주문진표준사의 액상화저항강도비

삼축시험에 대한 보정 및 현장상태에 대한 보정을 해 주어야 하며 본 연구에 이용된 보정식은 다음과 같다.

$$C_r = 0.9 \times \frac{1 + 2K_0}{3} \quad (3)$$

C_r 은 보정계수로 정지토압계수 K_0 값에 따라서 결정된다. 정지토압계수는 이용되는 Jacky의 식 $1 - \sin \phi'$ 을 일반적으로 이용하여 이때, ϕ' 값

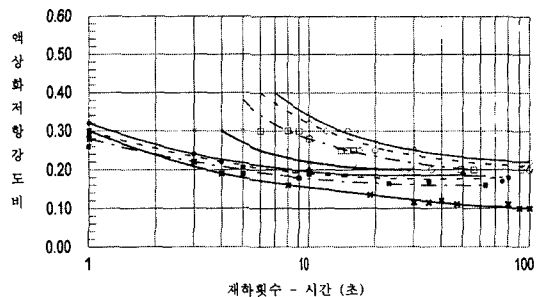


그림 9. 보정 후 No.200체 통과 함유량에 따른 주문진표준사와 현장시료의 액상화저항강도비

은 0이다. 따라서, 보정계수 C_r 값은 최종적으로 0.9가 되며 이를 이용하여 보정한 액상화 저항강도비와 재하횟수와의 관계는 그림 7과 같다.

그림 7은 보정후 진동삼축시험결과와 1976년 De Alba등이 수행한 진동전단시험결과와 비교한 것으로 본 진동삼축시험결과가 유사한 결과를 나타냄을 볼 수 있다. 최종적인 액상화 저항강도의 산정은 지진규모에 따라 소정의 재하횟수시의 값을 읽음으로 결정된다. 일본의 경우는 재하횟수 20회시의 값을, 미국의 경우 지진규모에 따라 15회시의 값을 이용한다. 이는 지진규모 7.5에 해당하는 값으로 자국의 지진특성 및 예측된 지진자료를 바탕으로 산정하여야 한다. 국내의 경우, 현재까지 이에 대한 규정은 없으며 국내지진기록과 지진특성을 고려한 지진규모 6.5시의 재하횟수를 Seed의 이론에 근거하여 선정하면 9~10회이다. 이는 1970년대부터 1995년까지 예측된 지진자료를 바탕으로 결정한 값으로 국내 발생한 지진규

표 3. 상대밀도에 따라 최종 결정된 주문진표준사의 액상화 저항강도비

구 분	상대밀도 50%	상대밀도 60%	상대밀도 70%
액상화저항강도비	0.140	0.160	0.190

표 4. 초기유효구속압에 따라 최종 결정된 액상화 저항강도비

구 분	초기유효 구속압 70kPa	초기유효 구속압 100kPa	초기유효 구속압 150kPa
액상화 저항강도비	0.151	0.160	0.175

모를 고려해 볼 때 적합하다고 판단된다. 이를 토대로 최종적으로 산정한 상대밀도에 따른 액상화 저항강도비는 다음 표 3과 같다.

초기유효구속압의 변화에 따른 주문진표준사의 시험결과와 No.200체 통과 함유량의 변화에 따른 주문진표준사와 현장시료의 시험결과를 그림 8와 그림 9에 나타내었다.

그림 8 및 그림 9에서 재하횟수 9~10회시의 값을 읽음으로써 최종적으로 산정된 액상화 저항강도비는 각각 표 4 및 표 5과 같다.

표 3 및 표 4를 보면, 상대밀도가 50%, 60%, 70%로 증가할수록, 초기유효구속압이 70kPa, 100kPa, 150kPa로 증가할수록 액상화 저항강도비가 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 표 5에서는 No200체 통과 함유량이 10%, 20%, 30%로 증가할수록 액상화 저항강도비가 커지고 있으며 이를 통해 입도분포가 좋은 현장시료가 저항강도의 증가로 액상화 발생이 어려워짐을 나타내고 있다.

