

기초분리방법을 이용한 교량 내진 설계

Seismic Design of Bridges Using Base Isolation

황 의 승*
Hwang, Eui Seung

Abstract

Base isolation is the alternative tool to protect structures against the earthquake. Basic ideas are the flexibility to reduce the response of the structure, energy dissipation to reduce the excessive deflection by flexibility, and the rigidity under the service load. Base isolation is specially good for bridges because it can be installed easily and be used for both new construction and rehabilitation. This paper describes the basic ideas of base isolation, various base isolation devices and design guidelines by AASHTO. It also introduces the applications in United States and New Zealand.

1. 서론

중래의 빌딩이나 교량의 내진 설계는 구조물의 기초를 지반에 고정시켜 지진에 의해 발생하는 힘을 구조물의 부재로 저항하게 하였으나 이로인해 구조물이 파괴되지는 않더라도 일시적 혹은 영구적으로 그 기능을 상실하는 경우가 종종 있었다. 특히 교량 구조물은 지진에 매우 약하여 많은 피해를 입어왔다. 1964년에 Alaska에서 발생한 지진으로 많은 교량들이 반파 혹은 완파되었으며 1971년의 San Fernando 지진은 60여개의 교량에 손상을 입혔고 과테말라, 일본, 칠레 등지에서도 많은 피해가 보고되고 있다. 1989년에는 Loma Prieta 지진으로 약 80여개의 교량이 손상되었으며 이중 3개의 교량은 상부구조가 붕괴되고 5개의 교량이 영구적으로 사용불가능하게 되었다. 따라서 실험실, 발전소, 병원, 교량 또는 소방서와 같은 중요 구조물이 지진이나 지진후에도 그 기능을 제대로 발휘하기 위해서는 설계 시방서에 기준

된 정도 이상으로 설계되어야 한다. 그러나 이는 비경제적인 설계를 하게 되므로 경제적이면서도 지진의 피해를 최소화할 수 있는 방법을 고안하게 되었다. 그 방법으로 지진의 힘이 구조물에 전달 되기 전에 그 영향을 줄일 수 있도록 고안된 것이 기초분리(Base Isolation) 방법이다.

이 방법은 구조물을 기초와 분리시켜 그 사이에 에너지발산장치를 설치하는 것으로 사실 약 100년 전부터 이 방법을 사용하려는 시도가 있었으나 최근에 와서야 새로운 재료와 장치의 개발로 인해 실용화되었으며 현재 많은 구조물(빌딩, 교량, 발전소, 등등)들이 이미 세워졌거나 설계되어지고 있다. 또한 이 방법은 구조물의 신축 뿐만 아니라 현존 구조물의 보강 및 복원에도 사용될 수 있다. 이 논문에서는 이러한 기초분리방법의 기본 개념, 지금까지 개발된 기초분리장치, 이의 교량에의 응용, 시방서의 설계기준 및 이미 건설된 교량들을 소개하고자 한다. 한편 참고문헌에는 여기에 인용된 것 외에도 교량의 기초분리에 대한 가능한 모든 자료를 수록하였다.

* 한국 건설기술연구원 구조연구실 선임연구원, 정회원, 공학박사.

이 논문에 대한 토론을 1992년 3월31일까지 본학회로 보내 주시면 1992년 9월호에 그결과를 게재하겠습니다.

2. 기초분리의 기본 개념

기초분리의 기본 개념은 차량의 현가장치 혹은 기계설비의 진동 방지 장치의 그것과 거의 동일하며 다음과 같은 세가지 중요기능이 있어야 한다.

◆구조물의 진동주기를 충분히 증가시켜 반응력을 줄이기 위한 유연 기능

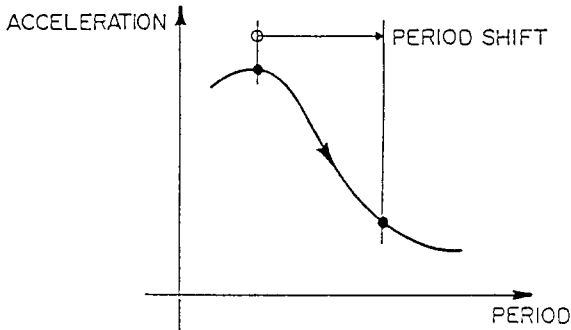
◆구조물의 유연함에 따른 과도한 처짐을 방지하기 위한 에너지 발산 기능

◆풍하중과 같은 작은 사용하중에 대한 강성 기능

진동주기에 따른 구조물의 반응은 그림 1의 가속도 반응 Spectrum에 보여지는 것과 같다. 대부분의 지진에 대해 진동주기가 증가됨에 따라 반응력은 감소하게 된다. 따라서 기초분리장치에 의해 구조물의 진동주기가 늘어나게 되고 반응력(전단력)도 감소하게 된다. 그러나, 진동주기의 증가 즉 유연함때문에 상대적인 처짐이 증가하게 된다(그림 2). 이러한 처짐의 증가는 부가적인 Damping을 도입함으로써 조정된다(그림 3, 4). 또한 구조물이 강한 지진하중에 대한 유연성도 필요한 반면 바람과 같은 사용하중에 진동하는 것도 바람직하지 않으므로 이러한 사용하중에 대해서는 높은 강성을 가져야 한다.

