

인터넷을 이용한 면진 교량의 원격 병렬 유사동적실험

Remote Parallel Pseudo-dynamic Testings Using Internet on Base-Isolated Bridge

Chung-Bang. Yun*, Dong-Uk. Park*, Eiichi Watanabe** and Kazutoshi Nagata**

ABSTRACT

This paper presents the results of a cooperative research on remote parallel pseudo-dynamic testing on a base-isolated bridge with multiple piers using Internet between KAIST, Korea and Kyoto Univ., Japan. Experimental facilities located at two institutions were parallelly used to test the nonlinear behavior of the base-isolators. Two data communication schemes for parallel tests were developed and the performance is compared. The results indicate that the elapsed time may vary widely depending on the data communication and testing schemes : i.e. 1-25sec for each time step. But it is fairly comparable with the time required for pseudo-dynamic testing. The testing method can become more powerful, as the data communication and monitoring techniques through Internet improve further.

1. 서론

대형 토목구조물의 내진 성능 평가는 비선형 거동을 하는 구조요소 개수의 증가로 인하여 점점 더 힘들어 지고 있다. 따라서, 대형구조물의 내진성능의 평가를 위해 효율적인 실험기법의 개발이 요구된다. 인터넷을 이용한 원격병렬 유사동적실험의 개념은 Watanabe[Watanabe, et. Al, 1999]에 의하여 제안되었다. 이 개념은 비선형거동이 크게 발생하는 여러 구조부재를 포함하는 대형 구조계의 동적거동을 분석할 수 있는 현실적인 실험기법을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 대형이고 복잡한 구조계의 동적실험에는 고가의 실험장비가 다수 필요한데, 이러한 고가의 장비는 한 연구기관이 다수를 보유하지 못한 경우가 일반적이다. 이 경우, 여러 기관이 보유한 실험장비들을 인터넷으로 연결하여 원격조정예 의한 병렬 실험을 수행하면, 대형 구조계의 동적 비선형거동을 효과적으로 분석할 수 있다. 특히, 실물 크기인 구조부재의 비선형 거동에 대한 실험과, 전체 구조계의 동적거동에 대한 전산해석을 매시간 병렬로 수행하는 실험기법인 유사동적실험은 이에 매우 적합한 실험 방법이다.

본 연구에서는 KAIST 와 일본 Kyoto 대학교에 위치한 실험 장비 및 컴퓨터를 인터넷으로 연결하여 원격병렬 유사동적 실험을 수행하였다 (그림 1). 대상구조물은 4 경간 연속 콘크리트 박스거더 교량이며, 높이와 구조적 특성이 다른 세개의 교각과 상판 사이에 면진 베어링이 설치된 경우이다. 면진 베어링의 비선형 거동은 매 시점에서 각각의 연구기관에 설치된 실험장비를 통해 계측되고, 이로부터 얻어진 면진 베어링의 복원력을 이용하여 전체 교량 시스템의 응답이 해석적으로 계산된다. 본 논문에서는 두 대학에서 독립적으로 개발된 데이터 전송기법을 이용하여 실제 실험을 수행하고, 두 기법의 효율성을 비교, 분석하였다.

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수
** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정
*** 교토대학교 토목공학과 교수
**** 교토대학교 토목공학과 조교

2. 원격병렬 유사동적 실험의 구성

그림 2 에 인터넷을 이용한 원격병렬 유사동적 실험기법의 전체적인 구성도를 나타내었다. 원격병렬 실험 시스템은 주 컴퓨터 시스템과 다수의 로컬 서버 시스템으로 구성된다. 주 컴퓨터는 전체 구조의 동적 해석을 위한 해석 엔진을 포함하고 있으며, 다수의 로컬 서버 컴퓨터는 각 연구기관의 실험 장비를 제어하는데 사용된다. 다음 시점에서 각 면진 베어링에 가해질 변위는 주 컴퓨터의 해석 엔진에서 계산되고, 그 결과는 각 로컬 서버로 전송된다. 그리고 각 로컬 서버는 전송 받은 변위를 해당 면진 베어링 시편에 가하여 얻어진 복원력 데이터를 다시 주 시스템으로 전송하게 되며, 이 결과를 이용한 전체 구조계의 동적 해석을 통하여 그 다음 시점의 변위가 계산되고, 이 변위를 이용한 다음시점에서의 실험이 계속된다.

