

준설매립지반의 액상화 간편예측 개선에 관한 연구

Improvement Scheme of Simplified Liquefaction Potential Evaluation for a Dredged and Reclaimed Ground

정 민 형¹ Jung, Min-Hyung

김 주 현² Kim, Ju-Hyun

정 상 국³ Jeong, Sang-Guk

이 송⁴ Lee, Song

Abstract

In this study, the analysis of density characteristics of some dredged and reclaimed ground sites, which is necessary for liquefaction evaluation of a dredged and reclaimed ground, was conducted. From analyzing a simplified liquefaction potential evaluation using SPT-N values which have been applied as domestic earthquake-resistant design criterion, improvement scheme is suggested. Based on the analysis result of density characteristics, it was found out that the relative density and the initial N-value ranged respectively 40~50% and 5~8. In the case of applying Liao & Whitman's equation to correct effective overburden pressure, liquefaction resistance of the upper ground that is relatively weaker than that of lower ground is overestimated. So, Skempton's equation is recommended. And the N value with depth which is applied for design process should be estimated by the exponential equation, $N = 1.35\sigma^{0.75}$.

요 지

본 연구는 사질토로 준설매립된 지반의 액상화 평가를 위해 반드시 요구되는 초기 밀도특성을 분석하였고, 국내 내진 설계기준에서 제시한 SPT-N을 이용한 액상화 간편예측 방법의 문제점을 분석하여 개선방안을 제시하였다. 기존 시공사례를 토대로 매립 직후 준설매립지반의 밀도특성을 분석한 결과, 상대밀도와 초기 N값은 대체로 각각 40~50%, 5~8의 범위에 분포하였다. 액상화 간편예측에 있어서 유효상재압 보정의 Liao & Whitman식은 항상 지진에 취약한 상부층이 하부층보다 액상화 저항능력이 크게 산정되어 Skempton식의 적용이 추천된다. 또한, 설계단계에서 준설매립 지반의 심도별 N값을 산정할 경우에는, 유효응력에 따른 N값의 변화를 나타내는 누승함수 $N = 1.35\sigma^{0.75}$ 를 이용하여 액상화 간편예측을 실시할 것을 추천한다.

Keywords : Correction effective overburden pressure, Initial N value, Liquefaction potential evaluation, Liquefaction resistance

1. 서 론

최근 우리나라는 서·남해안을 중심으로 해안의 도서 지역이나 연안의 공유수면을 매립하여 대규모 부지를

조성, 항만 및 공항 등의 부지개발이 꾸준히 이루어지고 있다. 보통 준설매립시 도로 및 단지 등에 매립 지반의 사용성을 고려하여 사질 계열의 흙을 준설매립재료로 사용하는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 그러나 준

1 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Seoul)

2 정희원, 알지오이엔씨 차장, 공학박사 (Member, Deputy General Manager, Ph.D, R-geo E&C Co. Ltd)

3 정희원, 송원대학 토목계열 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Songwon College)

4 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Seoul, scugeo@uos.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

설매립의 특성상 매립 후 불균질 지층을 형성하며 매우 느슨한 상태로 놓여있게 된다. 따라서, 지진에 대해 매우 취약한 상태에 놓이게 되므로, 액상화 발생 가능성 여부에 대해 반드시 평가해야 된다. 이 때, 액상화 발생 가능성이 높은 지반으로 평가될 경우 후속 공정으로 동다짐, 바이브로 플로테이션 및 모래다짐말뚝 등의 대책 공법을 적용하게 된다.

액상화 가능성을 간단한 자료로 평가하는 액상화 간편예측법은 Seed & Idriss(1971)가 반복삼축시험과 현장시험을 통해 액상화 평가방법 절차를 제안한 이래, Seed 등(1985)은 SPT-N값을 이용한 간편예측 도표를 제시하였다. 그 이후에 Youd & Idriss(2001)를 포함한 21명이 참가한 워크숍에서 세립분 함유량이 5% 이하인 조건에 대해서 액상화 저항능력비에 대한 하한계값으로 0.05를 적용하도록 한 수정 도표를 제시하였다. 또한, Iwasaki 등(1978)은 진동삼축시험을 토대로, 평균입경 D_{50} 과 세립분 함유량 40% 기준을 고려한 간편식을 제시하였다. 이 때 액상화 안전율은 지진시의 전단응력비와 지반의 액상화 저항능력비를 비교함으로써 산정하게 되며, 지진시 발생하는 전단응력비는 설계가속도와 동적특성치를 토대로 한 지진응답해석을 통하여 산정하게 된다. 이 때, 지진응답해석은 주로 SHAKE 91을 많이 이용한다.

현재 SPT-N값을 이용한 액상화 간편예측법은 CPT, 전단파속도를 이용한 방법들 보다는 설계단계에서 적용빈도가 훨씬 높은 실정이다. 이와 같은 원인은 원지반 상태를 평가하기 위한 가장 기초적이면서도 광범위하게 수행되는 시험이 바로 표준관입시험이기 때문이라 할 수 있다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이, 사질토로 준설매립된 지반에 대한 액상화 발생 가능성을 평가할 경우, 실제 시공이 이루어지기 전의 설계단계에서는 매

립 완료된 지반의 특성에 대해 기존의 시공사례들을 토대로 초기밀도 및 초기 N값들을 가정해야 되는 경우가 빈번하게 발생하게 된다. 특히 국내 설계 여건상 그 평가에 있어 사질토로 준설매립된 지반의 밀도 특성 및 그와 밀접하게 연관된 SPT-N값은 합리적인 근거 자료 없이 설계에 적용되어 이를 토대로 액상화 간편예측을 실시하고 있는 실정이다.

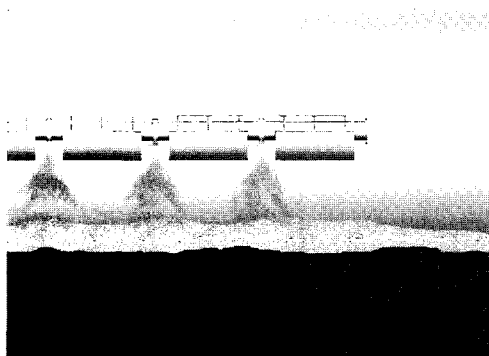
따라서, 본 연구에서는 준설매립지반의 밀도특성에 대해 국내외의 기존시공사례를 토대로 밀도특성 및 심도별 초기 N값에 대한 분석을 실시하여 적용방법을 제안하였다. 또한, SPT-N값(Seed et al, 1985)을 이용한 액상화 간편예측시 실시되는 N값에 대한 유효상재압 보정 방법의 문제점을 분석하여 개선방안을 제시하고자 한다.

