

고무계열 면진받침의 수직처짐에 대한 고찰 A Study on the Vertical Deflection of the Rubber Bearing

전규식*[†], 노광태** , 백범열***

Gyoo Shick Jeon*[†], Kwang Tae Roh** , Bum Youl Beak***

Abstract Recently earthquakes damage is increasing in worldwide, thus the seismic design and seismic retrofit of important building and bridge structure including high-speed rail has become important to recognize in this country. The isolation design with isolation bearings has been considered as superior seismic design method in economical and safety point. There are two kinds of isolation bearing based on rubber and based on metal. The metal bearing has spherical shape to absorb the rotation of superstructure and the rubber bearing must be accompanied the vertical deflection to absorb the rotation angle. The vertical deflection of rubber bearing is tend to ignore because of small amount and difficulty in calculation. However the consideration of vertical deflection in high-speed rail bridge must be performed in term of long-term safety.

Keywords : Rubber Bearing, Disk Bearing, Vertical Deflection, Vertical Stiffness, Shear Modulus

초 록 최근에 전 세계적으로 발생한 지진피해에 대한 사례는 국내에서도 경각심을 부각시켜 고속철도를 비롯하여 교량구조물의 내진설계 및 내진보강공사에 적극적으로 임하고 있다. 그리고 면진설계는 내진설계에 따른 교각의 단면증가 및 하부기초공사비의 증가라는 문제를 해결하기 위한 훌륭한 대안으로 널리 사용되고 있다. 대표적인 면진받침으로 고무계열 면진받침과 금속계열 면진받침이 있으며 교량의 회전각을 수용해야 하는 고무계열 면진받침은 필연적으로 수직처짐을 동반하고 있는 관계로 수직처짐에 대한 안전성을 반드시 확인해야 하며 레일의 단차를 엄격히 규정하고 있는 고속철도의 경우에는 더욱 그러하다. 그러나 디스크받침의 경우에는 처짐에 대한 설계기준을 간과하는 경우가 있어 고속철도와 같은 중요 구조물의 장기적인 안전성에 대한 불안감이 대두되고 있다.

주요어 : 면진받침, 고무받침, 디스크받침, 수직처짐, 수직강성, 전단탄성계수

1. 서 론

최근에 구조물이 대형화되고 주변 국가들에서 발생한 지진피해로 인하여 내진설계 내진보강공사가 토목/건축기술자들에게 중요한 화두가 되고 있다. 특히 교량구조물에 있어서는 기존의 고정단, 가동단이라는 교량받침의 배치로서는 고정단 교각에 지진하중이 집중적으로 작용하여 교각의 단면증가 및 기초파일의 공사비가 증가하는 문제를 내포하고 있다. 이러한 내진설계의 문제점을 해결하기 위하여 고정단을 갖지 않는 면진설계가 하부파일의 보강이라

*[†] 교신저자: 디프리기술연구원(주) 원장/공학박사 (isolators@naver.com)

** KRTC(주) 사장 *** VSL KOREA 부장

는 내진설계의 난제를 해결해 주는 훌륭한 대안으로 인식되고 있다. 그러나 면진설계가 적용된 교량이라면 상시하중에 대한 안전성을 충분히 확보하고 지진에 대해서도 안전하다는 논리가 성립되어야 하지만, 많은 엔지니어들이 상시거동의 안전성은 무시하고 지진에 대한 논리만을 생각하다 보니 내진 보강된 구조물이 오히려 상시하중에 대한 불안정한 구조물로 전락하는 경우가 다반사로 발생하고 있다. 대표적인 사례가 디스크받침을 포함하여 고무계열 면진받침은 수직처짐에 의한 문제가 발생하고 있으며, 펜들럼과 같은 금속계열 면진받침은 곡률반경에 의한 복원력이 부족하여 상부구조물의 횡방향 변위가 오히려 신축이음장치의 구속력에 의해 지지되고 있는데도 문제점이 인식되지 못하는 현상들이 발생하고 있다.

