

내진해석을 고려한 정보화 시공

Information Geo-Technology for Seismic Analysis

박인준¹⁾, Inn-Joon Park, 김수일²⁾, Soo-Il Kim, 서경범³⁾, Kyung-Bum Seo, 박성용⁴⁾, Seong-Yong Park

¹⁾ 한서대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanseo University

²⁾ 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

³⁾ 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

⁴⁾ 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : Over the past decade, major advances have occurred in both understanding and practice with regard to assessment and mitigation of hazard area associated with seismically induced soil liquefaction. In this paper, assessment of liquefaction resistance of soil are reviewed from the recent researches. In addition site characteristics investigation methods and tests for seismic design and liquefaction analysis are reviewed. Finally, introduction and characteristics of remedial measures against soil liquefaction are reviewed briefly.

Keywords : Liquefaction resistance, SPT, CPT, BPT, shear-wave velocity, MSF, remedial measures, sensor, data acquisition system

1. 서 론

최근 국내에서 협소한 토지 사정과 함께 지역 개발목적으로 인하여 연안지역을 개발하는 사례가 많아 지고 있다. 그러나 연안지역을 사질토로 성토, 매립하는 경우 매립 직후에는 상재압의 영향을 기대하기 곤란하며 지반상태가 느슨하고 또 포화되어 있는 상태로 조성될 가능성이 높다. 이러한 지반에서는 지진과 같은 갑작스러운 진동이 가해질 경우에 작은 규모의 지진에 의해서도 액상화에 의한 피해가 발생할 수 있음이 많은 지진피해 분석 자료에 나타나 있다. 국내의 경우 90년대 이후 주요 시설에 대한 액상화 평가 및 내진해석이 수행되고 있으나 지진자료의 부족으로 평가법에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다.

본 논문에서는 매립지반에서 지진시 가장 문제가 되는 액상화 현상과 액상화에 대한 평가방법, 특히 최근 국외의 액상화 평가방법에 대해 기술하였으며, 액상화 평가를 위해 필요한 현장 계측 방법 및 액상화 대책공법에 대하여 기술하였다. 본 연구 결과를 이용하게 되면 내진해석을 고려한 정보화시공에 도움이 될 것으로 확신하다.

2. 액상화 평가법

액상화 현상은 지진과 같은 급속한 진동하중 발생시, 순간적으로 배수가 허용되지 않음에 따라 느슨한 사질토 또는 매립지반에서 유발되는 과잉간극수압으로 지반의 전단저항력이 저하되거나 전단저항력을 잃게 되는 상태를 표현하는 것으로 그 발생정도에 따라 직접적인 지반파괴가 나타날 뿐만 아니라 이로 인해 야기되는 지반침하 또는 횡방향 변위가 구조물의 안정에 큰 영향을 미치게 된다.

액상화 가능성을 평가하는데 있어서 선행되어야 할 것은 대상 지점에서의 깊이에 따른 안전율을 구하는 것이다. 주로 전응력 개념의 경험적인 간편해석법을 이용하며 대표적인 방법으로는 지진으로 인한

최대전단응력비를 산정하고 지반의 액상화 전단저항강도비를 산정하여 이 두 값을 비교하여 액상화 평가를 수행하는 Seed와 Idriss의 방법, 유럽의 지진 및 지반특성을 고려하여 Seed와 Idriss의 방법을 수정·보완한 Eurocode법, 일본 항만구조물 내진설계규정에 수록된 방법으로 입도분포를 이용한 구역분류를 통해 정성적 평가를 수행하는 Ishihara법 등이 있다. 특히 1996년 NCEER Workshop과 1998년 NCEER/NSF Workshop에서 현재까지의 지반의 액상화 평가에 대한 연구가 집대성 되었으며, Youd 등 (Youd 등, 2001)에 의해 발표되었다. Youd 등의 논문에서는 지진발생 전단저항응력비(CRR) 산정시 사용되는 응력감소계수(stress reduction coefficient)에 대해 수정 보완하였으며, SPT, CPT, BPT 및 전단파속도를 이용한 액상화 평가법과 MSF(Magnitude scaling factor) 등에 관한 기준들을 제시하고 있다. 본 논문에서는 각 방법에 따른 액상화 저항강도 산정 방법 및 MSF에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

2.1 표준관입시험을 이용한 간편예측

표준관입시험을 이용한 간편예측방법은 현장 시추 조사시 병행하여 실시하는 표준관입시험을 통해 지진발생 전단응력비와 지반저항응력비의 관계로부터 액상화 발생을 판단하는 예측방법이다. 액상화 저항강도 산정에서 크게 달라진 내용은 세립분 함유량에 따른 보정과 표준관입시험에 따른 보정계수 부분이다. 그림 1은 순수 모래에 기초하여 지진규모 7.5에 해당하는 수정된 표준관입시험치 $(N_{10})_{60}$ 에 따른 전단저항응력비의 관계를 나타낸 것이다. 그림 1에서 $(N_{10})_{60}$ 는 상재압 100 kPa, 해머 에너지효율 60%에 대하여 보정된 표준관입시험치를 나타낸 것이다.

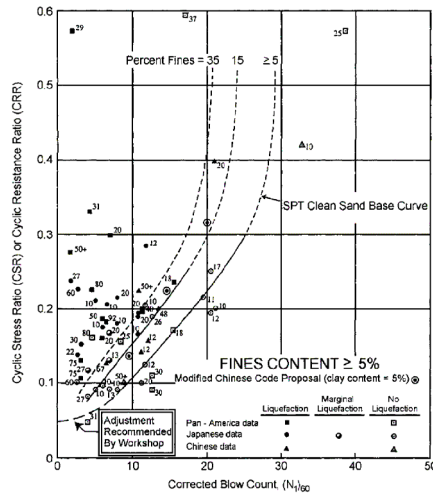


그림 1. SPT Clean-Sand Base Curve for M=7.5 earthquakes(Seed 등, 1985 수정)

