

지중구조물의 내진해석방법에 관한 연구

The Study on Seismic Analysis Methods for Underground Structures

정 광 모* · 방 명 석**

Abstract

본 논문에서는 지하공간에 설치되는 지중구조물에 대한 내진해석에 관한 연구로 구조물의 거동특성과 내진설계방법의 종류에 따라 수치해석을 실시하였다. 이를 위해 현재 가장 많이 실무에 적용되고 있는 내진설계방법인 등가정적해석법과 응답변위법을 적용하고 정밀한 해석이 가능한 시간이력해석법에 의해 검증을 시행하였으며 구조물 내진해석은 3-D 모델링에 의해 구조물-지반 상호작용을 고려하고 국내의 콘크리트구조설계기준에 따라 수행하였다. 해석 결과 현재 실무에서 적용되고 있는 등가정적해석법과 응답변위법을 적용하는 경우 정밀한 동적해석법 보다 다소 크게 산정되어 실무 적용에 문제가 없음을 확인 할 수 있었다.

In this paper various numerical analyses are carried out according to behavior characteristics of structures and types of seismic design methods as a study on the seismic analysis for underground structures. Equivalent Static Force Procedure and Response Displacement Method commonly used in practical design are adopted and Time History Method regarded as the most accurate analysis method is selected to verify the results of two practical methods above. 3-D modelling for seismic analysis of structures is introduced to consider Structure Soil Interaction and all analyses are based on Korea Structural Concrete Design Code. After numerical analyses, Equivalent Static Force Procedure and Response Displacement Method showed relatively larger values than those of Time History Method, so it is identified that above two methods are suitable for practical design purpose.

Keywords: Equivalent Static Force Procedure, Structure Soil Interaction(SSI), Response Displacement Method, Time History Method

* 충주대학교 안전공학과, (주)한국종합기술

** 충주대학교 안전공학과

1. 서 론

최근 한반도 주변을 중심으로 지진활동이 증가하고 있으며 우리나라의 경우 강원도 영월지진 등 실제적인 인명손실과 재산피해를 일으킬 가능성이 있는 지진의 발생빈도가 증가하고 있다. 이러한 지진 빈도의 증가에 따라 사회 기간시설에 대한 내진설계의 요구가 높아지고 있으며 근래 지하공간을 이용한 규모가 큰 지하구조물이 건설되고 있다. 지하구조물은 지상구조물에 비해 일반적으로 지진에 대하여 안전하다고 하나 최근 지하구조물은 양호하지 못한 지반조건에 건설되는 경우가 많으므로 강화된 내진설계기준을 고려할 때 지반의 영향을 고려한 내진 안전성 검토가 필요하다. 본 연구에 적용된 하수처리시설 구조물은 지중 내에 설치되어 지진발생시 지반과 구조물간에 상호작용이 일어나게 되어 내진 설계를 할 때 유체-구조물-지반계의 상호작용이 고려되어야 할 필요가 있다. 지진은 설계스펙트럼이나 시간이력 가속도의 형태로 적용할 수 있는데 본 연구에서는 제공된 시간이력가속도를 기반암 하면에 적용시켜 해석을 수행하며 지진파에 대해 3가지 방향에 대하여 모두 고려하고 각 방향별 지진파에 대한 영향을 조합한 결과로부터 얻어진 최대응력과 절대 최대 변위에 대하여 허용기준을 만족하는지 여부를 검토하고 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 내진해석 방법 중 등가정적해석법 및 응답변위법과의 비교를 통해 실무 적용에 대한 적합성 연구를 수행하고자 한다.

