

## 연약지반상 지진하중을 고려한 철도노반의 안정성 검토에 관한 연구

### A study on the Stability of Rail way Construction on the Reclaimed Land for Domestic Marine Clay Using the Seismic Analytic

김영수\*

Kim, Young-Soo

김무영\*\*

Kim, Moo-Il

---

#### ABSTRACT

The purpose, in this study, is to analyze liquefaction potential of Incheon International Airport at the Area Phase "I" for Railway Construction of all, seismic response was analyzed using the computer program, Shake91. Four methods proposed by Seed & Idriss, Eurocode, Iwasaki & Tatsuoka, and Ishihara were used for assessment of liquefaction potential and safety factors calculated from these methods are compared. Based on the results of seismic response analysis, the maximum acceleration at the ground surface is larger than that evaluated site factor effect by using site factor because these areas are composed of very loose sand clay. Especially, in the case of analysis with long period earthquake data, it is appeared that the acceleration of earthquake is amplified more largely. Therefore, accurate seismic response analysis is suggested for the design on the important structures on reclaimed land. The analytical results of liquefaction potential show that the increments of N-value and effective overburden pressure with remediation make safety factors increase. Through comparing the safety factors evaluated from four method, the safety factor calculated by See & Idriss method in the lowest one and it is found that the SPT N-value effect the safety factor very largely. And, Iwasaki & Tatsuoka method is affected by various factors such as average grain size, fine contents, confining pressure. In conclusion, to minimize earthquake Risk by liquefaction, the efficient remediation is essential and seismic response analysis should be carried out.

---

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경 및 목적

인근 국제 공항 1단계 지역내 철도노반 건설지역의 성토 지반은 영종도와 용유도 사이에 바다를 매립하여 조성한 부지 위에 철도 시설물이 건설되는 사례이다.

따라서, 느슨한 포화사질토 성토지반위에 구조물을 축조하는 경우 작은규모의 지진으로도 지반 특성에 의해 액상화 현상이 발생 가능하므로 이를 검토하여 성토지반의 안정성을 확보하는 것이 바람직하다.

액상화 현상을 판단하는 평가방법에는 현장지반의 표준관입저항치, 위도분포, 그리고 지반의 수 평가속도 등을 이용하는 경험적 방법이 있다. 경험적 방법을 이용한 액상화 평가 방법이 해당지반의 실제적인 동적 기동을 정확하게 표현하는 데에는 많은 어려움이 있는 반면, 간편하게 넓은 지역을 대상으로 액상화 평가를 수행할 수 있는 장점을 갖고 있다.

---

\* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 학생회원

\*\* 서울산업대학교 교수, 정회원

특히, 지진발생이 빈번함에 따라 이에 구조물별로 각기 다른 경험적 방법을 제안하고 있으나 주로 근간이 되는 경험적 예상화 평가방법은 수정된 Seed와 Idriss의 방법, Ishihara의 간헐법과 Iwasaki와 Tatsuoka의 방법이다. 또한, 우리나라와 지반 및 지진특성이 비슷한 유럽에서는 수정 Seed와 Idriss의 방법을 토대로 예상화 평가방법을 규정하고 있다. 본 연구에는 이러한 일본의 단체별 규정 및 Eurocode의 예상화 평가 방법에 대한 연구와 함께 대상지반에 대해 우리나라의 지반조건 및 지진특성을 고려하여 지진응답해석과 이를 이용한 예상화 평가를 수행함으로써 보다 정확한 평가를 수행하고 여러 영향인자들의 영향정도를 분석함으로써 각 평가방법의 특성들을 연구하고자 한다.

## 1.2 연구 내용 및 방법

사실토 등을 이용한 성토지반의 예상화 평가는 지진사 발생하는 반복 전단응력과 지반의 반복 전단지향강도 사이의 상관관계라 통해서 수행된다. 반복전단응력의 영향인자로는 최대지반가속도, 전단응력의 파형, 진도수, 진폭, 지속시간 등을 들 수 있으며 반복전단 지향강도는 지반의 표준관입시험치, 상대밀도, 흙의 입도분포, 지반의 포화도, 그리고 배수조건 등에 영향을 받는다. 지진으로 야기되는 반복전단응력은 각 나라에서는 규정화된 지반계수와 자국의 지진특성을 고려한 기판암에서의 가속도값을 이용하거나 설치된 시간이력곡선을 입력자료로 Shake91 등의 지진응답 해석프로그램의 수행을 통해서 산정한다.

