

통한다. 이때, 지반의 저항응력비는 강진피해자료를 토대로 제시된 액상화 저항응력비 곡선 또는 실내 진동시험에 기초하여 작성된 액상화 저항응력비 곡선을 이용하여 설계지진규모에 따라 산정하도록 되어 있으며 지진에 의한 전단응력비는 등가전단응력개념에 기초하여 지반응답해석을 통해 산정된 평가지층의 최대가속도를 통해 산정된다. 즉, 간편평가와 상세평가는 불규칙한 지진을 간편하게 정현하중화하고 지진규모에 따라 변화된 지반의 액상화 저항특성의 최대값만을 단순비교하는 것으로 실제 지진 및 지반의 동적특성을 정확하게 반영하고 있다고 보기 어려울 뿐만 아니라, 외력의 특성에 관계없이 재료의 한계저항특성이 일정하다고 보는 재료역학의 기본개념과 차이를 두고 있다. 또한, 현행 시방내용이 미국 및 일본 등 강진지역국가의 연구사례를 토대로 작성된 것으로 한반도가 속한 중진지역에 대한 고려가 미흡하다는 지적과 함께 국내 액상화 연구는 발생가능한 중진규모의 지진에 대해 액상화 발생가능성이 높을 것으로 예측되는 연안지역의 사질토 및 매립지반을 대상으로 중점수행되어야 한다는 여론이 크게 대두되고 있다. 특히, 국내 지진관련자료가 크게 부족한 점을 들어 동역학적 실험연구를 통해 계속적으로 수정보완되는 것이 효율적인 연구수행의 기초가 될 것이라는 점도 함께 강조되고 있다.

본 연구에서는 기존 액상화 상세평가법의 역학적 불합리성 및 국내 부적합성을 보완하기 위하여 보편적으로 수행되는 실내진동시험결과로부터 액상화 발생메카니즘을 분석하여 새롭게 지반거동의 변화상태를 분류하고 이를 토대로 변형률 및 과잉간극수압 시간이력, 응력-변형률 상관관계, 그리고, 유효응력경로 등의 다양한 진동시험결과를 이용한 새로운 개념의 액상화 평가법을 제안하고자 한다. 제안된 평가법에서는 지반의 한계저항 소성변형과 다양한 실지진 시간이력 입력의 지반응답해석을 통해 예측된 변형률 시간이력으로부터 발생가능한 소성변형을 비교함으로써 액상화 평가를 수행하도록 하였다.

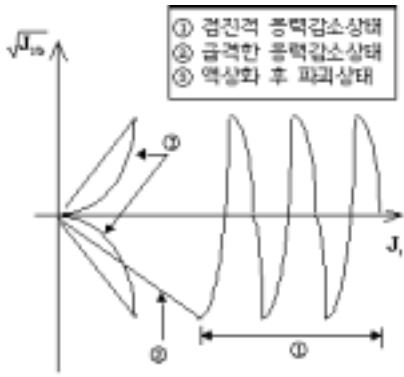
2. 실내진동시험에 기초한 액상화 평가방법

실험적 액상화 평가에 이용되는 실내진동시험으로는 진동삼축시험, 진동전단시험, 그리고 비틀전단시험 등이 있으며 국내의 경우, 진동삼축시험기가 일반적으로 가장 많이 보급되어 있다. 제조회사별로 다소 차이가 있지만, 공통적으로 변형률 및 과잉간극수압 시간이력, 응력-변형률 상관관계, 유효응력경로 등 액상화 예측과 관련된 자료의 획득이 가능하다. 그러나, 국내 및 해외에서 실내진동시험을 이용한 액상화 평가의 경우, 다양한 자료의 이용이 가능함에도 불구하고 단순하게 전단응력수준을 달리한 3회의 액상화 발생 실내진동시험에서 최대전단응력과 액상화 발생시 재하횟수만을 이용하고 있다.