2. 본 론

2.1 연구 내용 및 방법

지중에 설치되는 지하구조물인 하수처리시설 구조물에 대한 내진해석 연구는 첫째, 동적해석법 중 하나인 시간이력해석법에 대한 수치해석으로 지반은 지하수와 진동 등에 따라 다양한 특성을 나타내는데 지진파 같이 갑작스런 하중에 대해서는 간극수압의 소실이 발생하지 않으므로 비배수 조건을 적용하였으며 해석 전 깊이로 따른 초기 응력 상태를 부여하여 지반의 강성이 적절히 표현되도록 하고 간극수압으로 인한 응력은 분리하여 불필요한 전단응력의 증가가 발생되지 않도록 하였다. 또한 지반은 Strain에 따라 재료특성이 달라지므로 Strain-Degradation relationship을 해석 과정에서 나타나는 결과 값에 따라 재료특성이 다르게 설정되도록 하는 SHAKE91 기능을 사용하였다. 지반의 특성은 가해진 지진파에 대한 응답에 따라 달라지는 비선형 재료 특성을 가지는데, 그림. 1과 같이 지진파의 영향으로 발생하는 Strain에 대한 전단계수로 표현될 수 있으며 본 해석에 앞서 사전 해석을 통해 진동특성에 따른 지반의 재료 특성을 별도로 산출하여 모델링에 반영하였다.

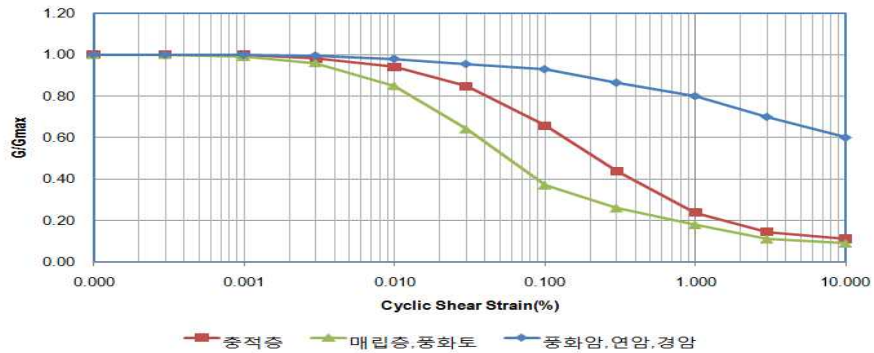


그림. 1 Typical strain-degradation relationship

그림. 2와 같이 입력지진으로는 계기지진인 Hachinohe, Ofunato 지진과 인공지진과의 3가지 입력지진파에 대해 수평 1축 방향으로 재하하고 지진 하중조합(자중, 토압 및 동수압)을 고려하여 수행한 각 지진파별 지진응답에 대한 수치해석 결과를 변위와 휨응력에 대해 최대 값을 정리하여 허용기준 및 다른 내진해석방법과 비교 분석 하였다.

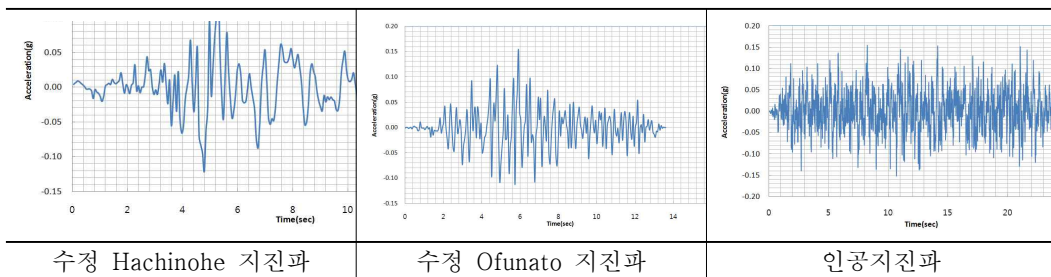


그림. 2 설계해석에 적용한 3가지 지진의 파형

둘째, 현재 국내 설계기준에 따라 실무에서 가장 많이 적용되고 있는 등가정적해석법과 응답변위법에 대한 수치해석에 관련된 내용으로 등가정적해석법은 구조물의 층량에 설계 진도를 곱한 힘을 관성력으로 구조물에 작용시켜 지진에 의해 구조물에 발생하는 응력을 구하고 응답변위법은 지진시 지하구조물에 생기는 응력은 관성력에 의한 영향보다도 주변 지반의 상대변위에 의해 강제로 발생되므로 지반변위를 강제로 구조물에 주는 것에 의해 구조물에 발생하는 응력을 구하였다.

