

동적 원심모형실험을 이용한 Rokko Island 하수관로연결 구조변화부의 지진거동 조사사례

李黎明*, 田中弘**

1. 머리말

지진이 많은 일본에서는 사회자본이 밀집된 도심 부에 있어서 합리적인 내진정책이 중요한 과제 중 하나이다. 특히 지중구조물의 경우는 지상구조물에 비해 지진시 거동을 쉽게 관찰할 수 없으며, 또한 주변 지반과의 동적 상호작용에 관한 기술과제도 포함하고 있다. 과거에는 지진피해에 따른 교훈을 바탕으로 축적한 내진대책에 관한 내용을 개선해 왔으나, 높은 수준의 지진동에 대응하며, 보다 합리적인 내진정책을 조기에 구축하기 위해서는 지진관측을 비롯해 모형실험과 수치시뮬레이션을 유효하게 활용하는 적극적인 자세가 필요하게 되었다.

지반공학의 모형실험 중 원심모형실험은 파괴나 극한 상태에 이르기까지의 모든 과정에 있어서 상사 법칙이 만족되는 (모형에서 구해지는 현상이 실물에 직접 대비가능한) 유일할 실험방법으로 일반적으로

인식되어 오고 있다. 특히 설계법이 확립되지 않은 구조물이나, 대책공법에 관한 기술과제 또는 시공관리에 있어서 실질적인 현상과 거동의 검토와 검증에 유효한 방법의 하나이다.

따라서 지중구조물 변화부의 지진시 거동이나 내진대책을 검토할 목적으로 지중구조물인 수직갱과 쉘드관로의 연결부, 하전황단부의 관로와 수직갱의 연결부에 착안한 3차원 모델을 사용하여 동적 원심 모형실험을 수행하였다. 수직갱과 쉘드관로 연결부의 사례는 그림 1에 나타난 Rokko Island 하수처리장과 고베시를 연결하는 사이편형 하수도간선을 적용하였다. 이 하수도간선은 해저부를 연결하는 쉘드터널과 2개의 수직갱으로 구성되었으며, 쉘드터널과 수직갱 연결부의 침하대책으로 가동성 조인트를 사용하였다. 1995년에 발생한 고베대지진시 수직갱에는 큰 피해가 발생하였으나, 쉘드터널과 수직갱 연결부의 변위는 크게 발생하지 않고 기능적으로 손상정도만 발생하여 가동성 조인트의 설치로 구조변화부의 내진성이 개선된 것으로 사료된다¹⁾.

본 고에서는 실험장치의 사양과 지반조건, 모형설

* 비회원, 공학박사, 日本工営(株) 中央研究所 総合技術開発部 主任研究員(a5109@n-koei.co.jp)