4.2 현장시험을 통한 액상화 저항강도 산정

미국, 일본의 내진설계기준을 보면, 액상화 저항강도를 산정하기 위한 도표 및 수식들이 실무에서 보편적으로 사용하고 있는 에너지효율 60%시의 표준관입저항치 $N_{I(60)}$ 과 콘 관입저항치의 항으

표 5. No200체 통과 함유량의 변화에 따라 최종 결정된 액상화 저항강도비

구 분		No.200체 통과 함유량 0%	No.200체 통과 함유량 10%	No.200체 통과 함유량 20%	No.200체 통과 함유량 30%
액상화저항 강도비	주문진표준사	0.140	0.160	0.171	0.175
	현장시료	0.200	0.251	0.290	0.308

로 표현된 것을 볼 수 있다. 많은 진동삼축시험에 기초하여 제정된 일본 도로교 시방서를 보면, 제안된 액상화 저항강도 산정식은 기본적인 물성인 평균입경 및 세립질 함유량, 유효구속압과 상대밀도와 연관된 표준관입저항치 N 의 함수로 구성되어 있다. 미국의 경우, 액상화 저항강도 곡선을 제시하고 있는데 이는 지진자료 및 실내시험을 토대로 상대밀도와 연관된 표준관입저항치 $N_{I(60)}$ 과 액상화 저항강도의 관계를 세립질 함유량별로 도시한 것이다.

본 연구에서는 진동삼축시험결과의 비교분석을 위해 여러 조건별 상대밀도의 변화에 따른 결과들을 표준관입저항치와 연관하여 표현하였으며 이때, 이용된 상대밀도와 표준관입저항치와의 상관관계식은 Gibbs와 Holtz의 식이다. 이 식은 낮은 지반심도에서 상대밀도에 따른 표준관입저항치를 작게 산정하게 됨으로 비교적 안전한 해석결과를 도출하며 특히, 상대밀도가 높지 않은 경우에 적합한 식으로 알려져 있다. 식 (4)는 Gibbs와 Holtz가 대상심도에서의 유효수직응력을 토대로 규명한 상대밀도와 표준관입저항치(N_{SPT})와의 상관관계를 표현하고 있다.

$$D_r = \left[\frac{N_{SPT}}{23\sigma'_{3c} + 16} \right]^{0.5} \quad (4)$$

여기서, N_{SPT} 는 표준관입저항치 N 치를 나타내며 상재하중으로 보정한 값을 이용한다. 상재하중에 의한 보정식은 2장에 나타내었다. σ'_{3c} 는 표준관입시험이 시행되는 곳에서의 유효수직응력으로 단위는 kg/cm^2 이다. 식 (4)를 이용하여 상대밀도로부터 표준관입저항치를 구해 여러 가지 조

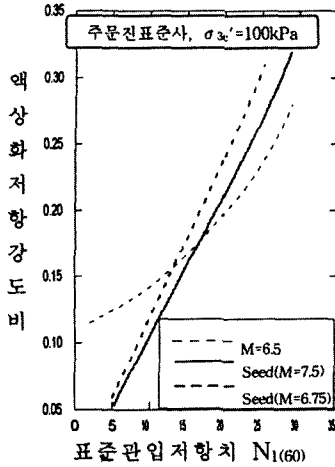


그림 10. 지진규모에 따른 액상화저항강도비 ($\sigma'_{3c}=100\text{kPa}$)

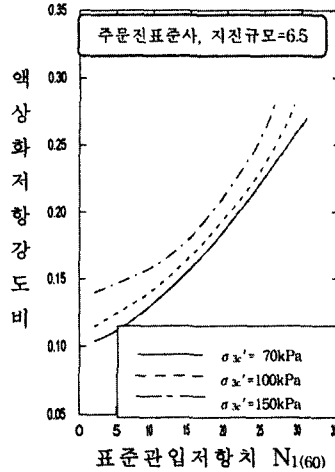


그림 11. 초기유효수직압에 따른 액상화저항강도비 (M=6.5)

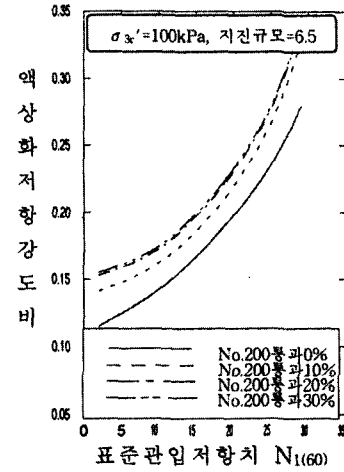


그림 12. No.200체 통과량 변화에 따른 액상화저항강도비 ($\sigma'_{3c}=100\text{kPa}$, M=6.5)

건에 따른 표준관입저항치 $N_{1(60)}$ 과 액상화 저항강도와의 관계를 도시하면 그림 10~그림 12와 같다.

