

가압식 브레이싱 보강에 의한 지중박스구조물의 내진성능향상 방법

정지승 · 문인기* · 민대홍**

동양대학교 철도토목학과 · *고려개발 토목사업본부 · **다음이앤씨
(2013. 7. 1. 접수 / 2013. 8. 14. 채택)

Anti-seismic Capacity Improvement of Underground Box Structures Strengthened with Pressure Bracing

Jee-Seung Chung · In-Gi Moon* · Dae-Hong Min**

Department of Railroad Civil Engineering, Dongyang University

*Department of Civil Business, Korea Development Corporation · **Daum Engineering and Construction

(Received July 1, 2013 / Accepted August 14, 2013)

Abstract : This paper presents a new strengthening method of underground box structures against seismic loads for anti-seismic capacity improvement. A threaded steel member with pressure devices(so called 'I-bracing pressure system') is used to improve seismic capacity of the RC box structure. The I-bracing pressure system is fixed the corner of opening after chemical anchor was installed by drilling hole on the box structure. The structural performance was evaluated analytically. Two bracing types of strengthening methods were used; conventional bracing method and improved I-bracing pressure system. For the performance evaluation, seismic analyses were performed on moment and shear resisting structures with and without I-bracing pressure system. Numerical results confirmed that the proposed I-bracing pressure system can enhance the seismic capacity of the underground RC box structures.

Key Words : underground box structures, anti-seismic capacity, bracing strength

1. 서론

최근 국내에서는 인천 백령도 해역에서 규모 3.7의 지진이 발생하였으며 2013년 5월 1달동안 규모 2.8-4.8 지진이 15차례 감지되어 한반도는 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 학계의견이 지배적이다¹⁾.

우리나라는 1970년대 이후 급속한 경제성장과 함께 대도시의 입체적인 개발로 인간생활에 기본이 되는 도시철도, 전력구, 통신구, 지하차도 등과 같은 많은 공공시설물이 지중에 건설되었다. 이러한 지중 구조물은 지반운동에 순응하여 구조물이 진동하여 큰 증폭현상이 발생되지 않아서 지진의 영향이 적다는 이유로 별도의 내진설계를 수행한 사례가 많지 않다. 하지만 1995년 일본 고베에서 발생한 한신 대지진 발생시 도시철도 역사가 붕괴되는 등 지중 구조물의 지진피해사례가 입증되었다. 국내의 경우 에는 1988년대에 최초로 일반 구조물에 대한 내진설계가 의무화 되었으므로 1988년 이전에 설계되어진 지중 구조물은 대부분 내진설계가 반영되지 않아 지진에 대한 안전성을 확보하지 못한 상태이다. 특히, 다수의 지중 구조물은 도심지 지하에 위치하고 있으므로 지진에 의한 구조물 손상시 피해는 매우 크며 복구는 매우 어려운 실정이다. 이러한 지중 구조물의 지진시 안전성을 확보하기 위하여 개착을 통한 보강을 한다는

것은 막대한 건설비용과 간접비용이 소요되므로 경제성을 확보하면서 효과적으로 보강할 수 있는 보강방안의 필요성이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 지중 콘크리트 박스 구조물 내부에 브레이싱 보강재를 설치하고 가압력을 도입하여 구조물의 내진성능을 보강하는 새로운 개념의 내진보강공법을 제시하고 수치해석을 통해 보강효과를 검증하였다.

2. 기존의 브레이싱 내진보강 공법

지중 박스구조물은 지하에 위치하고 있는 특성상 외부에서 내진보강을 수행하기 위해서는 터파기 등 대규모 공사가 불가피하다. 또한, 박스 내부에서 공사를 수행한다 하더라도 건축한계, 시공시간, 시공공간, 인력시공 등 많은 제약조건으로 인해 내진보강이 매우 어려운 실정이다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 현재 국내에서는 지중 박스구조물에 대한 많은 보강공법들이 문헌²⁻⁴⁾에 제안되었으며, 국내에서 개발된 대부분의 기술은 FRP소재의 판넬, Sheet등의 보강재를 정모멘트 최대부에 부착하여 단면강도를 증가시키는 공법들이다. 하지만 부착식 보강공법은 정모멘트에는 효과적이거나, 부모멘트 및 전단력 부족 단면에는 보강효과가 없는 단점이 있다.