2. 준설매립지반의 초기밀도 분석

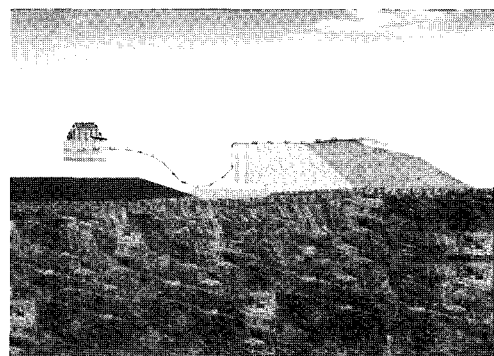
준설매립지반의 액상화 발생가능성을 평가하기 위해서는 매립이 완료된 직후의 준설매립지반의 초기밀도를 평가하는 것이 매우 중요하다. 준설매립은 수면아래의 지반을 굴착하여 물과 토립자가 혼합된 상태로 배사관을 통해 매립지역으로 이송하여 부지를 조성하는 공법으로, 준설매립에 의해 조성된 지반의 초기밀도 분포는 매립방법에 따라 상이하게 나타난다. 보통의 준설매립현장에서 주로 이용하는 매립공법으로써는 그림 1의 수중모래포설공법인 수중 Hopper Dumping 공법과 Hydraulic Fill 공법이 대표적으로 적용되고 있다.

2.1 상대밀도

매립방법에 따른 상대밀도 분포에 대해 국내 시공사례



(a) Hopper Dumping 공법



(b) Hydraulic Fill 공법

그림 1. 대표적 준설매립방법

로 제시되어 있는 자료는 극히 적은 상태이므로, 해외 시공시 제시된 준설매립 직후의 상대밀도 특성에 대해 소개하고자 한다. Shen & Lee(1994)에 의해 홍콩 준설매립 현장기준으로 제시된 상대밀도는 시공방법에 따라 수상 교통 다짐에 의해 상대밀도 80%, 수중 Hopper Dumping 공법에 의해 상대밀도 35~65%, 수중 Hydraulic Fill 공법에 의해 상대밀도 25~55% 범위에서 분포하는 것으로 나타났다. 이를 통해 수중 Hydraulic Fill 공법보다 Hopper Dumping 공법에 의해 조성된 준설매립부지의 상대밀도가 대략 10% 정도 크게 산정되는 것을 알 수 있다. 이를 토대로 대부분의 경우 수중 Hydraulic Fill 방법을 통해 준설매립을 하고 있는 국내 실정을 감안한다면, 국내 준설매립지반의 초기 상대밀도가 상당히 낮게 분포할 것이라는 것을 예측할 수 있다. 또한, NAVFAC(1982)의 Design Manual 7-2에서는 15% 이하의 비소성 세립분 또는 10% 이하의 소성 세립분이 함유된 매립재료를 Hydraulic Fill 공법에 의해 투기할 경우, 별도의 다짐공법 적용 없이 50~60% 정도의 상대밀도가 얻어지는 것으로 제시되어 있다.

2.2 해외 준설매립현장의 심도별 N값 분포 분석

다음 표 1은 일본의 네 준설매립현장에서 실측결과를 토대로 하여 일본항만기술연구소에서 제시한 N값의 적용범위를 나타내고 있다. 준설투기 방법에 따른 차이는 있으나, 대체적으로 N값은 2~10의 범위에서 분포하는 것을 알 수 있다. 특히, 국내의 경우는 준설투기에 의해 조성된 부지에 대한 상대밀도 또는 N값에 대한 적용범위가 아직까지 제시되어 있지 않은 실정이다. 따라서, 기존 준설매립현장에서 실측된 N값을 분석하여, 적용범위를 제시한 일본항만기술연구소(PHRI)의 추천 N값 5~8은 매립지반의 액상화 평가 또는 노상·노체로서 이용될 경우 초기 특성값을 산정할 때 활용가치가 높을 것으로 판단된다.

표 1. 준설매립지반의 심도별 N값의 범위(Iwasaki 등, 1978)

지역	N값
Yokohama 항	0~5
Toyoma 항	2~9
MOT 항	5
Kawasaki 항	8~10
일본항만기술연구소(PHRI)	5~8

(1) 유메시마항 (일본)

일본 유메시마항을 조성은 해저토사를 하상에서 직접 투기하는 방법으로 매립이 이루어졌다. 심도 8m까지는 Hydraulic Fill 방법을, 그 이하는 Hopper Dumping 방법을 적용하였다. 그리고, 매립재료는 통일분류법상 SM에 해당되는 준설토가 투기되었다. 지하수위는 4.5m에 위치하는 것으로 평가되었고, 수상조건에서의 N값은 10~14 범위에서, 수중조건에서의 N값은 8~10 범위에서 분포하였는데, 이는 수중에서 흙 입자의 느린 퇴적현상과 Hydraulic Compaction의 영향이 부족하기 때문으로 분석되었다(Turnbull 등, 1973). 또한, Hopper Dumping 방법을 적용한 경우, 평균 N값의 범위가 10~15로 Hydraulic Fill 방법보다 밀도증가 측면에서 유리한 것으로 나타나, 앞서 언급한 상대밀도 특성과 유사한 결과를 나타내고 있다.

(2) 버지니아 신항 (미국)

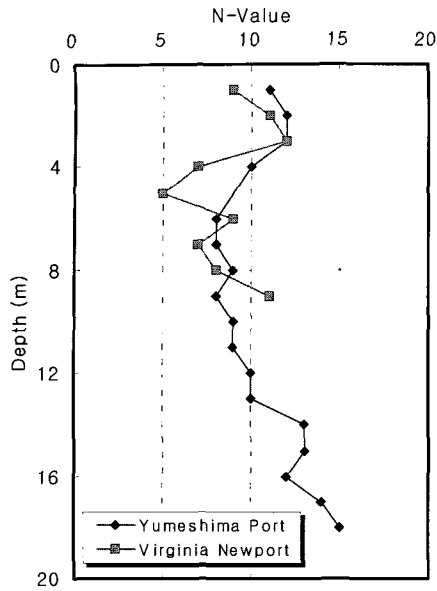
미국 버지니아 신항을 조성하기 위해 약 9m 두께의 준설매립이 이루어졌다. 지하수위는 심도 1m에 위치하며, 준설 매립재료는 연구대상이 되는 통일분류법상의 SM에 해당되었다. 심도별 N값의 분포 범위는 5~12이며, 역시 심도가 깊어질수록 N값이 증가하는 경향을 나타냈다(Mayne 등, 1984).