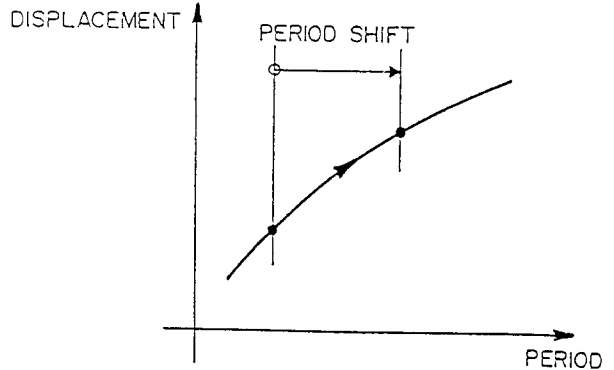
3. 기초분리장치의 종류

위에 설명된 기능들을 갖춘 기계적 장치에는



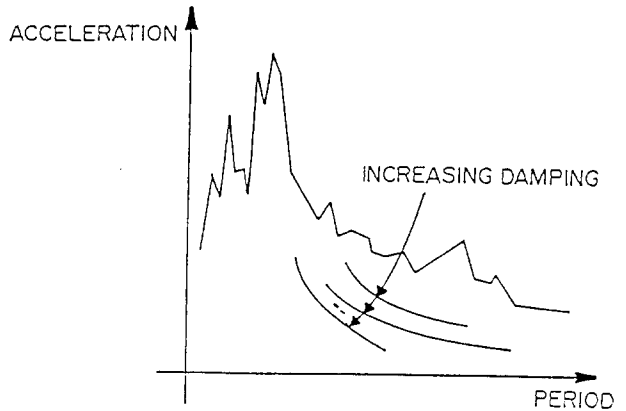
ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM

그림 1. 가속도 반응 Spectrum



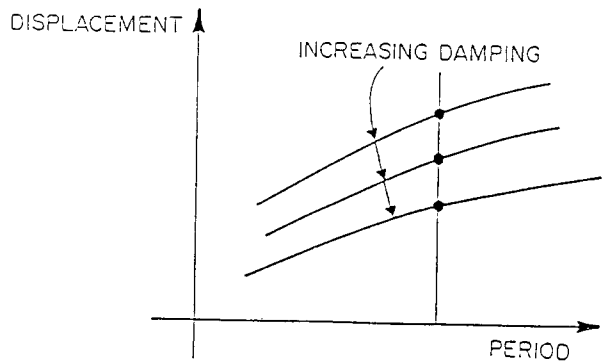
DISPLACEMENT RESPONSE SPECTRUM

그림 2. 처짐반응 Spectrum



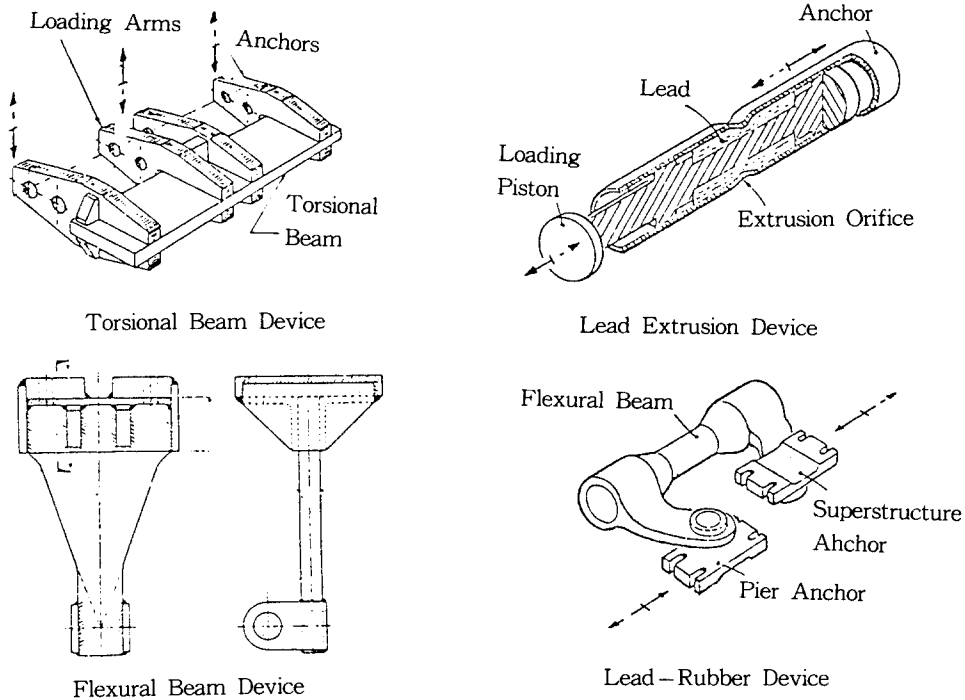
ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM

