

SSI해석을 통한 압축전담 교량 내진보강공법 거동 특성 연구

Behavior Characteristics of Compression-Only Bridge Seismic Reinforcement Method Using SSI Analysis

장유식¹, 윤원섭^{2*}, 유광호³

Yoo-Sik Jang¹, Won-Sub Yoon^{2*}, Kwang-Ho You³

〈Abstract〉

In this study, the reinforcement effect of the compression-only bridge seismic reinforcement method, which is mainly applied to old bridges, was studied through SSI analysis. As the analysis conditions, acceleration magnitudes of 0.1g, 0.15g, and 0.2g were applied, and long-period and short-period seismic waves were applied. As a result of the analysis according to the assumed ground characteristics and structure size, the horizontal displacement at the reinforced section was reduced by about 9%, and the long-period seismic wave had a 95% larger displacement than the short-period seismic wave. In addition, an increase in acceleration of 0.1g resulted in a displacement of about 50%, and a large increase in displacement was observed in long-period seismic waves. As a result of the analysis, in the case of the compression-only bridge seismic reinforcement method, there was a reinforcing effect, so the field applicability was excellent.

Keywords : Bridge, Compression-Only, Seismic, SSI Analysis

1 미호이엔씨 사장

2* 교신저자, 원광대학교 LINC 3.0 사업단 교수

E-mail: totoma13@wku.ac.kr

3 수원대학교 토목공학과 교수

1 CEO, Mi-Ho Engineering Corporation

2* Professor, LINC 3.0, Won-Kwang University

3 Professor, Dept. Civil Engineering, The University of Suwon

1. 서론

국내의 경우 지진관측이 본격적으로 시작된 후 지진의 빈도수는 지속적으로 증가하고 있다. 하지만 큰 규모의 지진은 발생 수가 많지 않아 경주지진, 포항지진 이후 국민의 관심은 줄어들고 있다. 정부에서는 1995년 일본 고베지진(규모 7.3) 이후 지진방재를 위한 법적 근거를 지속적으로 마련하였으나, 큰 피해를 야기하는 지진 빈도수는 작아 지진에 대한 연구는 미진한 상태이다.

국내에서는 내진설계의 개념을 정립하고, 내진설계를 통해 구조물을 건설하고 있지만, 구조물의 내진설계 규모에 미치지 않은 지진의 규모에서 수많은 사회간접시설물은 붕괴를 야기하고 말았다. 국내 내진설계에서 내진 1등급 구조물은 규모 6.5의 지진 규모에서 붕괴가 발생하면 안된다. 최소 규모 6.0 이상의 지진에서는 붕괴가 발생되지 않아야 하는 것이 정상이다. 하지만, 경주지진과 포항지진에서는 지진 규모가 6.0에 미치지 못하지만, 수많은 사회간접시설물은 무너지고, 균열을 일으키고 말았다. 내진설계의 방법이 잘못되었다는 것을 의미한다.

지난 포항지진으로 가장 많은 피해를 야기한 교량 부재는 관절장치이다. 교량 구조물은 온도변화 신축 등 다양한 요인에 의한 변형을 흡수하기 위해 관절장치를 가지고 있다. 자유롭게 변형을 흡수하고, 차량 등의 각종 하중을 전달해야 하므로 평소에도 복잡한 거동을 보인다. 여기에 지진이라는 추가 흔들림 하중에 내진 설계가 이루어진 구조물에서도 붕괴가 발생된 것이다[1]. Fig. 1은 포항지진에서의 고속도로 교량의 피해 사례이다. 높은 수준의 설계 및 유지관리기준을 가지는 고속도로 현장에서 발생한 관절장치 파손이다.

이러한 피해의 원인으로 적절한 유지관리대책 미흡, 내진성능이 확보되지 않은 관절장치 적용이 문제이다. 하지만 또 다른 문제로 지반의 특성을

고려하지 않은 내진설계로 인해 발생한 경우도 있다. 대부분 교량의 구조설계는 구조적 간단함으로 인해 극한상태 혹은 한계상태로 설계되고 있다. 하지만, 작은 규모의 지진이 지반의 특성으로 인해 증폭되어 발생하는 지진은 구조적 한계를 벗어나는 규모로 구조물에 지진하중이 전달되기 때문에 피해를 발생시키게 된다.