2.2 수치 해석

내진해석을 위한 수치해석으로 첫째, 시간이력해석법 적용시 지반-구조물 상호작용 해석방법은 구조물 혹은 구조물에 근접한 지반의 비선형성을 모형화 할 수 는 직접법(direct method)을 사용하였다.

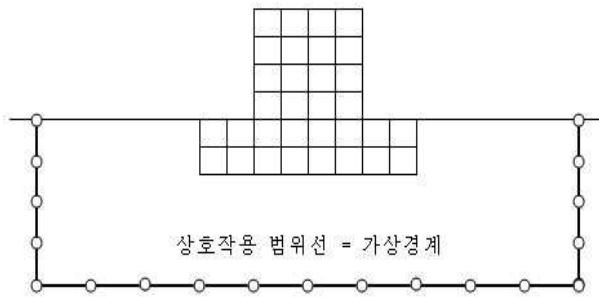
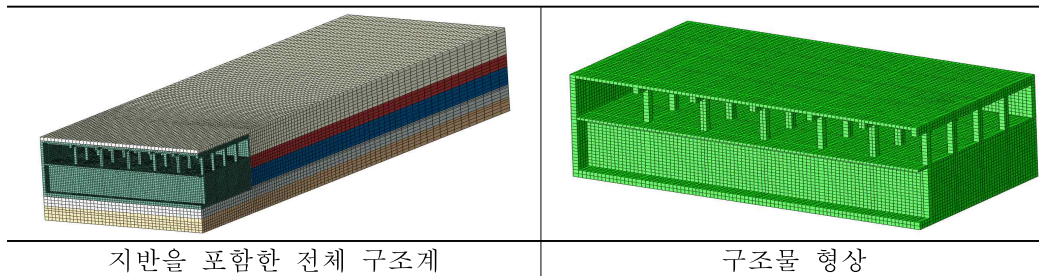


그림. 3 직접법 (Direct Method) 모형도

구조해석은 그림. 4와 같이 범용해석 프로그램인 ABAQUS에 의해 부재는 3차원 Shell 요소(4절점)를 사용하고 지반은 3차원 입체요소(8절점)에 의해 모델링하였다. 지진과 중류별 각 시간이력해석에 소요된 컴퓨터 사용량은 표. 1과 같다.



지반을 포함한 전체 구조계

구조물 형상

그림. 4 구조해석 모델링

표. 1 소요된 컴퓨터 사용량

구 분	Structural
Element types	구조물 3차원 4-joint Shell, 지반 3차원 입체 8-joint Solid
Number of elements	45,447
Total number of nodes	69,650
Total number of support nodes	2,326
Total number of load cases	2

둘째, 정적해석법인 등가정적해석법 및 유사정적해석법도 그림 4와 같으며 동적해석인 시간이력해석과 같이 3차원 Shell 요소(4절점)를 사용하고 범용해석 프로그램인 MIDAS 를 사용하여 구조해석을 수행하였다.

2.3 해석 조건

2.3.1 구조물 제원 및 내진설계 기준

구조물 제원은 표 2와 같으며 대상구조물이 하수처리시설임을 고려하여 내진 1등급과 지진구역 1구역을 적용하고 콘크리트 구조물임을 감안하여 붕괴방지수준에 대한 내진해석을 수행하였다.

표. 2 구조물 제원

구 분	규 격 (m)
상부 토피고	1.00
구조물 높이	15.00
부 재 두께	상부 및 중간 슬래브 0.50 , 바닥슬래브 1.10, 벽체 1.00
가로 x 세로	44.50 x 48.40

2.3.2 콘크리트 재료특성

해석에 사용된 콘크리트 재료특성은 표. 3과 같으며, Rayleigh damping $C = \alpha M + \beta K$ 에 사용되는 α, β 는 본 해석에 앞선 고유진동해석으로부터 얻어낸 고유치로부터 산출하였으며, 각각 1.40504, 0.00198312를 적용하였다.