이때, 주 시스템과 로컬 서버, 그리고 각 로컬 서버와 실험장비 사이의 데이터 전송을 위해서는 특별한 기법이 필요하다. 본 연구에서는 각기 다른 데이터 전송 방법을 이용하여 개발된 두 가지의 실험 기법을 사용하였다. 먼저, 실험기법 I 은 Kyoto 대학교에서 개발된 기법으로, 그림 3 에 나타낸 바와 같이 Unix 계열의 운영체제를 사용하는 EWS (Engineering Work Station)들로 구성되어있다. 인터넷을 통한 주 시스템과 로컬 시스템 사이의 데이터 송수신은 잘 알려진 TCP/IP 프로토콜을 이용하여 이루어진다 [Nielson, et al. 2001]. 반면에, 로컬 서버와 실험장비를 제어하는 PC(Personal Computer)사이의 데이터 송수신은 SAMBA 프로그램을 통해 구성된다 [Sharpe, et al. 2000]. 이 때 SAMBA 프로그램은 Unix 를 사용하는 EWS 와 Windows 를 PC 사이에서 변위와 복원력 데이터를 공유하기 위해 사용된다.

실험기법 II 는 KAIST 에서 개발된 기법으로, 그림 4 에 나타낸 바와 같이 주 컴퓨터 및 로컬 서버 컴퓨터가 모두 PC 들로 구성되어 있고 Windows 를 운영체제로 사용한다. 인터넷을 이용한 주 컴퓨터 및 로컬 서버 컴퓨터의 데이터 전송은 실험기법 I 과 마찬가지로 TCP/IP 프로토콜을 이용하여 이루어진다. 그러나, 이 실험기법에서는 로컬 서버 컴퓨터로 이용되는 PC 가 직접 실험장비를 제어하게 되므로, SAMBA 프로그램은 필요하지 않게 된다.

두 연구기관에서 사용한 네트워크 시스템의 최대 데이터 전송 속도는 100Mbps 로 동일하다. 인터넷을 이용한 데이터 전송에서 주 시스템과 로컬 서버 시스템은 사전에 결정된 포트번호를 공유해야 한다. 따라서, 인증 받지 못한 다른 컴퓨터는 시스템으로 들어올 수 없게 되어 시스템의 보안이 유지된다.

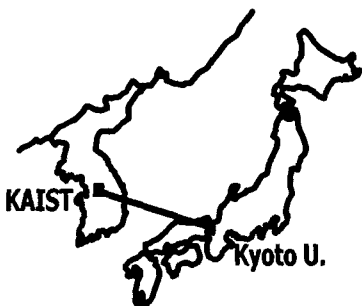


그림 1 KAIST 와 Kyoto 대학 간의 인터넷 연결

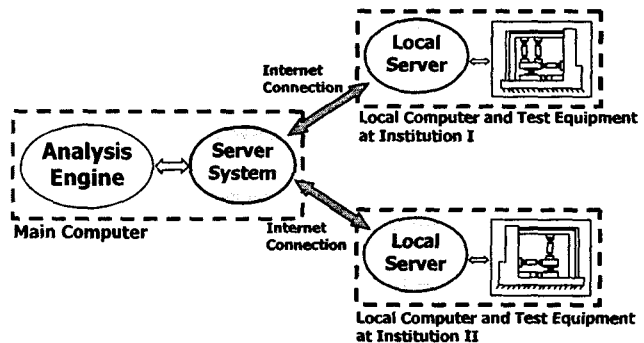


그림 2 원격병렬 유사동적 실험 시스템

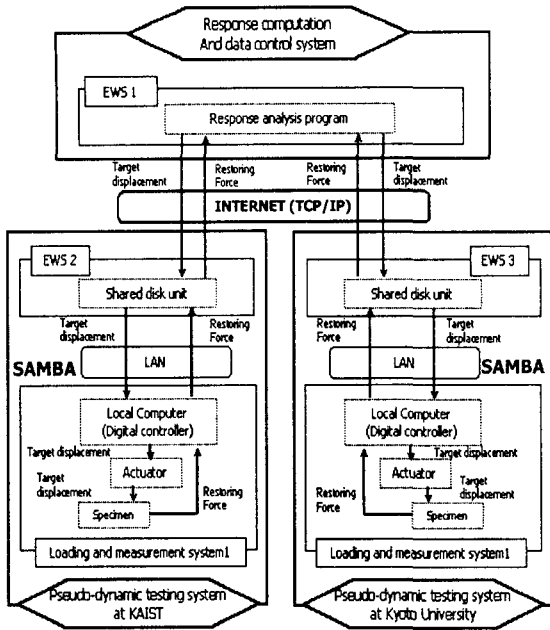


그림 3 실험기법 I(TCP/IP 및 SAMBA 사용)