2.2 콘관입시험을 이용한 간편예측

콘관입시험은 표준관입시험보다는 높은 정밀도와 연속적인 결과를 얻을 수 있기 때문에 최근 많이 사용되고 있는 현장시험법이다. 그림 2는 Robertson과 Wride(1998)에 의해 제시된 세립분 함유량이 5% 이하인 지반의 CPT 자료로부터 제안된 CRR(액상화저항응력)값을 계산하는 차트를 나타낸 것이다. 그림 2의 순수모래에 대한 곡선은 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$CRR_{7.5} = 0.833[(q_{c1N})_{cs}/1000] + 0.05 \quad (\text{단, } (q_{c1N})_{cs} < 50) \quad (1a)$$

$$CRR_{7.5} = 93[(q_{c1N})_{cs}/1,000]^3 + 0.08 \quad (\text{단, } 50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160) \quad (1b)$$

여기서, $CRR_{7.5} =$ 액상화 저항응력

$$(q_{c1N})_{cs} = 100 \text{ kPa로 정규화된 수정콘관입저항치}$$

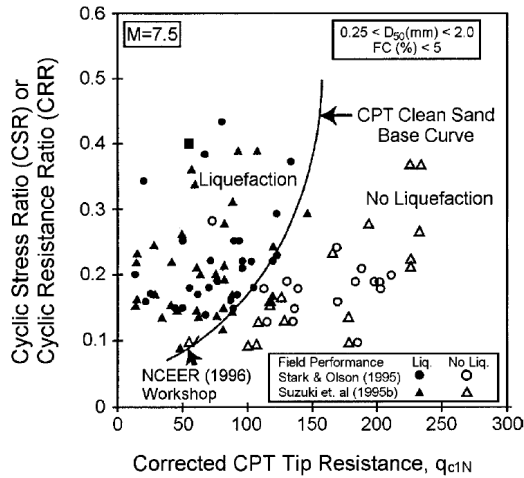
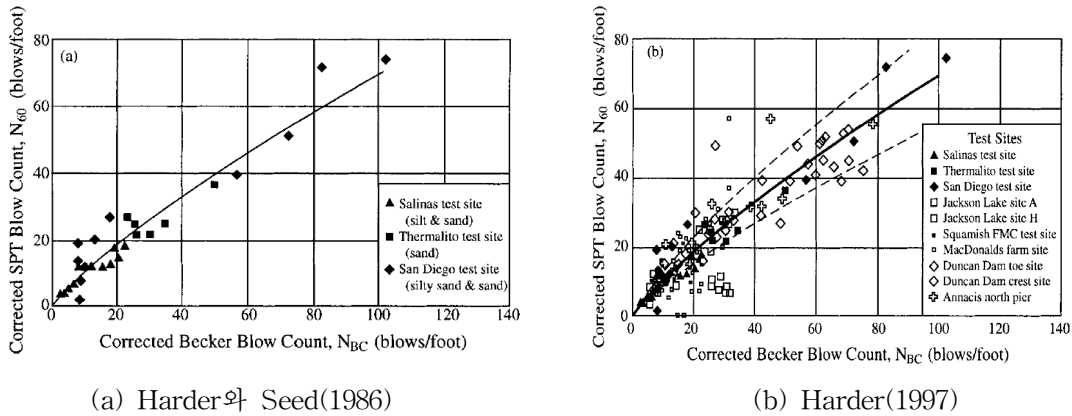


그림 2. CPT 자료

2.3 베커관입시험을 이용한 간편예측

액상화 저항강도 산정시 자갈을 함유하지 않은 지반의 경우에는 SPT, CPT 또는 전단파속도 측정 결과를 이용할 수 있으나, 자갈이 많이 포함된 지반의 경우 액상화 저항강도가 실제보다 크게 산정되는 경우가 있다. Becker관입시험(BPT)은 이러한 지반에 효과적으로 사용될 수 있는 시험방법이다. BPT는 아직 표준화 되어 있지 않으며, 액상화 발생지역의 자료가 부족한 관계로, 액상화 저항강도를 산정하는데 BPT 자료를 바로 이용하지 않고, BPT와 SPT의 관계로부터 액상화 저항강도를 산정할 수 있다. 그림 3은 BPT와 SPT의 관계를 나타낸 것이다.



(a) Harder와 Seed(1986)

(b) Harder(1997)

그림 3. Becker 관입저항치 N_{BC} 와 N_{60} 의 관계

2.4 전단파속도를 이용한 간편예측

Andrus와 Stokoe(1997, 2000)는 현장 전단파속도 측정자료로부터 액상화 저항강도 곡선을 제시하였다. 전단파속도를 사용하는 이점은 크게 세 가지가 있다: ① CPT 또는 SPT 시험이 불가능한 지역에 적용할 수 있다. ② 전단파속도는 저변형률에서의 전단탄성계수를 얻을 수 있는 기본적인 물성이다. ③ 저변

형률에서의 전단탄성계수는 동해석과 지반-구조물 상호작용을 해석하는데 기본적인 물성으로 사용된다. 저항능력비는 다음의 식 (2)를 통하여 산정할 수 있다. 식 (2)는 그림 4의 7가지 곡선 중에서 Andrus와 Stokoe(1997)가 제안한 식이다.

$$CRR = a \left(\frac{V_{sl}}{100} \right)^2 + b \left(\frac{1}{V_{sl}^* - V_{sl}} - \frac{1}{V_{sl}^*} \right) \quad (2)$$

여기서, $a = 0.022$

$b = 2.8$

V_{sl}^* : 세립분함유량이 35% 일 때에는 200 m/s, 5%이하일 때에는 215 m/s 그 사이에서는 선형분포

V_{sl} : 상재압에 대한 보정 후의 전단파속도

상재압에 대한 보정은 다음의 식 (3)으로부터 구한다.

$$V_{sl} = V_s \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25} \quad (3)$$

여기서, P_a : atmospheric pressure approximated by 100 kPa

σ'_{v0} : 초기 유효연직응력 (P_a 와 같은 단위)