표. 3 콘크리트의 재료특성

상수종류	적용값
Young's Modulus (MPa)	32,359 ($f_{ck} = 27$ MPa)
Poisson's ratio	0.18
Mass density (kg)	2,500
Mass Rayleigh Damping Constant, α	1.40504
Stiffness Rayleigh Damping constant, β	0.00198312

2.3.3 지반조건

지반은 해당 지역의 지질주상도를 참조하여 초기값으로 사용하되, 가해진 지진파에 대한 응답에 따라 달라지는 비선형 재료특성을 가지는 지반의 특성을 반영하기 위해 지진파 종류별로 선형 해석을 통하여 각 위치별 지반특성을 추출해내어 등가 선형 재료 특성을 적용하였다.

표. 4 지층별 정적 물성치

토 층	흙 단위중량 (t/m ³)	연직방향 응력 (MPa)	$K_0 = 1 - \sin(\phi)$	수평방향 응력 (MPa)
매립층(모래)	18	0.05	28	0.05
매립층(자갈)	20	0.00	33	0.27
퇴적층(모래)	18	0.00	30	0.10
퇴적층(자갈)	20	0.00	35	0.35
풍화토	19	0.21	29	0.40
풍화암	21	0.29	33	1.50
기반암	23	1.00	34	10.00

표. 5 지층별 동적물성치

지 층	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	동적 물성치			
			Gd(MPa)	Ed(MPa)	Kd(MPa)	v _d
매립층(모래)	753	221	64	183	561	0.446
퇴적층(모래)	860	274	140	402	1,248	0.433
퇴적층(자갈)	1,141	410	335	948	2,307	0.409
풍화토	1,512	429	524	1,499	4,110	0.430
풍화암	1,543	625	833	2,318	4,150	0.389
기반암	2,174	995	2,425	6,613	8,490	0.361

2.3.3 하중조건

자중을 포함한 고정하중은 사용프로그램에서 제공하는 Body Force에서 모델링에 반영된 체적과 질량을 계산하여 자동으로 재하 하였다.

2.4 해석 결과

내진설계는 앞에서 설명한 내용과 같은 입력자료와 모델링 방법을 이용하여 수치해석을 실시하였으며 해석 결과는 최대 또는 최소 발생 단면력 값을 중심으로 정리하였다.

2.4.1 시간이력해석

동적해석방법인 시간이력해석의 특성상 보고자 하는 결과의 종류에 따라 최대응답이 발생하는 시간구역이 다르며, 발생 지점도 상이하므로 임의 절점의 응답값 또는 임의 시간대의 응답이 모든 결과를 대신할 수 없으므로, 시간이력 변화곡선과 응력 콘타

를 병행 검토하여 도출하였다. 각 지진파별로 변위와 휨응력에 대한 최대 값을 정리하면 표. 6과 7과 같다.

표. 6 지진파별 최대 절대변위

구 분	최대수평 상대변위(mm)	위 치	허용 기준
수정 Hachinohe	222	외부벽체	300 mm
수정 Ofunato	195		
인공지진파	137		

표. 7 지진파별 최대 발생 휨응력

구 분	최대 발생모멘트 (kN.m)	최대 발생 휨응력 (MPa)	비 고	위 치
수정 Hachinohe	965.00	5.79	-	외부벽체 (T=1000mm)
수정 Ofunato	768.33	4.61	25 % ↓	
인공지진파	956.66	5.74	1 % ↓	

