

# 새만금 지역의 액상화 평가 및 향후 구조물 기초 설계시 액상화 영향의 고려방안 (I)

## Liquifaction Evaluation of Saemangeum Area and the Considerations of Liquifaction Effect to the Foundations of Structures in Near Future (I)

김 유 성<sup>1</sup> Kim, You-Seong  
고 형 우<sup>2\*</sup> Ko, Hyoung-Woo

### ABSTRACT

This study presents the estimation for the possibility of liquefaction according to the liquefaction evaluation methods in Saemangeum reclamation area for tide embankment, Jeollabuk-do, Korea. Liquefaction estimation is performed by cyclic triaxial tests and seismic response analysis using earthquake records of the long- and short-term. This area appears to have greatly potential of liquefaction from the grain-size distribution curve of the dredged and reclaimed soil in the area. Because the liquefaction can occur in this area if the foundations or buried structures are built at a depth within 10m below ground surface, the meticulous care is required in the design of them in the future.

### 요 지

본 연구에서는 국내의 대표적인 매립지인 새만금 방조제 지역을 대상으로 액상화 평가방법에 따른 액상화 발생 가능성을 예측하였다. 액상화 평가방법에 따라 장-단주기 실제 지진기록을 이용해 지진응답해석과 반복삼축압축시험에 의한 액상화 평가를 수행하였다. 평가 결과 대상지역의 준설패립토의 입도분포 곡선은 액상화 가능성이 매우 높은 범위에 해당하고 있고, 검토대상 지역의 깊이 10m 이내에 기초 또는 지중구조물이 구축될 경우 액상화에 따른 피해가 예상되고 있어, 향후 기초 또는 구조물 설치 위치에 따른 세밀한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

**Keywords** : Liquifaction, Dredged soil, Maximum acceleration, Seismic response analysis, Cyclic triaxial test

## 1. 서 론

우리나라에서는 근래, 1978년 홍성지진(규모 5.2), 1996년 영월지진(규모 4.5), 2003년 백령도지진(규모 5.0), 2004년 울진지진(규모 5.2)같이 비교적 큰 규모의 지진이 발생하였고, 2010년 기상청에서 발표한 1978년부터 2010년까지 지진연보를 살펴보면 1990년대부터 지진이 발생하는 횟수가 뚜렷하게 증가하는 양상을 보이고 있다. 특히 2009년의 경우 지진이 발생한 횟수는 연평균 횟수인 28회의 2배가 넘는 60회가 발생하여 우리나라가 지진에 대해

안전한 지역이라고 할 수 있는 근거가 점차 희박해 지고 있다. 한편 삼면이 바다인 우리나라에서는 협소한 국토의 효율적 사용을 위하여 서, 남해안을 중심으로 해안매립이 계속 증가하고 있고, 산업단지와 같은 대규모 해안 매립지반의 경우 그 지역의 N값, 입도분포에 비추어 볼 때 액상화 피해의 발생 가능성이 없다고 단언할 수 없다. 특히 느슨한 사질토로 지반을 매립할 경우, 작은 규모의 지진에 의해서도 액상화 현상이 발생하여 큰 피해가 발생할 수 있으므로 대규모 매립지반의 경우 액상화에 대한 안전성 평가 및 대책이 필수적이다. 대부분의 액상화 평가는 경험적

1 정회원, 전북대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National University)

2\* 정회원, 전북대학교 토목공학과 박사수로 (Member, Doctor Candidate, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National University, E-mail: bismark77@jbnu.ac.kr)

으로 제안된 간편해석법을 이용하여 이루어지고 특별한 경우에 한하여 진동삼축시험과 같은 추가 조사를 이용한 상세예측법이 이용되고 있다(박인준 등, 1999). 본 연구는 I, II로 나뉘어 I에서는 국내의 대표적 준설매립지반인 새만금지역의 방조제 끝막이 연장부 지역을 연구대상지역으로 선정하여 간편법과 지진동에 의한 지반응답해석을 통해 최대가속도의 산정 및 반복삼축시험에 근거한 상세법에 의해 액상화 발생가능성을 평가하였다. 또한, II에서는 기초가 설치된 지역에서 기초의 형태 및 근입깊이에 따른 지진시 액상화 피해사례를 분석하여, 향후 액상화 발생에 대한 피해를 최소화 할 수 있도록, 연구대상 지역에서의 기초의 근입깊이 및 지중구조물의 설치위치에 따른 설계시 고려방안을 제시하였다.

## 2. 액상화 평가방법

지진시 액상화가 발생하는 곳은 사질토층이나, 지금까지의 연구성과에 의하면, 표층이 3m 이상 두께의 점성토층이 있을 경우와, 20m 이상의 깊이에 있는 층에서는 액상화가 발생할 가능성이 작다, 반대로 액상화되기 쉬운 곳은 동일한 입경의 느슨한 모래층이 지표로부터 깊이 방향으로 연속되고, 지하수위가 높은 경우이다. 개략적으로는

① 깊이 10m 이하에 있는 포화사질토층 ② 표준관입시험의 N값이 10 이하 ③ 균등계수가 6 이하 ④ 입도분포곡선상의  $D_{20}$ (20% 직경)이 0.04~0.5mm에 있는 경우의 모든 조건이 성립하면 액상화 층으로 간주된다(日本道路協會, 2002). 이 조건 중 한가지 조건만이 해당되는 경우, 판정근거가 다소 미약하거나 중요구조물 건설의 경우에는 보다 상세한 검토가 요구된다. 한편 일본 건축학회에서는 가속도 200gal을 대상으로 액상화 위험성과 N값과의 관계를 그림 1과 같이 나타내었다. 또한 일본 항만구조물 설계기준에서는 액상화되기 쉬운 입도분포의 범위를 그림 3과 같이 나타내었고, 또 액상화에 대한 등가 N값과 등가가속도(gal)의 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 각 구역은 표 1에 나타내었듯이 I 구역은 액상화가 발생하고, II 구역은 액상화 가능성이 크고, III구역은 액상화 발생하지 않을 가능성이 크고, IV구역은 액상화 발생하지 않음으로 구분하고 있는데, 이와 같은 내용을 참조하여 종합적으로 판단할 필요가 있다. 위와 같은 액상화 예측은 크게 간편예측법과 상세예측법으로 나뉘고 있다. 위에서 기술하였듯이 간편예측법은 입도분포, 표준관입시험의 N값 등의 비교적 쉽게 얻을 수 있는 값을 적용하는 방법이며, 상세예측법은 반복삼축시험, 공진주 비틀림시험 등의 실내시험을 이용하여 지반의 액상화 강도와 실제 가속도에 의한 전