*Corresponding Author: In-Gi Moon, Tel : +82-31-420-9000, E-mail: mooningi@naver.com
Department of Civil Business, Korea Development Corporation, 954-2, Gwanyang2-dong, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do 431-804, Korea

콘크리트 박스구조물에 있어 전통적으로 부모멘트 및 전단력을 보강하기 위하여 사용된 대표적인 공법으로는 Fig. 1과 같이 개착을 통한 콘크리트 외부를 보강하는 공법이 있다. 하지만 개착공법은 터파기, 가시설 설치, 공사기간 중 교통 통제 등으로 인한 간접공사비가 크게 발생되며 공사 주변 환경조건을 고려하면 시공이 거의 불가능한 공법이다. 또한 지진이 자주 일어나는 일본에서는 박스구조물의 전단저항력을 향상하기 위하여 “지하 구조물의 내진성능 조사와 지진대책 가이드라인(안)”⁵⁾에서는 벽체 천공 후 전단 철근 삽입하는 공법이 제시되고 있으나, 이 공법 또한 구조물의 손상이 우려되는 다수의 천공이 필요하여 효과적인 공법이라 판단되지 않는다.

지진재해대책법⁶⁾, 시설물의 안전관리에 관한 특별법⁷⁾에서는 기존 시설물중 주요구조물에 대해 내진보강을 실시하도록 하고 있다. 지중구조물에 대한 내진보강방안으로는 슬래브증가, 강판접착, 부재증설, 브레이싱증설 등을 제안하고 있다. 또한 지반 굴착을 시행하지 않은 상태에서 구조물 내부에서 보강작업을 수행하는 일반적인 공법으로는 2011년 국토해양부에서 제정한 “기존 시설물 내진성능 향상요령”⁸⁾에서 제시하고 있는 방법 중 Fig. 2와 같은 H형강 브레이싱을 증설 보강공법이 내진보강 효과가 있는 것으로 기술되어 있다. 그러나, 내진보강 효과를 발휘하기 위해서는 H형강을 슬래브와 벽체에 완전밀착 시켜야 하는 시공상의 문제점이 있으며 본 연구에서 제안한 공법보다 사용강재 대비 구조적 효율성도 다소 미흡하다는 현실적인 문제가 있다⁸⁾. 따라서 보다 능동적이고 효율적인 가압식 브레이싱 내진보강공법이 필요하다.

3. 가압식 브레이싱을 이용한 내진보강 방법

3.1. 공법의 원리

지중 콘크리트 박스구조물의 내진보강은 과도한 비용

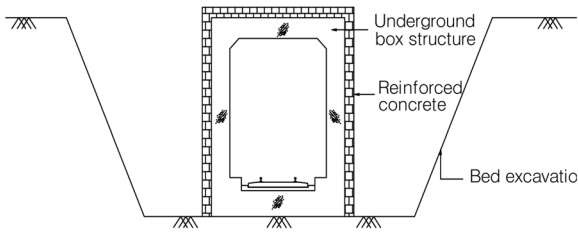


Fig. 1. Outside section reinforcement method after excavation.

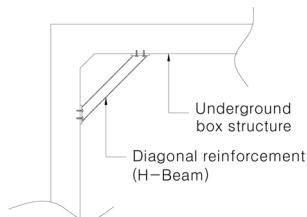


Fig. 2. Conventional bracing method.

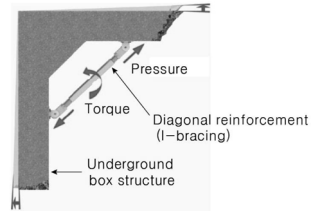


Fig. 3. I-Bracing pressure system.

이 발생하는 지반굴착공법을 배제하고, 내부공간을 효율적으로 사용하여 구조물의 내진성능을 향상시키는 것이 가장 효과적인 방법이다. 본 연구에서는 박스 내부 슬래브와 벽체사이(우각부)에 가압이 가능한 보강재를 Fig. 3과 같이 설치한 후 보강재에 토크를 도입하여 슬래브와 벽체에 지진력 작용방향의 반대방향 힘을 발생시켜 지진 시 발생하는 전단력과 모멘트에 저항하는 새로운 개념의 지중박스 구조물 내진보강 방법을 제안하였다.

3.2. 공법의 특징

가압부재를 이용한 내진보강 공법은 지진의 크기에 따라 가압력의 크기와 설치간격을 조절⁹⁾할 수 있어 경제성과 시공성이 우수하며 지중 구조물의 형태에 따라 Fig.4와 같이 다양한 형태로 제작 가능하다. 본 공법은 보강재 크기가 작아 건축단계 확보가 용이하고 별도의 시공장비가 필요 없어 한정된 공간에서 효율적인 시공이 가능하다.