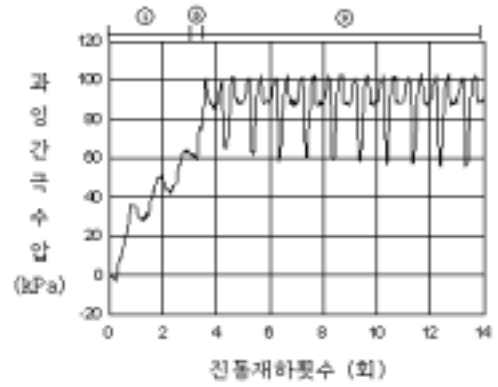
본 연구에서는 실내진동시험시 비배수조건의 과잉간극수압의 변화에 기인하는 액상화 거동이 진동하중으로 발생하는 교란도의 증가 및 누적 소성변형과 관계가 있음(최재순 등, 2002)과 유효응력경로를 통해 나타난 지반의 동적거동이 보여주는 규칙적인 상태변화(최재순 & 김수일, 2003)에 기초하여 액상화 저항특성을 표현하였다.

2.1 액상화 발생메카니즘

일반적으로 정현하중입력의 실내진동시험시 토립자 내부의 응력변화 및 과잉간극수압의 동적 거동변화를 살펴보면 그림 1과 같으며 지반의 동적거동변화는 3부분(①점진적 응력감소상태 ②급격한 응력감소상태, ③액상화 후 파괴상태)으로 구분된다. 즉, 진동하중이 작용함에 따라 과잉간극수압의 점진적 증가로 인해 지반이 보유한 유효응력은 서서히 감소하다가 순간적으로 일정상태에 도달하게 되면 과잉간극수압이 급격히 발전하면서 액상화 상태에 이르게 된다. 이론적으로는 액상화 발생이 유효응력의 상실, 즉 유효응력이 0이 되는 시점으로 정의되고 있으나, 실험을 통해 나타난 액상화 현상은 유효응력이 소정의 상태에 도달했을때, 급격한 과잉간극수압의 증가로 인해 유효응력이 상실되기 시작한다. 이와 관련한 연구사례로 교토대학의 Iai(1992)는 점진적 응력감소상태에서 액상화 상태로 전이되는 현상이 상태전이선(phase transformation line)과 관련이 있음을 정의하고 상태전이선과 유효응력경로가 만나기 전까지의 거동을 액상화 전(liquefaction front)로 구분한 바 있다. 이상의 내용을 토대로 액상화 발생은 유효응력이 완전히 상실되기 전, 순간적으로 급격한 응력감소의 발생을 전제로 한다고 볼 수 있다.



(a) 유효응력경로



(b) 과잉간극수압

그림 1 진동하중을 받는 등방구속하의 포화사질토의 거동 (최재순 & 김수일, 2003)

2.2 액상화 평가방법의 개요

본 연구에서는 그림 1과 같은 액상화 발생메카니즘에 기초하여 유효응력경로 상에서 뚜렷하게 구분되는 급격한 응력감소상태의 시작점으로부터 지반의 액상화 한계저항특성을 정의하였으며 이때, 지반의 액상화 저항특성은 식 (1)과 같이 나타난 누적소성전단변형을 통해 나타내었다.

$$\xi_{\gamma r} = \sum_{i=0}^n \sqrt{E_{ij}^p E_{ij}^p} \quad (n = \text{number of cycle}) \quad (1)$$

여기서, $\xi_{\gamma r}$ 는 소성전단변형률 상각궤도(plastic shear strain trajectory)로 누적소성전단변형률을 의미하며, E_{ij}^p 는 소성전단변형률(plastic shear strain)로 총소성변형률에서 소성체적변형률(plastic volumetric strain)을 감하여 산정한다. 그러나, 비배수조건인 경우, 체적변형이 발생하지 않으므로 소성전단변형률은 총소성변형률의 값이 된다. 식 (1)에 나타난 바와 같이 누적 소성전단변형률은 (+)의 값을 갖기 때문에 과잉간극수압의 변화와 같이 계속 증가하는 특성을 갖게 되므로 효과적으로 변형특성을 통해 과잉간극수압의 변화를 표현할 수 있다. 실내진동시험결과중 응력-변형률 상관도에서 소성전단변형률 상각궤도를 구하는 방법을 1회의 진동재하에서 나타내면 그림 2와 같다. 최종적인 액상화 저항특성치는 그림 1(a)에서 유효응력이 급격하게 상실되는 상태 ②의 시작점까지의 누적 소성전단변형률로 하며 이는 외력종류 및 형태에 영향이 거의 없는 지반의 고유한 특성치로 정의된다.