(3) 홍콩 준설매립현장

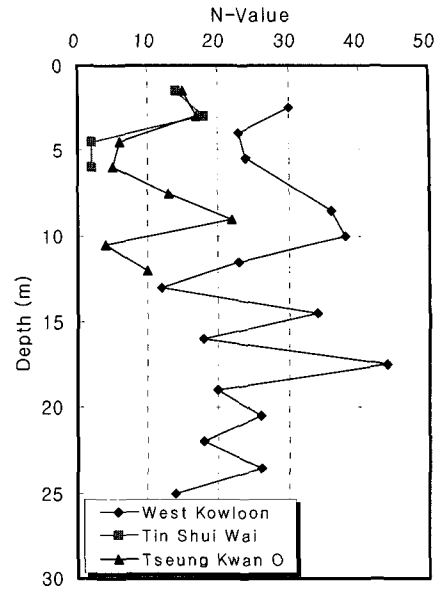
준설매립이후 심도별 지반특성을 파악하기 위하여, West Kowloon(CSI), Tin Shui Wai(TSW), Tseung Kwan O(TKO)의 3곳에서 표준관입시험이 실시되었다. 준설매립토의 두께는 각각 25m, 6m, 16m, 지하수위는 각각 9.5m, 4m, 4m에 위치하였다. 매립재료의 세립분 함유율은 5% 미만으로 통일분류법상 SW로 입도분포가 매우 양호하지만 액상화저항에 대해서는 불리한 조건의 입도분포를 보였다. 수상조건에서의 N값 분포는 15~35, 수중조건에서의 N값 분포는 5~40 범위로 전체적으로 심도별 N값의 편차가 큰 결과를 나타냈다(Shen 등, 1994).

2.3 국내 준설매립현장의 심도별 N값 분포 분석

준설투기방법에 의해 조성된 초기 부지의 상태가 심도에 따라 어떠한 N값 분포 경향을 보이는지 파악하기 위하여, 국내 준설매립현장 인천 송도신도시, 군장신항 컨테이너 부두 배후부지 조성공사, 부산동파제 및 서방



(a) 일본과 미국



(b) 홍콩

그림 2. 깊이에 따른 심도별 N값 분포(해외사례)

파제 축조공사, 영종도에서 실시된 실측결과를 조사하였다.

(1) 인천 송도신도시

지표면으로부터 최상부에 형성되어 있는 준설패립층 평균 매립두께는 약 10m이며, 통일분류법상 SP 또는 SM으로 분류되었고, 지하수위는 지표면으로부터 평균 2m 내외에 위치하였다. 표준관입시험에 의한 심도별 N값은 3~12의 범위로 매립특성은 대체적으로 느슨하거나 보통인 상태로 평가되었다(송도신도시 건설공사-지반개량 다짐관리 연구보고서, 2003).

(2) 군장신항 컨테이너 부두 배후부지 조성공사

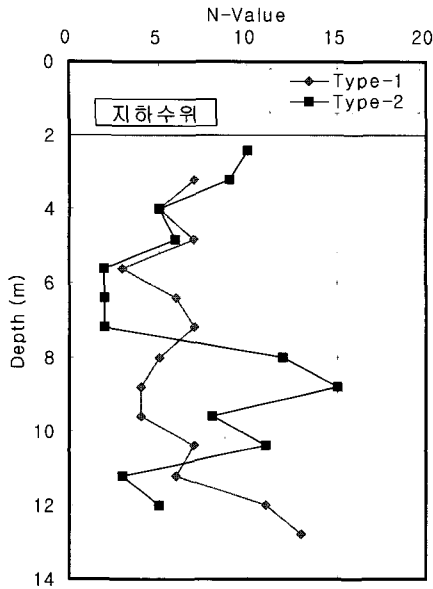
군장신항 남측안벽 컨테이너 부두 배후부지 조성공사를 위해 준설패립이 실시되었다. 평균 매립두께는 대략 9m, 지하수위는 약 1~2m에 위치하며, 준설토는 송도지역과 마찬가지로 통일분류법상 SP 또는 SM으로 분류되었다. 그림 3(b)에 나타난 것과 같이 표준관입시험이 4구역에서 1.5m 간격으로 기반암까지 실시되었다. 표준관입시험에 의한 심도별 N값은 3~10의 범위로 대체적으로 느슨한 상태에 놓여있다. 송도지역의 경우는 확실하게 심도에 따라 N값이 증가하는 모습을 보이지 않지만 군장지구의 경우는 상당히 뚜렷하게 심도가 증가하면서 N값이 증가하는 경향을 보였다(군장신항 컨테이너 부두 배후부지 조성공사-동다짐 종합보고서, 2005).

(3) 부산신항 동방파제 및 서방파제

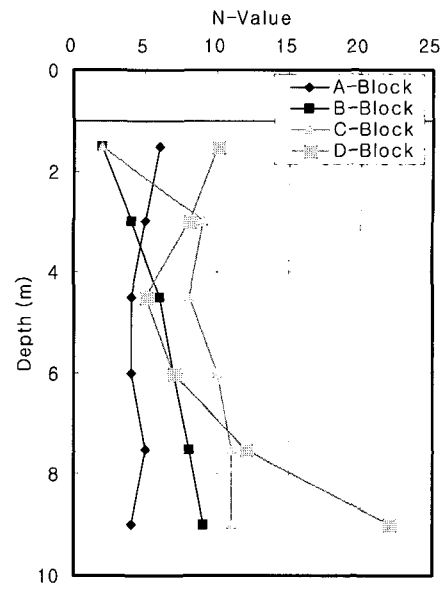
부산신항의 방파제 시공을 위하여 준설패립 공사가 시행되었고, 시공 직후 동방파제 지역과 서방파제 지역에 대하여 표준관입시험을 실시하여 초기 매립특성을 조사하였다. 각각의 방파제마다 다시 4구역으로 나누어 표준관입시험을 실시하였으며, 이 구역들의 평균 매립두께는 9~15m 이고, 준설패립재료는 통일분류법상 SP로 분류되었다. 군장신항의 경우와 마찬가지로 심도가 깊어질수록 N값의 증가 경향이 뚜렷하였고, 심도별 N값은 5~10 정도의 범위에서 분포하는 것으로 나타나, 이 역시 군장신항의 경우와 비슷한 분포를 특성을 보였다. 그림 3(c)와 그림3(d)에 나타난 심도별 N값 분포는 지하수위 아래에서 측정된 결과이다(부산신항 동·서방파제 축조공사 확인조사 보고서, 2002).

(4) 영종도 지반공학 야외시험장

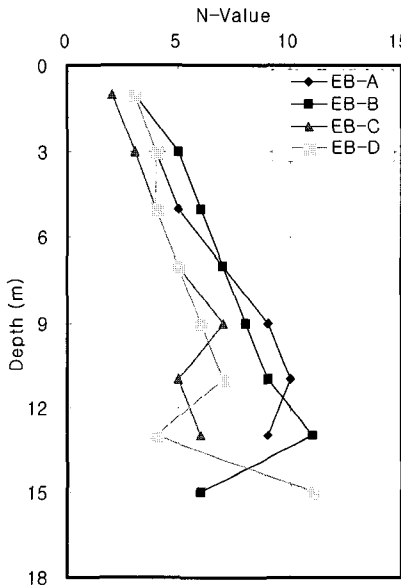
김동수 등(1999)은 영종도에 야외시험장을 설치하여 준설패립으로 조성된 지반을 유압해머다짐으로 개량한 후, 다양한 실험을 통하여 사질토지반의 개량효과를 평가하였다. 본 논문에서는 준설패립 직후의 초기특성에 초점이 맞추어져 있으므로, 개량 전의 특성에 대해 나타났다. 개량 전 심도별 N값은 지하수위 4~5m를 기준으로 그 이하는 상당히 낮은 값을 보였으나, 그 이상의 2m 정도는 모세관 현상에 의한 겉보기 Suction이 작용하여 높은 값을 보인다고 하였다. 지하수위 이하에서 N값은