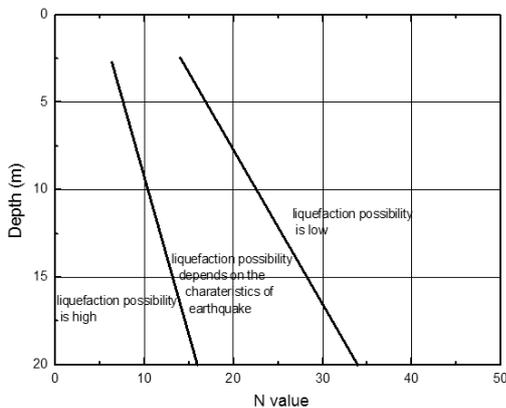


그림 1. 액상화 위험성과 N값과의 관계(日本建築學會, 2001)

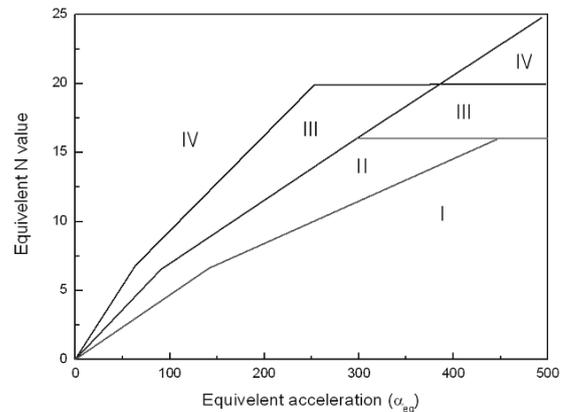


그림 2. 등가 N치와 등가 가속도를 이용한 지층의 분류(日本港灣協會, 1999)

표 1. 입도와 N값에 의한 토층의 액상화 예측 및 판정(日本港灣協會, 1999)

그림 3의 구역	입도와 N값에 의한 액상화 예측	입도와 N값에 의한 액상화 판정
I	액상화 발생	액상화 발생으로 판정
II	액상화 발생 가능성이 큼	액상화 발생으로 판정하나, 반복삼축압축시험에 의해 판정
III	액상화 발생하지 않을 가능성 큼	액상화 발생하지 않음으로 판정하나, 반복삼축압축시험에 의해 판정 특히 구조물에 안전을 요할 경우에도 반복삼축압축시험에 의해 판정
IV	액상화 발생하지 않음	액상화 발생하지 않음으로 판정

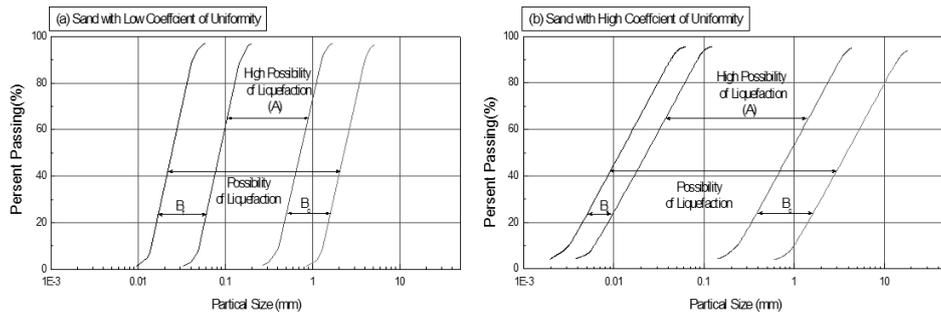


그림 3. 액상화 가능성이 있는 흙의 입도분포(日本港灣協會, 1999)

단응력을 구하는 방법이다. 본 연구에서는 간편법으로 수정 Seed and Idriss 방법과 반복삼축시험과 지진응답해석을 통한 상세법으로 액상화 가능성을 평가하였다.

### 2.1 Seed and Idriss의 간편법

Seed and Idriss의 방법은 지진에 의해 지반에 발생하는 전단응력과 지반의 액상화에 요구되는 전단응력을 비교하여 지반에 발생하는 전단응력이 크면 액상화가 발생하는 것으로 판정하는 방법이다. 지반내에 발생하는 전단응력(등가전단응력)  $\bar{\tau}_d$ 는 식 (1)로 얻어진다(Seed and Idriss, 1971).

$$\bar{\tau}_d = 0.65 r_d \cdot \gamma \cdot z \cdot \alpha_{\max} / g \quad (1)$$

식에서  $\bar{\tau}_d$ 는 깊이 z에서의 등가전단응력,  $r_d$ 는 깊이에 따른 보정계수(그림 4),  $\alpha_{\max}$ 는 지표면 최대가속도(gal), g는 중력가속도(980gal)이다. 한편 지반을 액상화시키는데 필요한 전단응력(액상화 전단응력)  $\tau_{ln}$ 은 식 (2)와 같다.

$$\tau_{ln} = \left( \frac{\sigma_d}{2\sigma_0} \right)_{50} \frac{C_r D_r}{50\%} \sigma_v' \quad (2)$$

식에서  $\tau_{ln}$ 은 n회의 반복파동에 의해 지반을 액상화시키는 전단응력(액상화 전단응력)이고,

$(\sigma_d/2\sigma_0)_{50}$ 은 상대밀도 50%의 모래에 대해 반복삼축압축시험을 수행하여, n회의 반복에 의해 액상화를 발생시키는 전단응력  $\sigma_d/2$ 와 초기유효응력  $\sigma_0'$ 와의 비로서, 그림 5에서 개략적으로 구할 수 있다.  $\sigma_d$ 는 축차응력이다.  $C_r$ 은 실내 삼축압축상태와 현장의 전단조건의 상이에 따른 보정계수로 그림 6에서 구할 수 있다.  $D_r$ 은 상대밀도이다.

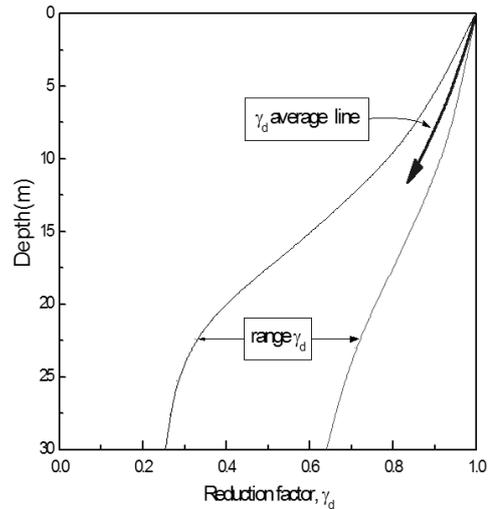


그림 4. 다양한 지반조건에 대한 응력감소계수의 범위 (Seed and Idriss, 1971)

표 2. 정현파의 지진규모별 반복횟수(Seed and Idriss, 1971)

지진 규모(M)	반복 횟수(N <sub>f</sub> )
5.25	2 ~ 3
6.00	5 ~ 6
6.75	10
7.50	15
8.50	26

위의 결과로서  $\bar{\tau}_d \geq \tau_{ln}$ 이면 액상화로,  $\bar{\tau}_d < \tau_{ln}$ 이면 비액상화로 판정한다. 한편 지진파동의 반복회수 n은 가상지진의 규모(M)에 의해 표 2와 같이 가정한다.