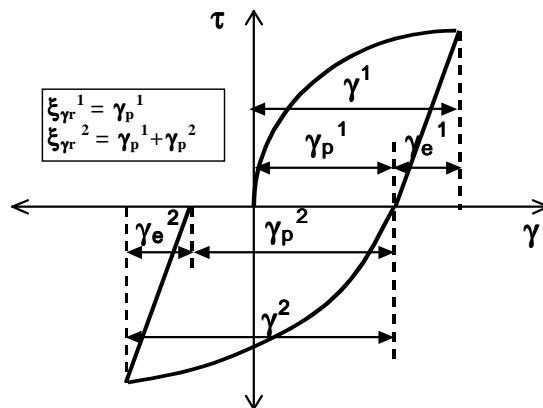


그림 2 누적 소성전단변형률 (Kim, 2003)

이상과 같이 지반의 고유한 액상화 한계저항특성치가 결정되면, 다양한 입력지진을 통해 지진에 의한 발생특성치, ξ_{yd} 를 산정비교함으로써 액상화 발생여부를 검토하게 된다. 한계저항특성치가 지반의 소성 변형률의 누적을 통하는 점을 고려하여 지진에 의한 발생특성치도 국내 발생가능한 실지진시간이력 입력의 지반응답해석을 수행하고 이를 통해 획득되는 변형률 시간이력을 이용하여 결정한다.

최종 액상화 평가는 다음의 식과 같이 안전율(S.F.)을 산정함으로써 수행되며 발생특성치를 결정하는 내용을 요약설명하면 그림 3과 같다.

$$S.F. = \xi_{yd} / \xi_{yr} \quad (S.F. \geq 1: \text{Safe}) \quad (2)$$

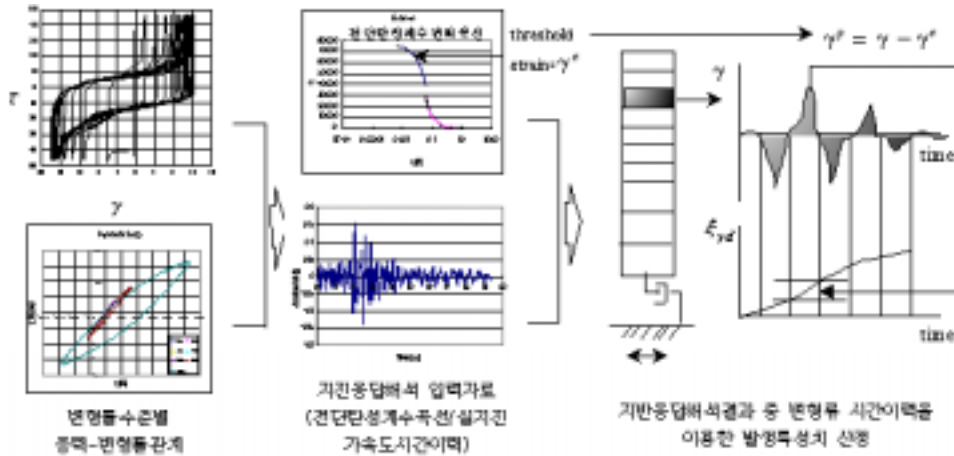
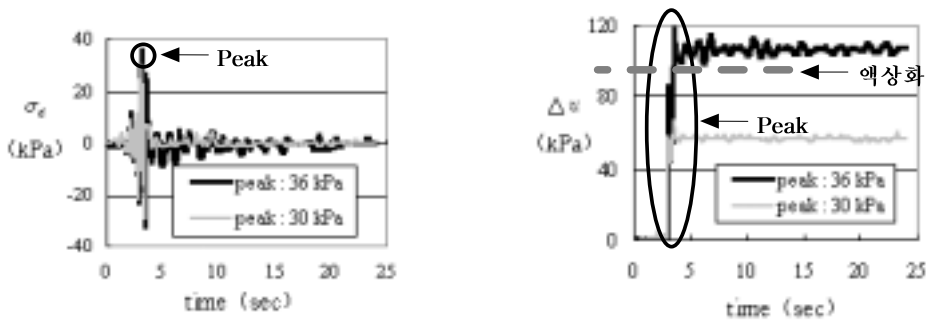