이러한 문제점 해결을 위해서는 기존의 내진 안전성 평가 방법인 구조적 안전성을 확보하던 내진설계 방법에서 지반 특성을 고려하여 내진설계를 수행하는 지반-구조물 내진 안전성 평가 방법으로 변화가 필요하다. 지반의 특성에 따라 지진파는 지표면으로 전달되는 과정에서 증폭되기도 감쇠되기도 하며, 지진의 파형도 장주기형 파형과 단주기형 파형이 선택적으로 전달되거나, 특정 영역의 지진파만 전달되기도 하기 때문이다. 지진의 특성이 고려되지 않은 내진설계를 실시하면, 지역에 따라 대규모의 피해가 발생할 수 있어 이러한 방법적 전환이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 교대와 교각의 변위를 감쇠하면서, 시공성, 경제성을 확보할 수 있는 압축전담 교량 내진보강공법에 대해 지반-구조물 상호작용 해석을 실시하여 안전성을 분석하였다. 압축전담 교량 내진보강공법의 내진성능이 확보되는지 보강 전, 후의 단면에 대해 가진 가속도 0.1g, 0.15g, 0.2g의 크기로 장주기, 단주기 파형을 이용하여 해석하였으며, 그 결과를 통해 공법의 거동 특성을 분석하였다.



Fig. 1 Daegu-Pohang expressway damage case[1]

2. 문헌고찰 및 연구방법

2.1 문헌고찰

지반내에서 발산된 에너지는 지반을 매개로 지표면으로 전파되면서 지반과 접하는 구조물의 경계에 도달하면서 구조물 진동은 시작된다. 이와 동시에 구조물 진동으로 진동에너지 일부는 구조물 관성에 의해 지반 경계면을 따라 지반에 전달된다. 이런 유한한 크기의 구조물과 반무한 영역의 지반이 상호작용으로 운동하는 현상을 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction; SSI)이라고 한다[2].

지반-구조물 상호작용해석을 일반적인 동적해석과 구별하게 되며, 구별하는 이유는 지반의 반무한성이 지반의 동적 특성인 주파수에 따라 달라지기 때문이다. 이러한 원인으로 지반-구조물 상호작용해석은 일반적으로 주파수 영역에서 수행되는데, 시간영역응답은 주파수 응답을 역 Fourier 변환하여 구한다. 모든 해석은 선형해석으로 국한되며, 구조물과 지반의 비선형성은 등가선형화기법을 이용하여 근사적으로 고려할 수 있다[3].

지진하중에 대한 동적응답에 대한 연구로 지진하중 하의 구조물의 동적응답 해석 시 기존의 운동방정식을 이중적분에 의해 등가방정식으로 변환하여 보다 효율적인 수치적분 방법을 적용시켜 해석하는 방법에 대한 연구가 있었다[4]. 또 구조물에 실제 지진하중을 적용하여 지진응답을 구하는 실험적 방법을 연구함으로써 실험체의 동적하중에 대한 동적 효과를 얻기 위해 유사동적실험법(pseudo-dynamic test)을 적용하여 1자유도 실험체에 있어 실험 결과와 해석 결과가 대체로 일치하는 연구도 수행된 바 있었다[5].

지하구조물과 주변 지반은 지진하중 작용 시 서로 연계되어 거동한다. 구조물은 지반과 분리되

어 작용하지 않고, 구조물의 지진응답과 구조물에 인접한 지반의 운동은 서로 영향을 주고 받는다. 이와 같은 지반-구조물 상호작용의 동적해석법은 1985년 부분구조법을 이용한 연구로 진행된 바 있다[6].

기존에 지반-구조물 상호작용해석의 경우 많은 연구가 수행되었으나, 동적해석의 개념과 차이를 보였다. 해석의 어려움으로 많은 연구가 수행되었지만, 다양한 구조물에 대한 거동 특성 연구는 미진한 상태로 추가적인 연구는 필요하였다.

2.2 지반-구조물 상호작용해석

일반적으로 지반-구조물 상호작용은 지반과 구조물의 감쇠 효과를 높임으로써 구조물의 고유진동수는 작아진다. 이와 같은 상호작용 효과는 구조물과 지반의 강성비, 지반의 층상 및 역학적 특성, 구조물과 지반이 접하는 경계 형상에 따라 크게 변한다. 일반적으로 대형구조물에서는 지반-구조물의 상호작용 효과는 크게 나타나며, 신선한 암반에 구조물이 건설되는 경우는 이의 영향을 무시할 수 있다. 그러나 연암, 풍화암, 자갈층, 사질토 및 점토 등에 건설되는 대형 교량 구조물의 동적해석에는 반드시 지반-구조물 상호작용 해석이 수행되어야 한다[7][8].