이 방법은 지표면 최대가속도와 깊이에 따른 감소계수를 이용하여 소요깊이에서의 지진가속도를 구하도록 하고 있다. 이 때 감소계수의 값은 그림 4에서와 같이 상한값과 하한값의 평균값을 이용하도록 하고 있으나 깊이가 깊어질수록 감소계수의 범위가 넓어지기 때문에 신뢰도에 문제가 있다. 따라서 수정 Seed and Idriss의 방법에서는 감소계수를 사용하지 않고 지진응답해석을 통해 소요깊이에

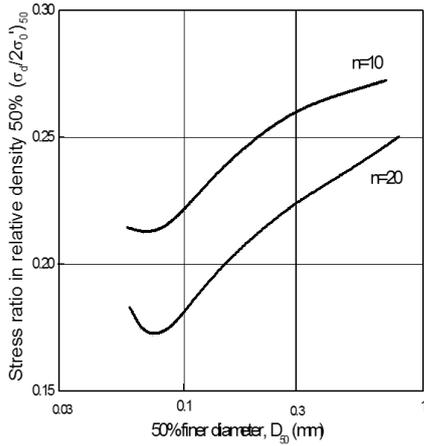


그림 5. 반복횟수에 따른 액상화 전단응력  $\sigma_d/2$ 와 초기유효응력  $\sigma'_0$ 와의 비(Seed and Idriss, 1971)

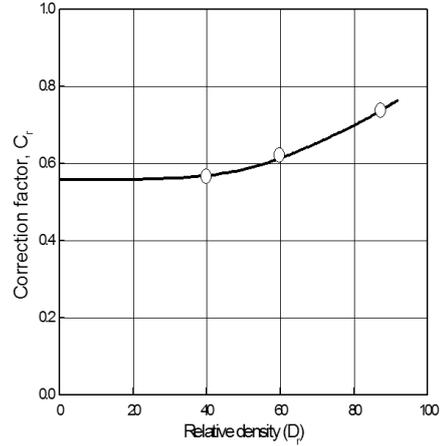


그림 6. 삼축압축상태와 현장의 전단조건에 상이에 따른 보정계수 (Seed and Idriss, 1971)

서의 지진가속도를 구하여 이를 이용해 지진에 의한 전단 응력을 산정토록 하였다.

## 2.2 반복삼축압축시험과 지진응답해석에 의한 상세법

위에서 기술한 방법에 의해 각각의 토층에 대한 액상화 판정에 근거하여 액상화 판정 토층의 두께, 그 토층의 깊이 등을 고려하여 지반전체로서의 액상화 판정을 수행하게 되는데, 이상의 검토에 의해 액상화 유무의 판정이 확실하지 않을 경우, 지반의 지진응답해석 및 불교란 모래시료의 반복삼축압축시험을 실시하여 지진시의 지중전단응력과 지반의 액상화에 대한 강도를 비교하여 지반의 액상화를 예측 및 판정하게 된다.

## 3. 새만금 지역 준설패립토의 물리적·공학적 특성

### 3.1 준설패립토의 물리적 특성

본 연구에 사용된 준설패립토의 비중은 2.672, 평균입경( $D_{50}$ )은 0.09mm이고, 준설패립토를 구성하고 있는 점토, 실트, 모래의 구성비는 0.5%, 14.8%, 84.6%이다. 통일분류법으로 실트질모래(SM)에 해당한다(서세관, 2008). 그림 7은 준설패립토의 입도분포곡선을 나타낸 것으로 그림 3의 액상화가능 입도분포상에 도시하였다. 긴 파선은 액상화 발생 가능성의 범위이고, 내부의 짧은 파선의 범위는 액상화의 가능성이 높은 범위이다. 그림에서 대상토의 입도분포 곡선은 액상화 가능성이 매우 높은 범위에 해당하고 있어, 대상토가 액상화에 취약하다는 것을 유추 할

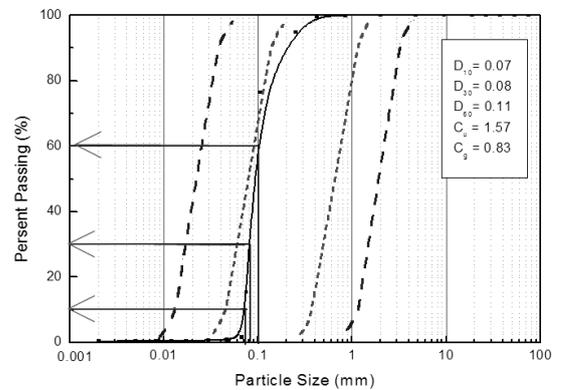


그림 7. 대상토의 입도분포곡선과 입도분포를 통한 액상화 판정(서세관, 2008)

표 3. 대상토의 최대·최소 건조밀도

상대밀도(%)	건조단위중량(g/cm <sup>3</sup> )
Maximum	1.553
Minimum	1.212
70%	1.432
50%	1.361
30%	1.297

수 있다.

또한 대상토의 최대·최소 건조밀도는 노건조한 대상토에서 #40번체를 이용, 조개껍질 등 이물질을 제거한 시료만을 이용하여 비점성토의 최대·최소 건조밀도 시험방법(KS F 2345, 2009)으로 구하였다. 최대건조밀도와 최소건조밀도는 각각 1.553g/cm<sup>3</sup>, 1.212g/cm<sup>3</sup>이었고, 반복삼축 시험에 사용할 상대밀도 30%, 50%, 70%의 건조단위중량은 표 3에 나타내었다(오수환, 2011).