그림 10~그림 12를 이용하여 산정한 액상화 저항강도와 지진에 의한 전단응력과 비교를 통해 최종적인 액상화 가능성을 평가할 수 있다.

5. 대상지반의 액상화 평가

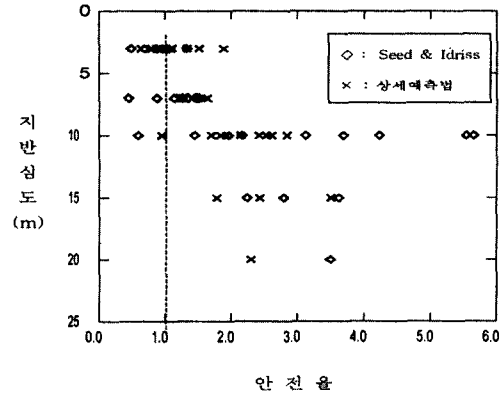
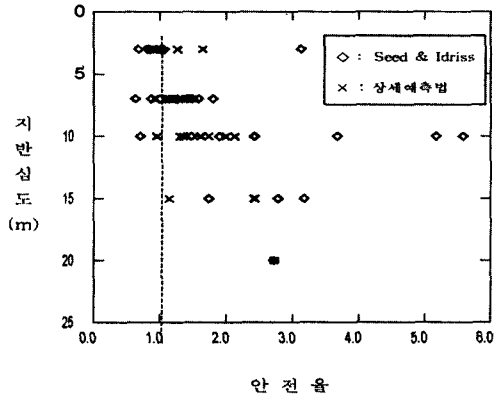
본 연구에서는 지진응답해석과 진동삼축시험을 이용하여 산정한 지진시 전단응력과 액상화 저항강도와의 비교를 통해 액상화 가능성을 평가하는 액상화 상세 예측을 수행하였다. 상세예측법을 이용한 액상화 평가에서는 인천국제공항 건설부지인 영종도 연약지반을 대상으로 선정하였다. 또한, 대상지반에 대한 기존의 경험적 액상화 평가를 수행하고 이를 본 연구에서 제시한 액상화 평가결과와 비교 분석하였다. 선정된 영종도지역 대상지반의 지반조사자료를 분석하면 크게 세 가지로 분류되며 실트질을 함유한 사질토 지반, 대부분 사질토로 이루어진 지반, 그리고 점성토층 위

에 사질토층이 존재하는 지반이다. 기본물성시험을 통해 나타난 사질토와 실트질 사질토의 단위중량은 $1.76\sim 1.90\text{ton/m}^3$ 정도이며 점성토의 단위중량은 $1.85\sim 2.1\text{ton/m}^3$ 정도로 나타났다. 액상화 평가에 이용된 내용을 요약하면 다음의 표 6과 같다. 액상화 평가는 세 지역으로 분류된 지반 동일 심도의 여러 지점에 대해 수행하였으며 특히, 국내 지진규모를 고려하여 지진규모 6.5를 기준으로 평가를 수행하였다. 평가결과를 종합하여 도시하면 다음의 그림 13~15과 같다.