그림 3. Damping의 증가에 따른 가속도 반응 Spectrum

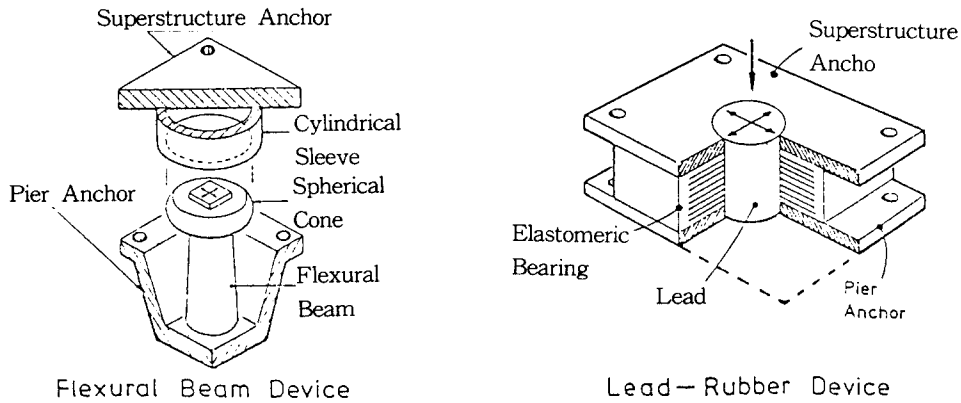


DISPLACEMENT RESPONSE SPECTRUM

그림 4. Damping의 증가에 따른 처짐 반응 Spectrum



(a) Uniaxial Action



(b) Omnidirectional Action

그림 5. 여러가지 기초분리장치

여러가지 종류가 있다(그림 5).

- ◆Torsional Beam: beam의 소성변형 이용
- ◆Lead Extrusion: 구멍을 통해 왕래하는 납의 소성 이용
- ◆Flexural Plate: 강철판의 휨항복에 대해 반복

되는 소성 이용

- ◆Uniaxial Flexural Beam: 강철탄의 휨 성질 이용

Omnidirection Flexural Beam

- ◆Lead-Rubber: 납의 소성 전단변형 이용

비록 그 방법은 다르나 이 모든 장치들이 결국은 그림 6과 같은 휨-처짐관계를 갖게 된다. 이 그림에서 K_u 는 초기강성으로써 사용하중하에서의 강성을 담당하게 되며 어느정도 이상의 힘에서는 K_d 의 강성을 갖게 되어 매우 유연해진다. 또한 반복하중에 대해 빗금친 부분만큼의 에너지를 발산하게 된다. 따라서 위에 요구되는 기초분리장치의 모든 조건을 만족하게 된다.

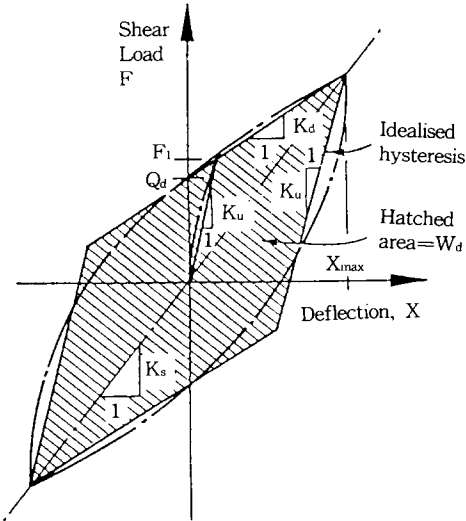


그림 6. 기초분리장치의 휨-처짐관계

4. 교량에의 응용

기초분리장치가 그 기능을 잘 발휘하기 위해서는 구조물을 지반으로부터 완전 분리시키는 것이 중요하다. 빌딩의 경우에는 대개 구조물과 기초사이 에 즉 각 기둥의 하단부와 기초사이에 이 장치를 설치하게 된다. 교량의 경우에는 상부구조와 교대사이에, 그리고 상부구조와 교각사이에 설치하는데 경우에 따라 교각 하부 또는 교각 중간에 설치할 수도 있다(그림 7). 따라서 빌딩의 경우 이 방법의 기본 목적이 기초분리면 상부의 구조물을 보호하는 것인 반면 교량의 경우에는 기초분리면 하부의 구조물을 보호하는 것이다.

또한 교량의 경우 기초분리장치는 단단한 지반을 가진 교량에 대해서 주로 사용되는데 이는 연약지반의 경우 이 장치가 오히려 구조물의 반을

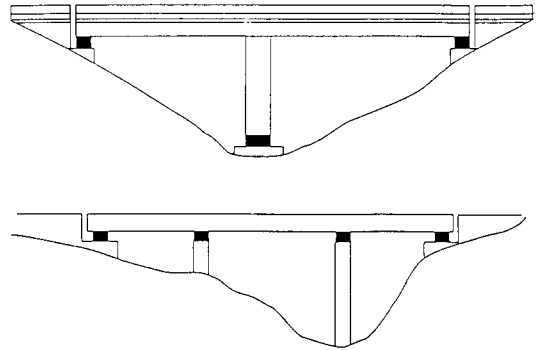


그림 7. 교량의 기초분리장치 위치

을 증가할지도 모른다는 우려 때문이다. 이러한 경우에 대해서는 더 심층적인 연구가 필요로 된다.