본 연구를 통해 개발된 보강공법은 일반적으로 사용하고 있는 Fig. 2 브레이싱 증설에 의한 보강방법과 형상과 시공방법은 유사하나 구조적으로 다른 특징이 있다.

첫째, 가압력을 도입하여 지진력에 저항한다.

둘째, 구조물과 연결이 힌지구조로 연결되어 있으며 보강재에는 축력만 발생되어 보강재 단면을 효율적으로 사용할 수 있다.

셋째, 가압력을 적용함으로 콘크리트 벽체에 확실한 착설이 가능 하여 구조물과 일체화동이 가능하다.

본 보강공법의 적용에 있어 먼저 콘크리트 벽체 천공 후 케미컬 앵커를 삽입하여 콘크리트와 확실히 부착시키고, Muscle Nut를 사용하여 체결함으로써 반복하중에 저항할 수 있도록 하였다. Muscle Nut는 Nut 내부에 스프링 코일이 형성되어 있어 일방향으로만 회전가능하며 반대방향으로는 스프링 코일의 저항으로 풀리지 않는 특징을 가지고 있어 반복하중에 유리한 형식으로 판단된다.

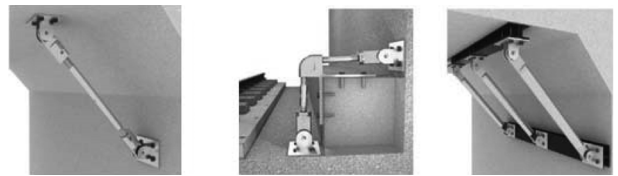


Fig. 4. I-Bracing pressure system and diverse shapes of the system.

3.3. 시공순서

Fig. 5는 제안한 가압식 브레이싱 공법의 시공순서를 나타내었다.

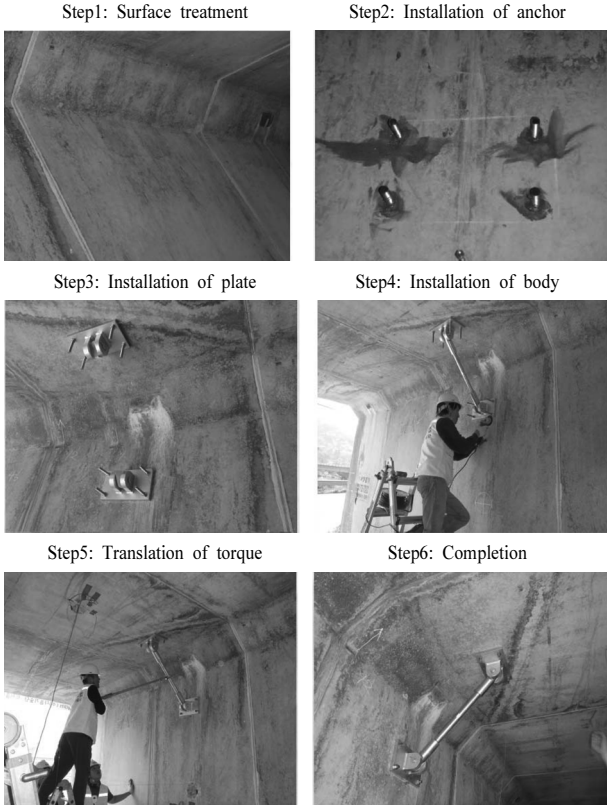


Fig. 5. Construction sequence of I-bracing pressure system.

4. 지중 콘크리트 박스구조물에 대한 수치해석 검토

기존의 브레이싱 보강방법과 제안한 가압식 브레이싱 보강방법의 효과를 검증하기 위하여 수치해석을 실시하였다.