전 세계적 가장 널리 사용되고 있는 적층고무형 탄성받침의 수직강성이 수평강성에 비해 월등히 강한 이유는 얇은 고무층과 철판이 적층으로 구성되는 구조형식에 기인하고 있다. 탄성받침의 수직강성 산출식은 수평강성의 산출식에 비하여 매우 난해하여 엔지니어들이 이해하기 어려운 측면이 있으며, 사용성의 측면에서는 수직처짐의 크기가 매우 작아 교량구조물의 설계에 있어서는 무시하고 있는 것이 일반적이지만, 수직강성의 설계값을 제시하고 받침에서 발생할 수 있는 단기/장기 처짐량을 미리 예상하는 것은 교량구조물의 설계 및 시공에 있어서는 매우 중요한 문제이다. 그러나 국내에서 널리 사용되고 있는 디스크받침은 같은 고무계열의 교량받침인 관계로 당연히 수직처짐이라는 현상이 발생함에도 불구하고 금속받침과 같은 무한강성으로 인식되어 설계시 고려되지 않은 과도한 처짐량으로 인하여 신축이음장치에서 단차가 발생하는 문제를 야기하고 있으며, 수직처짐이 철도레일의 안전성에 절대적인 영향을 미치는 고속철도교량의 경우에는 더욱 그러하다.

2. 본 론

2.1 적층형 고무받침의 수직강성

적층형 고무받침의 수직강성은 $K_v = A \times E_c / (n \times t)$ 라는 수식으로 표현되며, 고무 한 층에 대한 평면적을 측면적으로 나눈 비의 값인 형상계수(S_1)를 매개변수로 하는 $E_c = (3 + 1 / 2\pi^2 S_1^2)$ 라는 이론적인 관계식으로 표현된다. 그림-1은 적층고무에 있어서 E/G의 값을 형상계수를 변수로 하여 이론식과 실험식을 표현한 것이다[6].

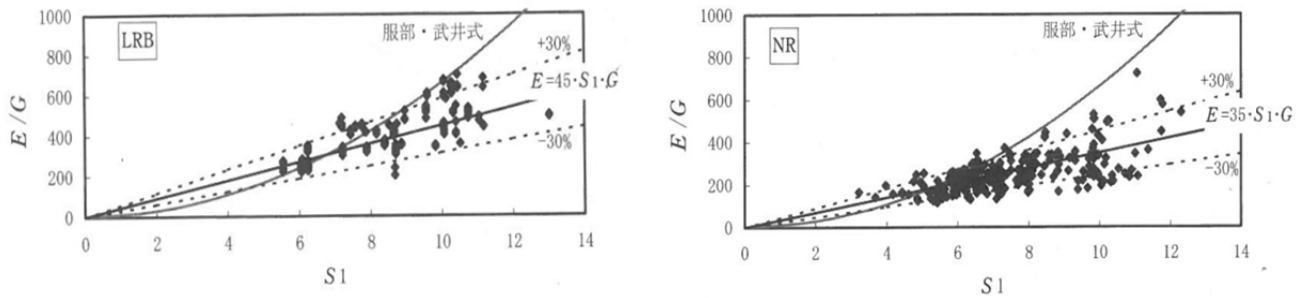
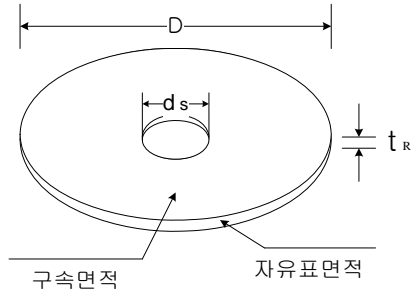


Fig.1 The ratio of elastic modulus depend on shape factor



$$S_1 = \frac{\pi(D^2 - d_s^2)/4}{\pi(D + d_s)t_R} = \frac{D - d_s}{4 \cdot t_R}$$