지반-구조물 상호작용해석은 부분구조법(substructure method), 집중질량해석법(lumped mass method) 그리고 직접법(direct method) 등으로 나누어진다. 부분구조법(substructure method)은 지반을 유한요소로 이산화하지 않고, 지반의 역학적인 거동을 진동수 종속 또는 독립인 강성과 감쇠를 가지는 단일계로 취급하는 방법이다. 직접법(direct method)은 지반을 구조물과 같이 연속체로 취급하여 지반의 일부분(주로 구조물 주변) 또는 전부를 직접 유한요소 또는 무한요소 등을 이용하여

이산화하는 방법이다[9].

부분구조법은 직접법에 비하여 간단한 응력해석을 수행할 수 있으나, 지반재료의 비선형성, 비균질성 등을 표현하기 어렵다. 직접법은 지반과 구조물 사이에서 비선형성과 지반재료의 비선형성, 비균질성의 문제를 직접 모델링하여 이를 극복하지만, 무한경계의 적절한 모델링과 소요되는 해석시간의 증가라는 어려움이 있다. 최근에는 지반재료의 비선형 특성이 지반-구조물 상호작용에 미치는 영향이 매우 크다는 사실이 여러 경우의 대규모 현장 실험 및 계측 결과에 의하여 밝혀짐에 따라 직접법에 의한 해석법을 선호하고 있다[9].

본 연구에서는 부분구조법보다는 직접법을 이용하여 지반과 구조물을 모델링하여 해석을 수행하였다.

2.3 해석 조건

본 연구에 적용된 지진파는 일본에서 측정된 실지진파로 해양수산부 등에서 구조물의 거동 특성을 평가하기 위해 제시된 지진파를 적용하였다. 연구에 적용된 장주기파, 단주기파의 특성은 Table 1, Fig. 2와 같다. 지진파를 이용하여 최대가속도를 0.1g, 0.15g, 0.2g로 가진하여 해석하였다.

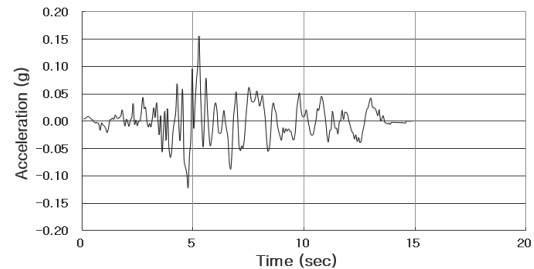
단주기와 장주기 지진파는 일반적으로 지진이 진앙지에서 지반을 따라 전파되면서 지반의 특성에 따라 파 성분이 증폭과 감쇠가 이루어진다. 연약한 지반을 통과하면, 장주기파 특성의 지진파가 지표면에 도달되며, 단단한 지반을 통과하면, 일반적으로 단주기파가 지표면에 도달하게 된다.

Table 2, Fig. 3은 지반-구조물 상호작용해석에

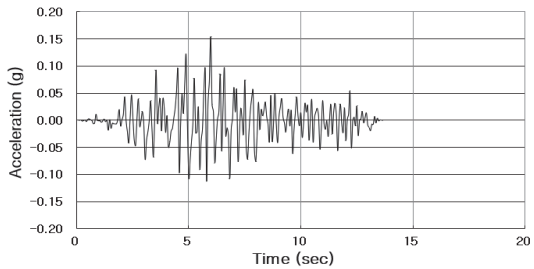
Table 1. Seismic waves applied to tests

Division	Characteristics	Earthquake scale
Hachinohe	Long period wave	7.9
Ofunato	Short period wave	7.4

적용된 단면과 해석지반정수이다. 1번 지층은 토사층으로 가정하였으며, 2번 지층은 일반적인 풍화암층의 지반정수로 가정하여 해석에 적용하였다. 교량의 길이는 10m이며, 폭은 5m로 가정하였다. 교량의 높이는 기초에서 상판의 최상부까지 6.5m로 가정하였다.