그림 3 지진에 의한 발생특성치 산정모식도

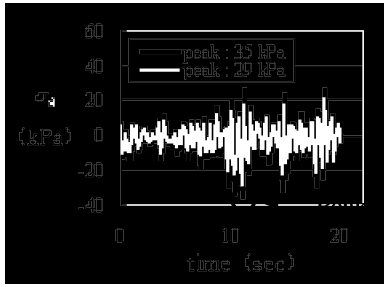
지진에 의한 발생특성치 산정에서 중요한 점은 지진의 지속시간 내에서 실제 액상화를 유발하는 자료가 어떤 것인지를 분석하는 것이다. 이와 관련하여 국내에서 연구수행된 충격형 및 진동형 실지진하중 재하의 진동삼축시험결과(박성용, 2003)를 보면, 전반적으로 지진하중 재하시 일정수준이상의 경우에만 눈에 띄는 과잉간극수압의 변화를 볼 수 있었으며 그림 4의 충격형 하중재하의 경우에는 최대하중 재하시, 그림 5의 진동형 하중재하시에는 최대하중 재하후 후속된 일정수준이상의 큰 하중재하시에 초기 액상화가 발생한 것으로 나타났다.



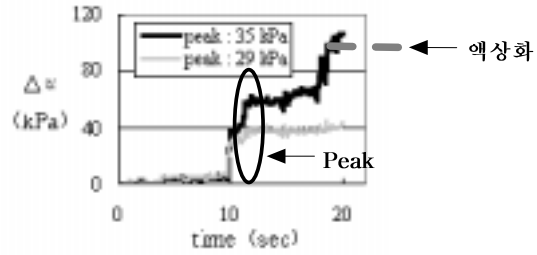
(a) 재하된 축차응력

(b) 과잉간극수압

그림 4 충격형 실지진하중재하의 실내진동시험 (2003, 박성용)



(a) 재하된 축차응력



(b) 과잉간극수압

그림 5 진동형 실지진하중재하의 실내진동시험 (2003, 박성용)

또한, 2003년 국내 지진력을 분석한 결과, 충격형이 전체의 70%를 차지하고 있는 점과 그림 4에 나타난 바와 같이 충격형 지진의 경우, 최대하중이 가장 큰 액상화 발생원인인 점을 고려하여 우선적으로 충격형 지진기록의 입력시에만 제안된 평가법을 사용할 것을 권장한다. 즉, 충격형 지진입력시 액상화 발생특성치는 최대하중 재하시점까지의 변형률 시간이력을 이용하여 산정한다. 향후, 계속적으로 진동형 지진에 관한 특성연구를 수행하여 본 평가법을 보완할 예정이다.

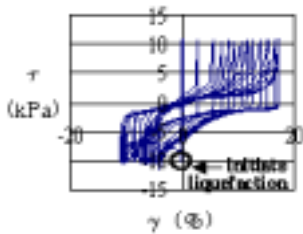
3. 실내진동시험

본 연구에서는 제안된 평가법의 국내 적용성 연구를 위해 주문진 표준사를 대상으로 액상화 저항특성치 산정을 위한 진동삼축시험과 지반응답해석의 입력자료 중 하나인 변형률수준별 전단탄성계수곡선 및 감쇠비 곡선의 선정을 위해 비틀전단시험을 수행하였다. 표 1과 같은 시료 및 시험조건하에서 진동삼축시험 및 비틀전단시험을 수행하였으며 각각의 결과는 그림 6과 그림 7에 나타난 바와 같다.

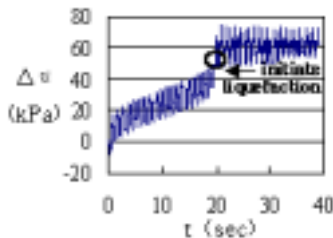
표 1 실내진동시험시 시료 및 시험조건 (주문진 표준사)

입도 분포	물 성	구 분	시 험 조 건
평균입경 D_{50} (mm)	0.208	제어방식	응력제어방식
상대밀도(%)	40	진동전단응력비	0.18 ~ 0.33 (CT)
초기유효구속압	60, 100, 150 kPa	시료조건	포화비배수(CT) / 습윤비배수(TS)
진동수	0.1(CT) / 1(TS) Hz	시료성형	수중침강(CT) / 습윤다짐(TS)

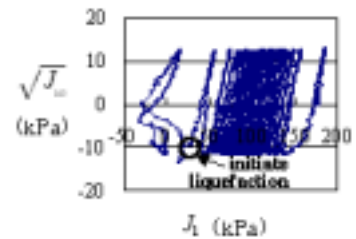
주) CT : 진동삼축시험 (cyclic triaxial test), TS : 비틀전단시험 (torsional shear test)