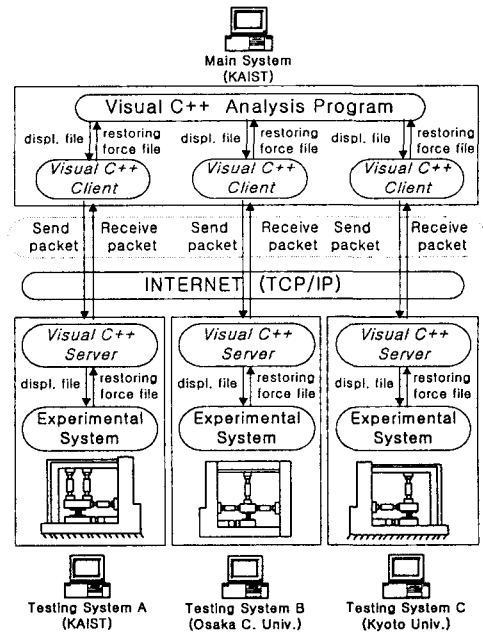
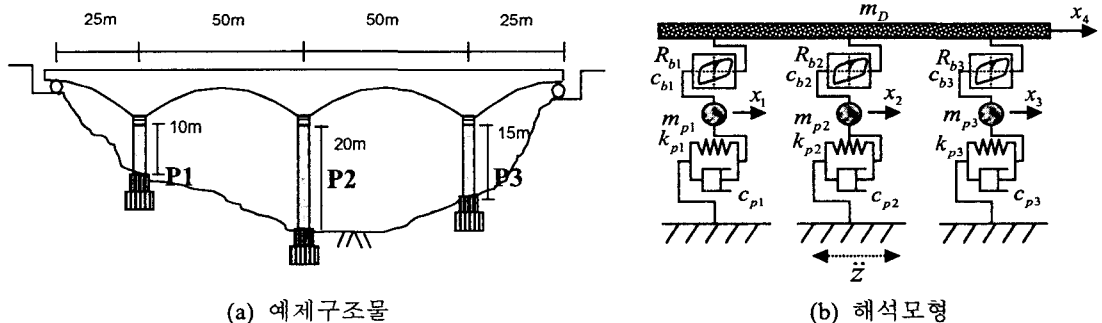


그림 4 실험기법 II(TCP/IP 사용)

3. 예제 구조물

3.1 면진교량

예제연구에 사용된 구조물은 그림 5에 보인 바와 같이, 4 경간 연속의 콘크리트 박스거더 교량으로, 서로 다른 길이의 3 개의 교각 상부에 납면진반침(LRB)이 설치된 경우이다. 그림 5(b)와 표 1에 이상화된 해석모형과 구조적 특성을 나타내었다. 해석 모형은 그림에서와 같이 상판 및 3 개의 교각에 대한 집중질량과 3 개의 교각에 대한 선형 요소 및 3 개의 LRB에 대한 비선형 요소로 구성되어있다. 전 교각의 상부에 lock-up 장치가 설치됐다고 가정한 경우 교량의 고유주기는 0.5 초이며, LRB가 설치된 면진 교량의 경우 목표주기는 2.0 초로 택하였다. 지진 입력력으로는 최대지반 가속도가 0.3g로 조정된 El Centro 가속도기록(NS, 1940)을 사용하였다. 그림 6에 입력지진과 5% damping에서의 응답스펙트럼을 보였다. LRB가 설치되어 구조물의 고유주기가 2.0 초로 증가될 경우, 스펙트럴 가속도가 현저하게 감소함을 알 수 있다.