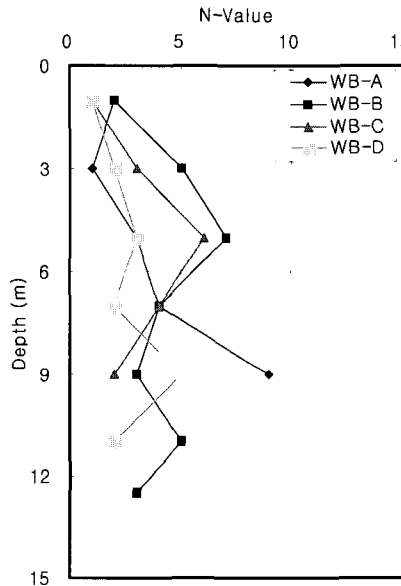
(a) 송도 신도시



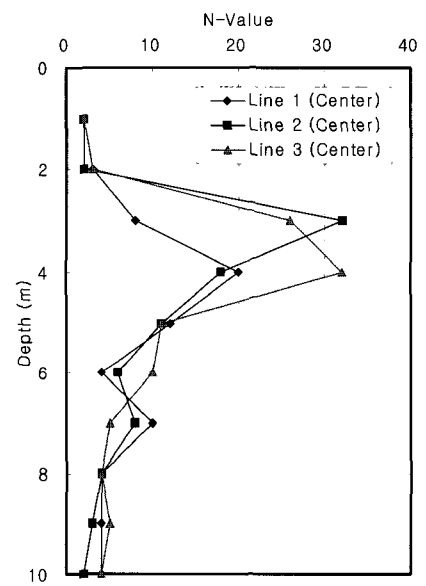
(b) 군장 신항



(c) 부산 동방파제



(d) 부산 서방파제



(e) 영종도 야외시험장

그림 3. 깊이에 따른 N값 분포(국내사례)

대체적으로 심도에 따라 약간 감소하는 N값의 경향을 나타냈다.

2.4 초기 N값 및 상대밀도 분석 결과

심도에 따른 초기 N값에 대한 분석에서 대체적으로 국외의 시공현장은 N값의 편차가 상당하였으나, 대체적으로 심도가 깊어지면서 N값이 커지는 경향을 보였다. 국내의 경우는 그 값의 분포도 일정한 경향을 나타내었으며, 심도에 따른 N값은 대체적으로 그 증가의 경

향이 뚜렷이 나타났다. 본 연구에서는 심도에 따른 초기 상대밀도를 산정하기 위하여 상대밀도와 N값과의 상관관계를 이용하였다.

N값을 이용한 상대밀도 산정에 관한 초기 연구에서는 N값을 이용하여 상대밀도를 직접 산정하는 방법을 이용하였다. 이후에, 실내시험을 바탕으로 한 연구를 통해서, N값은 유효상재압에 의해 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 따라서, Gibbs와 Holtz(1957)는 Calibration Chamber Tests를 기준으로, N값과 유효상재압을 이용하여 상대밀도를 산정하는 식을 제시하였다. 이 식은 낮

은 지반심도에서 상대밀도에 따른 N값을 작게 산정하게 됨으로 비교적 안전한 해석결과를 도출하며 특히, 상대밀도가 높지 않은 경우에 적합한 식으로 알려져 있다. 식 (1)은 Gibbs와 Holtz(1957)가 대상 심도에서의 유효 수직응력을 토대로 규명한 상대밀도와 N값과의 상관관계를 나타내고 있다.

$$D_r = \left(\frac{N_{SPT}}{23\sigma'_v + 16} \right)^{0.5} \quad (1)$$

여기서, NSPT는 표준관입저항값 N값을 나타내며, σ'_v 는 유효상재압을 나타낸다. 이 때, 유효상재압의 단위는 kg/cm^2 이다.

국내 5개 현장에서 실측된 N값을 기준으로 식 (1)을 이용하여 심도에 따라 산정된 상대밀도는 그림 4와 같다. 또한, 표 2에 나타낸 바와 같이 통계분석을 통하여, 상대밀도의 평균 및 표준편차는 각각 41.8, 11.3으로 산정되었다. 그림 5는 상대밀도에 따른 확률밀도함수를 나타내며, 이를 통해, 매립 직후의 초기 상대밀도는 대체로 40~50% 사이에서 분포함을 알 수 있다.

한편, 국내 5개 현장에서 측정된 심도별 N값 분포와 통계분석 결과를 각각 그림 6, 표 3에 나타내었으며, 심

도별 N값에 대한 평균 및 표준편차는 각각 6.0, 3.5로 산정되었다. 그림 7은 N값에 따른 확률밀도함수를 나타내며, 이를 통해 매립 직후의 초기 N값은 5~8 사이에서 분포함을 알 수 있다. 따라서, 통일분류법상 SP나 SM으로 분류되는 준서 매립재료를 이용하여 준서매립된 지반의 액상화 평가, 즉 간편 및 상세예측을 수행하는데 있어서 지반의 초기 매립특성을 산정할 때, 통계분석을 실시한 결과, 초기 N값은 5~8, 상대밀도 40~50%가 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