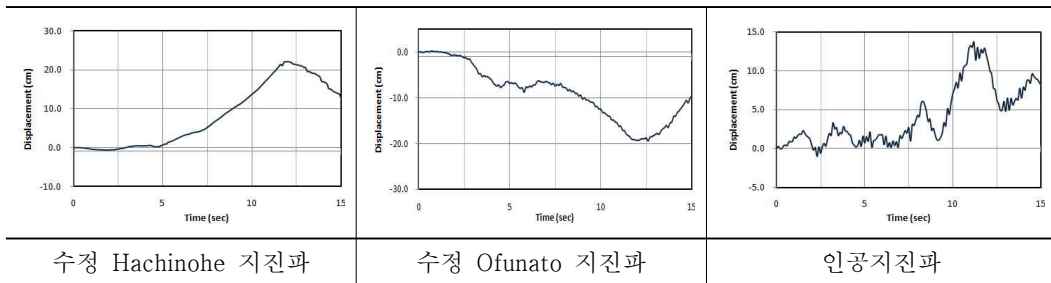


그림. 5 최대 변위 시간이력 그래프

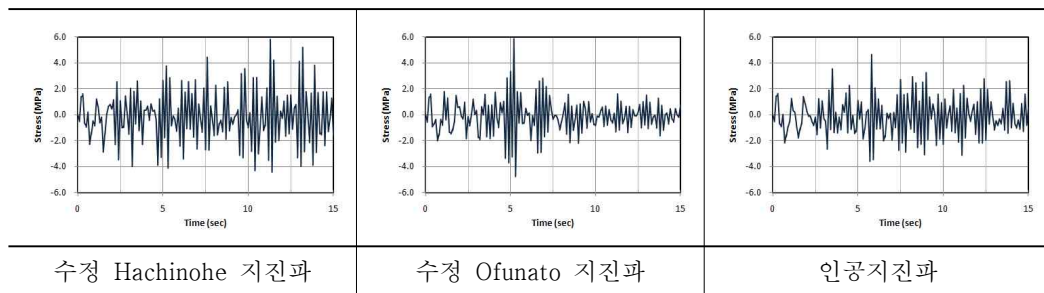


그림. 6 최대 휨응력 발생 위치에서의 휨응력 변화 그래프

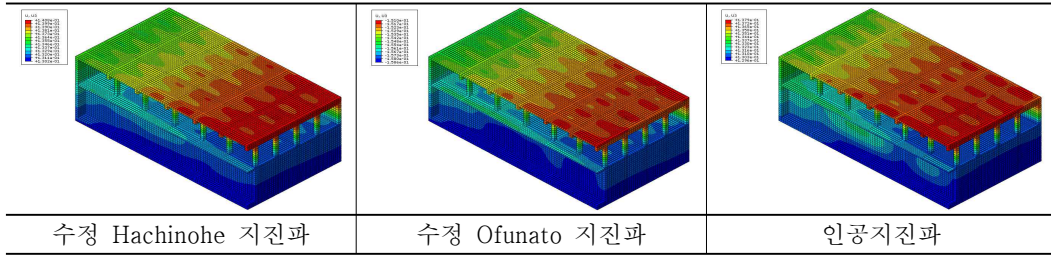


그림. 7 변위(U1) 분포도

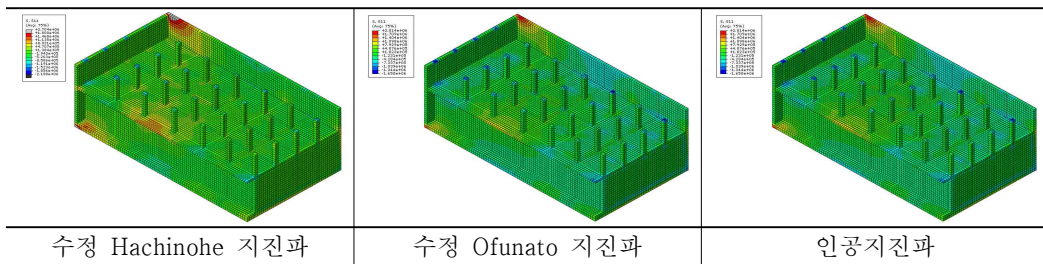


그림. 8 최대 휨응력(S11) 분포도

표. 6과 7과 같이 수치해석에 의해 발생된 최대 휨응력은 Hachinohe, Ofunato 지진파와 인공지진파의 3가지 입력지진파 모두 4.61~5.79 MPa로 약 20 % 이내에 분포하며 최대 발생 수평 변위도 최대 휨응력 분포와 같이 3가지 입력지진파 모두 137~222 mm 로 약 61 % 이내에 분포하며 허용 상대 변위(300 mm)량 이내로 검토되었다.

2.4.2 등가정적해석 및 응답변위법

정적해석방법인 등가정적해석 및 응답변위법에 대한 해석 결과를 시간이력해석 결과와 비교하기 위해 같은 위치에서 최대 또는 최소 발생 단면력 값을 정리하였다.