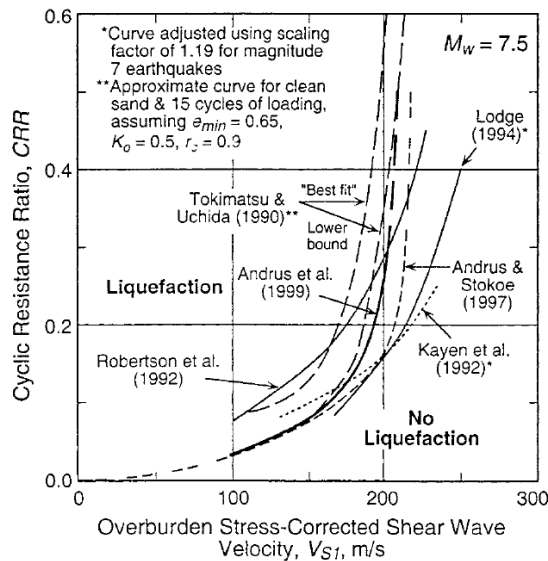


그림 4. V_{sl} 과 CRR과의 관계곡선

2.5 지진규모 보정계수(Magnitude scaling factors, MSFs)

지진의 규모는 지진에너지를 표현하는 정량적인 양이므로 지역의 여건에 맞는 지진 규모를 결정해야 한다. 따라서 국내의 경우 간이평가법으로 안전율을 산정하는 경우 식 (4)와 같이 지진규모를 고려하여야 한다. 표 1은 여러 연구자들에 의해 제시된 지진규모에 따른 보정계수를 나타낸 것이다(Youd 등, 2001). 그림 5는 지진규모에 따른 보정계수 곡선을 나타낸 그림이며, 빗금친 부분이 NCEER에서 추천한

MSF 범위이며, 점선이 그 평균값을 나타낸다.

$$FS = \left(\left(\frac{\tau_{dl}}{\sigma_{3c}'} \right)_{7.5} / \frac{(\tau_d)_{max}}{\sigma_{3c}'} \right) MSF \quad (4)$$

여기서, $\left(\frac{\tau_{dl}}{\sigma_{3c}'} \right)_{7.5}$ = 지진 규모 7.5인 경우에 대한 액상화 전단저항응력비

$\frac{(\tau_d)_{max}}{\sigma_{3c}'}$ = 지진시 산정된 진동 전단응력비

MSF = 지진규모에 따른 보정계수

표 1. 지진규모에 따른 보정계수(Youd 등, 2001)

Magnitude, <i>M</i>	Seed and Idriss (1982)		Ambraseys (1988)	Arango (1996)		Andrus and Stokoe (1997)	Youd and Noble (1997b)		
	Idriss*	Idriss*		Distance based	Energy based		$P_L < 20\%$	$P_L < 32\%$	$P_L < 50\%$
5.5	1.43	2.20	2.86	3.00	2.20	2.8	2.86	3.42	4.44
6.0	1.32	1.76	2.20	2.00	1.65	2.1	1.93	2.35	2.92
6.5	1.19	1.44	1.69	1.60	1.40	1.6	1.34	1.66	1.99
7.0	1.08	1.19	1.30	1.25	1.10	1.25	1.00	1.20	1.39
7.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—	—	1.00
8.0	0.94	0.84	0.67	0.75	0.85	0.8?	—	—	0.73?
8.5	0.89	0.72	0.44	—	—	0.65?	—	—	0.56?

Note: ? = Very uncertain values.

*1995 Seed Memorial Lecture, University of California at Berkeley (I. M. Idriss, personal communication to T. L. Youd, 1997).

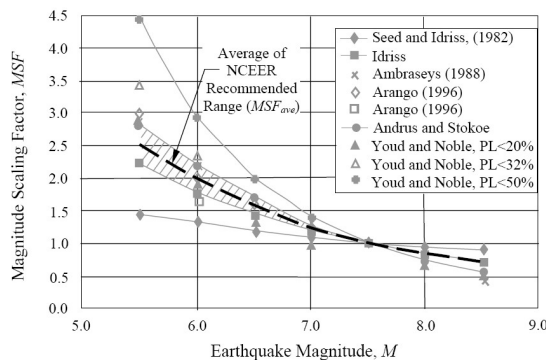


그림 5. 지진규모 수정계수 곡선(Youd와 Noble, 1997)

3. 지반조사, 시험법 및 지진응답계측

3.1 조사유형 및 절차

개량지반의 지반조사는 예비조사(Preliminary investigation), 일반조사(General investigation), 상세조사(Detailed investigation), 보충조사(Supplementary investigation)의 4가지로 나누어진다. 예비조사는 지반개량 이후에 수행되는 일반, 상세조사의 계획을 결정하기 위해 지반개량 이전에 실시하며, 예비조사의 결과는 일반, 상세조사의 조사목적, 위치, 깊이, 구역, 방법 등을 결정하는데 사용된다. 일반조사와 상세조사는 개량된 지반의 지반조건을 추정하는 주된 수단이며, 보충조사는 상세조사에서 예상하지 못한 결과가 나왔거나, 얻은 결과가 불충분할 때 실시한다. 그림 6은 액상화 예측/평가를 포함하는 개량된 지반에 대한 조사 흐름도를 나타낸 그림이며 표 2는 항만시설에 대한 지반조사 항목의 가이드라인을 나타낸 표이다(Ports and Harbours Bureau, 1971).