반복삼축시험을 위한 시료 제작은 먼저 하부 페테스탈

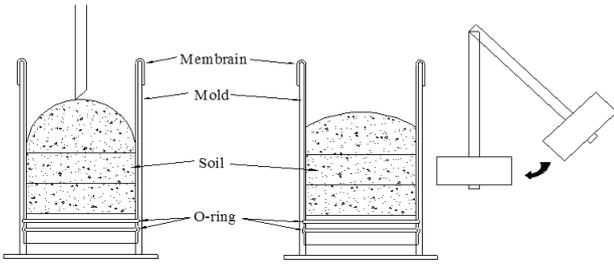


그림 8. 시료제작 방법

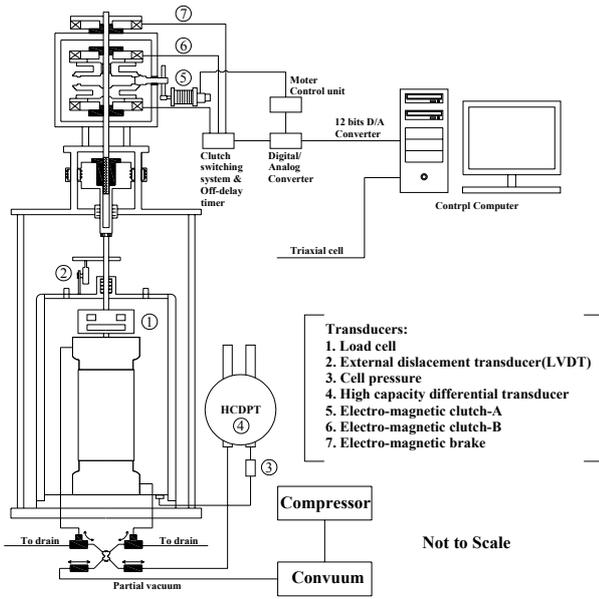


그림 9. 삼축시험장치의 개요도

저부에 고무 멤브레인을 씌우고 O-ring 2개와 고무 멤브레인으로 이중 밀봉을 하였다. 그리고 진공성형상자를 하부 페테스탈과 맞춰 결합시킨 후 고무 멤브레인을 진공성형상자에 씌워 진공압으로 밀착시켰다. 시료를 총 5층으로 나누어 그림 8과 같이 낙하고 없이 퇴적시키고 대칭적으로 성형상자에 미세한 충격을 가하여 필요한 상대밀도로 제작하였다.

### 3.2 반복삼축시험을 통한 액상화저항 능력비

반복삼축시험은 그림 9에 나타난 삼축시험장치를 이용하였다. 이 삼축시험장치는 비반복 재하시험에서 0.0001%/min 정도의 미세한 축변형률의 속도로 재하가 가능하고, 0.001%/min 정도의 축변형률 진폭으로 반복재하가 가능하며, 기어 시스템의 전환으로 시간적 지연없이 재하 방향의 반전이 가능하다. 또한 컴퓨터에 의한 자동응력 제어가 가능하며, 국부변형률장치(LDT)와 삼축셀 안에 이중

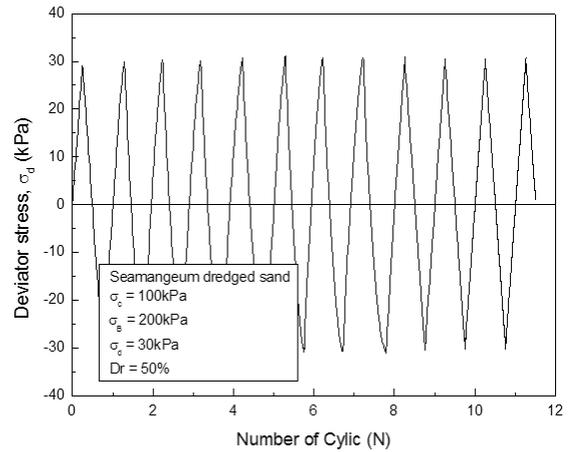


그림 10. 반복횟수와 축차응력( $D_r=50\%$ ,  $\sigma_c=100\text{kPa}$ ,  $\sigma_d=30\text{kPa}$ )

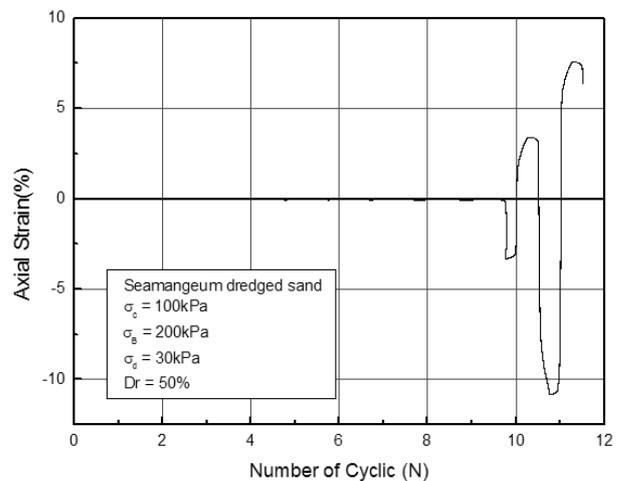


그림 11. 반복횟수와 축변형률( $D_r=50\%$ ,  $\sigma_c=100\text{kPa}$ ,  $\sigma_d=30\text{kPa}$ )

계를 설치하여 미소변형률(0.0001%이하)의 측정이 가능하다.

그림 10은 대표적으로 상대밀도 50%, 구속압 100kPa, 축차응력 30kPa일 때의 반복삼축압축시험에 의한 반복횟수와 축차응력( $\sigma_d$ )과의 관계이고, 그림 11에는 반복횟수와 축변형률( $\epsilon_d$ )과의 관계를 나타내었고, 그림 12는 반복횟수와 간극수압비( $u/\sigma_c$ ) 관계를 나타낸 것이다. 반복횟수가 9회까지는 축변형률이 미소하게 변화하고 있으나, 반복횟수 10회 인장변형일 때로부터 변형률이 크게 증가하면서 12회 반복시 간극수압비가 0.95이상이 되고, 압축변형률이 5% 이상 발생하여 액상화 상태로 되고 있음을 알 수 있다.

또한, 그림 13은 상대밀도 30%, 50%, 70%에서, 양진폭 변형률(DA)이 5%일 때의 반복횟수와 반복응력비(cyclic stress ratio,  $\sigma_d/2\sigma_c$ )의 상관관계를 정리한 것이다. 그림에서 상대밀도가 클수록 양진폭 변형률이 커질수록 반복응

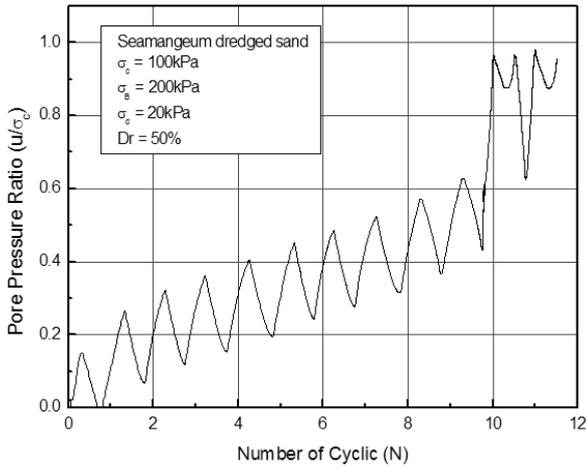


그림 12. 반복횟수와 간극수압비  
( $D_r=50\%$ ,  $\sigma'_v=100\text{kPa}$ ,  $\sigma'_v=30\text{kPa}$ )