5. 시방서의 설계 기준

교량의 내진설계에 대해서는 1971년의 San Fernando 지진이후 관심이 고조되어 왔으며 1981년에 FHWA(Federal Highway Administration)에서는 “Seismic Design Guidelines for Highway Bridges”라는 보고서를 발표하였다. 1983년에 이 기준은 AASHTO(American Association of State Highway Transportation Officials)에 적용되었고 1990년에 교량의 내진설계의 표준시방서(Standard Specification for Seismic Design)²⁾가 되었다. 기초분리(Base Isolation or Seismic Isolation) 방법은 내진설계의 또다른 대안으로 최근에 주목받기 시작해 전세계적으로 널리 이용되고 있다. 미국에서는 1990년에 교량의 기초분리설계 지침(Seismic Isolation Design Guidelines for Highway Bridges)³⁾을 마련하였는데 이 장에서는 종래의 교량 내진설계와 비교하여 이 지침에 대해 소개하고자 한다.

5.1 기본요건

이 지침은 세가지 기본요건들을 만족하도록 되었는데 첫째는 종래의 AASHTO 내진설계 시방서와 가능하면 유사하게 하는 것이며 두번째

는 현재 사용되는 Uniform Building Code의 빌딩 내진설계와 가능하면 유사하게 하는 것이고 세번째는 여러 기초분리 장치에 다 적용될 수 있도록 하는 것이다.

5.2 설계원리

기초분리방법에서는 종래의 설계에 비해 교량이 감당해야할 지진력이 상당히 감소하기 때문에 두가지 설계원리를 적용할 수 있다. 첫째는 지진력의 감소로 인해 더 경제적인 설계를 할 수 있으며 종래의 내진설계시와 같은 정도의 지진 안정성을 갖게 된다. 두번째는 종래의 내진설계에 비해 더 좋은 지진안정성을 갖게 되어 구조물의 손상이 줄어들게 되는 것이다.

5.3 설계 지침

종래의 내진설계시 탄성지진계수(elastic seismic coefficient)(C_s)는 다음과 같이 표현된다.

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \quad (1)$$

여기서 A 는 가속도 계수로 교량의 소재에 따라 다르며, S 는 지반계수로 지반의 종류에 따라 1.0, 1.2, 1.5를 사용한다. T 는 구조물의 기본진동주기이다.

기초분리된 교량의 설계지침에서는 C_s 가 다음과 같이 표현된다.

$$C_s = \frac{AS_i}{TB} \quad (2)$$

위에서와 마찬가지로 A 는 가속도 계수, S_i 는 지반계수로 지반의 종류에 따라 1.0, 1.5, 2.0로 변하며 B 는 기초분리장치의 Damping 계수로 표 1에서 보는 것과 같다. 이 C_s 값은 중력가속도와 곱하여 spectral acceleration이 구해지며 이는 spectral displacement와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$S_A = \omega^2 S_D \quad (3)$$

여기서 $\omega = 2\pi/T$ 이다. 따라서

표 1. Damping 계수, B^{**}

등가 Viscous Damping 계수	<2%	5%	10%	20%	30%	40%	>50%
B	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	1.9	2.0

$$S_A = \frac{AS_i}{TB} g \quad (4)$$

$$S_D = \frac{1}{\omega^2} \frac{AS_i}{TB} g = \frac{9.794S_i T}{B} \text{ inches} \quad (5)$$

따라서 지점에서의 처짐 D 는 약산식으로

$$D = \frac{10AS_i T}{B} \text{ inches} \quad (6)$$

지진 설계 하중 F 는

$$F = C_s \cdot W \quad (7)$$

여기서 W 는 구조물의 무게이다. 따라서

$$C_s = \frac{F}{W} = \frac{\Sigma K_{eff} \times D}{W} \quad (8)$$

여기서 ΣK_{eff} 는 상부구조를 받치는 기초분리장치를 나타내는 유효 등가 spring 강성의 합이된다. ΣK_{eff} 와 B 는 기초분리장치를 시험하여 구해지는데 자세한 시험방법은 지침을 참고바란다.

결과적으로 정적 등가 지진력은 식 (6)과 (8)을 이용하게 되며 이때의 진동주기는

$$T = 2\pi \frac{W}{\Sigma K_{eff} \cdot g} \quad (9)$$

한편 기초의 전단력 V 는

$$V = F = \Sigma K_{eff} \cdot D = \frac{AS_i}{TB} \cdot W \text{이다.}$$

이후의 설계요령은 종래의 내진설계와 같다.