표 2. 항만시설의 지반조사 가이드라인(Ports and Harbours Bureau, 1971)

분류	조사 방법	조사 목적	조사 항목	샘플링	주요 시험값
예비 조사	자료 수집	구조물 배치계획 일반 조사 계획	굴착 및 사운딩 결과, 지하수위, 지형도, 지질도, 구조물의 침하 및 파괴기록, 건설작업 보고서, 지역 사진, 액상화 기록	-	-
	현장 답사	위와 동일	지형도, 지질도, 구조물의 파괴 및 침하 기록	표층	물리적 시험
일반 조사	굴착, 샘플링, 사운딩, 지질조사	구조물 배치계획 구조물 설계세부조사 계획	기초 깊이, 하부층 형태, 강도, 압밀특성, 지하수위, 투수성, 액상화 강도, 동적 변형 특성	점토:비교관시료 1-1.5m간격 사질토 1.5-2m 간격	사질토:1-2m간격 N값 점토: q_u, W, v_i 값 진동삼축시험, 동적 변형시험, 탄성과 시험
상세 조사	굴착, 샘플링, 흙의 시험, test pit	구조물 설계보고서, 건설작업 통계기록	위와 동일	위와 동일	위와 동일
보충조사	위와 동일	위와 동일	위와 동일	-	-
특별 시험	slip파괴시험, 현장시험, 모델 시험, 실내투수시험	위와 동일	지지력, 사면안정, 압밀특성, 투수성, 액상화 측정과 관련된 값들	-	-

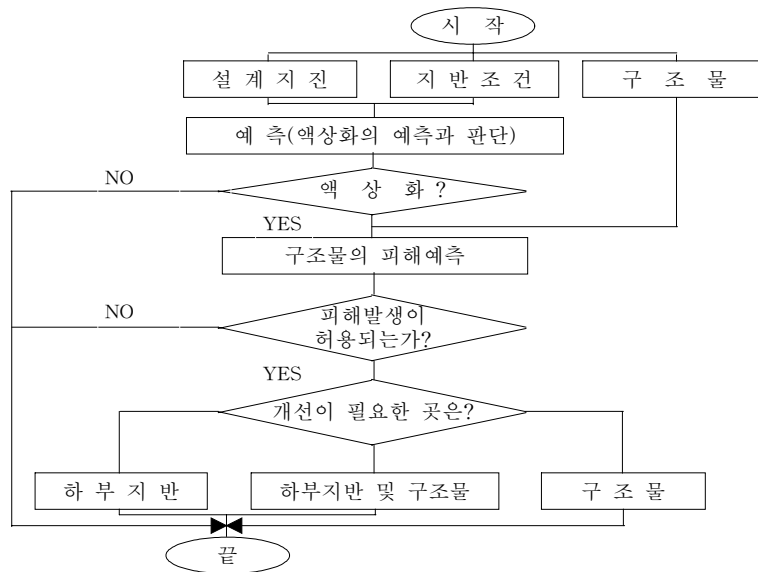


그림 6. 액상화에 대한 설계고려사항 흐름도

3.2 지반조사 구역의 배치

지반조사 구역의 선택은 요구되는 정확도, 시간, 비용 등을 고려해서 결정해야한다. 항만지역에서의 지반조사는 표 3에 기술된 간격으로 지반공학적 조사 계획이 이루어지는 것이 좋다. 표 3에 나와 있는 배열은 각각의 지반조건, 구조물의 형식, 조사의 목적 등을 고려하여 산정한 기준이다(Ports and Harbours Bureau, 1989).

표 3. 조사 방법의 개요 (Ports and Harbours Bureau, 1989)

(단위:m)

		부두 방향		부두에 직각인 방향			
		설계 간격		설계 간격		부두면으로부터 거리(최대값)	
		굴착	사운딩	굴착	사운딩	굴착	사운딩
일반 조사	넓은 지역	300-500	100-300	50	25	50-100	50-100
	좁은 지역	50-100	20-50	50	25	50-100	50-100
세부 조사		50~100	20-50	20-30	10-15	50-100	50-100

2. 지층이 복잡한 경우

	부두 방향		부두에 직각인 방향			
	설계 간격		설계 간격		부두면으로부터의 거리(최대값)	
	굴착	사운딩	굴착	사운딩	굴착	사운딩
일반 조사	30이하	15-20	20-30	10-15	50-100	50-100
세부 조사	10-30	5-10	10-20	5-10	50-100	50-100

Note: 일부 사운딩은 시추공을 요하고 일부는 필요 없다. 위의 '사운딩'항목에는 시추공을 필요로 하지 않는 경우만 나타내었다. 시추공을 필요로 하는 사운딩은 굴착과 같은 간격이다.

그림 7은 안벽의 종류별 조사 지점을 나타낸 그림이다(Ports and Harbours Research Institute, 1997). 각각의 조사지점을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

a) 중력식 안벽(gravity quay wall)

- 그림 7 (a)의 조사지점 ① : 이 지점은 벽구조체 전면 끝부분의 액상화를 예측/판단하는데 사용되는 조사지점이다. 중력식 안벽의 전면 끝부분의 액상화는 안벽구조체의 안정성에 영향을 미친다.
- 그림 7 (a)의 조사지점 ② : 이 지점은 벽구조체 후면부분의 액상화를 예측/판단하는데 사용되는 조사지점이다. 벽구조체 후면부의 액상화는 구조물의 안정성과 에이프런(apron)의 침하에 영향을 미친다. 중력식 벽체구조물에서의 액상화는 벽구조체의 안정성에 크게 영향을 미친다. 기존 벽구조물 아래의 지반조사는 상당히 어려우며, 그러한 경우에는 기존의 지반조사 자료를 사용하거나 ①, ②지점의 지반조사 결과를 사용해야 한다.

b) 널말뚝식 안벽(sheet pile quay wall)

- 그림 7 (b)의 조사지점 ① : 이 지점은 널말뚝의 전면에서의 액상화를 예측/판단하는데 사용되는 조사지점이다. 널말뚝 전면에서의 액상화는 구조물의 안정성에 영향을 미친다. 이 지점의 조사는 새로운 조사에서 종종 생략되기 때문에, 기존의 조사 자료가 보통 사용된다.
- 그림 7 (b)의 조사지점 ② : 이 조사지점은 널말뚝과 앵커사이의 액상화를 예측/판단하는데 사용되는 조사지점이다. 널말뚝과 앵커사이의 액상화는 널말뚝벽체의 안정성, 앵커의 안정성, apron의 침하에 영향을 미친다.