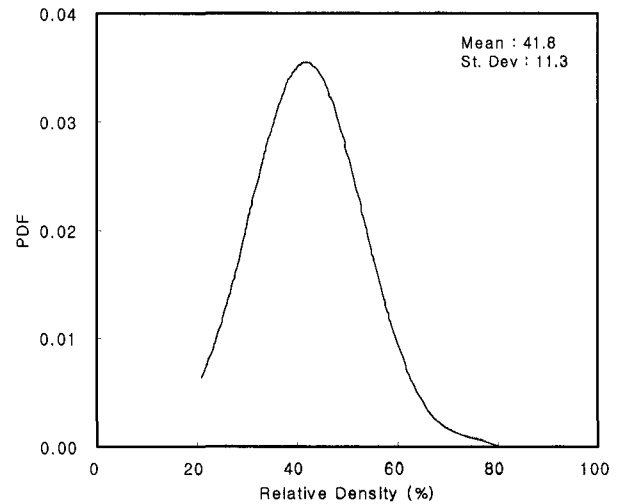


그림 5. 상대밀도에 따른 확률밀도함수 분포

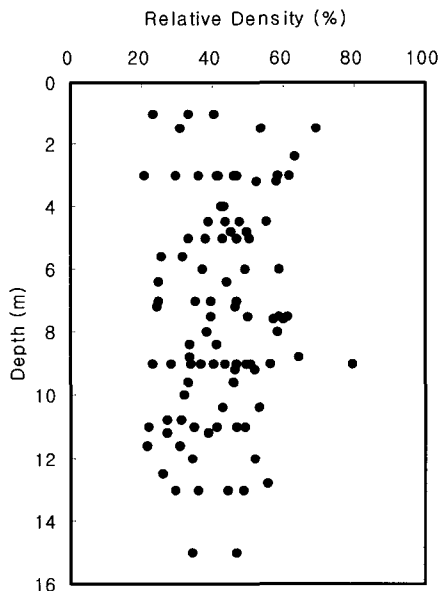


그림 4. 깊이에 따른 상대밀도 분포

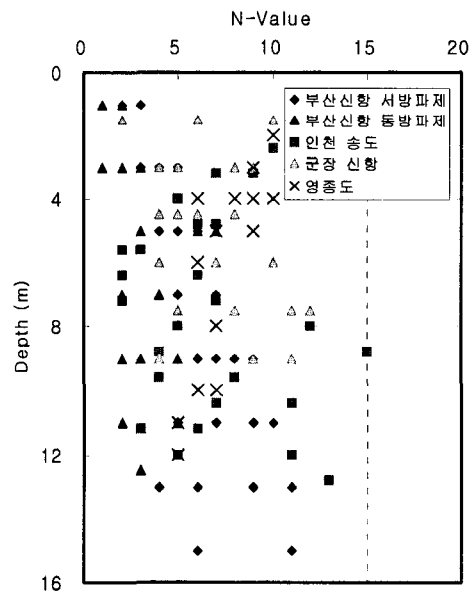


그림 6. 깊이에 따른 N값 분포

표 2. 심도에 따른 상대밀도에 대한 통계분석

평균	표준편차	분산	신뢰수준 (95.0%)
41.8	11.3	126.7	2.0

표 3. 심도에 따른 N값에 대한 통계분석

평균	표준편차	분산	신뢰수준 (95.0%)
6.0	3.5	12.1	0.6

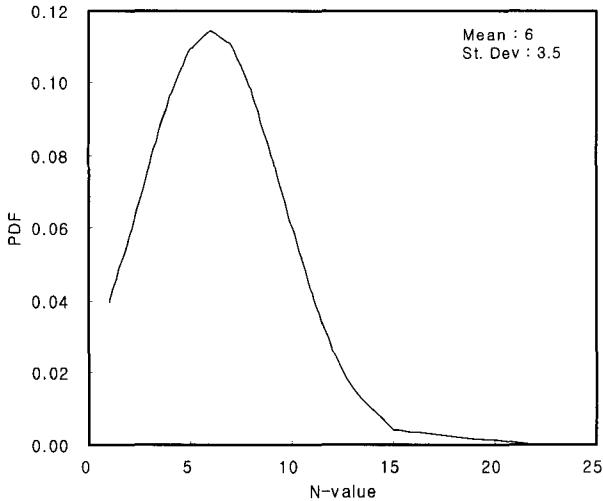


그림 7. N값에 따른 확률밀도함수 분포

3. 국내 액상화 간편예측의 문제점 및 개선방안

3.1 유효상재압 보정에 대한 분석

N값의 유효상재압에 대한 보정방법은 Seed, Liao & Whitman, Skempton 등 여러 연구자들에 의해 제시되어 있지만, 그림 8에 나타난 바와 같이 대기압 1bar 이하의 응력조건에서 대략 1.5~2.5배까지 유효상재압 보정계수 C_N 의 편차가 매우 크게 발생되는 것을 알 수 있다. 여기서, Skempton에 의해 제안된 보정계수는 대부분이 실내시험 데이터를 기준으로 제시된 반면에, 그 외의 다른 연구자들에 의한 값은 현장 데이터를 기준으로 제시

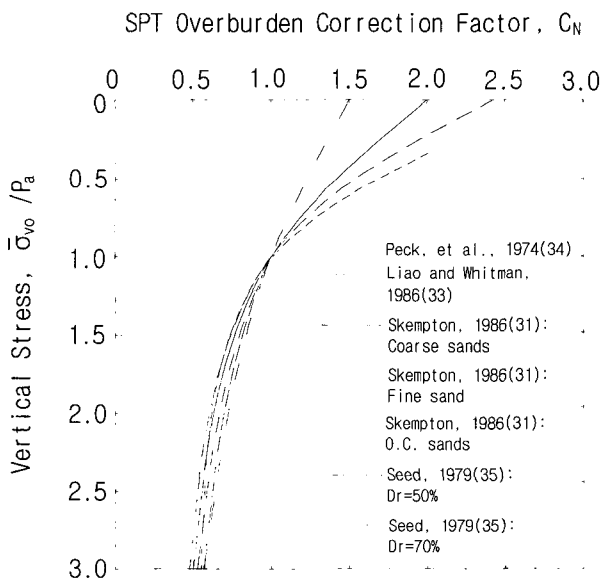


그림 8. 유효상재압에 따른 보정계수, C_N 의 비교(Cornell University, EL-6800, Research Project 1493-6, 1990)

되었다.

특히, 국내 액상화 간편예측에 적용되는 Liao & Whitman (1986)의 식 (2)는 다른 보정식들과 비교할 때 산정식이 간단하지만, 표층에서 N값이 과다하게 보정되는 경향을 나타내므로, 이 식을 적용할 경우 표층부에서 액상화 저항응력비가 상대적으로 크게 산정되는 결과를 초래하게 된다. 국내 항만 및 어항설계 기준(2005)에서는 액상화 평가 대상 심도가 20m 이상이면 액상화 평가를 생략하는 것으로 되어있는데, 이는 대상 심도가 깊어질수록 구속압이 크게 작용하여 액상화 발생가능성이 낮아지는 경향을 반영한 것으로 판단된다.

$$C_N = \left(\frac{10}{\sigma'_v} \right)^{0.5} \quad (\text{Liao \& Whitman, 1986}) \quad (2)$$

여기서, C_N = 보정계수, σ'_v = 유효상재압(tf/m²)

그림 9는 Liao & Whitman(1986)식과 Skempton(1986)식을 비교하여 나타낸 것이며, 그 중에서도 Skempton (1986)식은 정규압밀된 세립질 모래에 대한 식 (3)을 이용하였다. 두 식은 0.5bar 이상의 응력조건에서는 비교적 적절한 값을 나타내며, 과압밀된 모래에 대해서도 적용 가능한 것을 알 수 있다. 한편, Skempton(1986)식은 지표에서 상한값이 2 이지만, Liao & Whitman(1986)식은 상부층에서 그 값이 커지는 문제로 인하여 3m 보다 얕은 심도에 대해서는 일률적으로 상한값 2.0을 적용하도록 하고 있다. 모든 응력조건에서 Skempton(1986)식이 Liao & Whitman(1986)식 보다 작은 값을 나타내며, Liao & Whitman(1986)식이 3m 이하의 심도에서 상한

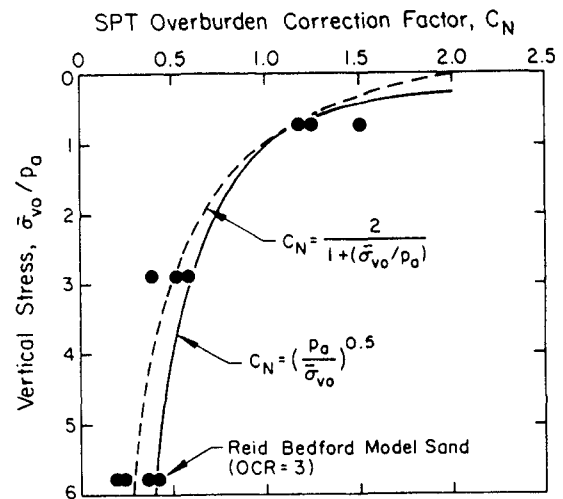


그림 9. 추천된 C_N 값과 과압밀 모래에 대한 데이터의 비교(Liao & Whitman, 1986)

값을 두는 것을 감안하면, 이러한 경향은 지표에 가까울수록 더욱더 현저함을 알 수 있다.