(a) 응력-변형률 상관관계



(b) 과잉간극수압



(c) 유효응력경로

그림 6 진동삼축시험 결과 (상대밀도 40% 유효구속압 60 kPa)

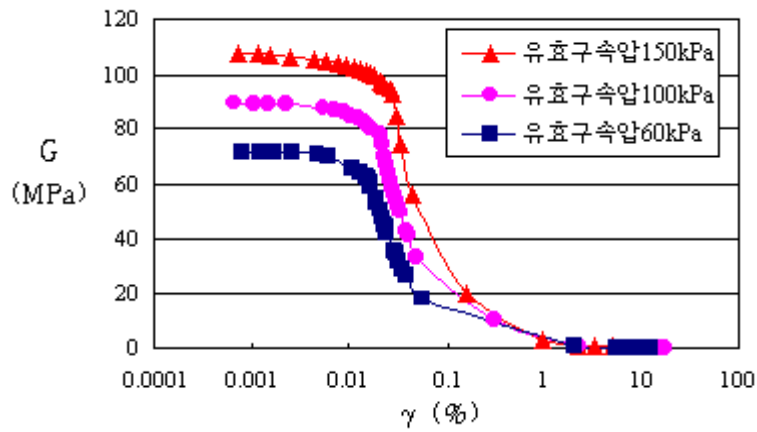


그림 7 비틀전단시험결과를 이용한 변형률수준별 전단탄성계수곡선 (상대밀도 40%)

4. 실내진동시험에 기초한 액상화 평가사례 비교분석

본 연구에서는 상대밀도 40% 유효구속압 60kPa의 실내진동시험 결과를 이용한 액상화 평가를 위해서 그림 8과 같이 임의로 해석대상지반을 선정하고 표 2와 그림 9에 나타난 바와 같이 다양한 지진특성의 실지진 시간이력들을 입력하여 지반응답해석을 수행하였다. 해석시 내진성능수준은 붕괴방지 1등급으로 하였으며 이때, 설계지반운동수준은 0.154g로 각 입력지진의 최대값을 이에 준하도록 하였다.