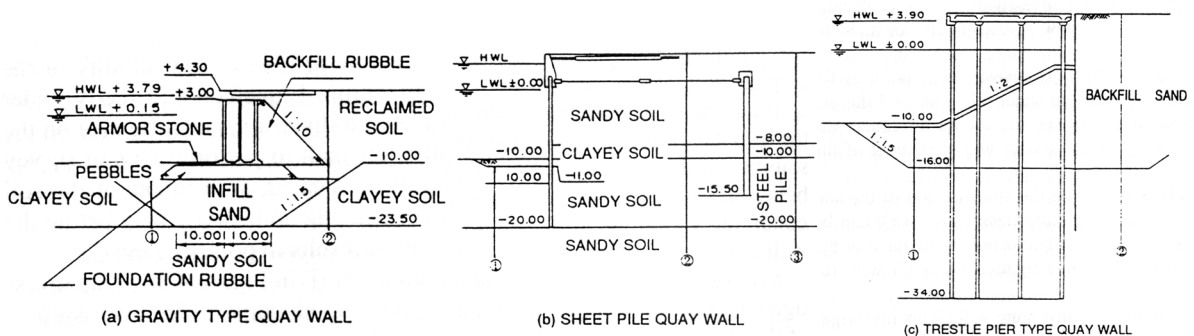


그림 7. 구조물별 조사지점(Ports and Harbours Research Institute, 1997)

- 그림 7 (b)의 조사지점 ③ : 지층이 수평방향으로 일정하다면, ③에서의 조사는 ②에서의 조사기록으로 대체가능하다. 브레이싱 후방부의 액상화는 ② 지점에서 기술된 것과 같은 영향이 있다.

c) 잔교식 안벽(trestle pier type quay wall)

- 그림 7 (c)의 조사지점 ① : 이 지점은 잔교식 안벽의 전면에서의 액상화 예측/판단 지점이다. 잔교식 안벽 전면에서의 액상화는 잔교식 안벽 구조물의 안정성과 지반옹벽의 안정성에 영향을 미친다.
- 그림 7 (c)의 조사지점 ② : 이 지점은 지반옹벽 후방부에서의 액상화를 예측/판단하는 지점이다. 옹벽후방부의 액상화는 옹벽의 안정성과 에이프런(apron)의 침하에 영향을 미친다.

3.3 조사심도

지반의 보링과 샘플링 깊이는 적당한 하부층(base layer)이 위치하는 깊이로부터 결정된다. 정하중에 대한 구조물 설계에 있어서는, 하부층은 매립지나 구조물하중을 지지할 수 있는 충분한 강도를 지닌 지층으로 정의된다.

말뚝기초의 대형 구조물인 경우 하부층은 50이상의 SPT N값을 보이는 층에서 결정된다. 하부층에 50이상의 N값이 발견되지 않는다면, 조사 깊이는 SPT N값과 아래에 나타난 하부층의 두께와의 관계로부터 결정되어야 한다.

- SPT N값이 10~20 : 5m이상
- SPT N값이 20~30 : 3~5m
- SPT N값이 30~50 : 2~3m

표준관입시험은 일반적으로 N값을 얻기 위해 1m 간격으로 수행된다.

액상화와 관련된 조사 깊이는 일반적으로 앞에서 언급한 정적 지지력시험을 위한 깊이와는 다르다. 액상화 문제를 평가하기 위한 지질학적 조사 깊이는 다음과 같다.

a) 지진응답해석을 위한 하부층의 깊이

액상화 평가를 위해 하부층의 전단응력을 분석할 때 지진응답해석이 필요하다. 지진응답해석을 위해 하부층은 전단파속도가 300m/s 이상인 가장 얇은 층으로 정해진다. 기준 속도이하의 층일 경우 하부층에 기반암이 존재하거나 50이상의 N값을 갖는 사질토 또는 일축압축강도(q_u)가 65tf/m²인 점토이어야 한다. 50이상의 N값이 발견되지 않을 경우 지반응답해석을 위한 하부층 깊이는 보통 정적 지지력 설계를 위한 깊이보다 큰 값으로 정한다.

지반조사를 위한 깊이 산정은 다음과 같이 요약할 수 있다. :

- 전단파속도를 측정했을 때 지반조사는 전단파속도가 300m/s 또는 그 이상이 나오는 깊이까지 조사되어야 하며 이 층 아래에서는 낮은 전단파속도가 있는 층이 발견되지 않아야 한다.
- 전단파속도를 측정할 수 없을 경우 지반조사는 기반암 또는 N값 50이상의 사질토층 또는 일축압축강도 65tf/m²이상의 점토층까지 조사되어야 한다.

b) 액상화 조사 깊이

여러 논문들에서 언급된 바에 따르면 지표면 이하 20m이상의 깊이에서 액상화가 보고된 사례는 거의 없다. 이러한 사실에 대한 이론적이며 정량적인 연구는 아직 존재하지 않으나 이 사실을 설명할 수 있는 추론은 가능하다. 20m이상의 깊이에서는 유효 수직응력이 상대적으로 크며, 따라서 지진에 의해 발생한 전단응력비는 상대적으로 작아 액상화 발생 가능성이 적다. 그러나 20m이상에서 액상화가 발생되는 명확한 증거가 발견될 경우 조사 깊이는 20m보다 커야 한다.

3.4 지진응답계측

실제 지진을 계측하면 내진해석에 크게 도움을 줄 수 있으며, 항만시설물을 기준으로 지진응답계측에 관련된 여러 사항들을 살펴보고자 한다. 지진응답계측은 지진시 또는 지진 경과 후 항만시설물의 안전성을 확인하며, 내진설계의 가정을 검증하고 설계이론을 개선시키기 위한 항만시설의 실제 동적거동에 대한 정보를 획득하기 위하여 실시한다. 또한 지진활동에 대한 자료를 취득하고 축적하기 위해서도 실시한다. 사용되는 계측기기의 종류로는 가속도계, 속도계, 지진계(seismogram), 간극수압계, 동적토압계, 경사계(inclinometer), 침하판, 측량장비 등이 있다. 항만구조물에서 계측되는 항목과 위치를 살펴보면 다음과 같다. 우선 계측항목의 경우 동적인 것과 정적인 것으로 분류되며, 전자는 지진시 동적거동을 기록하기 위함이고, 후자는 지진 전·후의 구조물의 변형량과 지반특성의 변화를 기록하기 위함이다. 지진시 지반운동을 계측하기 위해서는 항만시설물 주위 지반의 지표 및 지중에 가속도계, 속도계, 지진계 등을 설치한다. 지진 전·후의 구조물의 성능평가를 위한 구조물 기초의 침하량, 토구조물의 변형량, 지중구조물의 침하량 등을 측정하기 위하여 경사계, 침하판, 측량 기준점 등을 설치하여야 한다. 또한 액상화 현상