6. 기초분리이용 교량

6.1 미국

기초분리방법은 교량의 신축 뿐만 아니라 현존 교량의 복구 및 보강에도 사용되는데 California 주에서는 최근에 5개의 교량이 이 방법으로 보강되었다. 현존 교량의 문제점으로는 다음과 같은

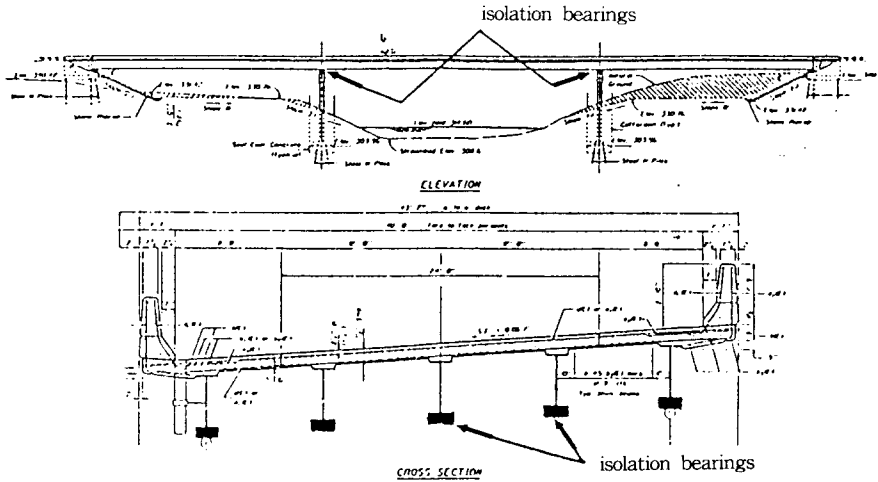


그림 8. Sexton Creek Bridge

표 2. 기초분리방법을 이용한 교량(미국)⁷⁾

교 량	지 간 형 태	건설연도	기초분리장치의 갯 수	유효진동 주 기	기 초 전단력	기초분리장치 최대치짐(in)
Sierra Point Overhead	L=616ft 10 spans	1957	36	1.79	0.20W	6.97
Santa Ana River	L=1010ft 13 spans	1938	28	1.40	0.20W	3.85
Eel River	L=606ft 2 spans	1941	12	1.86	0.30W	10.14
Main Yard and Shop access	S=256ft 2 spans	1954	8	2.44	0.17W	9.95
All American Canal	S=410ft 3 spans	1964	12	2.04	0.32W	12.88
Sexton Creek	S=294ft 3 spans	건설중	20	1.48	0.13W	2.80

보편적인 결함이 있다. 이들은

- ◆bearing과 연결부의 부적절한 강도
- ◆교각 및 하부구조의 부적절한 강도 및 연성
- ◆보의 부적절한 지지길이 등이다.

이러한 문제들은 적절한 기초분리 장치를 사용함으로써 모두 해결할 수 있다. 표 2에서는 기초분리장치를 이용한 5개 교량들을 소개하고 있다. 새로운 교량으로는 Illinois주의 Sexton Creek Bridge 가 대표적이며 (그림 8) 역시 표 2에 보여지고 있다.

6.2 뉴질랜드

뉴질랜드에서는 1970년대초부터 기계적인 에너지 발산장치를 이용하려는 연구가 시작되었으며 1985년까지 약 37개의 교량이 건설되었다. 표 3에서는 이 교량들에 대해 간략하게 소개하고 있다. 이중 4개 교량에 대해 그림 9-12에서 간단한 설계도를 보여주고 있다.

7. 결론

이상에서 본 논문은 기초분리장치의 기본개념, 시방서의 표준 및 교량에의 실제응용 등에 대해

표 3. 기초분리방법을 이용한 교량(뉴질랜드)^{*)}

교 량	건설 연도	상부 구조 형태	지 간 (m)	지 진 구역	기초분리장치의 종류
South Rangitikei*	1974	PSC Box	315	A	Steel torsion bar
Bolten St	1974	Steel I Beam	71	A	Lead Extrusion
Aurora Tce	1974	Steel I Beam	61	A	Lead Extrusion
Toetoe	1978	Steel Truss	72	A	Lead/rubber
King Edward St	1979	PSC Box	52	B	Steel Cantilever
Cromwell	1979	Steel Truss	272	A	Steel flex. beam
Clyde	1981	PSC U-Beam	57	A	Lead/rubber
Waiotukupuna	1981	Steel Truss	44	A	Lead/rubber
Ohaaki	1981	PSC U-Beam	83	B	Lead/rubber
Maungatapu	1981	PSC Slab	46	B	Lead/rubber
Scamperdown	1982	Steel Box	75	A	Lead/rubber
Gulliver	1983	Steel Truss	36	A	Lead/rubber
Donne	1983	Steel Truss	36	A	Lead/rubber
Whangaparoa	1983	PSC I-Beam	125	A	Lead/rubber
Karakatuwhero	1983	PSC I-Beam	105	A	Lead/rubber
Devils Creek	1983	PSC U-Beam	26	A	Lead/rubber
Aorere	1983	Steel Truss	44	A	Lead/rubber
Rangitaike(Te Teko)	1983	PSC U-Beam	103	B	Lead/rubber
Ngaparika	1983	Steel Truss	76	A	Lead/rubber
Oreti	1984	PSC I-Beam	220	B	Lead/rubber
Rapids	1984	PSC I & U-Beam	68	A	Lead/rubber
Tamaki	1984	PSC I-Beam	12	A	Lead/rubber
Twin Tunnels	1985	PSC I-Beam	90	A	Lead/rubber
Tarawera	1985	PSC I-Beam	63	A	Lead/rubber
Hikuwai No.1-4**		Steel Pl. Gir	74-92	A	Lead/rubber
Makatote**		Steel Pl. Gir	68	A	Lead/rubber
Kopuaroa No. 1 & 4**		Steel Pl. Gir	28 & 55	A	Steel Cantilever
Makaritea**		Steel Pl. Gir	47	A	Steel Cantilever
Hairini		PSC Slab	62	B	Lead/rubber
Bannockburn		Steel Truss	147	A	Lead/rubber & Lead Extrusion
Glen Motorway		PSC T-Beam	60	B	Lead/rubber
Grafton No.4		PSC T-Beam	50	C	Lead/rubber
Grafton No.5		PSC T-Beam	80	C	Lead/rubber