(a) Hachinohe



(b) Ofunato

Fig. 2 Seismic waves applied to tests

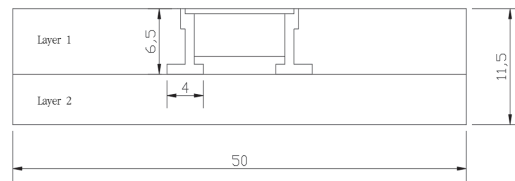


Fig. 3 Analytical section

Table 2. Analysis conditions

Division	γ (KN/m ³)	C (kPa)	ϕ°	E (MPa)	ν
Layer 1	19	10	25	2e4	0.32
Layer 2	21	30	30	2e5	0.33

2.4 교량 내진보강공법

본 연구에 적용된 압축전담 교량 내진보강공법은 Fig. 4의 모식도와 같이 제작되어 교대 및 교각에 설치된다. 압축전담 교량 내진보강공법은 지진 시 상부 구조물의 관성력이 고정단 받침이 있는 교각에 집중되면서 발생하는 과도한 휨모멘트를 감소시키고, 내하력이 부족한 교각 기둥의 구조 안전성을 증가시키며, 교각 기초의 전도 안전성을 증가시키는 공법이다.

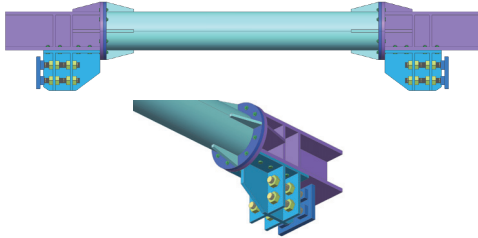


Fig. 4 A schematic diagram of the compression-only bridge seismic reinforcement method

Fig. 5는 압축전담 교량 내진보강공법의 시공 모식도이다. 이 공법은 교대 및 교각과 접하는 하중 전달판은 부착되지 않고, 밀착 상태이므로 압축력만 전달하며, 시점교대부터 교각을 거쳐 종점 교대까지 일체화되는 장점이 있다. 또한, Fig. 6과 같이 실제로 단순한 장치로 시공되기 때문에 장치의 제작, 조립이 단순하여 시공이 간단하며, 설치가 간단하여 시공비가 저렴한 장점이 있다.



Fig. 6 Full view of device fabrication

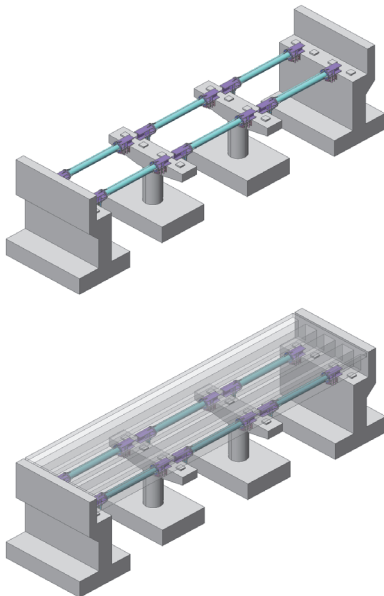


Fig. 5 Construction diagram

3. 해석 결과

본 연구에서는 압축전담 교량 내진보강공법의 보강 효과에 따른 안전성 평가를 지반-구조물 상호작용해석을 통해 분석하였다. Fig. 7은 지반-구조물 상호작용해석 요소망이다. 해석은 ITASCA사의 유한차분해석에 기반을 둔 지반 전용 범용프로그램인 FLAC 2D(ver 8.0) 프로그램을 이용하여 해석하였다.

지진파는 장주기와 단주기 지진파를 적용하였으며, 가진 가속도는 0.1g, 0.15g, 0.2g를 적용하였다. 보강 전, 후의 단면에 대해 분석한 결과는 다음과 같다.

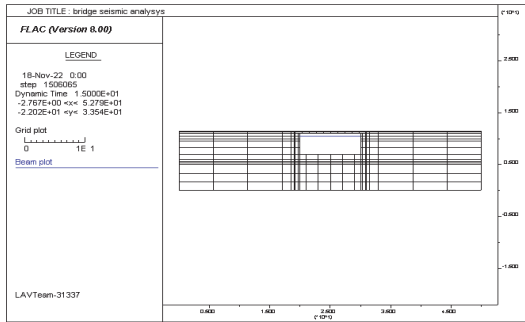


Fig. 7 Analysis mesh

3.1 보강 효과

Table 3, Fig. 8, Fig. 9는 보강 전, 후의 해석 결과이다. 해석 결과 장주기 지진파가 단주기 지진파에 비해 약 95% 크게 발생되었다. 내진 보강이

Table 3. Analysis result (units: mm)

Division		0.1g	0.15g	0.2g
Reinforced	Short wave	10.27	15.40	20.54
	Long wave	22.96	34.44	45.93
Unreinforced	Short wave	11.27	16.90	22.53
	Long wave	25.15	37.73	50.26

실시되지 않은 경우가 내진보강이 실시된 경우에 비해 수평변위가 약 9% 정도 크게 발생되었다.