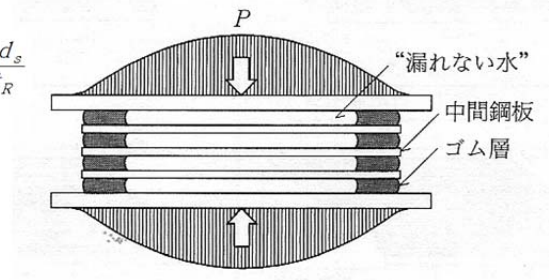


Fig.2 Definition of Shape Factor

Fig.3 Principle of Vertical Stiffness of Elastic Bearing

등방탄성체의 이론에 따르면 체적탄성계수에 대한 전단탄성계수의 비는 포아송비를 매개변수로 하여 고무재료의 포아송비는 비압축성인 물과 유사하게 0.499정도로서 $E/G=3$ 의 관계식을 갖는다. 반면에 얇은 고무층과 얇은 철판으로 구성된 적층형 고무받침의 경우에는 형상계수가 증가하면 증가할수록 E/G 의 비는 그림-1에서 알 수 있는 것처럼 수백이라는 단위로 증가하며 탄성받침의 수평탄성계수에 비하여 수직탄성계수는 급격히 증가하게 된다. 즉 적층형 탄성받침의 원리는 얇은 고무층과 얇은 철판을 적층으로 구성함으로써 그림-3과 같이 내부의 고무는 갇힌 물처럼 거동하므로 수직으로는 금속과 유사한 강성을 가지며 수평으로는 고무의 본래의 부드러운 성질을 유지하는 비밀이 숨어 있다. 또한 일본에서 수행된 그림-1의 실험치와 이론치의 비교에서 암시하고 있는 것처럼 탄성받침의 수직강성에 대한 물리적인 성질은 제품에 따라 상당히 큰 편차를 갖고 있으며, 기본적으로 수직처짐 자체가 매우 적은 물리량이라는 측면에서 계측오차를 포함하여 적층형 고무받침의 수직강성을 수학적으로 정확히 예측하는 것이 얼마나 어려운가를 암시하고 있다.

2.2 디스크 받침의 수직강성

반면에 디스크 받침[4]은 높이에 대한 직경의 비율이 10정도가 되는 고무 단일체로서 형상계수로서는 $S_1 = 2.5$ 정도의 낮은 값을 갖기 때문에, 포트받침 및 탄성받침과 같은 팽출 억제 메커니즘을 도입하지 않고 수직강성을 올릴 수 있는 유일한 방법으로서 G값이 높은 우레탄고무를 사용하여 수직처짐을 제어하고자 하는 제품이다.

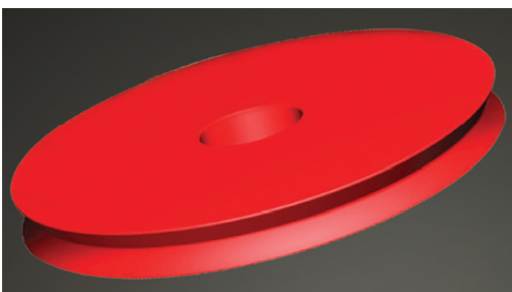


Fig.4 Shape of Disk Bearing

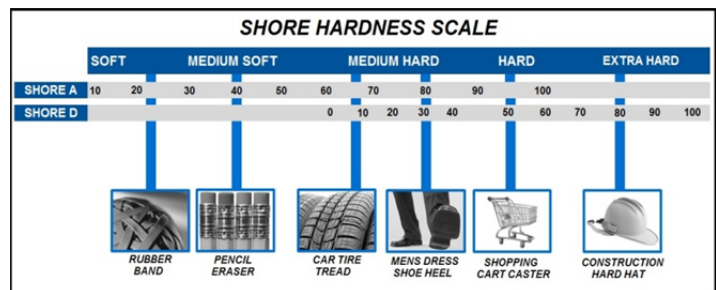


Fig.5 Comparison between Shore A and Shore D

탄성받침에 사용되는 고무의 경도는 “쇼와경도 A”로서 40~60 정도가 사용되고, 디스크 받침에 사용되는 고무의 경도는 “쇼와경도 D”로서 45~60 정도가 사용된다. 동일한 관점에서 비교하기 위하여 각각의 표준경도가 갖는 수치적인 개념을 고무의 전단탄성계수로 표현하면, 디스크받침에 사용되는 우레탄고무의 전단탄성계수 ($G=10\text{Mpa}$)는 일반적인 탄성받침의 전단탄성계수 ($G=1.0\text{Mpa}$)보다 10배 정도 단단한 소재에 해당한다. 적층형 탄성받침은 기하학적인 방법으로 고무소재의 1차 형상계수를 증가시켜 수직강성을 크게 하는 반면에 디스크받침은 고무소재 자체의 탄성계수를 증가시켜 수직강성을 증가시키는 메커니즘이다. 효율적인 측면에서 살펴보면 형상계수의 자승에 비례하여 증가시키는 적층형 탄성받침의 방법이 소재의 강성을 증가시키는 디스크 받침의 방법에 비하여 매우 효과적임을 알 수 있다.