4.1. 해석조건 및 방법

지중 콘크리트 박스구조물의 내진보강효과를 평가하기 위하여 내진설계가 미 반영된 서울지하철 1~4호선 중 박스구간을 선정하였고 Case1은 내진보강을 하지 않은 경우, Case2와 Case3은 기존의 브레이싱 공법을 사용한 경우, 그리고 Case4는 가압식 브레이싱 공법을 사용한 경우로 나누어 수치해석을 수행하였다. Case2에서 사용한 H형강재는 Case4에서 사용한 강재량의 2배 크기의 H-125×125×6.5×9 ($A=3,031 \text{ mm}^2$)를 사용하였고 Cases3은 지하철 내부 건축한계를 고려할 때 우각부에 설치 할 수 있는 최대 크기인 H-300×300×10×15 ($A=11,980 \text{ mm}^2$)를 사용하였다. Case4에서는 지름 44 mm ($A=1,521 \text{ mm}^2$)에 150 kN의 가압력을 도입한 브레이싱을 사용하였으며 Case2, Case3, Case4의 H형 강재 및 가압식 브레이싱의 설치 위치는 전단 위험단면을

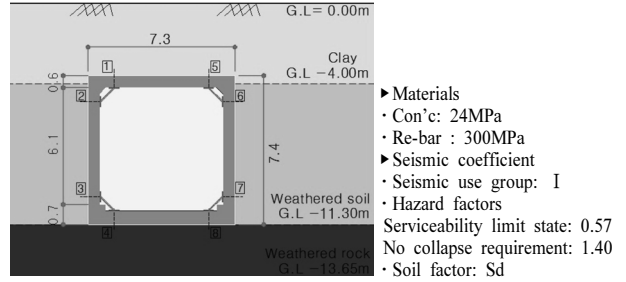


Fig. 6. Condition of analysis and Check points of section force.

벗어난 지점의 벽체에 최대한 밀착하여 설치하는 것으로 가정하였다. 해석조건은 Fig. 6에 나타내었고 부재단면 제원 및 부재력 검토위치를 나타내었다.

해석방법은 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대해 현행 설계에서 통용하는 응답변위법을 사용하여 2차원 Fream 해석을 수행하였다. 응답변위법은 지중구조물에 발생하는 응력은 관성력에 의한 영향보다도 구조물 주변지반의 상대적인 변위에 의해 크게 영향을 받는 사실에 근거하여, 지진시에 발생하는 지반의 변위를 구조물에 적용시켜 지중구조물에 발생하는 응력을 정적으로 구하는 방법이다.

기능수행수준의 손상도는 설계지진 작용시 구조물이나 구조물에 발생한 변형이나 손상은 구조물의 기능을 차질 없이 수행하는 범위 내로 제한되는 수준이고, 붕괴방지수준의 손상도는 설계지진 작용시 구조물이나 구조물에 발생한 변형이나 손상이 발생할 수는 있지만 구조물이 붕괴되거나 또는 구조물의 손상으로 인한 대규모 피해가 초래되는 것을 방지될 수 있는 수준이다¹⁰⁾.

해석모델 구성은 박스 구조물은 Beam요소, 지반은 비선형 Spring요소, 가압식 브레이싱은 Truss 요소를 사용하였으며 가압력 적용은 Truss요소에 Pretension load를 적용하여 해석을 수행하였다. 특히, 박스구조물은 Rigid Frame의 한 종류로 Frame 연결부에 대해서는 해석모델시 해당되는 강성을 고려하여 적용하였다¹¹⁾. Fig. 7에 해석모델의 부재번호와 부재력 검토위치를 나타내었으며, 검토위치 선정은 지진시 전단변형으로 인해 부재력(부모멘트, 전단력)이 가장 크게 발생할 것으로 예상되는 우각부 8곳을 검토위치로 선정하였다. 해석에 사용된 프로그램은 범용유한요소 해석프로그램인 Midas Civil 2012를 사용하였다.

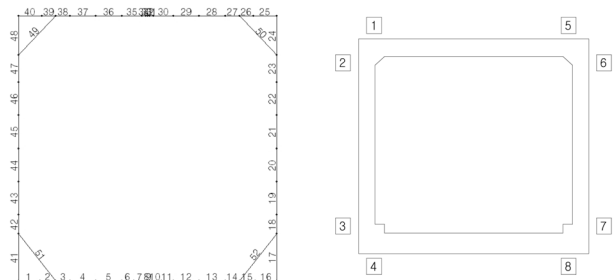


Fig. 7. Check points of section force.

Table 1. Results of analysis.