내진보강공법이 적용된 경우 장주기에서 최대 수평변위는 0.1g에서 22.94mm, 0.15g에서 34.40mm, 0.2g에서 45.87mm가 발생되었으며, 내진보강공법이 적용되지 않은 경우는 0.1g에서 25.15mm, 0.15g에서 37.73mm, 0.2g에서 50.26mm가 발생되었다.

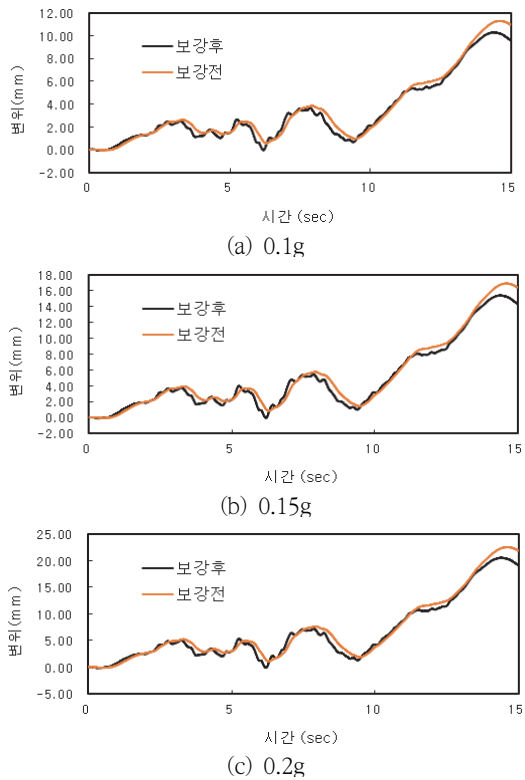


Fig. 8 Analysis result of reinforced (short wave)

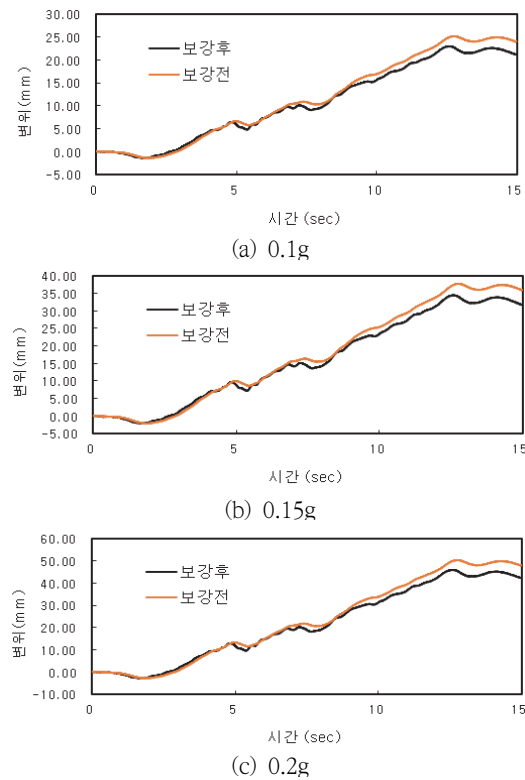


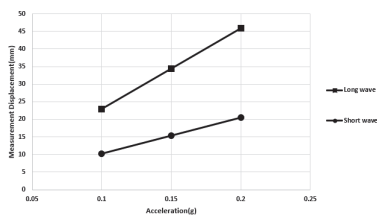
Fig. 9 Analysis result of reinforced (long wave)

내진보강공법이 적용된 경우 단주기에서 최대 수평 변위는 0.1g에서 10.26mm, 0.15g에서 15.39mm, 0.2g에서 20.52mm가 발생되었으며, 내진보강공법이 적용되지 않은 경우는 0.1g에서 11.27mm, 0.15g에서 16.90mm, 0.2g에서 22.53mm가 발생되었다.