(a) 예제구조물

(b) 해석모형

그림 5 면진장치를 가진 예제 교량과 해석모형

각 교각의 상부에는 4 개의 동일한 LRB 로 구성된 면진 시스템이 설치되어있으며, 이 때 각 LRB 의 유효강성(k_{eff})은 면진 교량의 목표 주기(T_B)를 2 초로 할 때 다음과 같은 관계식에 따라 결정된다.

$$T_B = 2\pi \times \sqrt{\frac{m_D}{3 \times 4 \times k_{eff}}} \quad (1)$$

이에 따라, LRB 의 유효강성(k_{eff})은 $2.95 \times 10^6 N/m$ 로 계산되었다. 그러나 실제 실험 수행 시 1/2 스케일의 시편을 사용하였다. 이때 상사율은 변위에 대해 1/2, 하중에 대해 1/4, 그리고 강성에 대해 1/2 로 택하였다. 그림 7 에 제작된 LRB 시편의 기하학적 형상을 보였는데, 지름이 30 cm 인 원형단면을 가지고, 20 개의 고무층의 총 두께는 4cm 이며, 납 core 의 지름은 6cm 이다. 그림 8 에는 지진하중에 대한 실제 실험에 앞서 수행된 작은 변위에 대한 반복하중 실험결과를 나타내었다. LRB 시편의 항복 강도는 28.5kN 이며, bi-linear 모델의 1,2 차 강성은 $k_1 = 1.425 \times 10^4$ 와 $k_2 = 0.526 \times 10^3 kN/m$ 이다. 이 수치들을 이용하여 예비 수치해석 연구를 수행하였다.

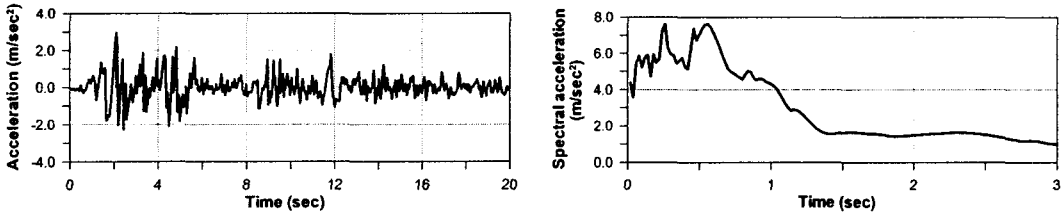


그림 6 입력 지진 및 응답 스펙트럼 : El Centro 1940 (pga=0.3g)

표 1 예제 교량의 구조적 특성

	Pier 1	Pier 2	Pier 3	Deck
Stiffness (kN/m)	3.44×10^5	8.60×10^4	1.38×10^5	
Weight (kN)	6.46×10^2	1.29×10^3	9.80×10^2	3.53×10^4
Natural Period of Bridge (sec)	0.5* (2.0**)			

Note : * 전 교각 상부에 LUD 가 설치된 경우의 교량 고유주기
 ** 전 교각 상부에 LRB 가 설치된 경우의 교량 고유주기

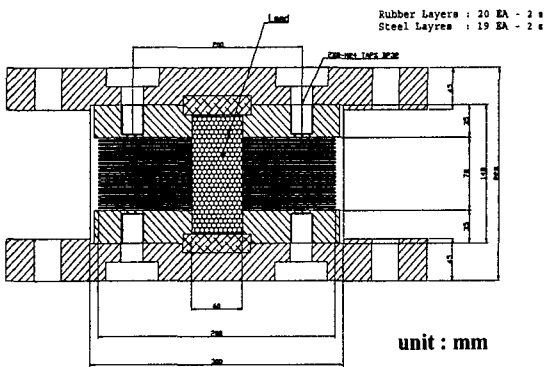


그림 7 LRB 시편의 형상

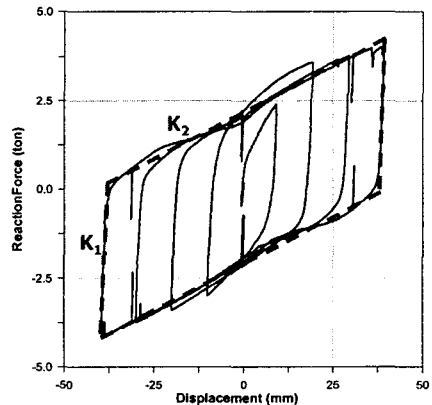


그림 8 LRB 시편의 반복 재하 시험결과

3.2 교량 모형의 운동방정식

그림 5(b)에서 보인 교량모형의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + R(X) = -M\ddot{z} \quad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{p1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{p2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{p3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_D \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_{p1} + c_{b1} & 0 & 0 & -c_{b1} \\ 0 & c_{p2} + c_{b2} & 0 & -c_{b2} \\ 0 & 0 & c_{p3} + c_{b3} & -c_{b3} \\ -c_{b1} & -c_{b2} & -c_{b3} & c_{b1} + c_{b2} + c_{b3} \end{bmatrix}, R(X) = \begin{bmatrix} k_{p1}x_1 - R_{b1} \\ k_{p2}x_2 - R_{b2} \\ k_{p3}x_3 - R_{b3} \\ R_{b1} + R_{b2} + R_{b3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