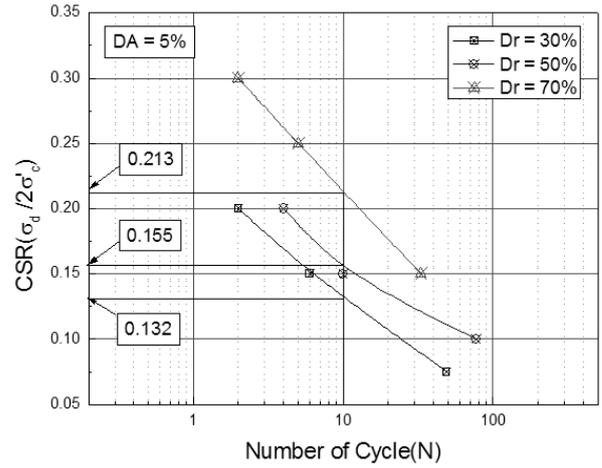


그림 13. 상대밀도에 따른 반복횟수와  
반복응력비의 관계(DA=5%)

표 4. 지진응답해석의 수행조건

설계지진가속도	0.154g
설계지진규모	6.5
입력지진기록	Hachinohe, Ofunato, Imperial Valley, San Fernando
지하수위	0m

력비가 증가한다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 표준관입시험 N치를 이용하여 식 (3)에 의해 산정한 상대밀도로 그림 13에서 액상화 저항응력비를 산정할 수 있다.

$$D_r = \left[ \frac{N_{spt}}{23\sigma'_v} \right]^{0.5} \quad (3)$$

## 4. 지진응답해석 결과

### 4.1 등가전단응력

지진응답해석은 다중반사모델을 바탕으로 하여 1차원 등가선형해석이 가능한 Pro-Shake를 이용하였다. 설계지진가속도는 대상 지역의 위치를 참고하여 지진구역 I에 존재하고 재현주기 1000년에 해당하는 가속도 값을 선정하였고 설계지진규모는 큰 지진이 발생하지 않는 국내의 여건을 고려하여 6.5로 결정하였다(표 4). 입력 지진기록으로는 주기별 지진응답특성을 해석하기 위해서 Hachinohe, Ofunato 와 설계지진규모 6.5를 고려하기 위해서 지진규모 6.5에 근접한 Imperial Valley, San Fernando 지진기록

표 5. 지진응답해석에 이용한 입력지진

지진명	발생 위치	지진규모	지표면 최대가속도
Hachinohe	1968년 3월 16일 일본 Tokachi 앞바다	7.9	0.170g
Ofunato	1978년 6월 12일 Miyagi 현 앞바다	7.4	0.161g
Imperial Valley	1979년 Southern California	6.5	0.157g
San Fernando	1979년 Southern California	6.6	0.152g

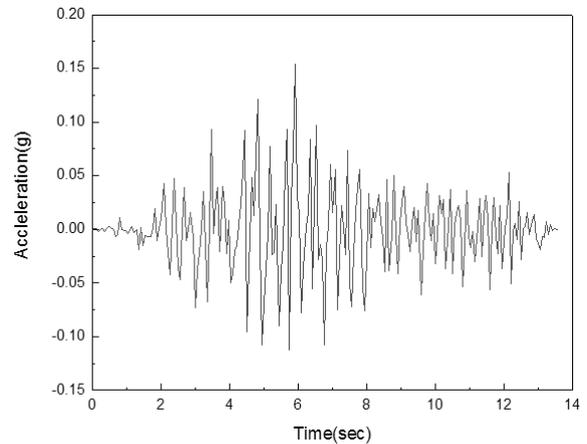


그림 14. Ofunato 지진기록

을 적용하였다. 이들 각 지진의 규모 및 가속도 시간이력 곡선은 표 5와 그림 14~17에 나타내었다.

지진응답해석시 지반에 관한 입력자료로는 단위중량, 전단파 속도, 감쇠비 및 전단탄성계수가 있다. 본 연구에서 사용한 물성값 중 전단탄성계수는 N값으로 산정하였

