

현수교의 해석 및 설계

玄 昌 憲*

1. 머리말

현수교는 탑사이, 탑과 정착부사이에 연결된 고강도의 케이블에 의해 연직방향 하중을 지지하는 형식의 교량으로서 경간의 길이를 길게 할 수 있어서 깊은 계곡이나 해협 등 교각을 세우기 어려운 지형에 적합한 교량 형태이다. 또한 현수교는 그 미관이 수려하고 경간이 약 300m이상인 경우 경제적으로 유리하므로 오래전부터 가설되어 왔다.

그러나 다른 형식의 교량에 비하여 경간의 길이가 길기 때문에 매우 유연하여 여기에 가해지는 모든 하중에 대하여 민감하게 거동하므로 해석 및 설계시에 이들 하중에 대한 구조거동특성을 면밀히 검토하여 고려해 주어야 한다. 따라서 여기에서는 현수교의 구조해석방법, 현수교 설계시 주요 관심사인 내풍설계방법, 구조설계시 고려해 주어야 할 기본적인 사항들에 대하여 간략히 살펴보고자 한다.

2. 기본 형상

현수교에는 보강 주형(stiffening girder) 또는 보강 트러스에 의해 보강된 형식과 보강되지 않은 형식의 현수교가 있으며, 이 보강 주형은 집중하중을 케이블로 분배시켜 주어 변형이 집중되지 않도록 하는 역할을 한다. 일반적으로 케이블 시스

템 자체만의 지지력은 사하중에는 매우 효과적이지만 차량하중에는 효과가 작고 풍하중은 거의 지지하지 못하기 때문에 근래의 현수교는 거의 보강 주형을 가진 형태로 설계한다.

보강 주형을 가지는 현수교는 크게 보강 주형(또는 트러스), 보강 주형을 지지하는 주 케이블, 주 케이블을 지지하는 주탑, 주 케이블을 수평·수직방향으로 지지하는 정착부의 네부분으로 이루어져 있다.¹⁾ 그림 1은 전형적인 3경간 현수교를 보인 것으로서 여기에 주요 구성요소와 기타 부위의 명칭들을 나타냈다.

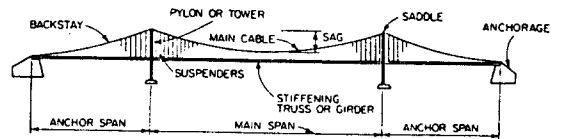


그림 1. 현수교의 주요 요소

3. 구조해석

현수교의 구조해석을 위한 하중은, 특정한 활하중, 풍하중의 동적 효과, 지진하중 등을 제외하고는 기존 도로교의 설계를 위한 시방서의 하중을 적용할 수 있다. 이 절에서는 구조해석방법에 대한 개념적인 설명과 주요 고려사항에 대하여 설명한다.

3.1 정적 해석

현수교의 정적 해석방법은 고전적인 탄성이론

* 정희원, 한국원자력안전기술원 토목구조실 선임연구원, 공박

에 의한 해석방법과 처짐이론(deflection theory)에 의한 해석방법으로 나눌 수 있다.²⁾ 탄성이론에 의한 방법은 하중재하상태에서 구조물 형상이 변형하는 효과를 무시하여 유도한 선형의 정적 평형 방정식을 이용한 해석방법으로서 사하중과 활하중에 대한 부재력을 중첩시킬 수 있으므로 해석이 간편하다. 그러나 이 방법은 부정확할뿐만 아니라 부재력을 과다하게 산정하므로 실제로는 거의 사용하지 않으나 예비설계 단계나 단경간 또는 강체의 보강 주형을 가진 현수교의 설계에서는 사용할 수 있다.