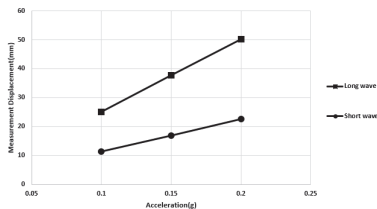
보강 효과에 따른 해석 결과를 종합하면, 해석 조건에 따른 지반-구조물 상호작용해석에서는 지반특성이 연약하여 장주기형 지진파에서 취약한 특성을 보였다. 내진보강 유무에 따라 약 9%의 변위 구속 효과가 있어 간단한 구조에 의해 구속되는 압축전담 교량 내진보강공법은 현장 적용성이 충분하였다.

3.2 가진 가속도 크기에 따른 특성

가속도 크기에 따른 해석 결과는 Fig. 10과 같다. 해석 결과 0.1g에서 0.2g까지 가진 가속도 증가에 따라 변위는 약 50% 정도 증가되었다. 장주기에서 가속도 증가에 따른 변위 증가량이 단주기에 비해 더 크게 나타났다.



(a) Reinforced



(b) Unreinforced

Fig. 10 Result of displacement with seismic wave scale

해석 결과를 종합하면, 교량 설계의 경우 다양한 지역과 지반 특성에서 시공되지만, 교량 내진 설계에서는 내진등급에 따라 고정된 가진 가속도 크기로 설계된다. 따라서 기존 설계법에서는 지반의 특성에 따른 가속도 증폭과 지진파 특성에 따른 안전성은 고려하지 않는 경우가 대부분이다. 제한된 해석 조건에 따른 연구 결과지만, 지반 특성에 따라 지반의 변위 증가가 달라지고 있어, 향후 구조물의 안정적 설계, 시공을 위해서는 지반-구조물 상호작용해석을 확대하여 신뢰성 있는 내진설계가 이루어져야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 노후 교량의 내진성능을 향상시키기 위해 개발된 압축전담 교량 내진보강공법의 보강 효과를 지반-구조물 상호작용해석을 통해 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에 적용된 압축전담 교량 내진보강공법의 경우 제한된 조건에서 지반-구조물 상호작용해석이 실시되었으며, 해석 결과 단주기에 비해 장주기에서 구조물의 변위가 약 95% 크게 나타나 장주기에 취약한 구조물로 분석되었다.
2. 내진보강이 실시된 단면이 내진보강이 실시되지 않은 단면에 비해 수평변위는 약 9% 감소되었다.
3. 가속도 크기에 따른 수평변위 분석 결과 가속도가 0.1g 증가 시 변위는 약 50% 증가되었으며, 장주기가 단주기에 비해 변위 증가량이 크게 나타나 다양한 지반에 시공되는 교량의 경우 지반의 특성을 고려한 지반-구조물 상호작용해석이 필요하였다.
4. 본 논문에서 연구한 압축전담 교량 내진보강

공법은 현장 적용성이 우수하였으나, 이는 제한된 연구 결과로 향후 다양한 지반 특성, 구조물 규모, 지진파 특성, 가속도 크기 등을 고려한 추가적인 연구 결과는 필요하였다.

참고문헌

- [1] KICT, Double Integration Method for Dynamic Analysis of Structures Under Earthquake Load, KICT Report, pp.1-4, 2018. (in Korean with English abstract)
- [2] Wolf, J.P., Dynamic Soil-Structure Interaction, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1985.
- [3] Seed, H. B. and Idriss, I. M., Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report No.EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1970.
- [4] Kim, J. H., Kim, D. W. and Lee, I. W., Double Integration Method for Dynamic Analysis of Structures under Earthquake Load, KSCE, Vol.15, No.4, pp.797-808, 1995. (in Korean with English abstract)
- [5] Kim, D. G., Kim, D. Y., An, J. H. and Park, C. L., Assessment of the Seismic Capacity of Structure Using Pseudodynamic Test, KSCE, Vol.15, No.4, pp.49-578, 1997. (in Korean with English abstract)
- [6] John P. Wolf., Approximate Dynamics Model of Embedded Foundation in Time Domain, John Wiley & Sons, 1986.
- [7] John P. Wolf., Approximate Dynamics Model of Embedded Foundation in Time Domain, John Wiley & Sons, 1986.
- [8] Clough, R. W. and Penzien, J., Dynamics of Structures, 2nd edn., McGraw-Hill, New York, 1993.
- [9] Park, B. G., Unified Dynamic Analysis of Whole Bridge System Under a Earthquakes Considering the Foundation nearby Soil Layers, Master's Thesis, HoSeo University, pp.11-18, 2007. (in Korean with English abstract)

(접수: 2022.11.08. 수정: 2022.11.28. 게재확장: 2022.11.30.)