일반적으로 지반의 예상화를 평가하는 경험적 방법으로 Seed와 Idriss방법, Iwasaki와 Tatsuoka 그리고 Ishihara 방법 등이 있다.

Seed와 Idriss 및 Iwasaki와 Tatsuoka 방법은 표준관입시험치인 N치 등을 이용하여 안전율을 산정함으로써 예상화 평가를 수행하며 Ishihara 방법은 N치와 입도분포곡선을 통해서 예상화 발생가능 정도를 예측한다.

일본 및 유럽에서는 이러한 방법을 근간으로 예상화 평가방법을 제안하고 있는 실정이다. 특히, 지진활동이 빈번한 일본에서는 일찍부터 시작되어온 여러 연구단체의 활발한 지진연구로 인해 각 단체별로 평가방법을 달리하여 규정지움에 따라 아직까지 통일된 국가기준이 마련되지 않은 실정이다.

그러나 각 단체별로 규정지움 방법들을 면밀히 살펴보면 위의 세가지 평가방법은 근간으로 하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 인천 국제공항 1단계 지역내 철도노반 건설지역의 성토지반을 해석지반으로 정하고 우선적으로 Shake91 프로그램의 수행을 통해 지진응답을 해석하고 지진응답해석결과를 토대로 Seed와 Idriss 및 Eurocode, Iwasaki와 Tatsuoka, 그리고 Ishihara의 경험적 방법으로 예상화 평가를 수행함으로써 지반응답현상과 각 경험적 예상화 평가방법의 영향인자들을 연구 분석하고자 한다.

## 1.3 연구 제한 사항

- 본 연구는 1997년 제정된 우리나라의 『상위개념 내진설계기준』의 기준을 만족하도록 하며 특히, 구조물의 중요도를 고려하여 붕괴방식 I등급 및 II등급 구조물을 해석대상으로 연구를 수행하였다.
- 지진응답해석에 이용된 지진기록은 일본의 항만구조물에 대한 내진설계시 주로 이용되고 있는 장주기 및 단주기 특성의 설치진가속도 시간이력곡선을 이용하였다.
- 지진응답해석은 상용화되어 널리 보급되어 있는 Shake91 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다.

- 액상화 평가지반은 인천국제공항 1단계 지역내 철도 노반 건설지역의 느슨한 메립지반을 대상으로 평가하였다.
- 대상지반의 동적 물성치 및 기본 물성치는 우선적으로 현장지반조사와 실내시험을 통하여 산정하였으며 시험수행이 어려운 경우, 경험식 및 기존의 연구자료를 통하여 가장 보편적인 값으로 산정하여 해석에 이용하였다.

## 2. 지진 응답 해석

### 2.1 Shake 91을 이용한 지진응답 해석

지진응답 해석시 지반에 대한 해석모델은 선형, 등가선형 비선형 모델등이 있다. 여기서, 본 연구에 이용되고 있는 지진응답 해석프로그램 Shake 91에서는 다층 반사모델을 이용한 1차원 등가선형 해석을 수행하고 있으며, 진단탄성 계수와 감소비등 지반의 동적특성을 고려하여 지진파의 지반내 증폭 현상을 해석하는 것이다.

Shake 91은 지진자료와 지반자료로부터 이용한 반복적 등가 선형 해석을 통하여 원하는 지점에서 시간대에 따른 선단응력의 설치진기록을 주파수 영역에서의 응답스펙트럼으로 변환이 가능한 장점을 갖고 있다.