** 비회원, 공학박사, 日本Civic Consultant(株) 事業統括本部 部長

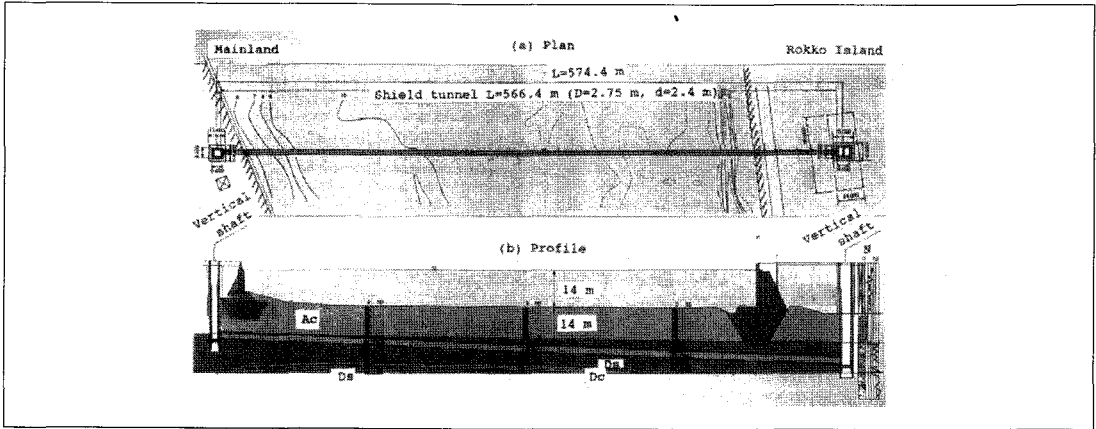


Fig 1. Schematic view of Rokko Island sewer connection line

치조건 및 내진대책공법의 조건을 다르게 하여 수직 강과 철드관로 연결부의 지진시 거동에 관한 대표적인 실험결과^{2), 3)}를 나타내고, 지반과 구조물의 동적 상호작용문제에 관한 모델화와 모형제작을 포함한 원심모형실험에 대해 서술하고자 한다.

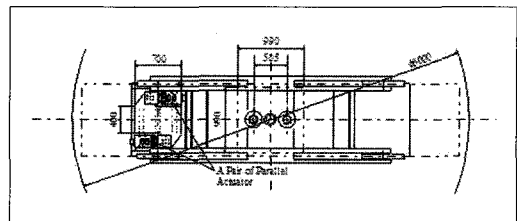
리의 계측데이터를 수집하였다. 또한 가진장치를 탑재하였기 때문에 원심재하장치의 회전 Arm에 고압 배전계, 유압 Accumulator 및 제어용 전기회로를 장

2. 실험개요

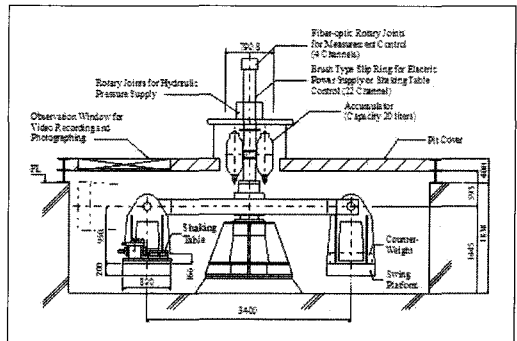
2.1 동적 원심모형장치

원심모형장치와 가진장치의 배치현황을 그림 2에, 원심모형시험기의 사양을 표 1에 나타내었다.

원심모형시험기는 유효반경 R=2.6m, 최대 원심 가속도 250G, 용량 약 981G·kN의 중형장치이며, Programmable Controller를 적용한 집중제어시스템을 이용하기 때문에 실험패턴에 따라 부드러운 회전제어가 가능한 구조이다. 계측시스템은 동변형앰프와 차징앰프에 의해 동시 샘플링이 가능하며, 비 접촉형 광슬립링에 의한 데이터전송으로 노이즈프



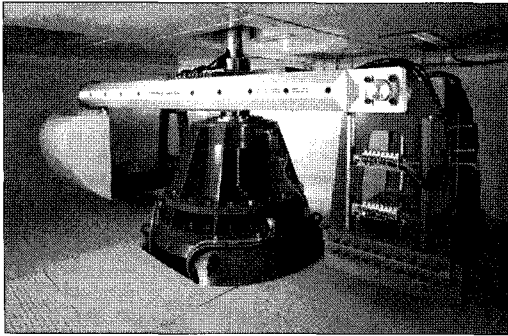
(a) Plane View



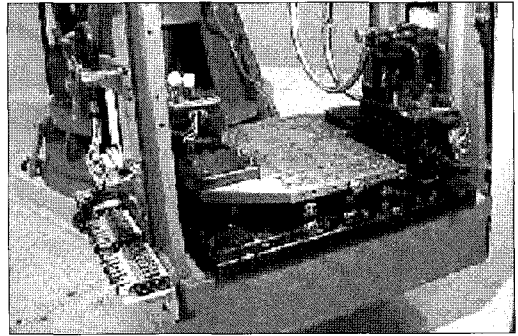
(b) side View

Fig 2. Configuration of the dynamic centrifuge system(계속)