Division		Section force(unit: kN · m)								Design force	Note
		The Serviceability limit state				The No collapse requirement					
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4		
Section1	Moment	404.96	401.73	283.59	386.67	122.82	105.18	84.43	102.31	987.40	O.K.
	Shear	324.05	326.78	120.61	319.90	318.05	237.32	128.23	233.21	541.61	O.K.
Section2	Moment	432.34	431.92	250.13	432.08	103.97	106.01	43.31	106.06	823.59	O.K.
	Shear	397.77	395.28	395.96	388.21	320.56	319.77	319.70	315.74	443.14	O.K.
Section3	Moment	754.83	705.85	635.84	596.04	176.26	157.83	143.09	137.06	823.59	O.K.
	Shear	637.15	553.36	432.19	409.27	501.82	409.19	331.47	327.38	443.14	C.1,2 N.G.
Section4	Moment	896.80	844.11	765.53	737.15	217.75	197.62	181.10	177.42	1151.21	O.K.
	Shear	575.85	468.43	321.65	263.99	431.69	315.79	221.23	199.74	640.09	O.K.
Section5	Moment	413.77	406.79	303.58	404.38	114.97	100.83	81.21	100.35	987.40	O.K.
	Shear	299.67	307.34	110.99	367.30	293.67	232.46	120.13	267.59	541.61	O.K.
Section6	Moment	381.53	361.87	285.45	325.02	107.61	92.48	78.11	85.29	823.59	O.K.
	Shear	449.64	412.24	237.03	347.90	353.95	273.51	155.87	235.73	443.14	C.1 N.G.
Section7	Moment	516.75	483.98	345.68	409.90	118.04	106.57	65.49	92.83	823.59	O.K.
	Shear	536.42	477.14	295.38	369.66	403.32	341.58	187.30	281.89	443.14	C.1,2 N.G.
Section8	Moment	641.45	606.68	405.81	532.80	151.63	139.38	77.90	125.70	1151.21	O.K.
	Shear	480.85	403.19	249.68	252.18	357.19	277.00	158.33	192.96	640.09	O.K.

4.2. 해석결과

각 Case별 수치해석을 실시한 결과를 Table 1에 정리하였다.

Case1의 무보강 경우 검토위치 3, 6, 7에서 전단력이 설계강도 이상으로 발생하여 구조적 안전성을 확보하지 못하고 있으며 안전율은 각각 0.70, 0.99, 0.83으로 나타났다. 이는 내진설계가 도입되기 전에 설계된 서울지하철1~4호선의 특성이라고 보이며 특히 전단력이 부족한 단면은 전단응력 특성상 균열이 부재 중심부에서 표면부 발생할 것으로 예상되는바 부재 표면부에서 균열이 발견 될 때는 이미 많은 손상을 입은 후 이므로 그 심각성이 크다고 판단된다.

기존의 브레이싱 보강공법을 사용한 Cases2는 검토위치 3, 7에서 구조적 안전성을 확보하지 못한 것으로 나타났다. H-Beam의 보강효과로 검토위치 6은 전단에 대한 안전성을 확보하였으며 검토위치 3, 7에서도 무보강 단면대비 안전율 0.70, 0.83이 0.80, 0.93으로 다소 높아지는 것으로 나타났다. 따라서 개선의 효과는 있으나 보강재의 크기가 적어서 충분한 보강이 이루어지지 않았다. 하지만 Case3과 같이 Case2의 약 4배의 단면을 가지는 보강재를 사용하면 강성이 크게 증가하여 지진하중에 효과적으로 저항하지만, 강재중량이 약 100 kg으로 한정된 공간에서 별도의 장비 없이 인력으로 시공할 경우 다소의 어려움이 예상되며, 부재 두께가 두꺼워질 경우 전단위험단면은 중앙부로 이동하게 된다. 이때 전단력을 효과적으로 보강하기 위해서는 보강재 설치위치를 단면 중앙부로 이동 배치해야 하므로 건축한계를 침범할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 Case4 가압식 브레이싱공법을 적용할 경우 검토대상 모든 단면에서 구조적 안전성을 확보하는 것으로 나타났다. 앞서 검토한 Case1, Case2, Case3

과 콘크리트 단면의 설계강도는 동일하나 가압력의 도입으로 고정하중에 대하여 일정부분을 보상해주며 보강재가 지진력에 저항하여 단면에 발생하는 단면력을 감소시켰기 때문이다.

본 연구에서 제안하는 Case4 가압식 브레이싱공법을 적용할 경우 검토대상 모든 단면에서 구조적 안전성을 확보하는 것으로 나타났다. 앞서 검토한 Case1, Case2와 콘크리트 단면의 설계강도는 동일하나 가압력의 도입으로 고정하중에 대하여 일정부분을 보상해주며 보강재가 지진력에 저항하여 단면에 발생하는 단면력을 감소시켰기 때문이다.