표. 8 정적해석법에 의한 발생 단면력

구 분	최대 발생모멘트 (kN.m)	최대 휨응력 (MPa)	위 치	허용 기준
등가정적 해석법	1,507.06	9.42	외부벽체 (T=1000mm)	14.04 MPa (fck x 0.4 x 1.33)
응답변위 해석법	1,121.98	6.73		

표. 8과 같이 수치해석에 의해 발생된 최대 휨응력은 등가정적해석법이 응답변위법보다 약 30% 크게 산출되었다. 이는 구조물의 거동특성 즉 상부구속 유무에 따른 수평변위(Side sway)에 따른 결과로 판단된다.

2.4.3 해석결과 비교

표. 9와 같이 내진 1등급을 적용하여 수치해석을 수행한 결과 실무에 많이 적용되고 있는 정적해석방법인 등가정적해석법과 응답변위법이 동적해석방법인 시간이력해석보다 약 14~64%이상 크게 평가되어 실무적용에 문제가 없다고 판단되며 내진 1등급을 만족하는 것으로 검토되었다.

표. 9 해석방법에 따른 발생 단면력 비교표

구 분		최대 발생모멘트 (kN.m)	최대 휨응력 (MPa)	비 고	
동적해석법	시간이력 해석법	965.00	5.74	기준	
정적해석법	등가정적 해석법	1,507.06	9.42	약 64% ↑	기준
	응답변위 해석법	1,121.98	6.73	약 14% ↑	약 34% ↑

3. 결 론

본 연구에서 수행한 내진해석의 검증은 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 정적해석방법인 등가정적해석과 응답변위법을 정밀해석이 가능한 동적해석방법 중 하나인 시간이력해석과 비교하여 실무 적용에 대한 적정성을 분석하는데 목적이 있으며 수치해석 결과를 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 계기지진인 Hachinohe, Ofunato 지진과 인공지진파를 적용한 수치해석 결과 발생된 최대 휨응력이 인공지진파에 비해 Ofunato파는 약 20 % 이상 적게 산출되고 Hachinohe파는 약 1% 이내로 산출되어 유사한 거동특성을 발견하였다.
- 2) 정적해석방법에 의한 수치해석 결과, 발생된 최대 휨응력은 등가정적해석법이 응답변위법보다 약 30% 크게 산출되었다. 이는 구조물의 거동특성 즉 상부구속 유무에 따른 수평변위(Side sway)에 따른 결과로 판단된다.
- 3) 정적해석방법인 등가정적해석법과 응답변위법이 동적해석방법인 시간이력해석보다 약 14~64%이상 크게 평가되어 실무적용에 문제가 없다고 판단되며 내진 1등급을 만족하는 것으로 검토되었다.
- 4) 본 연구는 국한된 하나의 지중 구조물에 대한 연구결과로 향후 지중 구조물의 형상에 따른 거동특성과 지반특성 등을 더 많이 고려하여 해석을 수행하고 그 결과에 따른 지중구조물의 내진해석 기준을 마련을 위한 연구가 수행되어야 한다.

4. 참 고 문 헌

- [1] 구조물의 내진설계(1997, 사단법인 한국전산구조공학회)
- [2] 지중구조물의 내진설계(1999, 사단법인 한국지진공학회)
- [3] 상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구(1999, 환경부)
- [4] 하수도시설 내진기준 마련을 위한 연구(2009, 환경부)
- [5] 구조물-지반 상호작용과 지진해석(2010, 구미서관)
- [6] 김용석, “구조물-지반 상호작용이 구조물의 동적거동에 미치는 영향,” 전산구조공학회지, 제6권 제2호, 1993.
- [7] Ahmed Elgamal, Linjun yan, Joel P. Conte, Three-Dimensional Seismic Response of Humboldt Bay, Bridge-Foundation-Ground System, J. of Structural Engineering, ASCE, July 2008
- [8] Mohsen Kamalian, Mohammad Kazen Jafari, Abdollah Sohrabi-Bidar, and Arash Razmkhah, Seismic Response of 2-D Semi-Sine Shaped Hills to Vertically Propagating Incident Wavs: Amplification Pattewrns and Engineering Applications, EERI, Earthquake Spectra, Vol. 24, May 2008