2.3 디스크 받침의 수직강성에 대한 평가

탄성이론에 따르면 응력과 변형율의 관계는 $\sigma = E_c \times \varepsilon$ 의 관계가 성립됨으로 재료의 수직탄성계수를 정확히 추정하면 설계하중에 대한 설계 처짐량의 추정은 그리 어려운 절차가 아니다. 예를 들어 디스크 받침의 체적탄성계수 E_c 를 앞에서 언급된 고무받침에서 산출된 형상계수의 식으로 평가하면 $E_c = 35G$ 정도가 되며 응력과 변형율과의 관계식에서 $\sigma = 35 \times 10\text{Mpa} \times \varepsilon$ 가 된다. 따라서 디스크 받침의 설계응력을 35Mpa 로 산정한다면 수직변형율은 10%에 달한다는 이론적인 관계식이 성립하며 설계 처짐량을 줄이려면 설계응력을 적게 산정해야 한다.

2.3.1 실험데이터의 소개

일본에서 수행된 디스크받침의 수직처짐에 대한 실험결과를 소개하면 다음과 같다[2]. 논문에서 소개된 자료에 따르면 디스크의 직경은 300mm 높이는 30mm 이며 디스크의 상하단면에는 팽출방지용 철판을 부착한 제품으로, 설계하중 25Mpa의 4배에 달하는 100Mpa까지 수직하중을 재하 하였다. 그림-6에서 나타내는 것처럼 높은 고면압을 경험하면서도 복원하는 성질이 우수하다는 것도 알 수 있지만, 그림-7처럼 수직 변위량도 상당히 크게 발생하고 있다.

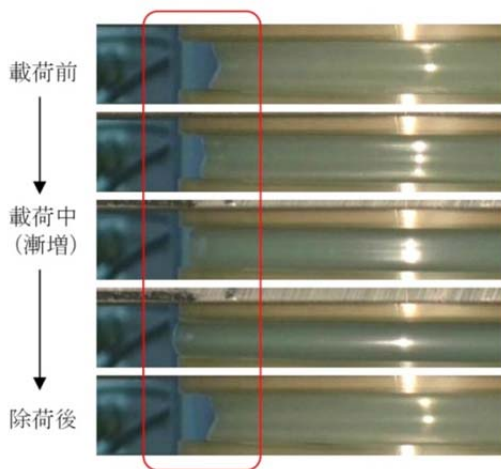


Fig.6 Bulging and Restoring Shape

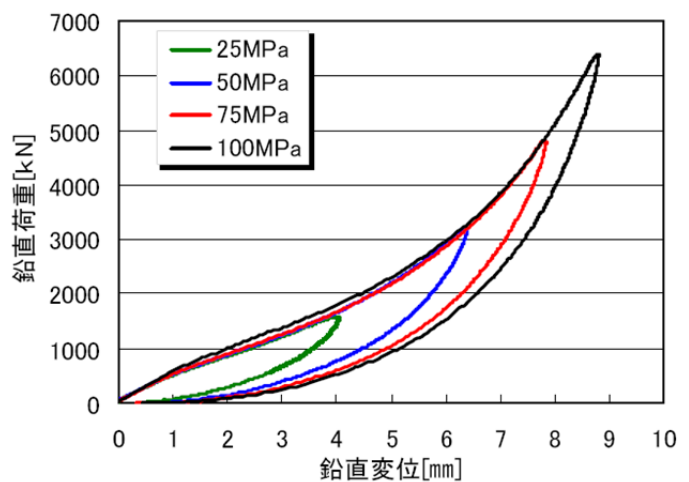


Fig.7 Relationship between Vertical Load and Deflection

2.3.2 FEM 해석

그림-8 및 그림-9은 디스크 받침에 대한 FEM 해석의 결과를 나타낸다[2]. 고무소재는 다른 소재와는 달리 대변형을 수반하는 관계로 FEM 해석이 상당히 까다로운 것으로 알려져 있으며 본 해석에서도 경계조건, 포아송비 및 수직하중의 크기에 따라 발산하는 관계로 많은 시행착오를 겪었다. 본 해석의 결과는 일본의 해석[2]보다 약간 큰 변형량을 나타내고 있으며 실제 현상보다 크게 산정되는 경향이 있기 때문에 경계조건 및 고무의 물성치를 수정하면서 추가적인 해석이 필요하다고 판단된다. 그러나 디스크의 변형 형상에 대해서는 상식적인 경향을 나타내고 있으며, 특히 디스크의 팽출을 방지하기 위한 상하판의 구속조건에 따라 수직처짐량에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다.