그림 13의 Site1은 실트질이 함유된 사질토 지

표 6. 대상지반 액상화 평가시 조건

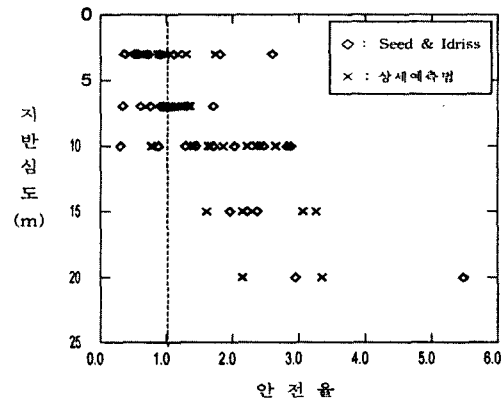
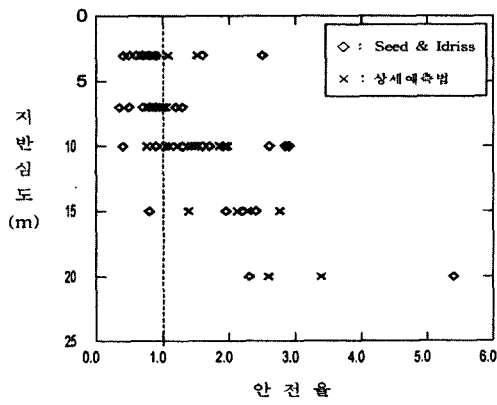
조 건	대상 지반
설계지진가속도	0.11g (지진구역 I, 2등급, 붕괴방지수준)
설계지진규모	6.5, 7.5
지진파	Hachinohe, Ofunato 지진자료
지하수위	0m (지표)
평가 심도	3m, 7m, 10m, 15m, 20m
지반 종류	실트질 사질토, 사질토, 점성토



(a) Hachnohe, M=6.5

(b) Ofunato, M=6.5

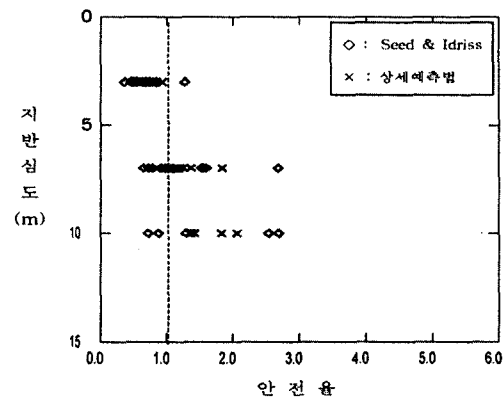
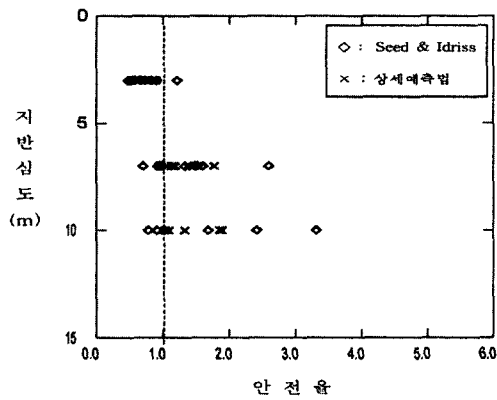
그림 13. 액상화 평가시 안전율 결과 비교 (Site1. M=6.5)



(a) Hachnohe, M=6.5

(b) Ofunato, M=6.5

그림 14. 액상화 평가시 안전율 결과 비교 (Site2. M=6.5)



(a) Hachnohe, M=6.5

(b) Ofunato, M=6.5

그림 15. 액상화 평가시 안전율 결과 비교 (Site3. M=6.5)

반에 대한 액상화 평가 결과이다. 액상화에 대한 안전율이 1.5이하인 경우, 상세예측법으로 구한 안전율이 경험적 방법으로 구한 안전율에 비해 대략 17.8%정도 크다는 것을 알 수 있다. 그림 14의 Site2는 지반이 주로 사질토로 구성된 경우이며 이러한 지반은 액상화 저항강도가 작아 비교적 작은 안전율을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. Site2도 역시 안전율이 1.5이하인 경우, 상세예측법으로 구한 안전율이 경험적 방법으로 구한 안전율에 비해 전반적으로 20% 이상 크게 나타났다. 그림 15의 Site3은 점성토 지반 위에 사질토 지반이 위치하는 경우로 그림 13의 Site1과 유사한 결과를 나타내고 있다.