* Superstructure supported on rocking piers

** Seismically retrofitted bridges

알아보았다. 기초분리방법의 가장 큰 장점은 기초 전단력 및 상부구조 횡방향처짐이 감소하여 더 경제적인 설계 또는 더 좋은 지진안정성을 갖게 되는 것이다. 즉 교각이 감당해야할 지진력을 줄이며, 과도한 처짐으로 인한 교대손상을 없애며, 교량의 신축 및 보강에도 사용할 수 있다는 것이다. 그러나 이 방법이 보다 광범위하게 사용되기 위해서는 다음과 같은 점이 더 보충되어야

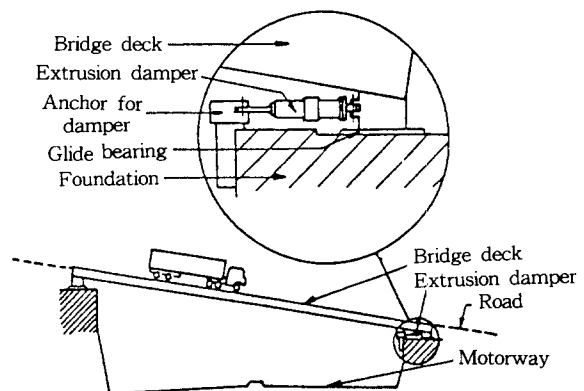


그림 9. Wellington Urban Motorway Overpass

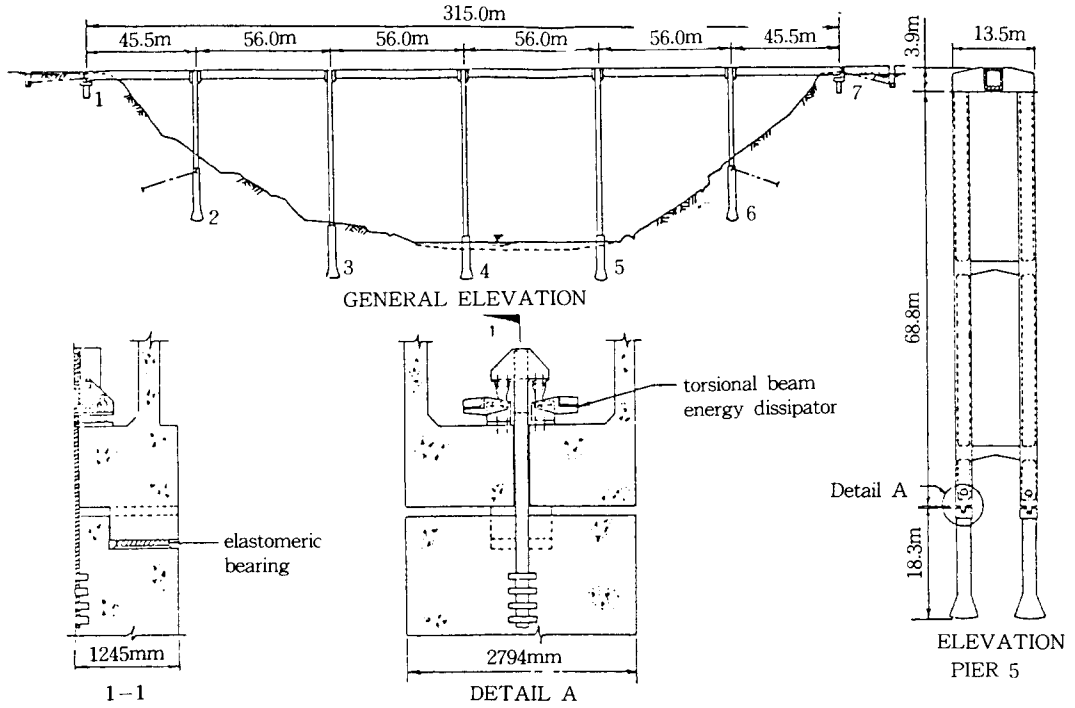


그림 10. South Rangitikei 교량

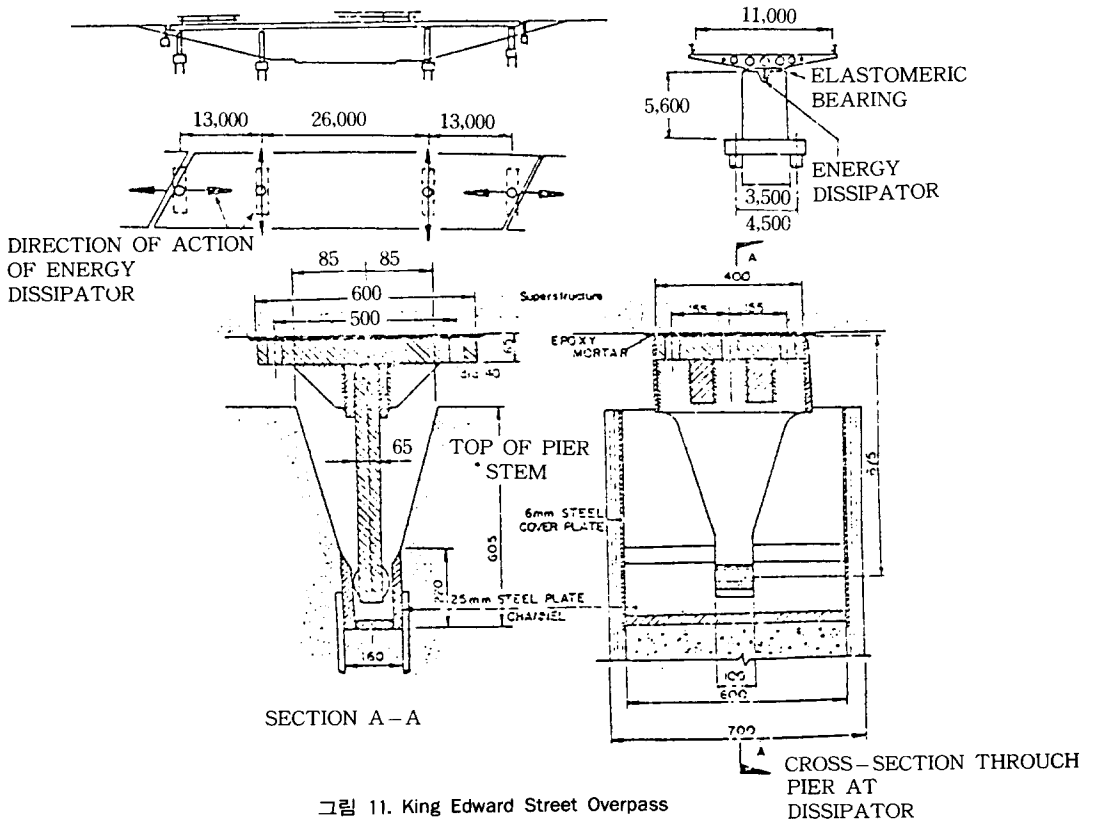


그림 11. King Edward Street Overpass

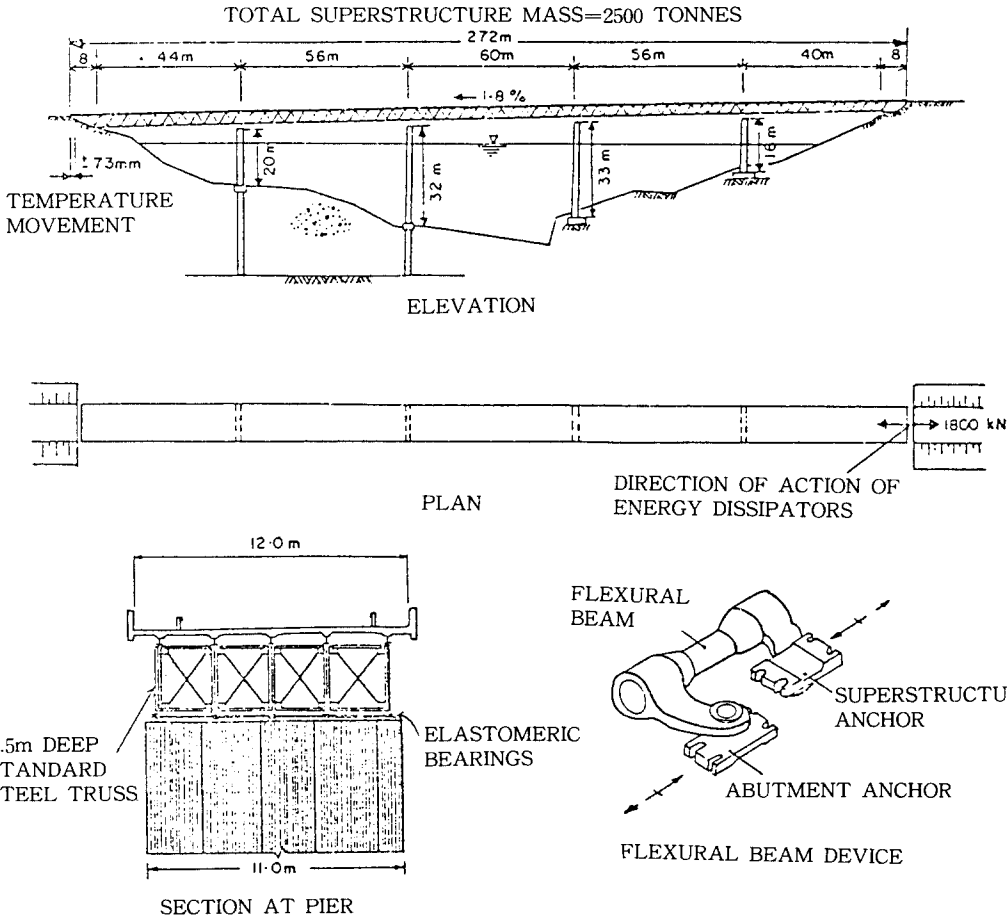


그림 12. Cromwell Bridge

한다.

◆교량의 신축 및 보강에 사용될 수 있는 시방서가 제정되어야 한다.

◆지반조건에 따른 연구가 선행되어 지반조건에 따른 제약이 명시되어야 한다.

◆Shaking Table 시험 및 실물크기의 진동시험을 하여 이론치와 검증이 되어야 한다.

◆기초분리장치의 항복까지의 실물크기의 실험이 수행되어야 한다.

◆기초분리장치의 표준시험방법이 제정되어야 한다.

◆더 효과적이며 신뢰성있는 기초분리장치를 계속적으로 개발해야 한다.

참 고 문 헌

1. AASHTO, "Guide Specification for Seismic Isolation-Design of Highway Bridges," AASHTO, 1990.
2. AASHTO, "Standard Specification for Seismic Design," AASHTO, 1990.
3. Billings, I.J. and Kirkcaldie, D.K., "Base Isolation of Bridges in New Zealand," Proceedings of Joint US-New Zealand Workshop on Seismic Resistance of Highway Bridges, Applied Technology Council Report 12-1, Redwood City, 1985.
4. Blakeley, R.W.G., "Design of Bridge Incorporating Mechanical Energy Dissipating Devices,"

- Bull. New Zealand natl. soc. earthquake eng. 3, 1978.