### 2.2 대상지반에 대한 지진 응답해석 결과

본 대상 지반은 물다짐 광법 (Hydraulic Compozer)으로 메립지반에 대한 지반개량이 수행되었다. 대상 지반에 대해 사진지반자료를 통해 지반특성을 살펴보면, 개량하기전 지하수위는 지표하 1m 정도이며, 메립된 원시반은 연약한 사질토층과 실트질 성분이 많은 점성토 층으로 구성되어 있고 약 10m 가량 메립이 이루어 졌다. 그리고 지반개량으로 인해 지하수위는 지표하 3m 정도로 낮아졌으며 표준관입저항치가 사질토 메립층에서 다소 증가한 것으로 나타났다.

본 지진응답해석에서는 이러한 지층분할 및 각 지층에 대한 지반물성 자료와 함께 Hachinohe항과 Ofunato항의 지진 가속도 시간 이력곡선을 우리나라의 『상위계급 내진설계기준』에 적합하도록 보정하여 지진응답해석을 수행하였다. 여기서 적용된 우리나라의 내진기준은 대상지반에 속조된 구조물의 중요도를 고려하여 붕괴방지 내진 I등급 및 내진 II등급 기준으로, 이에 대한 기반암에서의 지진가속도를 살펴보면, 각각 0.110g와 0.154g에 해당한다. 지진응답해석결과를 보면 대체적으로 기반암의 지진가속도는 점차 증폭되어 지표면에서는 약 1~2배 크게 증폭되었으며 Hachinohe 지진기록에 대한 해석결과가 Ofunato 지진해석결과보다 더욱 크게 증폭된 것으로 나타났다. 두 지진기록을 보면, 실제 지진 가속도 파형의 최대값이 거의 유사함에도 불구하고 이와 같이 해석결과가 크게 차이를 보이는 것은 주기특성이 주원인인 것으로 판단된다. 따라서, Hachinohe 지진이 장주기를 고려할 때, 본 해석지반과 같은 연약지반에서는 장주기의 지진이 더욱 큰 피해를 발생시킬 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 대상지반의 개량전후에 대한 입력자료인 진단파속도는 지반개량으로 인해 다소 감소하였다. 이는 지반개량으로 인해 지반의 초기진단탄성계수가 증가함에 따라 비례적 관계에 있는 진단파속도도 증가하여 이와 같은 결과가 나타난 것으로 생각된다. 지진응답해석결과, 지표면 최대가속도가 크게 산정된 Hachinohe 지진응답해석결과와 기반암에서의 가속도와 지반계수를 곱함으로써 지표면 최대가속도를 산정하는 일본 및 Eurocode의 규정 결과를 비교하면 다음의 표 2.1과 같다.

표 2.1 지진응답해석결과의 지표면 최대가속도 비교표 (Hachinohe)

구 분		지진응답해석		규정별 산정 결과	
		개량전	개량후	일본 규정	Eurocode
가속도 0.110g	A 지역	0.184g	0.176g	0.132g (지반계수 1.2를 적용)	0.154g (지반계수 1.4를 적용)
	B 지역	0.197g	0.197g		
가속도 0.154g	A 지역	0.224g	0.214g	0.185g (지반계수 1.2를 적용)	0.216g (지반계수 1.4를 적용)
	B 지역	0.283g	0.296g		

지반 조건에 따라 다양한 결과를 보이는 지반증폭현상은 단지 몇 지반조건에 대해 확실적인 지반계수를 적용하는 것은 안전측에서도 문제가 발생할 것으로 생각된다. 따라서, 연약지반상 구조물에 대한 내진 설계시 지진응답 해석을 수행하여 지반의 동적거동 변화를 분석하는 것이 반드시 필요하다고 판단된다. 상기표와 같이 지반개량에 따른 변화는 거의 없거나 매우 작은 감소를 보였다.

### 3. 액상화 평가 결과

본 연구에서는 지반 개량전에 액상화 발생 가능성이 높은 2개소를 대상으로 정하고 평가를 수행하였다. 또한, 지반개량에 따른 액상화 평가의 변화를 분석하기 위하여 지반개량 전후의 지반 조사를 수행하였으며 이를 이용하여 경험적 액상화 평가를 수행하였다. 이때 해석의 편의를 위해 해석 지층은 지표하 4m와 8m의 메딤층으로 동일하였으며 액상화 평가시 적용된 우리나라의 상위개립 내진설계기준은 붕괴방지 I 등급과 II 등급으로 정하였다.