이 예상되는 지역에는 지중에 간극수압계와 가속도계를 설치하여 액상화 발생 메카니즘과 액상화 전·후의 지반운동을 측정할 필요가 있다. 중요 토류구조물의 경우에는 토압계와 수압계를 설치하여 지진하중 및 과력을 측정할 필요가 있다. 이렇게 설치된 계측기들은 주기적으로 점검이 필요하며, 지진이 발생하면 가능한 빠른 시간 내에 점검하여 계측기록을 획득해야 한다. 획득된 계측기록은 관련 국가기관, 대학교, 연구소에 배포하여 지진응답의 특성을 분석하고 보존되어야 한다. 본 절에서는 지진응답계측을 위한 계측기의 배열과 데이터 획득 시스템(Sasajima, T. *et al.*, 2003)에 대해 자세히 살펴보겠다.

3.4.1 계측기의 배열

그림 8은 계측을 위해 배열된 센서의 종류와 위치를 나타낸 그림이다. 그림 8 (a), (b)는 각각 개량된 지반과 개량되지 않은 지반에 설치된 센서들의 종류 및 위치를 나타낸 그림이다. 3방향을 측정할 수 있는 가속도계가 14개, 3방향을 측정할 수 있는 속도계가 6개 설치되었으며, 이 센서들을 통해 시험 케이슨 및 매립지반의 진동거동을 측정할 수 있다. 각 시험 케이슨에는 두 개의 가속도계(TA 1, 3과 UA 1,3)와 3개의 속도계(TV 1, 2, 3과 UV 1, 2, 3)가 설치되어있다. 속도계는 속도뿐만 아니라 변위의 계산을 위해서 사용된다. 한 개의 가속도 측정기는 개량된 영역과 개량되지 않은 영역의 쇄석마운드(rubble mound)에 위치하고 있다. 가속도계는 개량된 지반과 개량되지 않은 지반에 수직으로 배열되어 있으며, 가장 깊이 설치된 가속도계는 TV8 가속도계로 14m 깊이의 하부층(As2)에 설치되었다. 지진시 동적 간극수압을 측정하기 위한 간극수압계 또한 수직으로 개량된 지반(TP 1, 2, 3, 4, 5)과 개량되지 않은 지반(UP 1, 2, 3, 4, 5)에 각각 설치되었다. 두 개의 간극수압계(UP 6, 7)는 지진시 동적 압력과 파압(wave pressure)을 측정하기 위해 쇄석마운드에 설치되었다. 개량된 지반에 설치된 시험 케이슨 벽 전면에는 네 개의 파압계(wave pressure cell)가 수직으로 배열(TW 1, 2, 3, 4)되었으며, 이는 파 자체로 인해 야기된 수압의 변화 뿐 아니라 지진과 케이슨의 진동으로 인해 야기된 동적 변화를 모두 측정하기 위해서이다. 시험 케이슨 벽 뒷면에는 개량된 지반과 개량되지 않은 지반에 각각 4개의 토압계(TN 1, 2, 3, 4와 UN 1, 2, 3, 4)가 수직으로 배열되어 있다. 그림 9에는 각 토압계의 세부 위치를 나타내었다. 1m×1m의 패널에는 네 개의 로드셀(load cell)이 설치되어 있으며, 케이슨 뒷면의 마찰특성과 유사한 거동을 모사하기 위해 시멘트 모르타르로 코팅이 되어있다. 수압의 동적 변화를 추적하기 위해 패널의 내부와 외부에 각각 두 개의 수압계(water pressure cell)가 포함된 토압계가 설치되었다. 따라서 내부 수압을 패널의 관성력에 대해 보정을 할 수 있게 되며 이를 통해 유효토압과 전체 토압계산이 가능해진다.