5. Blakeley, R.W.G., "Analysis and Design of Bridge Incorporating Mechanical Energy Dissipating Devices for Earthquake Resistance," Proc. of a Workshop on Earthquake Resistance of Highway Bridges, ATC 6-1, January 1979, pp.314~342.
 6. Blakeley, R.W.G., "Application of Base Isolation to Seismic Resistant Bridges," Comparison of United States and New Zealand Practices for Highway Bridges, ATC 12, August 1982, pp. 77~82.
 7. Buckle, I.G. "Some Innovations in the Seismic Isolation of Bridges," 4th Joint US-Japan Workshop, 1988.
 8. Buckle, I.G. & Mayes, R.L., "The Application of Seismic Isolation to Bridges," Proceedings of Structures Congress, 1989, pp.633~642.
 9. Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M. & Watson, R., "Combined Teflon Disk Bearing and Displacement Control Device Isolation System for Bridges," Proceedings of Bridge Engineering Research in Progress, 1990.
 10. Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M. & Gu, X., "Displacement Control Device for Seismically Isolated Bridges, Part I: Development and Testing of Frictional Device, Part II: Testing of Displacement Control Device," Report to Watson Bowman Acme Corporation and National Science Foundation, Department of Civil Engineering, SUNY at Buffalo, New York, March, 1990.