| 동적 원심모형실험을 이용한 Rokko Island 하수관로연결 구조변화부의 지진거동 조사사례 |



(c) Centrifuge



(d) Shaker

Fig 2. Configuration of the dynamic centrifuge system

Table 1. Specifications of the centrifuge

Type	Beam type with dual swing platform
Normal radius	2,600 mm
Platform space	L1,000 mmxW800 mmxH900 mm
Maximum acceleration	250 G
Maximum payload	9.81 kN
Capacity	981 G-kN
Drive motor	AC200 V, 90 kW
Rotary joints	Air or Water: 2 poles (Working pressure: 981 kPa) Oil: 2 poles (Working pressure: 20.6 Mpa)
Data acquisition system	Digital dynamic amplifier: 3 Units (30 channels) Charge amplifier: 22 channels 18 channels for piezoelectric accelerometer 4 channels for laser type displacement Data sampling rate: 20 kHz(50 msec)
Slip-ring	Fiber-optical rotary joint: 4 poles Electrical slipping: 22 poles 300 V, 15 A: 6 poles for electric power 300 V, 3.5 A: 16 poles for electrical control
Observation system	CCD camera: 3 sets Strobo camera: 1 set

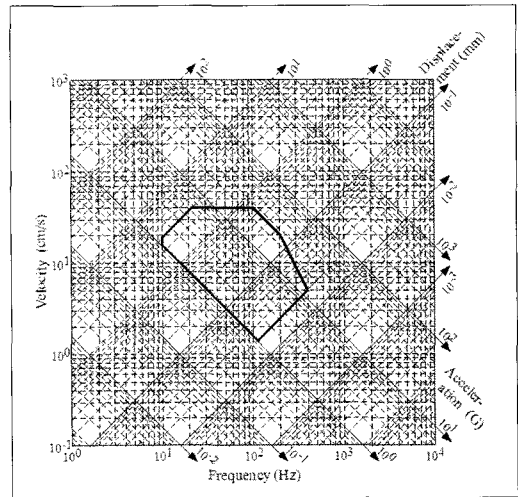


Fig 3. Characteristic curve of the shaker

Table 2. Specifications of the shaker

Items	Specification	
	Model	Prototype (1/50 model)
Maximum velocity	40 kine	40 kine
Maximum amplifier	3.0 mm	150 mm
Maximum acceleration	25 G(1 G=9.8 m/sec ²)	490 gal
Maximum frequency	10-400 Hz	0.2-8 Hz
Maximum charge load	118 kN	
Size of the table	1,700 mm xW400 mm	
Maximum payload	2.45 kN(model+container)	
Control system	Electro-hydraulic servomechanism	
Control mode	Acceleration or displacement	
Shaking motion type	Regular, irregular and random wave	

착하였다.

가진장치는 전기유압 Servo제어방식이며, 유압원에서의 가진용 고압유는 로터리조인트를 통해 Accumulator에 축적하여 가진테이블에 연결한 Actuator로부터 가진력을 발생시키는 기구이다. 가진제어는 PC제어 Servo Controller를 적용하였다. 가진장치의 사양 및 가진한계측정곡선을 표 2와 그림 3에 나타내었으며, 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