Case별 검토결과를 살펴보면 Case4는 모든 단면에서 안전성을 확보 할 수 있으나 기존의 브레이싱 공법 (H-Beam)의 경우 동일한 크기의 브레이싱으로는 안전성을 확보하지는 못했지만 보강의 효과는 분명히 있는 것으로 나타나 있다.

또한 기존 브레이싱 공법(H-Beam)이 가압식 브레이싱 공법과 동일 또는 그 이상의 효과를 내기 위해서는 Case3과 같이 Case4에 비해 약 4배 큰 단면을 가지는 브레이싱을 사용하여야 한다.

4.3. 부재력 비교

각 해석에서 각 Case별 발생된 모멘트를 Fig. 8에 전단력을 Fig. 9에 나타내었다.

Case2 기존 브레이싱 공법의 경우 H-Beam의 강성이 지진력에만 저항하는 효과를 발휘하여 무보강 대비 모멘트 감소를 최대 6.1%, 전단력 최대 18.7%로 보강효과가 미미한 것으로 검토되었다.

Case3의 경우 H-Beam의 강성이 커진 효과로 지진력의 저감효과가 큰 것으로 검토되었다. 하지만 Case3의 경우 해석조건에서 기술한 것과 같이 강재중량이 Case2에 비하

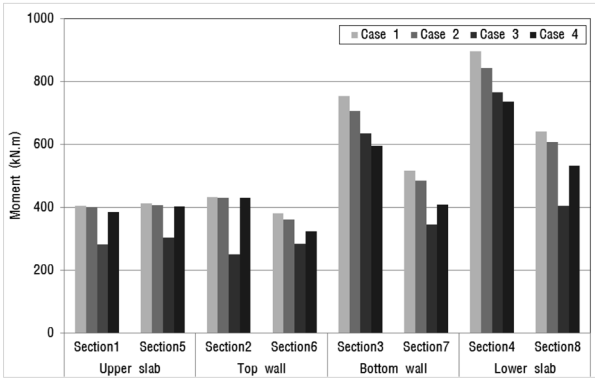


Fig. 8. Comparison of moments.

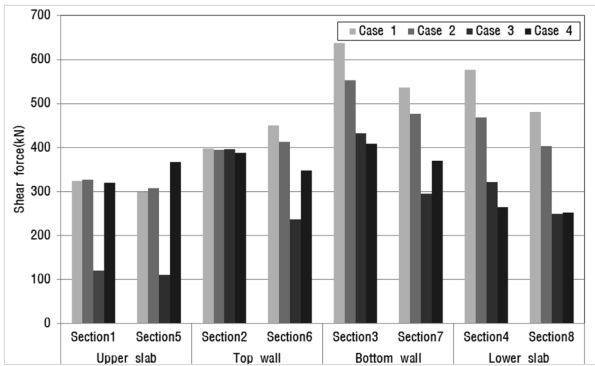


Fig. 9. Comparison of shear forces.

여 4배 증가함으로 경제성 측면에서 불리해지며, 보강재 중량이 무거워져 한정된 지하공간에서 인력으로 시공하기에는 무리가 있다고 판단된다. 특히 지하철 박스 구조물은 보강시 열차운행 안전을 확보하기 위해 건축한계확보가 가장 우선시 고려되어야 하므로 Case3는 효과가 우수하나 실제 현장 적용시 많은 제약조건이 따를 것으로 판단된다.

Case4의 경우 지진력에 대해서는 Case2 기존 브레이싱 공법과 거의 동일한 효과를 내며 추가로 가압력을 도입한 효과가 고정하중에 저항하여 무보강 대비 모멘트 감소율 최대 52.5%, 전단력 감소율 최대 62.8%로 보강효과가 큰 것으로 검토되었다.

상기 해석결과를 휨모멘트와 전단력이 지배적인 단면에 대하여 정리해보면 휨모멘트의 경우 지배단면인 검토 3, 4위치에서 16.7%, 14.5% 모멘트 감소효과가 있으며 전단력의 경우 지배단면인 검토 3, 4, 7위치에서 32.2%, 44.1% 44.9% 전단력 감소효과가 있는 것으로 검토되었다.