 11. Dynamic Isolation System, "Seismic Isolation and Energy Dissipation Implementation in Bridge Analysis and Design," DIS Inc., Berkeley, 1990.
 12. Katayama, T., Kawashima, K. & Muradami, Y., "Current Design Considerations for Reducing Seismic Lateral Force of Highway Bridges in Japan," New Zealand-Japan Workshop on Base Isolation of Highway Bridges, Wellington, New Zealand, November, 1987.
 13. Kelly, J.M., Buckle, I.G. & Tsai, H. -C., "Earthquake Simulator testing of a Base Isolated Bridge Deck," UCB/EERC 85/09, Berkeley, 1985.
 14. Kelly, J.M., Buckle, I.G. & Koh, C.G., "Mechanical Characteristics of Base Isolation for a Bridge Deck Model Test," UCB/EERC 86/11, Berkeley, 1986.
 15. Kelly, J.M., "Base Isolation: Linear Theory and Design," Earthquake Spectra(Journal of EERI), Vol.6, No.2, May, 1990, pp.223~224.
 16. Mayes, R.L., "Current Applications of Seismic Base Isolation in U.S. Bridges," Proc. 2nd Joint US-New Zealand Workshop on Seismic Resistance of Highway Bridge, May 1985.
 17. Xiaoming, L., "Optimization of the Stochastic Response of a Bridge Isolation System With Hysteretic Dampers," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.18, 1989, pp. 951~964.
 18. Zelinski, R.J., "California Department of Transportation Bridge Earthquake Retrofitting Program," Proc. 2nd Joint US-Japan Workshop on Performance and Strengthening of Bridge Structures and Research Needs, San Francisco, 1985, pp.213~217.