해석 대상지층 4m와 8m에서의 최대 전단응력을 각 해석 지반별로 액상화 평가에 편리하도록 단위를 환산하여 정리한 결과 표 3.1과 같다.

표 3.1 지진응답해석결과의 전단응력 비교 (단위 :t/m<sup>2</sup>)

구 분	심 도	개 량 전		개 량 후	
		0.110 g	0.154 g	0.110 g	0.154 g
A 지역	4 m	1.24	1.47	1.18	1.43
	8 m	2.33	2.83	2.20	2.72
B 지역	4 m	1.40	1.98	1.37	2.03
	8 m	2.69	3.81	2.71	3.86

Seed와 Idriss 및 Eurocode의 방법으로 예상화 평가를 수행하는 경우에는 지진규모의 고려가 가능함에 따라 기본적으로 모든 평가방법에서 이용되는 지진규모 7.5에 대한 평가와 함께 비교적 지진규모가 약한 우리나라의 실정을 고려하여 지진규모 6.5와 5.5에 대한 평가도 병행하여 수행하였다.

표 3.1 예상화 평가로 산정된 안전율 비교 (A지역)

평가 방법	구 분 (지진규모/ 지진응답 해석이유)	심도 4 m				심도 8 m			
		0.110 g		0.154 g		0.110 g		0.154 g	
		개량전	개량후	개량전	개량후	개량전	개량후	개량전	개량후
SEED & IDRISS	진도 5.5	0.19	1.27	0.16	1.05	1.64	2.14	1.35	1.76
	진도 6.5	0.13	0.86	0.11	0.71	1.11	1.46	0.91	1.20
	진도 7.5	0.10	0.65	0.08	0.53	0.83	1.09	0.68	0.90
EURO  CODE	진도 5.5	0.27	2.73	0.19	1.95	6.08	6.81	4.34	4.86
	진도 6.5	0.20	2.10	0.15	1.50	4.68	5.24	3.34	3.74
	진도 7.5	0.09	0.95	0.34	0.52	0.97	2.38	1.52	1.70
	지진응답해석	0.40	0.63	0.34	0.52	0.97	1.30	0.79	1.05
Iwasaki & Tatsuoka	진도 7.5	0.74	1.13	0.63	0.93	0.74	0.98	0.61	0.79
Ishihara	진도 7.5	I	I	I	I	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

표 3.2 예상화 평가로 산정된 안전율 비교 (B지역)

평가 방법	구 분 (지진규모/ 지진응답 해석이유)	심도 4 m				심도 8 m			
		0.110 g		0.154 g		0.110 g		0.154 g	
		개량전	개량후	개량전	개량후	개량전	개량후	개량전	개량후
SEED & IDRISS	진도 5.5	1.00	1.26	0.70	0.84	1.29	1.53	0.91	1.02
	진도 6.5	0.68	0.86	0.48	0.57	0.88	1.04	0.62	0.69
	진도 7.5	0.51	0.64	0.36	0.43	0.66	0.78	0.46	0.52
EURO  CODE	진도 5.5	2.19	3.28	1.56	2.34	5.29	6.08	3.78	4.34
	진도 6.5	1.68	2.53	1.20	1.81	4.07	4.68	2.91	3.34
	진도 7.5	0.76	1.15	0.55	0.82	1.85	2.12	1.32	1.52
	지진응답해석	0.40	0.61	0.28	0.41	0.75	1.30	0.53	0.67
Iwasaki & Tatsuoka	진도 7.5	0.66	0.99	0.47	0.67	0.63	0.78	0.44	0.55
Ishihara	진도 7.5	I	I	I	I	I	Ⅲ	I	Ⅲ

상기 표 3.2, 3.3의 예상화 평가 결과, 지반 개량으로 인해 안전율은 증가한 것으로 나타났으며 B지역의 지반심도 8m인 경우를 제외한 지반개량 수행전의 지반은 지진 발생시 예상화가 발생 가능성이 매우 높은 것으로 예측되었다. 따라서, 매립 지반에 대해 예상화 발생이 최소화 할 만큼의 지반개량을 수행하는 것이 필요하며 특히, 중요 구조물에 대한 내진 설계시 반드시 지반개량 전후의 지반조사를 수행하여 이를 검증하는 것이 필요하다고 생각된다.