실제 설계단계에서는 준설투기에 의해 조성될 부지의 초기밀도특성, 즉 상대밀도 또는 SPT-N값은 실측결과가 없으므로, 기존시공 사례 등을 참고하여 액상화 발생 가능성을 평가하는 절차를 일반적으로 따르고 있다. 이 때 준설매립지반의 초기 N값은 2.4절에서 언급한 바와 같이 5~8 중 한 값을 선정하여 전 심도에 대해 일률적으로 적용하고 있다. 이러한 적용은 유효상재압에 대한 보정 후 액상화 반복저항능력비를 산정할 경우, 대기압 1bar 기준으로 하부층은 상대적으로 액상화 발생가능성이 높고, 상부층은 액상화 발생가능성이 낮게 나타나는 경향을 나타내며, 이러한 경향은 Liao & Whitman(1986)식을 이용하여 유효상재압에 대한 보정을 실시할 경우 더욱 현저하게 나타난다.

따라서, 본 연구에서는 간편예측법에 의한 액상화 반복저항능력비 산정에 있어서, Liao & Whitman(1986)식 대신 Skempton(1986)식 중 정규압밀된 세립질 모래에 적용하는 식 (3)을 유효상재압 보정에 적용할 것을 제안하고자 한다. 다음은 흙의 응력이력 및 입경에 따라 유효상재압 보정계수를 산정하는 Skempton(1986)식을 나타내고 있다.

$$C_N = \frac{2}{1 + \sigma'_v/10} \quad (\text{정규압밀된 세립질 모래}) \quad (3)$$

$$C_N = \frac{3}{2 + \sigma'_v/10} \quad (\text{정규압밀된 조립질 모래}) \quad (4)$$

$$C_N = \frac{1.7}{0.7 + \sigma'_v/10} \quad (\text{과압밀된 모래}) \quad (5)$$

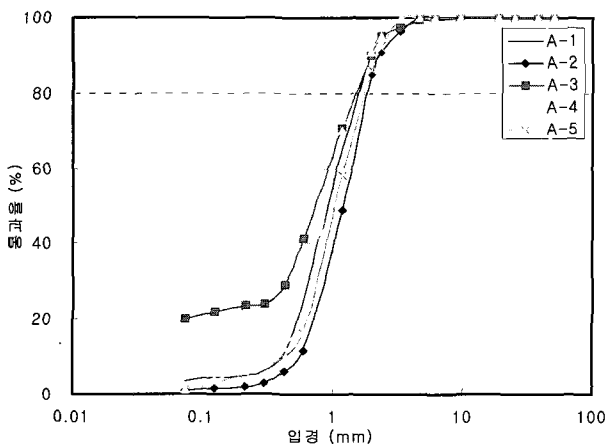


그림 10. 준설토의 입도분포곡선

유효상재압 보정에 대해 Liao & Whitman(1986)식과 Skempton(1986)식을 비교분석하기 위하여 부산신항 2-3 단계 컨테이너 부두 축조공사에 대한 준설매립지반을 대상으로 매립심도 20m 지역에 대한 액상화 발생 가능성을 검토하였다. 그림 9는 준설토의 입도분포곡선으로 #200 체 통과량은 1.0~20.0% 범위에서 분포하며, 양호한 사질토(SW)에서부터 빈입도인 세립질 사질토(SP-SM)가 대부분으로 액상화 현상이 발생하기 쉬운 조건을 가지고 있는 것으로 검토되었다. 지하수위는 대략 1.0m로 매립층내에 분포하고 있다.

그림 11~12는 초기 N값에 대해 5와 8을 기준으로 하여, 심도에 따라 두 식을 적용하여 산정된 액상화 저항능력비와 안전율을 나타내고 있다. 두 식의 차이는 지표면에 가까울수록 큰 차이를 보이며 Liao & Whitman(1986)식이 Skempton(1986)식에 비해 액상화 저항능력비 및 안전율에 있어서 최대 1.5배 정도 크게 평가되었다. 구체적으로 N값 5를 적용했을 때, Liao & Whitman(1986)식은 상부로부터 2m 까지는 액상화에 대해 안정한 것으로 판정되었지만, Skempton(1986)식은 모든 층에 대하여 액상화 상세예측이 필요한 것으로 검토되었다.

실제적으로 Liao & Whitman(1986)식은 앞에서 언급한 바와 같이, 상부층에서 그 값이 커지는 문제로 인하여 3m 보다 얕은 심도에 대한 상한값으로 2.0이 제안되었으며(Cornell University, EL-6800, Research Project 1493-6, 1990), 그 이후에 NCEER/NSF 워크숍에서 Youd & Idriss 외 19인(2001)은 액상화 간편예측시 상한값을 이 보다 더 낮추어 1.7을 적용하도록 제안하였다. 이에 반하여 정규압밀된 세립질 모래의 Skempton(1986)식은 최대값을 갖는 지표에서도 유효상재압 보정계수의 최대값이 2.0이므로, 특별히 값의 제한을 둘 필요가 없다.

따라서, 현재까지 국내의 설계기준에서는 Liao & Whitman(1986)식을 적용할 경우, 유효상재압 보정계수에 대해 특별히 상한값을 제한하고 있지 않으므로 지진에 상대적으로 취약한 상부층에서의 액상화 반복저항능력비가 매우 크게 산정되는 결과를 현재 그대로 반영하고 있는 실정이다. 따라서, SPT-N값을 이용한 액상화 간편예측시 적용되는 유효상재압 보정에 대해 Skempton(1986)식을 적용할 것을 추천한다.