위에서 X 는 변위 벡터, \ddot{z} 는 지반 가속도, M 는 질량 행렬, C 는 감쇠 행렬, 그리고 $R(X)$ 는 교각과 LRB 에 발생되는 복원력 벡터를 나타낸다. 유사 동적실험 수행 중에 전체 교량 시스템의 운동방정식은 내재적-외연적(implicit-explicit) 적분법을 사용한다. 이 방법은 수치적인 부분에 대해서는 내재적 Newmark 적분법을 적용하고 실험적인 부분에 대해서는 외연적 적분법인 predictor-corrector 방법을 혼합하여 구성하였다. [김남식, 1995]

4. 원격병렬 실험의 수행

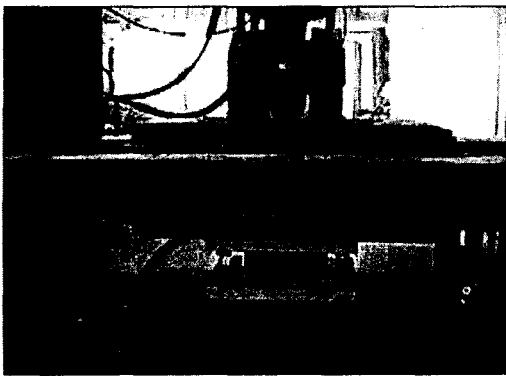
첫번째로 TCP/IP 와 SAMBA 를 기초로 하는 데이터 전송 기법을 사용한 실험기법 I 을 이용하여 공동실험을 수행하였다. Kyoto 대학과 KAIST 에서 LRB 1 과 2 에 대한 실제 실험을 각기 수행하였다. 계획단계에서 세번째 공동연구기관이었던 Osaka 시립대학에서는 장비사용에 문제가 발생되어서, LRB 3 에 대한 실험은 Kyoto 대학에서의 수치해석으로 대체되었다. 그림 9 에 두 연구기관의 실험장비를 보이었다. 모든 실험수행과정은 각각의 웹카메라를 통해 모니터 된다. 그림 10 에 실험 중에 모니터된 LRB 시편의 변형상태를 보이었다. 표 2 에 원격병렬 실험 중에 소요된 시간을 정리하였다. 표에서 나타난 바와 같이, 단일 시간간격(Δt)에 대하여 다소 긴 25 초가 소요되었다. 데이터 전송시간을 평가하기 위해, 수치해석으로 대체된 KAIST-Kyoto 대학 간의 병렬해석을 수행한 결과, 데이터 전송에 15 초가 소요되고, 실제 유사동적 실험에 10 초의 시간이 소요됨을 알 수 있었다.

두번째로 TCP/IP 만을 이용한 데이터 전송 기법을 이용한 실험기법 II 를 사용하여 동일한 교량 시스템에 대한 원격병렬 실험이 수행되었다. 이 경우, KAIST 에 위치한 LRB 2 만에 대하여 실험이 실제로 수행되고, LRB 1 과 3 의 경우는 Kyoto 대학에서의 수치해석으로 대체되었다. 표 2 에 나타난 바와 같이, 매 시간간격에 소요된 시간은 1 초 정도이다. 모든 LRB 시편에 대한 실험이 수치해석으로 대체될 경우 이는 0.25 초까지 줄어들어, 데이터 전송에 0.25 초, 실제 유사동적 실험에 0.75 초가 소요됨을 알 수 있었다.