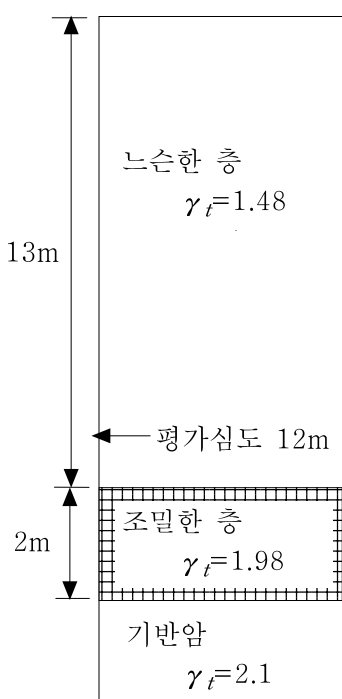


그림 8 평가대상지반

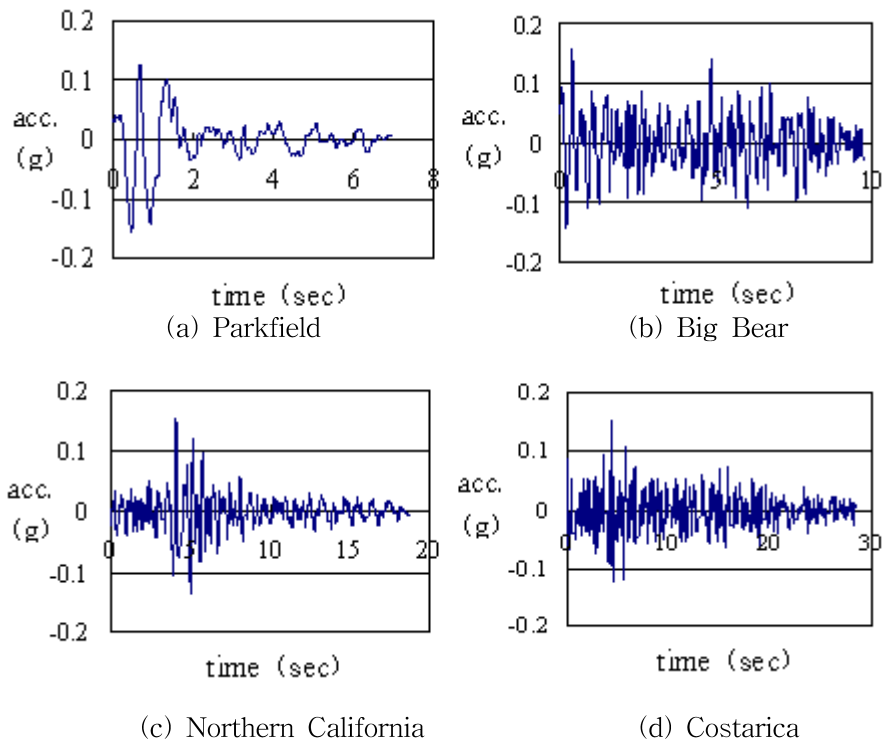


그림 9 입력지진들의 시간이력곡선

표 2 입력지진제원

구분	Parkfield	Big Bear	Northern California	Costarica
지진규모 / 유효지속시간	$M_w=6.1 / 7.0$ 초	$M_w=6.5 / 9.7$ 초	$M_w=6.7 / 18.8$ 초	$M_w=7.5 / 28.4$ 초

본 연구에서는 제안된 평가법의 특성분석을 위해 그림 10에 나타난 바와 같은 기존의 상세평가법과 비교분석을 수행하였다. 그림 11은 기존의 상세평가법에 기초하여 산정된 액상화 저항능력비 산정곡선을 나타내고 있으며 그림 6에 나타난 원은 액상화 저항특성치 산정시점인 급격한 응력감소의 시작점에 해당되는 결과들을 나타내고 있다. 지진에 의한 전단응력비 및 발생특성치는 지진응답해석결과를 이용하게 되는데, 기존의 평가법에서는 그림 10에 나타난 바와 같이 평가심도에서의 최대가속도만을 이용하도록 되어 있으며 제안된 평가법에서는 평가심도에서의 변형률 시간이력곡선에서 최대값까지의 누적소성전단변형률을 통해 각각 산정된다. 이러한 일련의 평가과정을 통해 산정된 각각의 평가안전율을 요약정리하면 표 3과 표 4에 나타난 바와 같다.

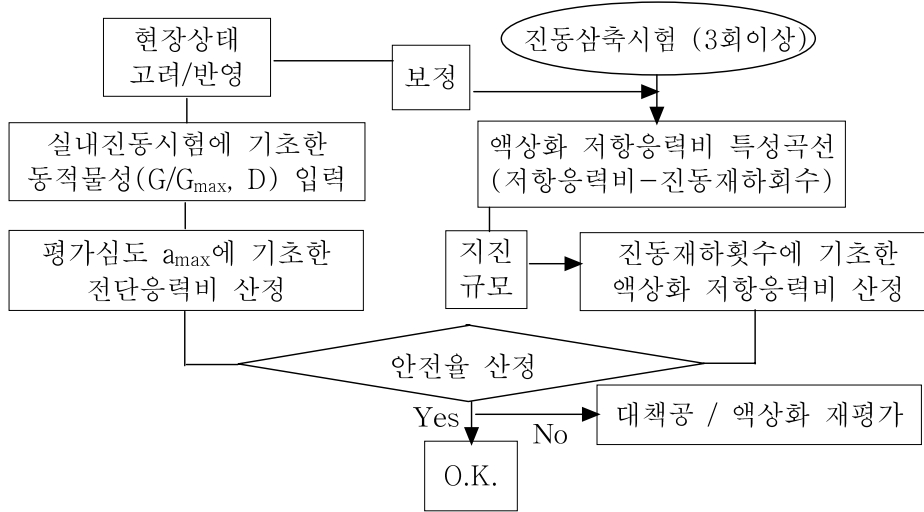


그림 10 기존의 액상화 상세평가법

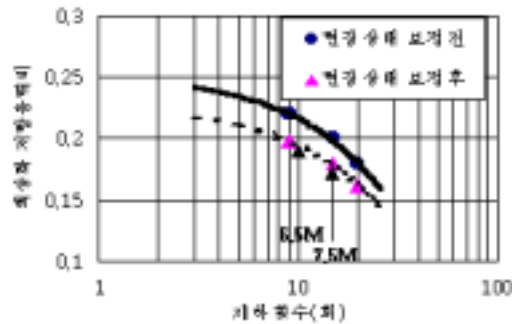


그림 11 기존의 상세평가법에 기초한 액상화 저항능력비 산정곡선 (상대밀도40%, 유효구속압 60kPa)