처짐이론에 의한 방법은 구조물의 변형을 고려하여 유도된 주형의 처짐에 대한 미분방정식을 이용하여 해석하는 방법이다.^{2,3)} 이렇게 유도된 식에는 활하중에 의한 주 케이블의 수평장력이 계수로 포함되는데 이 장력은 다시 주형의 처짐에 대한 함수이므로 이 식은 비선형방정식이 된다. 활하중에 의한 주 케이블의 수평장력은, 현수교 양단 정착점간의 케이블 총 길이(수평방향으로 투영된 길이)는 변하지 않는다는 적합조건으로부터 구해지며 이 식을 케이블 방정식이라 한다. 이 식에서 주 케이블의 수평장력은 주형의 처짐량에 대한 함수이며, 주탑 꼭대기에서 주 케이블의 지지상태가 roller조건이 아니면 주탑의 휨에 대한 유연성, 축력 등을 고려한 식⁴⁾을 사용한다.

이상과 같은 구조해석방법은 연직하중에 대한 현수교의 정적 해석방법이다. 횡방향 하중에 대한 경우는 Moisseff나 小松·西村의 이론을 이용하여 구조해석을 수행한다.⁵⁾

3.2 동적 해석

현수교의 동적 해석은 다른 유연한 구조물들의 경우에서와 마찬가지로 구조해석에서 매우 중요한 위치를 차지한다. 현수교에 동적 효과를 주는 주요 하중으로는 풍하중·지진하중·차량하중 등을 들 수 있으며 동적 해석은 선형처짐이론에 의해 수행된다.

동적 구조해석이 필요한 풍하중은 바람의 난류성 유동에 의한 Buffeting효과이다.⁶⁾ 이 난류성에 의한 풍속변동(velocity fluctuation)은 넓은 범위의 주파수에 걸쳐 분포되므로 무작위성을 가진다.

또한 현수교는 길이가 길고 주탑의 높이도 높기 때문에 길이 및 높이에 따른 풍속변동성분의 분포가 균일하지 않다. 따라서 풍하중에 대한 동적 해석시에는 풍하중의 공간적 상관관계도 적절히 고려하여야 한다. 바람의 buffeting 효과에 대한 동적 해석은 주로 random vibration이론에 의한 해석을 이용한다.⁷⁾

지진하중에 대한 현수교의 동적 해석은 이 하중의 비정상특성(nonstationarity)때문에 시간이력 해석을 수행하는 것이 보통이며⁸⁾ 최근에는 random vibration 해법을 이용하여 해석하는 방법들도 발표되고 있다.⁸⁾ 현수교는 길이가 매우 긴 구조물이므로 교량의 지점, 즉 교대와 주 케이블의 양단 정착부에 다른 지반운동이 가해질 수 있으며 이 효과는 현수교의 지진거동에 큰 영향을 준다는 사실이 알려져 있다. 따라서 지진하중에 대한 현수교의 동적 해석시에는 반드시 이 효과를 고려해 주어야 한다.

차량하중의 경우에는 도로교 설계시방서상의 하중을 적용하고 충격계수를 사용하여 정적 해석을 수행할 수 있다. 그러나 차량하중에 대하여도 동적 해석을 수행하는 것이 타당하며 이 경우 차량하중은 走行집중하중으로 모형화할 수 있다.^{4,5)} 현수교가 철도교로도 이용되는 경우에는 하중을 달리 모형화하여야 한다.⁵⁾

4. 내풍설계

1940년말 미국의 Tacoma Narrows교의 붕괴사고 이래 바람에 의한 장대교량의 동적 거동이 큰 관심의 대상이 되었으며 이 붕괴 원인을 분석한 결과 주형의 공기역학적 안정성이 가장 중요한 요인으로 판명되었다. 이에 따라 이 분야에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며 결국 근래에는 현수교와 같은 장대교량의 설계시 풍하중에 의한 영향을 설계 초기단계에서부터 고려하게 되었다.