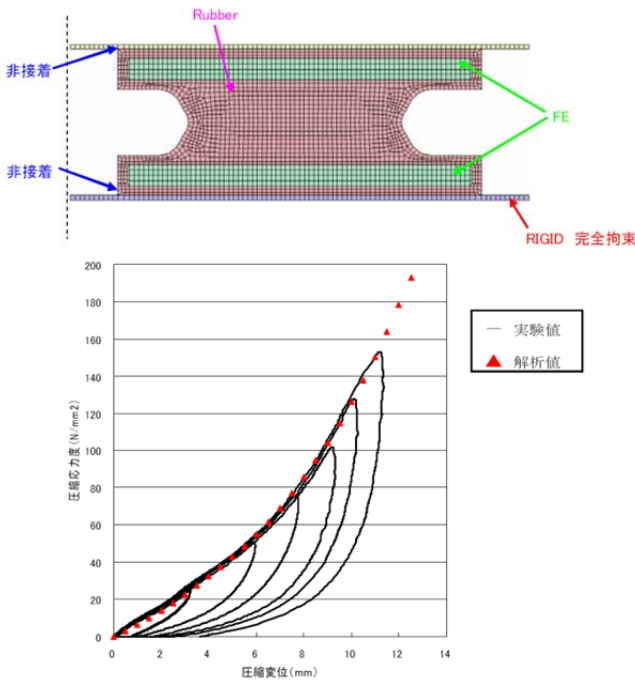


Fig.8 FEM Analysis by JAPAN

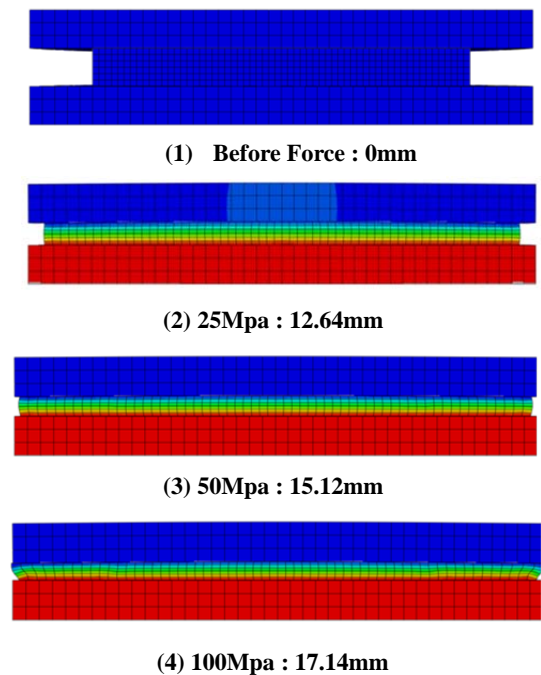


Fig.9 FEM Analysis in this paper

2.4 디스크 받침에 대한 시방규정

2.4.1 도로교 표준시방서

우리나라 도로교 표준시방서(2013) 제 5 장 신축이음 및 받침, 2.3 항 포트받침 및 디스크 받침에서는 “(2)폴리에테르 우레탄 디스크는 다음의 사항을 만족하도록 설계되어야 한다. ① 총 설계하중에 의한 즉시처짐이 무응력상태 디스크 두께의 10%를 넘지 않아야 하고, 크리프에 의한 추가처짐도 무응력상태 디스크 두께의 8%를 넘지 않아야 한다. ③ 디스크의 평균 압축응력은 35Mpa 을 넘지 않아야 한다.” 그리고 3.3 항 제조세목에서는 “(9) 디스크받침용 폴리에테르 우레탄 디스크는 상.하부 받침판에 링을 용접하거나 받침판에 홈을 내어 만든 구속링에 의해 구속되어야 한다. 링의 내경은 디스크의 직경보다 4%~6% 커야 한다” 라고 규정되어 있다. 이는 디스크 받침은 고무계열의 받침인 관계로 수직처짐이 크게 발생할 수 있으며, 크리프 8%에 대한 규정은 강성이 높은 고무일수록 크리프가 크게 발생할 수 있다는