표 3 등가전단응력개념에 기초한 액상화 상세평가 (상대밀도40%, 유효구속압 60kPa)

구분	지진에 의한 전단응력비		액상화 저항능력비		액상화 평가안전율	
	M=6.5	M=7.5	M=6.5	M=7.5	M=6.5	M=7.5
Parkfield	0.389	0.349	0.195 (재하횟수 10회의 값)	0.178 (재하횟수 15회의 값)	0.50	0.51
Bigbear	0.326	0.297			0.60	0.60
North. Cal.	0.273	0.257			0.71	0.69
Cosrarica	0.295	0.373			0.66	0.48
평균					0.62	0.5702

표 4 제안된 평가법에 기초한 액상화 상세평가 (상대밀도 40%, 유효구속압 60kPa)

구분	지진에 의한 발생특성치		액상화 저항특성치		액상화 평가안전율	
	M=6.5	M=7.5	M=6.5	M=7.5	M=6.5	M=7.5
Parkfield	1.739	1.986	0.705		0.41	0.36
Bigbear	1.061	1.116			0.67	0.63
North. Cal.	1.039	1.239			0.68	0.57
Cosrarica	1.715	1.781			0.41	0.40
평균					0.54	0.49

표 4의 내용을 보면, 제안된 평가법이 한계저항특성이 고유하다는 재료역학적 이론에 기초하여 지진 규모에 관계없이 저항특성치가 일정함을 나타내고 지진규모 증가에 따라 발생특성치도 함께 증가하여 최종산정된 안전율은 지진규모 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해, 기존의 상세평가법 결과에서는 지진규모에 따른 기준진동재하횟수에 따라 지반의 저항능력비가 변화함을 나타냈으며 지진에 의한 전단응력비와 평가안전율 모두 지진규모와 상관없이 변화하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 현행 국내 상세평가법이 실내진동시험으로부터 많은 자료를 이용할 수 있음에도 불구하고 기존의 등가전단응력개념에 기초하여 3회 이상의 시험시 최대전단응력과 액상화 발생시 진동재하 횟수와 같은 단순자료만을 이용하는 단점을 보완하고자 액상화 거동에 대한 새로운 상태구분과 함께 지반재료의 변형특성과 지진으로 발생하는 변형특성을 비교하는 새로운 상세평가법을 제안하였다. 제안된 평가법은 유효응력경로와 응력-변형률 상관관계를 이용하여 지반의 한계소성저항특성을 결정하고 실지진기록 입력의 지반응답해석을 이용하여 지진이 발생시킬 소성변형특성을 산정비교하도록 하였다.

평가사례분석결과, 제안된 평가법이 진동하중을 받는 지반거동을 점진적 응력감소, 급격한 응력감소, 그리고 액상화 후 파괴거동으로 분류하여 지반의 동적저항특성을 신뢰성높이 표현하고 있을 뿐만 아니라, 지반증폭을 포함한 응답해석결과 이용시 합리적으로 지진특성을 고려하는 방법상의 특징으로 인해 충격형 지진기록이 보유한 지진규모 등의 영향을 신뢰성높게 표현하고 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. 박성용(2003), **실지진하중을 이용한 중진지역에서의 액상화 저항강도에 관한 실험적 연구**, 공학석사학위논문, 연세대학교.
2. 최재순, 홍우석, 박인준, 김수일(2001), “지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (I) : 이론제안”, **한국지반공학회 논문집**, 제18권, 1호, pp.91-99.
3. 최재순, 김수일 (2003), “포화사질토의 동적거동규명을 위한 수정 교란상태개념”, **2003년도 추계 학술 발표회 논문집**, 한국지진공학회, pp. 107~114.
4. Iai, S., and Matsunaga, Y. and Kaneoka, T.(1992), “Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility”, **Soil and Foundation**, JSSMFE, Vol.32, No.2, pp.1-15.
5. Kim, S. I.(2003), “Liquefaction Potential in Moderate Earthquake Regions”, **Proceeding of 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**.