4.1 바람의 영향

교량에 가해지는 바람의 영향은 크게 정적인 효과와 동적인 효과로 나눌 수 있다. 이중 정적인 효과는 일정한 속도로 불어오는 바람의 효과로서 정

적인 양력, 항력, 비틀모멘트 등을 발생시키며, 이로 인해 바람이 어떤 임계풍속에 이르면 주형의 불안정 현상이 유발될 수 있다. 정적인 풍하중에 의한 주형의 불안정 현상은 주형 단면의 형상, 크기, 양각 등에 의해 결정되며 횡좌굴(lateral buckling) 현상과 비틀림발산(torsional divergence) 현상으로 나타난다. 이런 현상을 막기 위하여는 주형 단면을 적절히 선택하여 휨강성과 비틀림강성을 크게 하고 항력계수 C_D 와 모멘트 계수 C_M 의 양각에 대한 기울기를 작아지도록 할 필요가 있다.¹⁰⁾

바람의 동적 효과는 바람의 시간에 따른 변동성 및 바람과 구조물간의 상호작용에 의해 교량의 진동을 유발시키는 효과로서 이에 의한 교량의 진동은 제한진동(limited-amplitude oscillation)과 발산진동(divergent oscillation)으로 나누어 생각할 수 있다. 여기서 제한진동 현상은 와류(vortex)에 의한 진동과 난류성 유동에 의한 buffeting 효과로, 발산진동은 자려진동인 flutter현상으로 나타난다. 이러한 풍하중의 동적 효과에 대한 내풍설계 기준은

1) 최대응답 < 허용응답,

2) 안전율 × 설계풍속 < 임계풍속

과 같이 취할 수 있으며 1)의 기준은 제한진동에, 2)의 기준은 발산진동에 적용한다.¹⁰⁾

자려진동을 줄이기 위해서는 주형 단면의 공기역학적 특성을 증진시키거나 비틀림강성을 크게 설계하여 flutter를 발생시키는 임계풍속을 높여야 한다. 와류에 의한 진동을 줄이기 위한 방법으로는 구조물의 강성을 증가시켜 공진풍속을 상승시키는 방법, 질량을 증가시키거나 감쇠력을 증가시켜 응답의 진폭을 감소시키는 방법, 주형 단면의 공기역학적 특성을 개선하여 와류를 약하게 하거나 규칙적인 발생을 억제하는 방법(4.2절 참조) 등이 있다. 또한 buffeting효과를 줄이기 위해서는 주형 단면을 적절히 선택하여 항력계수 $C_D(\alpha)$, 양력계수 $C_L(\alpha)$, 모멘트계수 $C_M(\alpha)$, 양력계수와 모멘트계수의 양각에 대한 기울기 등이 작아지도록 한다(여기서 α 는 주형의 양각임).

4.2 내풍설계시 고려사항¹⁰⁾

현수교의 내풍설계시에는, 정적인 풍하중 효과에 대하여 설계를 수행한 후 그 설계案에 대하여 동적 풍하중 효과에 대한 안정성을 확인하는 절차를 밟는다. 공기역학적으로 안정한 현수교를 설계하기 위하여는 공기 유동이 부드럽게 이루어지도록 하거나 유동이 분리(flow-dividing)되도록 주형의 기본 단면을 선택하며 이를 위한 몇가지 방안 및 고려사항은 다음과 같다.

1) 평판형 단면보다는 격자 트러스와 같이 개구부를 가진 단면을 선택하며 이때 상판(deck)은 open grating을 가지도록 한다.

2) 트러스 단면인 경우 상하부 트러스간에 횡방향 저항 브레이싱을 설치하거나 상자형 단면을 형성시켜 비틀림강성을 높인다.

3) 평판을 이용한 단면의 경우는 상자형으로 하여 비틀림강성을 높여 주며 이때 단면을 유선형이 되도록 선택한다.

4) 보조익이나 유선형 부속물과 같은 공기역학적 불안정 억제장치를 부착하여 단면을 유선형화한다.

5) 주형의 공기역학적 특성은 난간·연석·기타 그 외의 부속물들을 포함한 단면의 미묘한 차이에도 영향을 받기 때문에 이들의 설치에는 주의를 요한다.