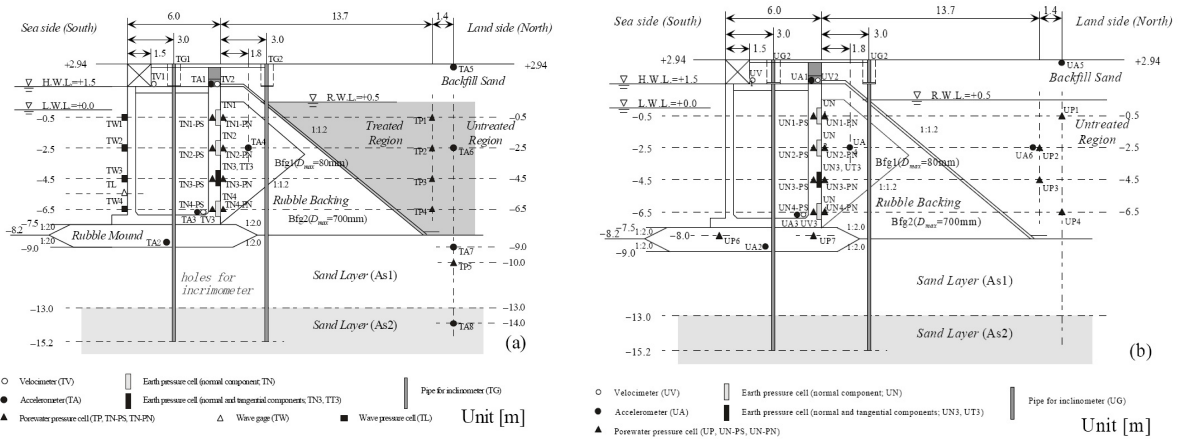


그림 8. 계측기 배열의 예

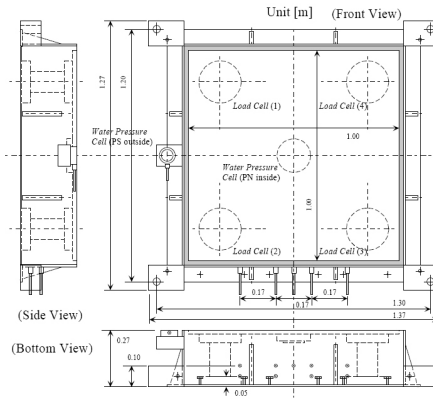


그림 9. 토압계의 세부위치

3.4.2 데이터 획득

데이터 획득 시스템 흐름도의 한 예를 그림 10에 나타내었다. 구체적으로 내용을 살펴보면 모든 센서는 시스템 내에서 11개의 단위로 구성되며, 전자신호는 아날로그에서 디지털로 전환된다. 계측을 위한 시험 안벽 옆에 마련된 관측소의 주컴퓨터에 의해 감시와 자료수집이 자동적으로 수행되며, 획득한 자료는 원격으로 프로젝트의 책임자에게 전송되는 시스템이다. 그림 10에 나타난 계측계획은 크게 4가지로 나누어진다.

- 보정계측(correction measurement) : 계측기간 동안 정해진 시각에 자동적으로 수행되며, 가속도계와 속도계를 제외한 모든 센서의 민감도가 모니터링 된다. 또한 획득된 자료는 지진의 측정 자료를 보정하는데 이용된다.
- 정적계측(static measurement) : 계측기간 중 하루에 수차례 자동으로 계측되며, 시험 안벽의 정적응답을 측정한다. 획득된 자료는 상대값에서 절대값을 구하기 위해 지진계측 자료와 합쳐진다.
- 지진계측(earthquake measurement) : 지진시 100Hz 주파수로 측정되며 그림 9에 나타난 하부층에서 (AS2) 가속도계(TA8)에 의해 측정된다. 수직성분(TA8-z)으로부터 계산된 가속도의 절대값이 1Gal 이나 0.5 Gal의 경계를 넘게 되면 지진발생이전 20초부터 181초 동안의 데이터가 컴퓨터에 저장된다.
- 확장된 지진계측(extended earthquake measurement) : 큰 규모의 지진에 대한 계측을 의미하며, 가속도계와 속도계를 제외한 모든 센서의 데이터가 기록된다. 큰 규모의 지진이 발생한 후, 지표에서 수직방향(TA5-z)으로 기록된 지진강도가 3.5를 넘는 경우 이 계측이 시작되며 가속도계와 속도계를 제외한 모든 센서의 자료가 30분(1800초)간 기록된다. 이 계측을 통해 간극수압의 소산과 이와 관련된 토압의 정적변화가 추적된다.

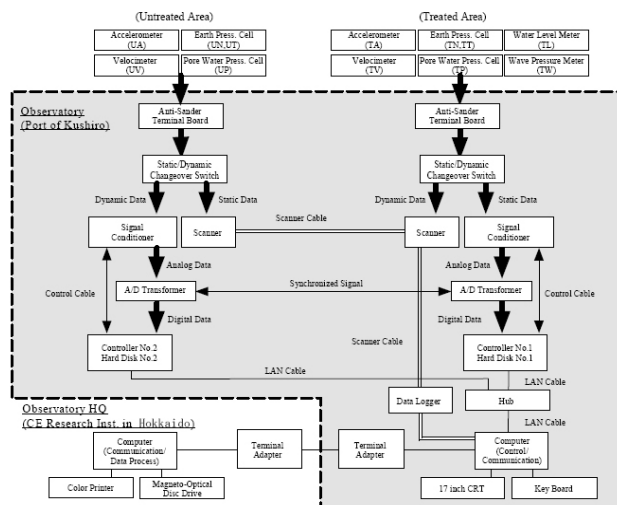


그림 10. 데이터 획득 시스템

4. 액상화 대책공법

지반의 액상화 가능성이 있는 경우 액상화 대책공법을 수립해야 한다. 그림 11에 나타낸 바와 같이 액상화 대책공법은 크게 지반 개량에 의한 방법과 구조적인 설계에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 액상화 대책공법 선정 시에는 그 공법에 필요한 개량범위 목표 및 시공상의 제약을 기존 사례 등을 토대로 검토해 보는 것이 효과적이다. 이러한 기본 사항에 근거하여 많은 액상화 대책공법들이 개발되고 있으며 대표적인 액상화 대책공법의 개요 및 특징 등을 공법별로 간단히 정리하면 다음과 같다.

① 다짐공법

다짐에 의한 액상화 대책공법은 진동, 충격 등으로 사질토의 밀도를 크게 하여 액상화 강도를 높이는 공법이다. 다짐공법의 종류로는 모래다짐말뚝(sand compaction pile, SCP), 다짐봉공법(vibro-rod), 바이브로플로테이션(vibroflotation), 동다짐(dynamic compaction)공법 등이 있다.

② 간극수압소산

간극수압소산공법은 지반 내에 배수 타일을 관입하여 과잉간극수압을 줄이고 사질토 지내에 간극수압소산을 촉진하는 공법이다. 대표적인 공법으로는 자갈배수(gravel drain)공법을 들 수 있다. 이 공법은 다짐에 의한 공법과 비교하여 진동·소음이 작고, 주변에 미치는 영향이 작은 장점이 있다. 단점으로는 세립분 함유율이 크고 투수성이 낮은 지반에서는 공법의 적용이 곤란한 점을 들 수 있다.