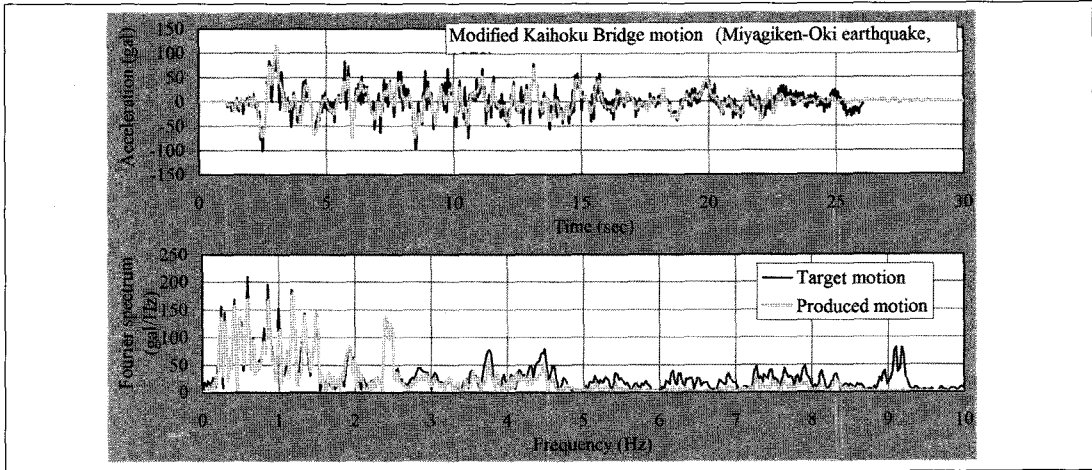


Fig 4. Comparison between the target motion and motion actually produced by the centrifuge mounted shaker

(1) 연속가진기능

본 가진장치는 외부로부터의 유압공급방식으로 써 가진에 의한 유압의 저하가 신속히 회복되어 재 가진준비가 가능하다. 또한 PC제어에 의한 파형발생장치를 사용하여 각기 상이한 파형에 의한 연속가진기능을 가지고 있다.

(2) 보정 가진기능

일반적으로 가진제어 PC에서 가진장치에 목표파형을 송신하면 가진테이블상에 설치한 모형의 질량 분포와 강성 등의 영향으로 고유진동수의 관계로부터 가진테이블이 목표파형과는 다른 응답파형을 나타낸다. 본 가진장치는 보정 가진기능을 가지고 있기 때문에 목표파형과 응답파형을 비교하고 수정반복함으로써 각 모형에는 목표파형에 가까운 응답파형을 얻기 위한 지령파형이 작성가능하다. 가진장치의 제어기능을 나타내는 목표파형과의 응답파형의 예를 그림 4에 나타내었다. 그림에 나타내는 응답파형은 소정의 모형에 대해 보정가진으로 구한 것이

다. 이 그림을 보면, 0~5Hz의 주요 주파수범위에 있어서 목표파형과 잘 일치하게 모형의 응답파형이 구해지는 것을 확인할 수 있다.

(3) 목표에 따른 파형의 입력기능

가진장치는 규칙적 정현파, 불규칙파의 실 지진기록파, 랜덤파의 3종류가 입력가능하며, 목표에 따라 입력파형설정이 가능하다.

2.2 실험조건의 설정

상술한 바와 같이 3차원 모델에 의한 동적 원심모형실험은 지중구조물 변화부의 지진시 거동파악과 내진대책을 목표로 수행하였다. 본 고에서는 수직갱과 쉘드관로의 연결부에 착안한 실험사례를 바탕으로 모델과 실험방법, 결과를 간략히 나타내었다.

실험대상인 수직갱과 쉘드관로의 구조제원을 그림 5에, 실험조건을 표 3에 나타내었다. 본 실험에서는 총 6 Case의 가진실험으로부터 지반액상화의 유

| 동적 원심모형실험을 이용한 Rokko Island 하수관로연결 구조변화부의 지진거동 조사사례 |

Table 3. Test conditions

CASE	Depth of the joint	Ground condition	Countermeasure
1	15m	Dry, Dr=55%	None, Fixed joint
2	15m	Dry, Dr=55%	ground improvement (180 degrees)
3	15m	Dry, Dr=55%	ground improvement (360 degrees)
4	15m	Dry, Dr=55%	Flexible joint
5	6m	Dry, Dr=55%	None, Fixed joint
6	6m	Saturated, Dr=55%	None, Fixed joint

무, 관로 연결부의 심도별 영향과 내진대책공의 효과를 조사하였다.

내진대책으로는 수직갱과 쉴드관로 연결부 주변의 지반개량에 의한 보강과 가동성 연결에 의한 연성 구조화를 고려하였다. 지반개량은 실제 시공성을 고려하여 상부 반단면 개량과 전단면개량에 있어서 대책공법의 효과를 비교하였다(그림 6 참조).