사실을 의미하고 있다. 또한 FEM 해석에서도 알 수 있었던 것처럼 팽출방지 메커니즘의 중요성을 언급하며 설계응력의 과도한 설정도 제한하도록 하고 있다. 그러나 국내에 유통되고 있는 대부분의 디스크 받침은 제작규정을 제대로 준수하지 않고 있으며, 한계치 설계응력을 적용하고 있는 관계로 수직처짐이 상대적으로 중요하지 않는 도로교에서 조차 수직처짐에 의한 문제점이 발생하고 있다. 그러므로 레일의 안전성이 무엇보다도 중요한 고속철도에서는 시공과정에 일부 수정이 가능한 초기 처짐에 대한 문제뿐만 아니라 장기적인 처짐인 크리프에 대한 안전성의 문제를 보다 적극적으로 검토할 필요가 있다고 판단된다[3].

2.4.2 철도설계기준 (노반편)

우리나라 철도설계기준(노반편) 교량 일반사항의 8.5 사용성 및 내구성을 규정하는 항목 중에서, 표 8.5.3 에서 열차를 지지하는 구조물의 레일수준에서의 허용 부등 변위량 (상시)에 대하여 열차속도가 120~250km/h 는 2.0mm 이내로, 고속철도와 같이 열차속도가 300km/h 이상일 경우에는 1.5mm 이내의 연직변위로 제한하고 있다. 일본 신간선의 규정에는 1.0mm 이내로서 전 세계적으로 고속철도의 상시 수직처짐에 대해서 엄격한 규정을 적용하고 있다.

3. 결 론

과거 교량용 금속받침은 힌지구조 및 반구형 형태의 단면으로 상부구조의 회전각을 수용하며, 현재의 포트받침은 밀폐된 고무가 회전을 허용하는 구조를 갖는다. 반면에 자유표면을 갖는 고무계열 교량받침은 수직처짐이 반드시 발생하게 되며 수직처짐은 회전을 수용하는 역할도 겸하고 있다. 즉 고무받침에 있어서 수직처짐량과 허용회전각은 양날의 칼과 같은 것으로 허용회전각을 크게 하려면 반드시 수직처짐량도 크게 발생하여야 한다. 그러나 국내에서 적용되고 있는 디스크 받침은 포트받침과 같은 금속받침으로 분류하여 설계단계에서는 무한강성으로 간주하여 각 제품의 수직강성에 대한 설계값을 제시하지 않고 있으며 단지 제품시험에서 시방서의 최대 처짐기준만 만족하면 합격으로 인증하고 있다. 신소재인 디스크 받침은 발주처, 설계자, 시공자 사이에 인식의 괴리가 발생하고 있어 정확한 정보로 개선할 필요가 있다.

도로교와는 달리 철도교 교량은 궤도레일의 안전성을 위하여 수직처짐에 대한 엄격한 규정을 적용하고 있으며 고속철도의 경우에는 보다 그러하다. 일반적으로 초기처짐은 시공단계에서 조절이 가능한 측면이 있지만, 디스크는 아직 적용기간이 짧아 장기적인 처짐인 크리프에 대해서는 정확하게 검정되지 못한 관계로 어느 누구도 정확히 예측하지 못하고 있다. 그러므로 디스크 받침의 초기처짐 및 장기처짐에 대한 기술적인 자료가 부족한 상태에서 고속철도 교량에 적용한 사례가 있다면 지금이라도 지속적으로 관찰할 필요가 있다. 특히 탄성계수가 적은 탄성받침에 비하여 탄성계수가 큰 디스크 받침은 온도변화에 민감하고 초기처짐에 대한 장기처짐의 비율이 크다는 사실은 고무 전문가들 사이에는 알려져 있다.

참고문헌

- [1] 戸原春彦(1975), 加硫ゴムの弾性率とスプリング式硬さ、日本ゴム協会誌
- [2] 姫野岳彦(2010), ウレタンゴムを用いたDisk Rubber Bearingの高加重支持性能の評価、土木学会 第65回年次学術講演会
- [3] 서울시 서부도로사업소(2014.8.7), 「두모교 긴급점검용역」 발주계획 보고 공문
- [4] ㈜에스코알티에스, 면진용 교량받침 EQS 카다로그
- [5] 전규식(2105), 2015년도 한국지진공학회 가을학술발표회
- [6] 일본 도로교지승편람 (2004)