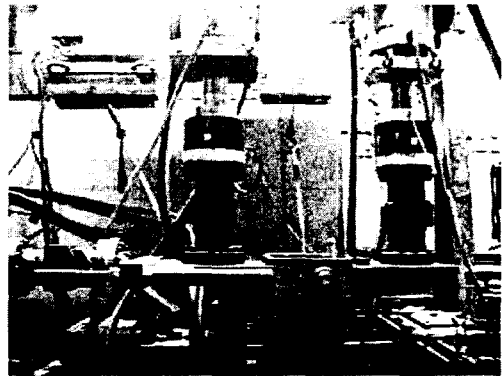
두가지 경우의 실험결과를 살펴보면, SAMBA 를 경유하는 실험기법 I 의 경우 상당히 긴 시간이 소요됨을 알 수 있는데, 이것은 SAMBA 프로그램 자체가 여러 목적을 가지는 범용 프로그램이기 때문이라 판단된다. 또한 일본 Kyoto 대학교의 실험장비는 다축방향의 실험이 가능한

장비이므로(그림 9-(b)) 일축방향의 실험만이 가능한 KAIST의 실험장비에 비해 하중 재하 시간이 오래 걸린 것으로 된다.

실험기법 II를 사용한 실험결과를 그림 11-12에 보이었는데, 이 경우 실제 실험은 KAIST에 위치한 LRB 2에서만 수행되었고, LRB 1과 3은 수치해석으로 대체되었다. 그림 11에 LRB 2에서의 변형 및 복원력에 대한 시간 이력을 보이었으며, 그림 12에서는 LRB 2의 이력곡선을 보였다. LRB에 대한 실험결과를 전체구조를 수치해석으로 구한 결과와 비교하였는데, 그림에서 보는 바와 같이 두 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 이는 실제 실험이 LRB2에 대하여만 수행되고, 다른 LRB에 대하여는 수치해석으로 대체하여 지진하중 하에서의 실제 LRB 거동과 이를 Bi-Linear로 근사화한 것의 차이가 크게 나타나지 않은 이유로 판단된다.

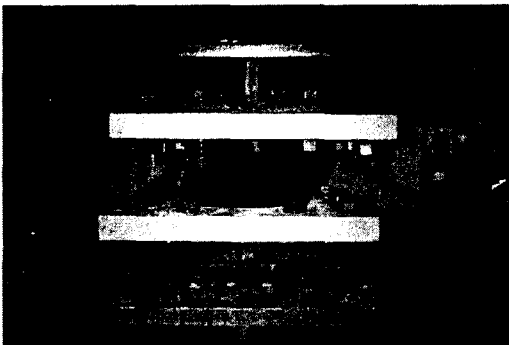


(a) KAIST

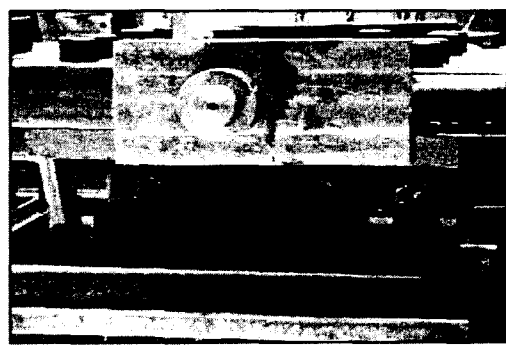


(b) Kyoto 대학

그림 9 LRB 시편이 설치된 실험장비 형상



(a) KAIST



오류!

책갈피가 정의되어 있지 않습니다.

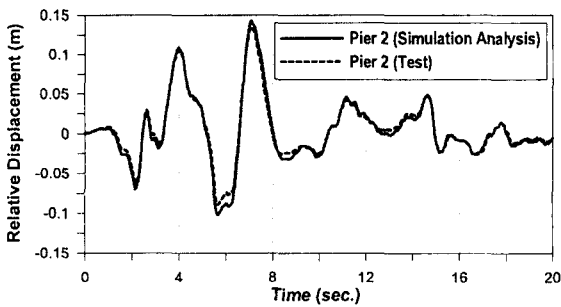
(b) Kyoto 대학

그림 10 원격병렬 실험중의 LRB 시편

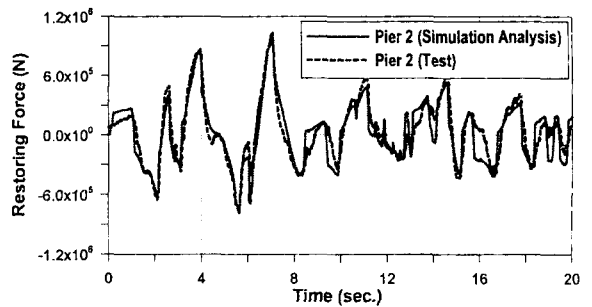
표 2 원격병렬 실험의 소요시간

Communication Schemes	주 System	Sub-Systems	소요시간		비고
			1000 steps	per step	
TCP/IP and SAMBA	Kyoto 대학교	KAIST	250.0 분	15.0 초	해석
		KAIST	418.3 분	25.1 초	실험*
TCP/IP only	KAIST	여수대학교 창원대학교	5.5 분	0.33 초	해석
		Kyoto 대학교	4.17 분	0.25 초	해석
		Kyoto 대학교	17.0 분	1.02 초	실험**