2.3 실험방법

2.3.1 실험모형

실험모형개요를 그림 7에 나타내었다. 모형은 축척 1/70으로 제작하였으며, 70G(G:중력가속도, 9.81m/s²)의 중력가속도장에서 가진실험을 수행하였다. 대상의 실물크기는 15m×15m×심도 21m의 수직갱과 외경 6m, 길이 30m의 쉴드관로를 대상으로 하였다. 수직갱은 강제 구조로써 실물의 중량에 대한 상사법칙을 위해 알미늄제 모형으로 제작하였다. 쉴드관로에 대해서는 축방향 등가강성이 압축에 비해 인장축이 상당히 작기 때문에 축인장이 발생하는 상태에서의 거동이 중요할 것으로 판단되어 등가 인장축강성의 상사법칙을 고려하여 염화비닐의 일

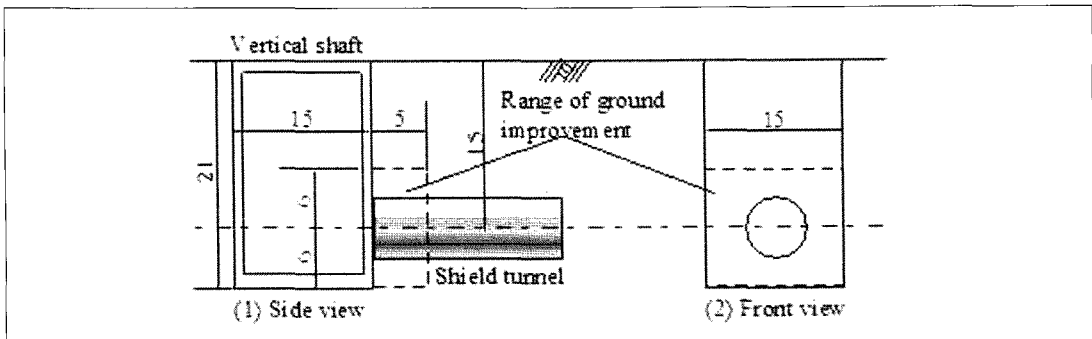


Fig 5. Configurations of the prototype structures (unit: m)

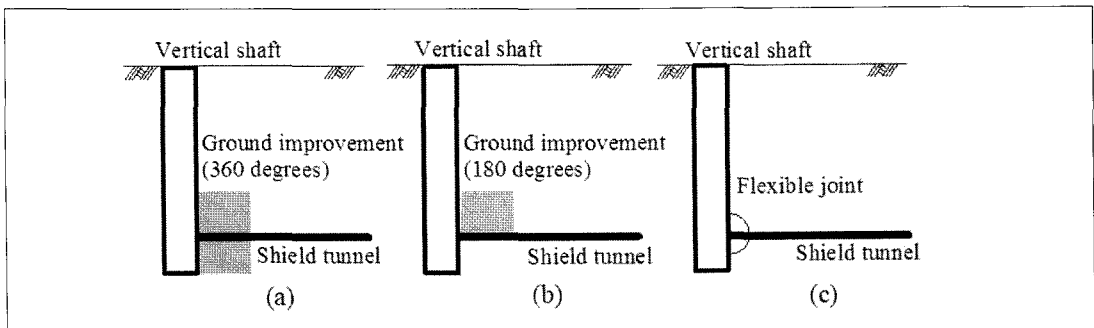


Fig 6. Types of countermeasures

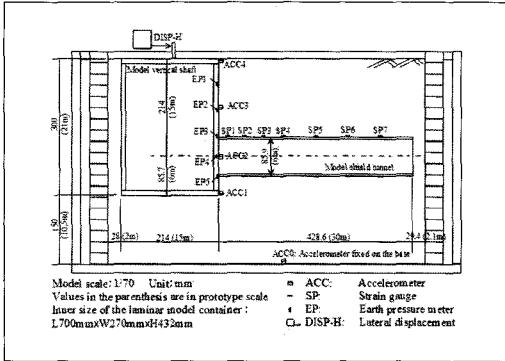


Fig 7. Schematic view of the model and instrumentation

정한 단면을 가지는 모형관이다. 이 경우, 모형관 단면방향으로 휨강성이 극단적으로 작아져 지반의 상재하중에 의해 큰 처짐이 발생될 것이 예상되었다. 따라서 변형을 억제하고 또한 관로중량에 관한 상사 법칙을 만족시키기 위해 염화비닐모형관의 내경에 맞춰 상사적 중량을 가지는 알미늄관을 삽입한 2중 관형식의 쉘드관로모형을 제작하였다. 아울러 2중 관 사이의 마찰저항을 제거하기 위해 두께 0.5mm의 Teflon Seat를 삽입하였다.