Ishihara의 예상화 평가방법은 안전율 산정을 통해 예상화 평가를 수행하는 다른 방법과 달리,

예상화 발생가능 정도를 파악하는 것으로 해석지반에 대한 평가결과, 다른 평가내용과 비슷하게 A지역의 지반개량전후와 B지역의 지반개량후의 경우에는 중요 구조물 건설시 추가적인 평가수행 을 제안하고 있는 III지역으로 구분되었으며 그 외의 경우에는 예상화가 발생할 것으로 평가되었 다. 지진 규모별 예상화 평가가 가능한 Seed와 Idriss의 방법과 Eurocode에서 제안하고 있는 방 법으로 평가를 수행한 결과를 분석해 보면, 발생지진 규모가 7미만인 우리나라의 지진특성상 매우 유용한 것으로 예상되었으나 지진규모 6.5와 5.5에 대한 Seed와 Idriss의 해석결과는 지진규모 7.5 의 결과와 비교하여 안전율이 1~2배 증가하였으며 Eurocode의 경우에는 2~4배로 증가하는 경향을 보였다. 이는 각 방법별 보정계수가 지진규모에 따라 크게 차이가 남에 기인한 것으로 이로 인 해 이 방법들을 수정보완없이 그대로 우리지반에 대해 적용하는 것은 무리가 있을 것으로 판단된 다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 지진응답해석을 수행한 결과, 지역의 지반특성에 따라 매우 다양하게 지반증폭현상이 발생하는 것으로 나타났으며 특히, 장주기 특성을 갖는 Hachinohe항의 지진기록을 입력자료로 사용한 경우 에 그 정도가 더욱 심화되어 나타났다.
2. 예상화 평가를 수행한 결과, 전반적으로 지반심도가 깊어짐에 따라 유효상재압 및 표준관입저 항치의 증가로 인해 예상화 발생 가능성이 낮아졌으며 지반개량의 효과가 우수한 경우에는 안전율 이 크게 증가하는 경향을 나타내었다.
3. 평가결과를 토대로 각 방법에 미치는 영향인자들을 살펴 본 결과, Seed와 Idriss의 방법 및 Eurocode에서는 표준관입저항치가 가장 중요한 영향인자로 나타났으며 Iwasaki와 Tatsuoka의 방법에서는 표준관입저항치 및 유효상재압과 함께 토체의 물리적 특성인 평관입경과세립질 함유 량 등의 인자들이 전체적으로 영향을 주는 것으로 나타났다.
4. 지진규모를 고려하여 평가를 수행한 결과, 각 방법에서 적용하는 지진 규모 보정계수가 너무나 크게 차이가 남에 따라 각각 산정된 안전율이 크게 차이가 나는 것으로 나타났다.
5. 본 연구결과, 지반조건에 따라 다양한 결과를 보이는 지반증폭현상을 단지 몇 지반조건에 대해 확립적인 지반계수를 적용하는 것은 안전측에서도 문제가 발생한 것으로 생각되므로 중요 구조물 에 대한 내진설계시 지진응답해석을 통해 지진의 지반증폭현상을 보다 정확하게 고려하는 것이 필요하다고 판단된다. 또한, 연약지반 위에 매립토를 성토하여 대규모 부지를 마련하는 경우, 원 지반에 대한 지반개량과 더불어 성토지반에 대해서도 효과적인 지반개량을 병행하여야만 지진발 생으로 야기되는 예상화 피해를 최소화할 수 있으며 반드시 지반개량후의 조사를 통해 이를 검증 하는 것이 반드시 필요하다고 판단된다.