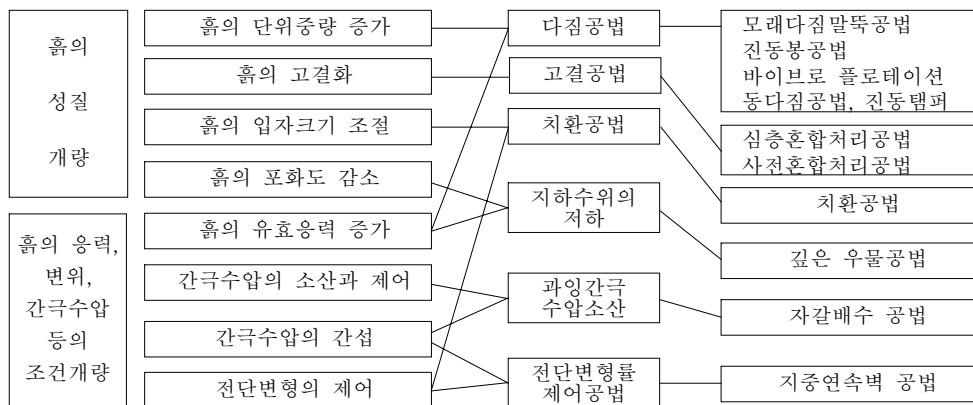


그림 11. 액상화 대책공법

③ 고결 공법

고결공법의 종류로는 심층혼합처리공법과 사전혼합처리공법을 들 수 있다. 심층혼합처리공법은 사질토 지반에 시멘트 등의 안정제를 혼합하여 지반을 고결시키는 방법이다. 사전혼합처리공법은 새로운 매립지반을 만들 때 사용되며, 매립토사에 사전에 안정제를 첨가한 재료를 매립함으로써 매립과 동시에 액상화 대책을 시행하는 공법이다.

④ 치환공법

이 공법은 지반의 성질을 개량시키는 다른 지반 개량공법과는 달리 지반을 액상화 하지 않는 재료로 치환하는 것이다. 즉, 액상화를 일으킬 가능성이 있는 흙은 입도분포가 제한적이므로 액상화 하지 않는 재료로 지반을 치환하는 방법이다. 치환공법은 액상화 대상층이 비교적 얇은 경우나 굴착을 동시에 하는 공사에 효과적으로 이용될 수 있다.

⑤ 지하수위저하

지하수위저하 공법은 지하수위를 저하시켜 대책지반을 불포화상태로 만들거나 유효응력을 크게 만드

는 공법이다. 이 공법은 지하수위를 낮게 유지시키는 것이 중요하며, deep well등에서의 양수비용 등을 고려하여 선택해야 한다.

⑥ 진단변형 억제

진단변형억제에 의한 액상화 대책공법은 지진시 지반의 진단변형을 억제하기 위해 지중에 지중연속벽 등을 설치하는 공법이다. 이 공법은 기존구조물이 설치되어 다른 액상화 대책공법 적용이 어려운 경우에도 사용가능한 공법이다.

⑦ 선행재하공법

선행재하공법은 성토등과 같은 하중재하로 지반을 과압밀 상태로 만들어 액상화 강도를 증가시키는 대책공법이다. 이 공법은 세립분이 많은 경우에 적용가능하며, 기존구조물이 있는 경우에도 적용가능하다.

⑧ 구조적인 방법(structural remedial measures)

이전의 방법들은 지반의 성질을 개량함으로써 액상화 대책을 세우는 것인 반면, 구조적인 방법에서는 널말뚝이나 말뚝 등을 사용하여 강도를 증가시키는 방법이다.

5. 결론

본 논문에서는 매립지반에서 지진시 가장 문제가 되는 액상화 현상과 액상화에 대한 평가방법, 특히 최근의 국외의 액상화 평가방법에 대해 기술하였으며, 액상화 평가를 위해 필요한 현장 계측 방법 및 액상화 대책공법에 대하여 정리하였다. 본 논문의 결론을 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 1) 최근 액상화 평가시 SPT, CPT, BPT 및 진단파속도를 이용한 진단저항응력비 산정 방법들과 지진 규모 보정계수(MSF; Magnitude scaling factor) 등에 관한 기준들을 조사 정리하였다.
- 2) 매립지반의 내진 및 액상화 대책을 위한 지반조사방법, 시험법 및 지반응답 계측요령에 대하여 정리하였다.
- 3) 끝으로 액상화 가능성 지반에 대하여 액상화 대책공법의 개요 및 특징 등을 공법별로 간단히 정리하였다.

참고문헌

1. Andrus, R. D., and Stokoe, K. H., II (1997). "Liquefaction resistance based on shear wave velocity." *Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Nat. Ctr. for Earthquake Engrg., Res., State Univ. of New York at Buffalo, 89-128.
2. Andrus, R. D., and Stokoe, K. H., II (2000). "Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity." *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, 126(11), 1015-1025.
3. Harder, L. F., Jr., and Seed, H. B. (1986). "Determination of penetration resistance for coarse-grained soils using the Becker hammer drill." *Rep. UCB/EERC-86/06*, Earthquake Engrg. Res. Ctr., University of California at Berkeley.
4. Ports and Harbours Bureau. (1971). *Port and harbour survey manual*, Japanese Association of Ports and Harbours.
5. Ports and Harbours Bureau. (1989). *Port and harbour survey manual*, Japanese Association of Ports and Harbours.

6. Ports and Harbours Research Institute. (1997). *Handbook on liquefaction remediation of reclaimed land*, A.A.Balkema.
7. Robertson, P. K. (1990). "Soil classification using CPT." *Can. Geotech J.*, Ottawa, 27(1), 151-158.
8. Robertson, P. K., and Wride, C. E. (1998). "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test." *Can. Geotech. J.*, Ottawa, 35(3), 442-459.
9. Sasajima, T. Kubouchi, A., Sakiwaka, M., Miura, K., Otsuka, N., and Kohama, E. (2003). "A project for observation of seismic behavior of full-scaled gravity type quay wall in port of Kushiro." *Symposium on the Seismic Urban, Reclaimed and Port Areas - Dynamic Behaviors and Stabilities of Earth and Soil-Retaining Structures*, Japan.
10. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M. (1985). "The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations." *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 111(12), 1425-1445.
11. Youd, T. L., and Noble, S. K. (1997). "Magnitude scaling factors." Proc., *NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Nat. Ctr. for Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York at Buffalo, 149-165.
12. Youd et al. (2001). "Liquefaction resistance of soils : summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils," *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, 127(10), 817-833.