접속부의 가동성 연결조건으로는 모형 수직갱의 벽면양측에 두께 3mm의 고무왓셔를 끼워 모델화하였다. 그림 7에 나타난 모형배치는 관로의 접속심도가 15m인 얇은 심도 매설관의 경우이며, 접속심도가 6m의 경우는 모형을 상하 반대로 설치하여 실험을 수행하였다.

2.3.2 모형지반의 제작

모형지반은 낙하높이가 조절가능한 특수 호퍼를 이용하여 건조 Toyapura 규사를 상대밀도 $D_r=55\%$ 가 되도록 공중낙하시켜 제작하였다. 지반개량모델은 개량범위를 5m로 하며, 7일간의 양생을 통해 소

정의 강도를 발현하는 시멘트혼합 개량체를 사전에 접속부에 타설하였다. 액상화지반의 경우는 물보다 70배 높은 점성을 가지는 실리콘오일을 사용하였다. 모형지반의 포화는 2중 부압공급계통을 장착한 진공수조에서 10kPa의 압력으로 모형지반의 하부에서 주입하였다.

2.3.3 입력지진파 및 계측항목

가진실험의 입력지진파는 그림 4와 같으며, 최대 진폭 350gal로 조정하여 사용하였다. 계측은 그림 7에 나타내듯이 다음의 항목에 대해 측정하였다.

- (1) 쉘드터널의 발생 축·휨모멘트
- (2) 수직갱 천단부의 수평변위
- (3) 수직갱 심도방향의 응답가속도
- (4) 수직갱 전면측(쉘드터널과 연결하는 부분)의 작용토크

3. 실험결과

3.1 내진대책에 따른 관로발생축력의 저감 효과

그림 8에 지진시 관로에 발생하는 최대 인장축력의 분포를 나타내었다. 가동성 연결이 연성구조의 경우, 연결부 단부에서 발생하는 축력의 저감효과가 명확하게 나타나고 있었다. 한편 지반개량에 의해 연결부가 강성 구조일 경우는 개량범위내에서 발생 축력의 저감효과는 있지만, 축력의 peak가 지반측으로 전환되는 경향이 나타났다. 따라서 연결부를 지반개량하여 강성 구조로 하는 경우 내진대책공법으로는 보기 어려운 것으로 사료된다.

동적 원심모형실험을 이용한 Rokko Island 하수관로연결 구조변화부의 지진거동 조사사례

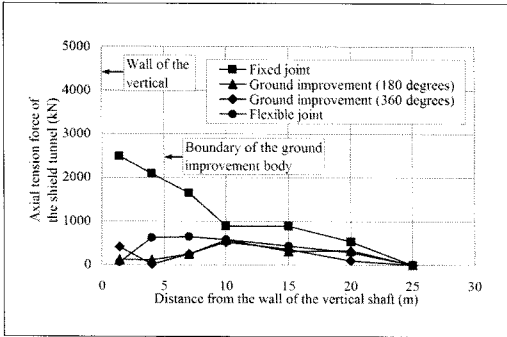


Fig 8. Measured axial tension force of the shield tunnel

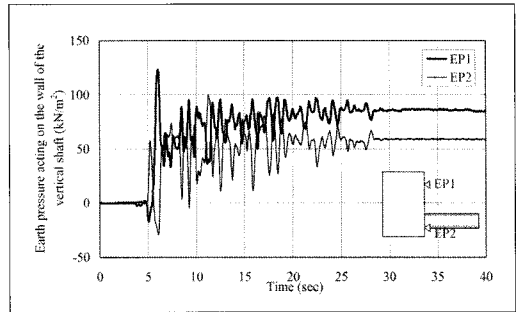


Fig 9. Measured earth pressure acting on the front wall of the vertical shaft

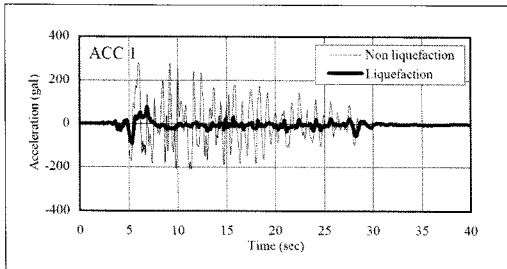


Fig 10. Measured accelerations at the vertical shaft for test cases with and without liquefaction