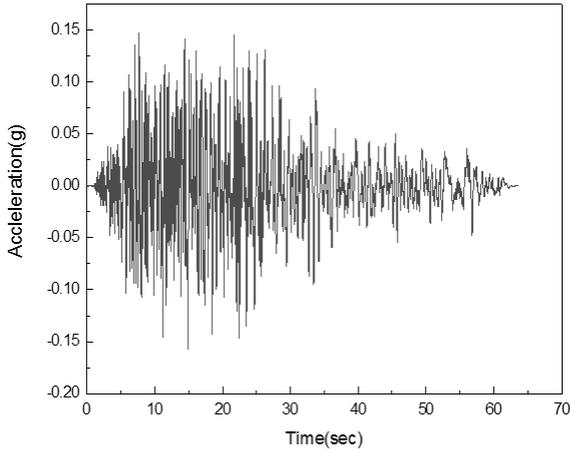


그림 15. Imperial Valley 지진기록

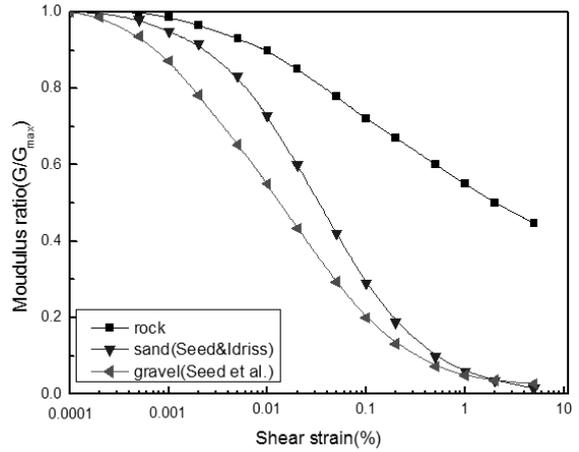


그림 18. 전단탄성계수의 전단변형을 의존성

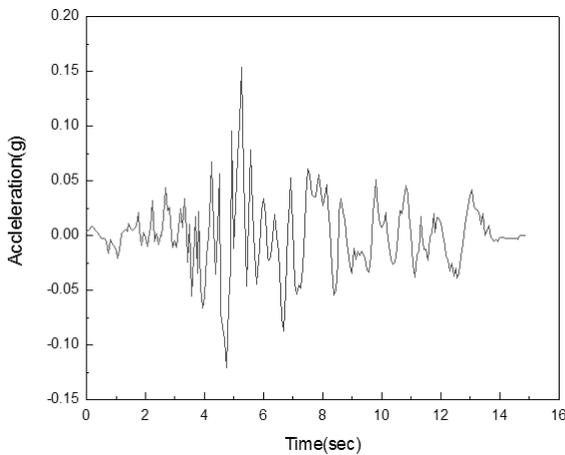


그림 16. Hachinohe 지진기록

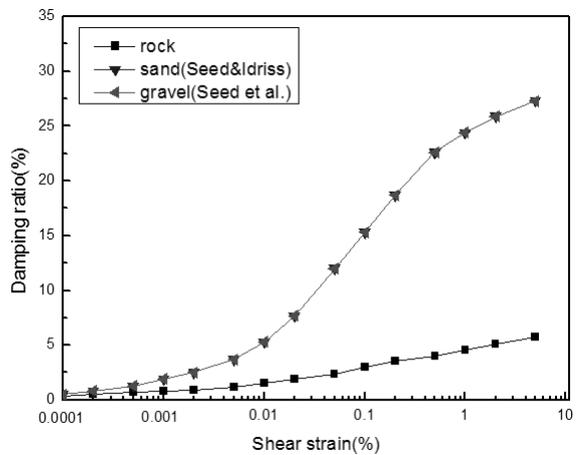


그림 19. 감쇠비의 전단변형을 의존성

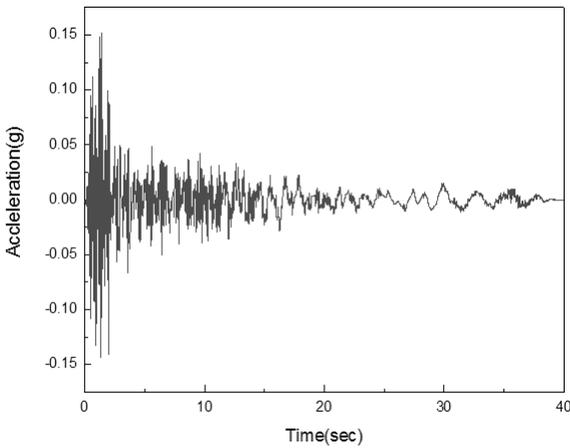


그림 17. San Fernando 지진기록

고 각 지층별 전단탄성계수의 변형률 의존성( $G/G_{max} \sim \gamma$ ) 및 감쇠비 변화는 그림 18과 그림 19와 같다.

연구대상 지역의 주상도는 그림 20과 같으며, 각 지진 기록을 이용한 7개 지역의 평균 전단응력은 그림 21에 나

타내었다. 그림에는 간편법에 의해 산출된 각층의 전단응력도 함께 도시하였다. 그림에서 간편법에 의한 전단응력과 상세법에 의한 평균전단응력 간에 다소의 차이가 보이고 있음을 알 수 있다. 대체로 상세법에 의한 전단응력이 크나, 그 차이의 일정한 형태가 보이지는 않고 있다.

#### 4.2 액상화 전단응력

액상화 전단응력은 반복삼축압축시험에서 반복횟수 10회, 상대밀도 50%에 해당하는 액상화 반복응력비를 심도에 따라 평가하여 그림 22와 같이 나타내었다. 액상화 전단응력은 대체적으로 상세법에 의한 값이 작은 경향이 있고, 특히 액상화 가능성이 큰 심도 10m 이내에서 더욱 작은 경향을 보이고 있다. 따라서 10m이내의 액상화 가능지역에 대한 액상화 검토는 반복삼축압축시험 결과를 이용한 상세법에 의하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