4. 결론

본 연구에서는 내진설계가 반영되지 않은 지중 콘크리트 박스구조물의 내진보강을 위해 브레이싱 내진보강 공법에 대한 건축한계 및 기술적 검토를 수행하였다. 그리고 가압식 브레이싱 공법을 제안하였으며 이를 기존의 공법과 수치해석을 통해 비교하였고 결론은 다음과 같다.

1) 소방방재청제정 기존시설물내진보강기본계획과 국토해양부제정 기존시설물내진성능 향상요령에 따르면 지중구조물에 대한 내진보강방법으로 브레이싱 증설공법을 제안하고 있어 도심지의 지하철 및 공동구와 같은 박스형태의 지중구조물에 사용하고 있다. 하지만 벽체의 결합에 대한 세심한 시공과 모멘트 부재라는 단점을 가지고 있어 본 연구에서는 이를 개선한 가압식 브레이싱 공법을 제안하였다. 이는 현지연결구조로 되어있는 축부재를 사용하면서 벽체의 결합력을 확실히 할 수 있고 가압력이 외부하중으로 인해 발생한 박스구조물 우각부의 전단력 및 모멘트를 감소시키는 동시에 보강부재로 사용할 수 있어 적은 부재로 보다 적극적인 보강이 가능한 공법으로 판단된다.

2) 수치해석을 통해 기존의 브레이싱공법과 가압식 브레이싱공법을 비교해 볼 때 본 해석조건에서는 동일한 성능을 가지기 위해서는 기존의 브레이싱공법에 비해 가압식 브레이싱 공법을 적용할 경우 단면적을 4배 감소시킬 수 있었다. 해석조건에 따라 단면적의 크기는 다소 상이할 수 있으나, 본 공법을 적용할 경우 기존 공법을 적용하는 것보다 부재 단면적을 작게할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 건축한계의 여유가 부족한 지하철 박스 구조에서는 가압식 브레이싱공법이 적합하다고 판단되며, 실제 적용에 있어서는 지하철 박스 구조의 건축한계를 우선 검토하여야 한다.

3) 현재 국내에서는 내진설계 기준이 도입되기 전에 설계 및 시공된 기존시설물에 대하여 내진성능평가와 성능향상을 필요로 하게 되었고 다양한 방법이 제안되고 있다. 특히 7대 중요구조물 중에 하나로 지정된 지중구조물의 경우 지진시 발생할 사회간접비의 피해를 고려할 때 본 연구에서 제안하는 가압식 브레이싱공법은 적은 단면으로도 효과적으로 전단 및 모멘트를 보강하는 우수한 공법이라 사료된다.

References

- 1) B. E. Yoo and C. H. Kim, "South Korea is Not a Safe Zone Earthquake" J. of The Korea Institute of Building Construction Vol. 6, pp. 3~4, 2006.
- 2) H. Y. Shin, D. K. Kim, M. H. Kwon, C. H. Chang and K. H. Kim, "Preliminary Design of Retrofitted System of Domestic Subway Tunnel" Journal of Spring Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, pp. 6~9, 2009.
- 3) K. H. Kim, S. Y. Han, D. E. Han and J. H. Hur, "A Study for the Application Technique of Recently Developed Performance-strengthening Systems in Urban Railway" Journal of Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, pp. 843~848, 2011.
- 4) K. H. Kim, M. H. Kwon, D. Y. Jang, S. K. Kim and H. G. Ko, "Experiment of Underground Box Tunnel of Metro Rail System for Seismic Performance Evaluation" Journal of Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, pp. 199~204, 2012.
- 5) Japan Society of Civil Engineers, "Guideline for Seismic Performance Evaluation and Earthquake Protection Measures

- for Underground Structures”, pp. 475~481, 2011.
- 6) National Emergency Management, “Act on Earthquake Disaster Relief”, 2008.
 - 7) Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, “Special Act on the Safety Management of Structures(Facilities)”, 2009.
 - 8) Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, “Seismic Performance Assessment Guidelines for Infrastructures”, 2011.
 - 9) J. S. Chung, Y. K. Kang, B. H. Kim, D. H. Min, Y. S. Yoon and J. W. Jeon, “A Study on the Arrangement of Pressure Members for Strengthening in the R.C BOX Structure” Journal of Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society of Civil Engineers, pp. 2396~2399, 2012.
 - 10) D. K. Kim, “Dynamics of Structures”, 2nd ed., Goomibook, pp. 534~572, 2009.
 - 11) Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, “Concrete Structure Code” pp. 210~211, 2012.