3.2 수직갱의 동적거동(Locking현상)

그림 9에 수직갱 벽면의 작용토압에 대한 경시변화를 나타내었다. 진동중 수직갱 상부와 하부의 작용토압 부호가 상반되어 잘 나타나고 있으며, 강성 수직갱은 중앙부근을 축으로 이른바 록킹현상이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 수직갱과 지반의 강성차이 및 지반진동의 심도방향 증폭에 따른 것으로 판단되며, 관로연결부의 단부에서 큰 단면력이 발생된 요인의 하나로 추정되었다.

3.3 지반액상화에 의한 수직갱의 응답특성의 변화

그림 10에 액상화와 비액상화지반에 대해 수직갱

의 응답가속도 경시변화 예를 나타내었다. 비액상화 지반에서는 수직갱이 입력지진파와 비슷한 진동을 나타내는데 비해 액상화지반에서는 주요 진동이의 응답가속도가 거의 0에 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 액상화지반에서는 지진응답보다 수직갱 주변의 지지력저하와 부상이 지배적인 요인으로 작용하고 있는 것으로 판단되었다.

4. 맺음말

지중구조물변화부의 지진시 거동 및 내진대책의 검토를 목적으로 3차원 모델에 의한 동적 원심모형 실험을 나타내고 합리적인 내진대책을 검토하는 경우, 동적 원심모형실험이 유효성을 나타내었다. 또

한 지반과 구조물의 동적 상호작용문제에 관한 모델화와 모형제작을 포함한 실험을 통해 나타내었다. 본 실험을 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1)지중구조물 변화부에 대한 내진대책으로 연성 구조화에 의한 효과는 명료한 반면, 지반개량보강은 구조물 변화부 이외에 대해 내진대책이 필요한 것으로 판단된다.

(2)강성 수직갱 구조물의 지진시 거동은 톱킹현상에 가깝게 나타나고 있었다. 주변지반 및 연결 구조물의 응답특성과 다르게 나타나기 때문에 톱킹현상은 연결부의 내진성을 크게 지배하고 있는 것으로 판단된다.

(3)주변지반에 액상화가 발생되면 구조물의 응답 특성이 액상화하지 않는 지반의 경우에 비해 크게 변화하며, 지진응답보다도 수직갱 주변지반의 지지력이나 부력이 지배적 요인으로 작용하고 있는 것으로 판단되었다.

(4)향후 기존 관로시설에 있어서 시공성을 고려한 내진보강대책의 검토가 필요하며, 수행결과를 보고하고자 한다.

감사의 글

끝으로 본 기사의 투고에 많은 도움을 주신 (주)삼보기술단 지반사업부 김재영박사에게 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Tohda, J., Yoshimura, H. and Li, L. (1996): Characteristic features of damage to the public sewerage system in the Hanshin area, Special Issue of Soils and Foundations, 335~347.
2. Tanaka, H. and Li, L. (2003): Dynamic centrifuge model test on seismic performance of the structural change points of underground structures. Civil Engineering Journal, ISSN 0386?5886, Public Works Research Center, 46?49 (in Japanese).
3. Sakuma, K., Shimizu, N. and Tsunokuni, N. (2003): A study on the seismic performance of the structural change point of underground structures through dynamic centrifuge model test. Proceedings of the JSCE annual conference, (in Japanese).
4. Public Works Research Institute, Public Works Research Center and 17 private companies (1998): Technical report of the joint research project on development of the earthquake-absorbing materials and design procedures for underground structures (in Japanese).