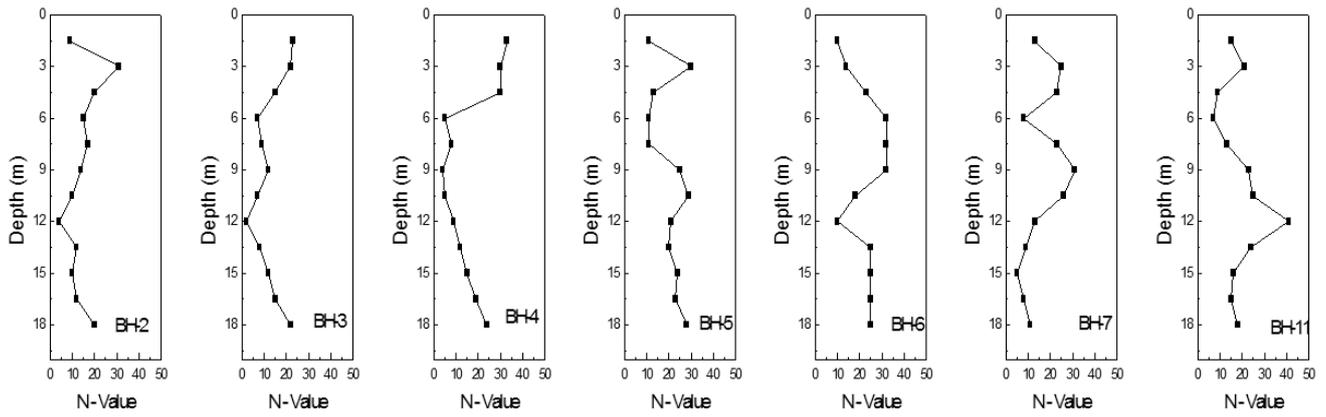


그림 20. 대상지역의 주상도

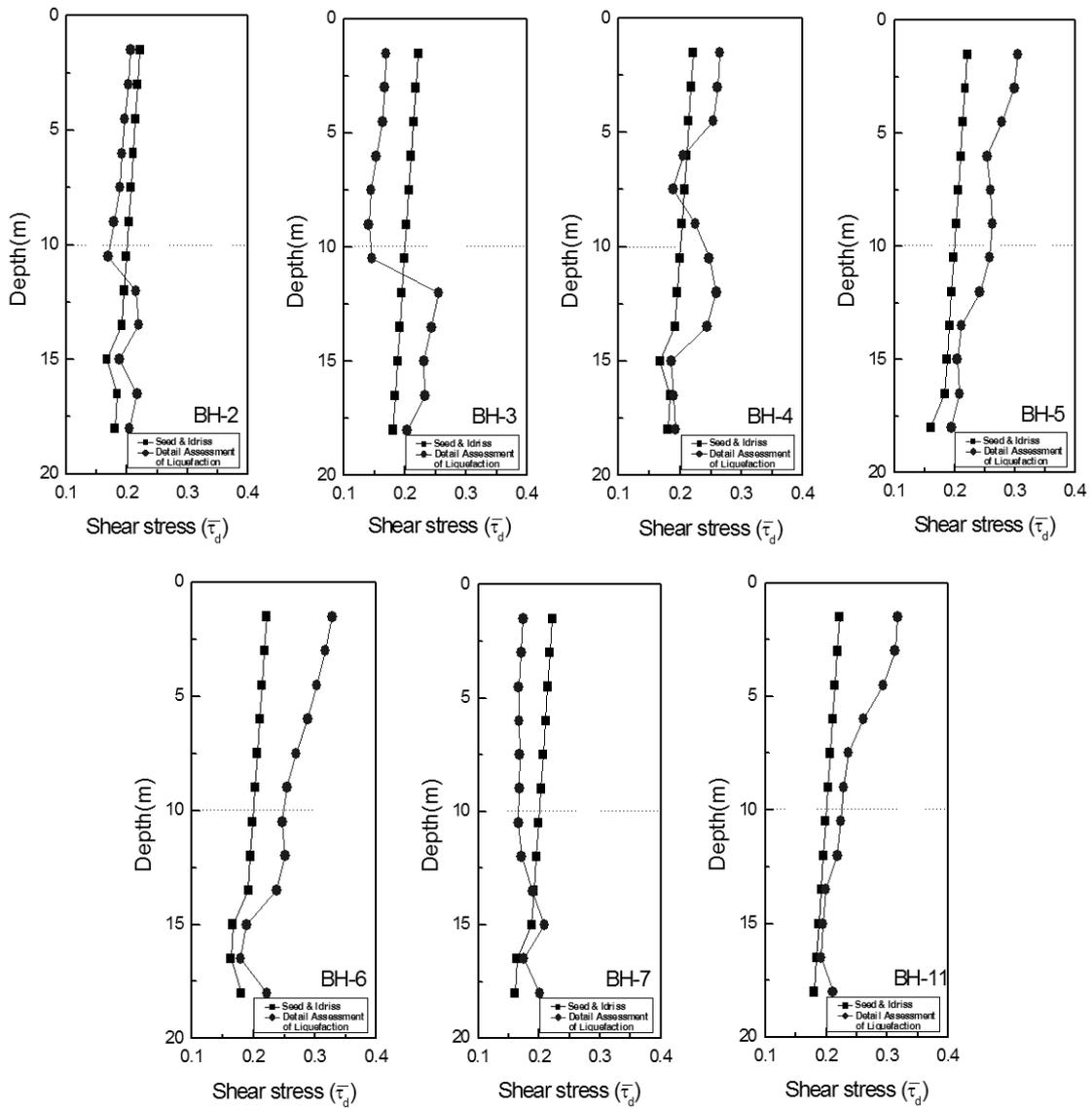


그림 21. 지진기록에 의한 7개 지역의 평균 전단응력 및 간편법에 의한 전단응력

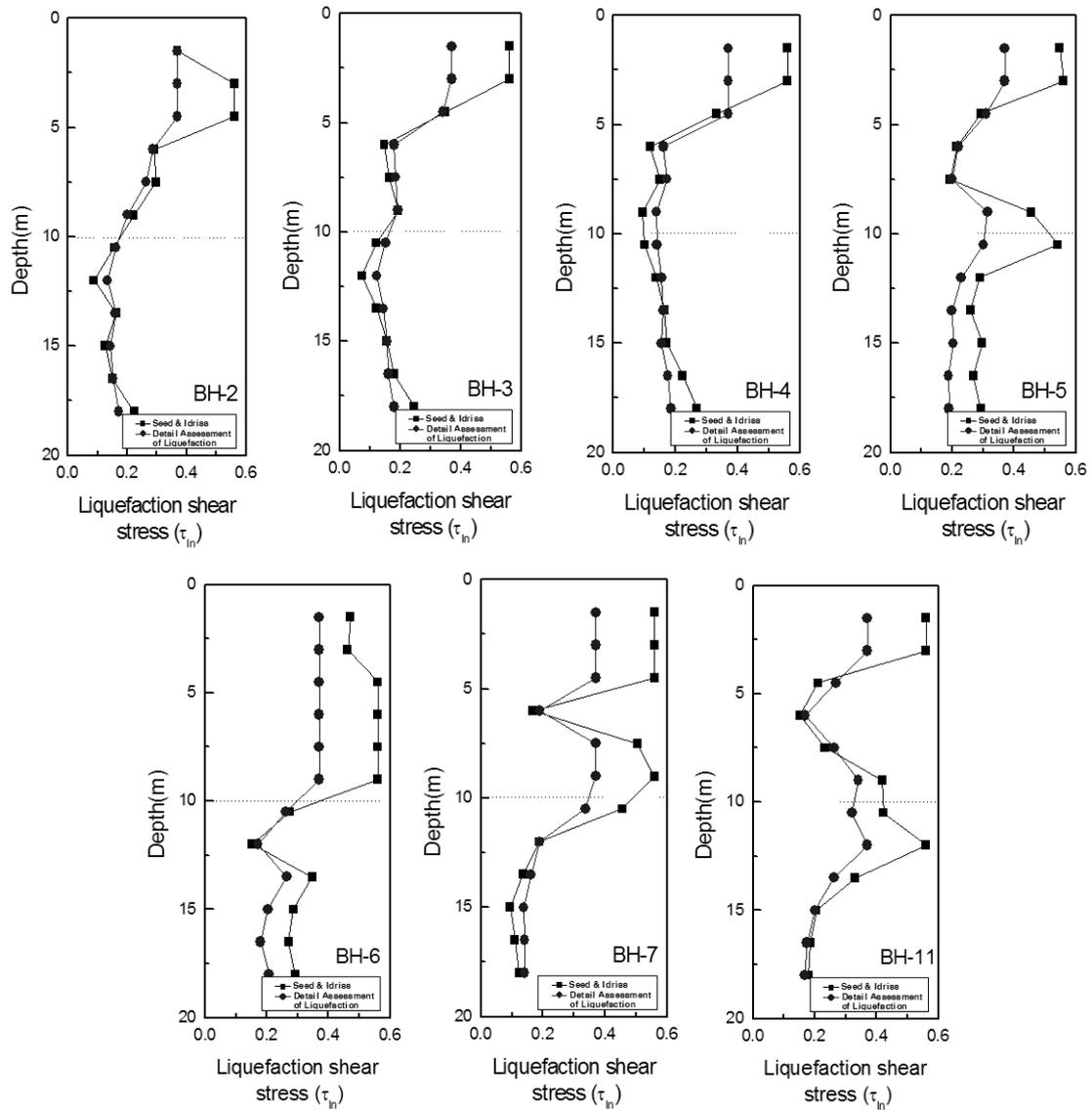


그림 22. 상세법과 간편법에 의한 7개 지역의 액상화 전단응력

### 4.3 액상화 평가

그림 23은 각 위치별로 깊이에 따른 액상화 안전율을 나타낸 것이다. BH-3, BH-6, BH-7 지역에서는 10m이내의 깊이에서는 액상화 가능성이 작으나, 깊이 10m 이심에서는 액상화 가능성을 보이고 있다. BH-2, BH-4, BH-5, BH-11 지역에서는 깊이 10m 이내에서 액상화 가능성이 크게 나타나고 있어, 이 지역에 깊이 10m 이내에 기초 또는 지중구조물이 구축될 경우 액상화에 따른 피해가 예상되고 있다. 이 논문의 후편(II)에서는 액상화 가능 깊이와 기초 또는 구조물 설치 위치에 따른 상관관계에 대해 검토하였다.