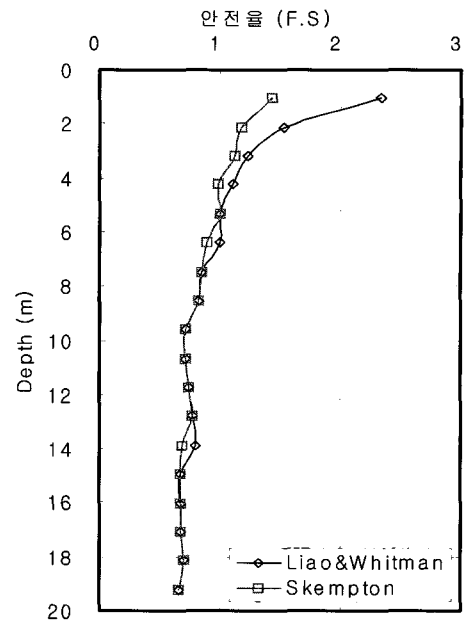
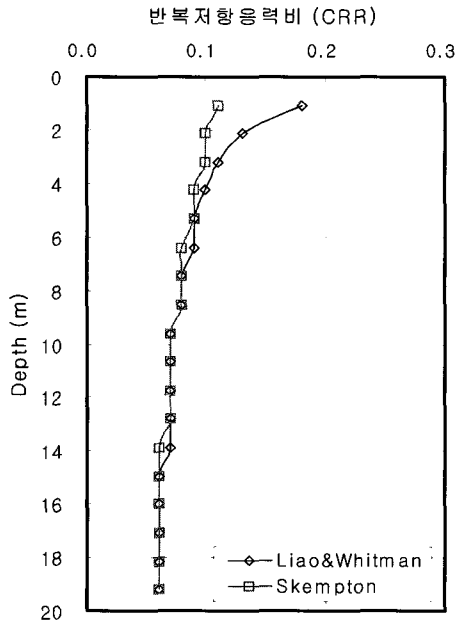


그림 11. 반복저항응력비(CRR)와 안전율(F.S)의 비교분석(N=5)

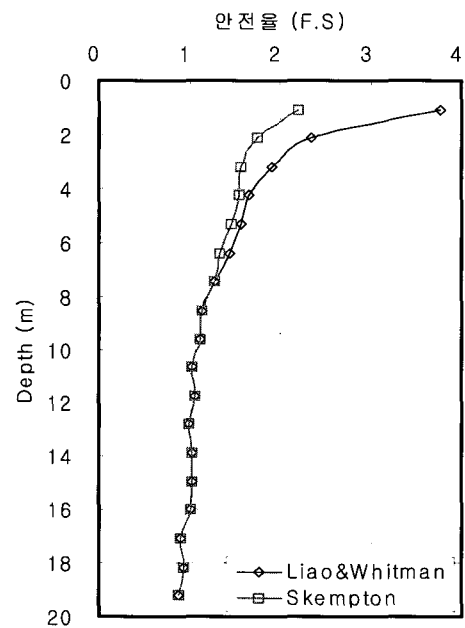
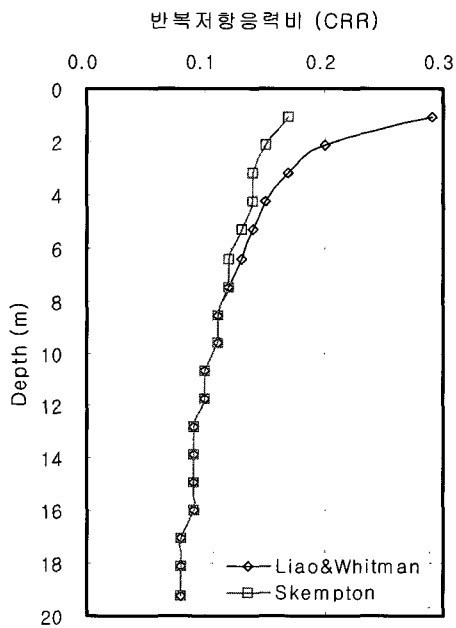


그림 12. 반복저항응력비(CRR)와 안전율(F.S)의 비교분석(N=8)

3.2 매립지반 밀도특성에 대한 분석

Seed et al(1983)의 방법에 의한 준설패립지반의 액상화 간편예측을 실시할 때, SPT-N값이 반드시 필요하지만, 앞서 언급한 것과 같이, 설계단계에서 준설패립된 지반의 심도별 N값 분포를 사전에 파악하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 따르게 된다.

현재 국내에서는 준설패립지반에 대한 액상화 간편예측을 수행할 경우, 5~8의 어느 한 가지 N값을 심도별로

일률적으로 적용하여 보정된 N값을 기준으로 액상화 반복저항응력비를 산정하는 방법을 따르는데, 이와 같은 평가방법은 항상 지표면에 가까운 층이 심층보다 액상화 발생시 보다 안정한 것으로 평가되는 문제점을 지니게 된다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위하여, 그림 6의 국내 준설패립현장의 심도별 N값 분포를 분석하였다. 이때, 심도에 따른 N값이 증가하는 경향을 나타내면서, 결정계수 R^2 값이 가장 높게 산정되도록 분산된 N값들에 대해 필터링하여 누승함수식 (6)을 산정하였다.

$$N = 1.35\sigma'^{0.75} \quad (6)$$

식 (6)은 지하수위의 일반화를 위하여 심도를 유효응력의 향으로 대체하였고, 식 (3)의 적용성을 검증하기 위하여, 3.3절의 대상지반에 대해 일률적인 N값 적용과 유효응력과 N값의 누승함수식 적용을 비교하여 액상화 안전율을 산정한 결과를 그림 14에 나타냈다.

준설매립지반의 밀도특성, 즉 SPT-N값을 크게 평가할수록, 표층부에서의 액상화 안전율은 더 크게 평가되

었으며, 이러한 경향은 Skempton(1986)식 보다 Liao & Whitman(1986)식을 적용한 경우 더욱더 두드러지게 나타났다.

한편, 일률적인 N값을 적용하여 안전율을 산정한 경우와 비교할 때, 누승함수식을 적용한 경우는 심도에 따른 액상화 안전율의 편차가 크게 나타나지 않았다. 이와 같은 결과를 분석해보면 실제 준설투기에 의해 조성된 부지의 현상상태를 고려할 경우, 유효상재압 효과 때문에 심도가 깊어질수록 N값이 증가하는 경향을 나타내지만, 매립지반의 심도별 상대밀도는 거의 동일한 값을 갖게 된다. 따라서 심도에 따른 일률적 N값 적용은 지반 상부층에서 상대밀도를 과다하게 평가함으로써 액상화 저항력 또한 과다평가한다고 할 수 있다. 따라서, 이와 같은 실제 준설매립지반의 밀도특성을 합리적으로 반영하기 위하여, SPT-N값을 이용한 액상화 간편예측을 수행할 경우, 실측 결과를 토대로 산정된 누승함수식의 적용을 추천한다.

4. 결론

본 연구에서는 준설매립지반의 액상화 평가를 위해, 매립지반의 초기밀도특성을 기존 국내외 시공사례를 토대로 분석하였고, 국내 설계 여건을 고려하여 국내 내진설계기준에 제시된 액상화 간편예측 방법에 대한 개선방안을 다음과 같이 제시하였다.