전반적인 결과를 보면, 평가안전율이 약 1.5이하에서는 상세예측법이 경험적 방법에 비해 안전율을 보다 크게 산정하는 경향이 있으며 안전율이 약 1.5이상에서는 경험적 방법이 안전율을 더 크게 산정하는 것으로 나타났다. 이것은 표준관입저항치 $N_{(60)}$ 치의 변화에 따라서 결정되는 액상화 저항강도가 두 가지 방법에서 차이가 나기 때문이다. 즉, 유효구속압 100kPa을 기준으로 표준관입저항치 $N_{(60)}$ 이 12~13보다 작을 때는 상세예측법이 보다 큰 액상화 저항강도를 산정하며 표준관입저항치 $N_{(60)}$ 이 12~13보다 클 때는 경험적 방법이 액상화 저항강도를 더 크게 산정하게 된다. 국내의 경우, 큰 지진력에 의해 액상화 피해가 발생한 외국과 달리, 주로 표준관입저항치 $N_{(60)}$ 이 작은 연약지반에서 발생할 액상화에 더 큰 관심이 있으므로 국내에서는 상세예측법을 이용한 액상화 평가를 수행하는 것이 합리적이고 경제적인 것으로 판단된다. 지진응답해석시 입력지진자료에 대한 차이를 분석하기 위해 장주기인 Hachinohe 지진자료와 단주기에 해당하는 Ofunato 지진자료를 이용하였다. 입력지진파에 따른 지진응답해석 결과 지진가속도 증폭현상은 지반의 특성에 따라 다르게 나타나므로 두 가지 결과 중 큰 값을 사

용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한 그림 13~15에서 나타난 바와 같이 안전율이 1.5이하로 액상화 발생 위험성이 있는 지점은 비교적 지반 심도가 낮은 연약지반이며 그 한계심도는 약 15m 정도인 것으로 나타났다.

6. 결론

- 1) 기존에 제시되어 있는 Seed와 Idriss의 경험적 액상화 평가 방법과 진동삼축시험을 통한 상세예측법을 비교해 볼 때, 상세예측법이 초기유효구속압 100kPa을 기준으로 표준관입저항치 $N_{(60)}$ 12~13이하에서는 지반의 저항강도를 보다 크게 산정하고 있는 것으로 나타났다.
- 2) 3종류의 대상지반에 대해 액상화 평가를 수행한 결과, 안전율이 1.5이하에서는 상세예측법이 경험적 방법에 비해 대체로 안전율을 크게 산정하는 것으로 나타났다. 따라서, 경험적 방법과 상세예측법의 적절한 혼용을 통하여 합리적이고 경제적인 내진설계가 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서 선택한 대상지반에서 지진규모 6.5를 기준으로 액상화 현상을 평가한 경우, 액상화 현상은 비교적 심도가 얇은 연약한 지반에서 주로 발생하며 그 한계심도는 일본의 규정에 제시되어 있는 20m보다 낮은 15m정도인 것으로 나타났다.
- 4) 액상화 저항강도비에 영향을 미치는 지반조건으로는 상대밀도, 초기유효구속압, 입도분포 등이 있는데 이러한 영향인자 중 입도분포에 의한 영향이 비교적 크게 나타남을 알 수 있었다. 따라서, 연안의 연약지반 개량시 입도분포가 양호한 매립토를 사용하는 것이 효율적인 액상화 방지대책이 될 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 KISTEP(N2-01-A-04) “지진재해 대응기술 개발사업”과 KEERC(97K3-1301-02-03) “기초와 지반의 지진응답특성 규명연구”의 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 박인준, 신윤섭, 최재순, 김수일(1999), “기존의 액상화 평가기법 및 그 적용성에 관한 연구” 지반공학회 봄 학술발표회, pp.431~438.
2. 신윤섭(1999), “우리 나라 지진특성을 고려한 액상화 평가기법의 개선방안에 관한 연구”, 공학석사학위 논문, 연세대학교
3. De Alba, P., Seed, H. B., and Chan, C. K.(1976), “Sand Liquefaction in Large-Scale Simple Shear Tests”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. 9, pp.909-927.
4. 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.
5. Ishihara, K.(1996), Soil Behavior in Earthquake Geotechnics, Oxford University Press Inc., New York, pp.282-315.
6. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., and Yasuda, S.(1978), “A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan”, Proceedings of 5th Japan Earthquake Symposium, pp.641-648.
7. Seed, H. B. and Lee, K. L.(1966), “Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp.105-134.

(접수일자 1999. 9. 21)