### 5. 결론

준설매립으로 형성된 새만금 방조제 지역의 보-링 주상도, 입도분포, 반복삼축압축시험, 지진응답해석에 의한 액상화 예측 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 대상지역의 준설매립토의 입도분포 곡선은 액상화 가능성이 매우 높은 범위에 해당하고 있어, 향후 지반구조물 설계시 반드시 액상화 검토가 요구된다.
2. 지진시 지반에 발생하는 전단응력은 대체로 상세법에 의한 전단응력이 크나, 그 차이의 일정한 형태가 보이지는 않는다.

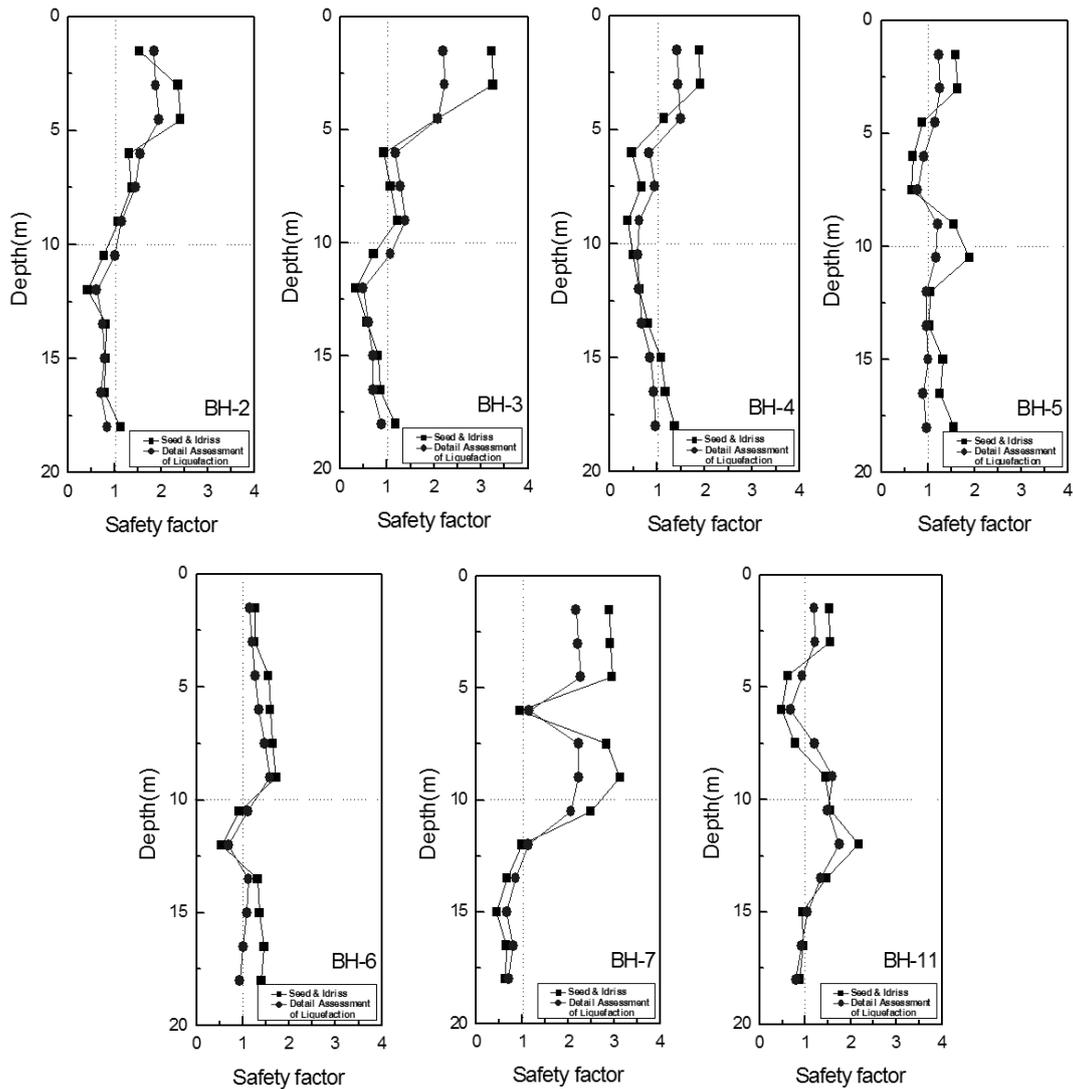


그림 23. 간편법과 상세법에 의한 7개지역의 액상화 안전율

3. 액상화 전단응력은 특히 액상화 가능성이 큰 심도 10m 이내에서 더욱 작은 경향을 보이고 있어, 10m이내의 액상화 가능지역에 대한 액상화 검토는 반복삼축압축 시험 결과를 이용한 상세법에 의하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.
4. 검토대상 지역의 깊이 10m 이내에 기초 또는 지중구조물이 구축될 경우 액상화에 따른 피해가 예상되고 있어, 향후 기초 또는 구조물 설치 위치에 따른 세밀한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

2. 서세관 (2008), 반복삼축시험에 의한 새만금준설토의 액상화 강도특성에 관한 연구, 석사학위 논문, 전북대학교.
3. 오수환 (2011), 새만금 매립지역의 액상화 평가에 관한 연구, 석사학위 논문, 전북대학교.
4. 日本港灣協會 (1999), 港灣の施設の技術上の基準・同解説.
5. 日本建築學會 (2001), 建築基礎構造設計指針.
6. 日本道路協會 (2002), 道路橋示方書 V 耐震設計編.
7. KS F 2345 (2009), 비점성토의 상대 밀도 시험 방법.
8. 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, SM9, pp.1249-1273.

### 참고문헌

(논문접수일 2011. 5. 20, 심사완료일 2011. 6. 27)

1. 박인준, 신윤섭, 최재순, 김수일 (1999), "기존의 액상화 평가기법 및 그 적용성에 관한 연구" *지반공학회 봄 학술발표회*, pp.431-438.