Note : * Kyoto 대학 및 KAIST 에서 실제 실험수행.
 ** KAIST 에서만 실제 실험수행



(a) 변위



(b) 복원력

그림 11 LRB 2 에서의 변위 및 복원력

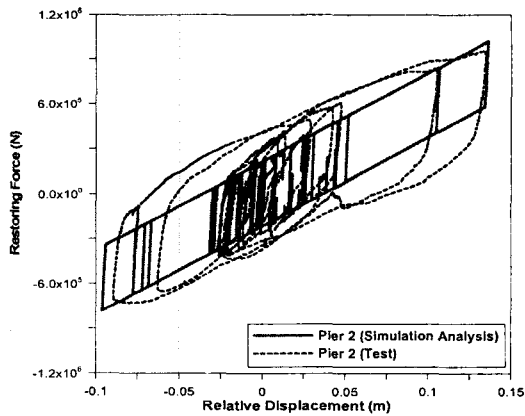


그림 12 LRB 2 에서의 이력곡선

5. 결론

본 연구에서는 비선형 거동이 관련된 대형 구조계의 지진응답을 효과적으로 구하기 위해 인터넷을 이용한 원격병렬 실험방법에 대하여 연구하였다. 두 가지 실험기법을 이용하여 KAIST와 일본 Kyoto 대학간의 원격병렬 실험을 성공적으로 수행하였다. 결과에서 알 수 있듯이, 데이터 전송 기법으로 TCP/IP와 SAMBA를 이용한 실험방법 I의 경우, 데이터가 SAMBA를 경유하는 시간 및 장비제어시간 등의 차이로 인해 TCP/IP만을 사용하는 실험방법 II에 비하여 다소 긴 시간이 소요된다. 이와 같이, 원격병렬 실험의 소요시간은 데이터 전송 및 실험기법에 따라 매 시간간격(Δt)에 1-25 초까지 폭넓게 변화하게 되지만, 일반적인 유사동적 실험의 소요시간과 비교하였을 때 충분히 합리적인 수준으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 원격병렬 유사동적 실험기법의 개선 및 보안을 위해서 인터넷을 통한 데이터 전송기술의 개선과 함께 다음과 같은 연구가 필요하다.

- (1) JAVA 언어를 이용한 사용자 환경 S/W의 개선
- (2) 실험 수행과정 및 결과 모니터링 방법의 개선

Acknowledgement

본 연구에 대한 일본 지진방재연구센터(EdM)의 연구비 지원과 한국과학재단에서 주관하는 국가 지정 연구실(NRL)사업의 재정적 지원에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

References

- [1] N-S. Kim, D-G. Lee, "Pseudo-dynamic test for seismic performance of base-isolated liquid storage tank", Engineering structure, Vol. 17, No. 3, pp. 198-208, 1995
- [2] E. Watanabe, K. Sugiura, K. Nagata, T. Yamaguchi and K. Niwa, "Multi-phase Interaction Testing system by means of the Internet", Proc. of 1st Int'l Conf. on Adv. in Str. Eng. & Mech., Seoul, Korea, 1999
- [3] C-B. Yun, I-W. Lee, D-U. Park, E. Watanabe, "Remote Parallel Pseudo-dynamic Testing on Base-Isolated Bridge Using Internet", Proceeding of the 13th KKNN Symposium on Civil Engineering, pp.87-92, 2000.
- [4] S-J. Wang, K-J. Wang, Y-S Yang, C-C. Chou and K-C. Tsai, "Networked Collaborative Pseudo-dynamic Testing Examples", Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Stability and Dynamics, pp. 319-324, 2002
- [5] R. Sharpe, T. Potter, "Special Edition: Using Samba", Que book, 2000.
- [6] M-S Nielsen, J-L Lee, "Windows2000 Server Architecture and Planning", Coriolis book company, 2001