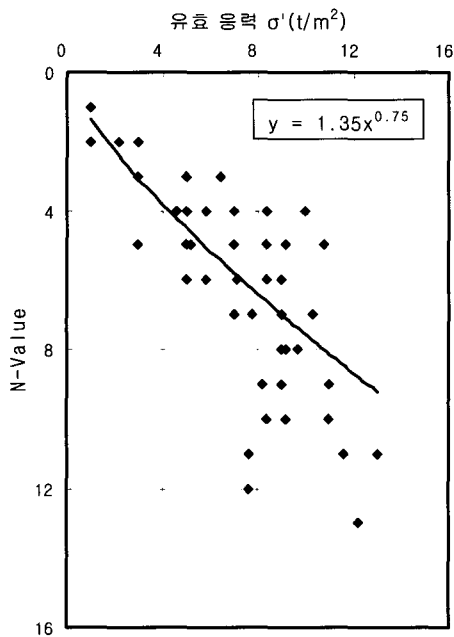
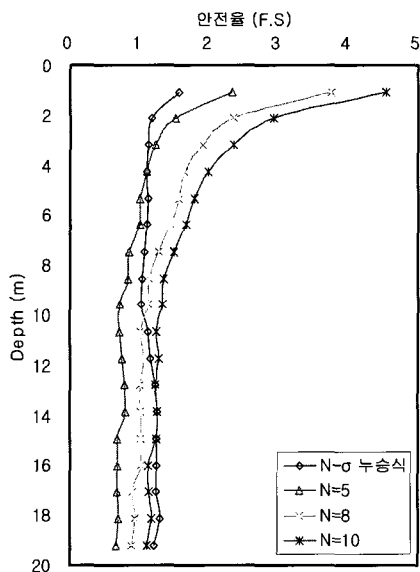
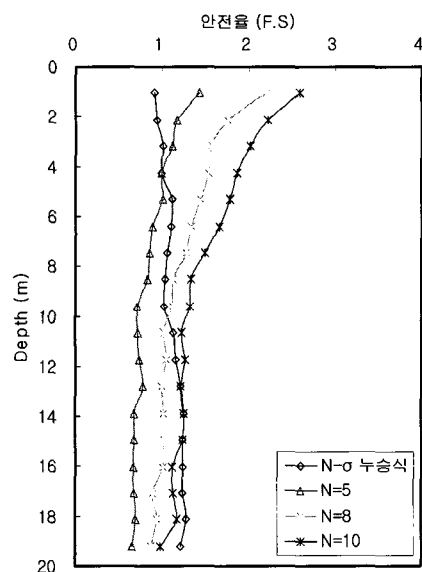


그림 13. 유효응력에 따른 N값의 변화



(a) Liao & Whitman C_N 보정식 이용



(b) Skempton C_N 보정식 이용

그림 14. 누승함수식과 기존 적용방법에 대한 비교

- (1) 기존시공사례를 토대로 매립 직후 준설매립지반의 밀도특성에 대해 통계분석을 실시한 결과, 매립방식에 따른 차이는 있지만, 대략의 초기 N값과 상대 밀도는 각각 5~8, 40~50% 범위에서 분포하였다.
- (2) Liao & Whitman(1986)식을 적용하여 액상화 간편 예측을 수행할 경우, 지진 발생시 상대적으로 취약한 상부층에서의 액상화 반복저항능력이 매우 크게 산정되는 경향을 나타내므로, 이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 N값에 대한 유효상재압 보정에 있어서 상부층과 하부층의 편차가 크게 나타나지 않는 Skempton(1986)식을 적용할 것을 추천한다.
- (3) 설계단계에서 SPT-N값을 이용하여 준설매립지반의 액상화 간편예측을 수행할 때, 실측결과를 토대로 산정된 유효응력에 따른 N값의 변화를 나타내는 누승함수, $N = 1.35\sigma'^{0.75}$ 의 적용은 유용할 것으로 판단된다. 본 논문에서 제시된 누승함수식은 원지반 조건이 아닌 준설매립방법에 의해 조성된 지반 조건을 기준으로 통일분류법상 SW, SM 등 비교적 세립분 함유량이 적은 지반에 대해 적용되어야 할 것이다.
- (4) 액상화 상세예측에 수행되는 반복삼축시험 결과에 의한 각각의 상대밀도와 세립분 함유량에 따라 산정된 액상화 반복저항능력의 데이터베이스를 구축하여, SPT-N값에 의한 액상화 간편예측 방법과 같이 액상화 발생가능성을 간편하게 평가할 수 있는 방법이 향후 지속적인 연구를 통하여 제시되어야 할 것이다.

현재 국내에서는 항만공사가 활발하게 진행되고 있으므로, 시공 전·후의 지반물성값에 대한 데이터베이스를 확보하여 차후 유사한 항만공사가 있을 경우 이를 설계 자료로 활용하여 내진설계의 신뢰성을 향상시키는 방안이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김동수, 박형춘, 김영웅, 김수일 (1999), “영종도 지반공학 야외 시험장에서의 사질토지반 개량효과 평가”, *한국지반공학학회 논문*

- 술발표대회 논문집, pp.439-446.
2. 인천광역시 도시개발본부 (2003), *송도신도시 건설공사 지반개량 다짐관리 연구보고서*.
3. 효성건설(주) (2005), *군장신항 컨테이너 부두 배후부지 조성공사 동다짐 종합보고서*.
4. 해양수산부 (2002), *부산신항 동·서방파제 축조공사 확인조사 보고서*.
5. 해양수산부 (2005), *항만 및 여항설계 기준*, pp.323-331.
6. Cornell University, EL-6800, Research Project 1493-6 (1990), *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*, pp.2-17~2-38.
7. Gibbs, H. J. and Holtz, W. G. (1957), “Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing”, *Proceedings, 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, London, pp.35-39.
8. Iwasaki, T., Tatuoka, 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.
9. Liao, S. S. C. and Whitman, R. V. (1986), “Overburden Correction Factor for SPT in Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.112, No.3, March 1986, pp.373-377.
10. Mayne, P. W., Jones, J. S. and Dumas, J. C. (1984), “Ground Response to Dynamic Compaction”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.110, No.6, pp.757-774.
11. NAVFAC DM-7.2 (1982), *Foundations and Earth Structures*, pp. 54-56.
12. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), “Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.97, No.SM9, pp.1248-1272.
13. 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.
14. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. and Chung, R. M. (1985), “The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.111, No.12, pp.1425-1445.
15. Shen, C. K. and Lee, K. M. (1994), “Hydraulic Fill Performance In Hong Kong”, *Geo Report*, No. 40&64.
16. Skempton, A. W. (1986), “Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation”, *Geotechnique*, 36, No.3, pp.425-447.
17. Turnbull, W. J. and Mansur, C. I. (1973), “Compaction of Hydraulic Placed Fills”, *ASCE*, Vol.99, No.SM11, pp.939-956.
18. Youd, T. L., Idriss, I. M. et al. (2001), “The 1996 NCEER and NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.10, October, pp.817-833.

(접수일자 2006. 11. 6, 심사완료일 2007. 8. 22)