풍하중에 의한 교량의 진동을 억제하는 방법중의 하나로 근래에는 구조물의 감쇠를 기계적으로 직접 증가시켜 주는 방법을 사용하기도 한다. 이 방법은 감쇠장치를 구조물에 직접 장착하는 방법으로서 수동형과 능동형의 두가지 형태가 있으며 현재까지는 수동형 감쇠장치를 주로 사용하고 있다.

5. 구조설계

현수교의 설계를 위하여는 우선 교량밀의 통행공간 요구조건, 路幅, 지반조건 등 가설 부지의 주요 고려인자들을 미리 파악하고 그와 유사한 환경조건, 유사한 크기의 기존 현수교들을 조사해 보는 것이 바람직하다. 그런 다음 설계에 고려해야 할 주요 요소들을 결정하고 각 부재의 상세설계를 수행한다.

5.1 주요 설계요소

(1) 구조형식의 결정

현수교의 구조형식은 주 케이블의 정착방식, 주형의 지지방식, 경간의 수에 따라 여러가지로 분류할 수 있으며, 그림 2에 현수교의 전형적인 구조형식들을 보였다. 그림 2-(a), (b), (c), (d)는 주 케이블의 양단을 교량 외부에 정착하는 형식의 현수교이며 그림 2-(e)는 구조물 자체, 즉 보강주형에 주 케이블을 정착시키는 자기정착식(self-anchored) 현수교이다.

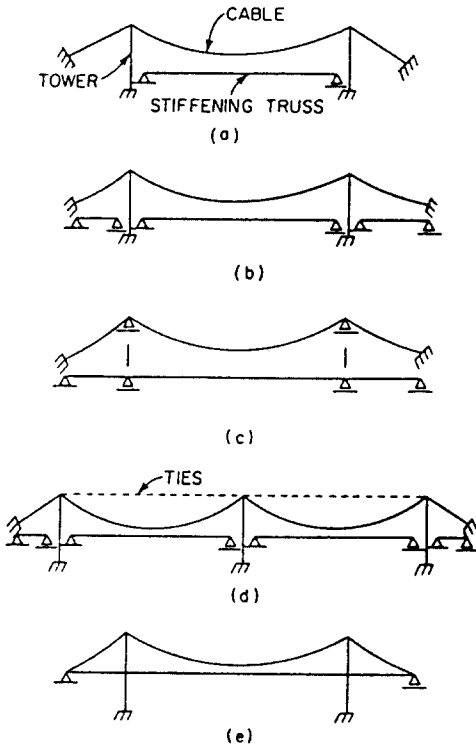


그림 2. 현수교의 기본 구조형식

자기정착식 현수교는 주 케이블이 주형의 휨모멘트를 많이 부담해주지 못하며 주 케이블의 수평장력에 의해 발생하는 압축력을 주형이 받게 되므로 형의 축력과 캠버효과가 중요한 인자로 작용하게 된다. 또한 주 케이블 장력의 연직상향 성분은 양단지지점에서의 사하중에 대한 반력을 제거시키는 효과를 나타내므로 주형의 들림현상이 발생

될 수 있으며 이런 경우에는 들리지 않도록 별도의 장치를 설치해 주어야 한다. 그러므로 이 형식은 지반조건이 매우 불량하여 외부 정착이 어려운 경우에 비교적 짧은 경간(120~300m정도)의 현수교에만 적용한다.²⁾

그림 2-(d)는 4경간(다경간) 현수교로서 경간의 수가 적은 경우보다 구조적으로 더 유연해져 주형에 많은 하중이 걸리게 되고 주형과 주탑의 변형이 과대해진다. 따라서 주탑의 꼭대기 사이를 정착용 케이블로 연결해주고 이 케이블의 양단은 외부 지반 또는 주형 양단에 정착시켜야 한다.¹⁾

그림 2-(a)는 단일 경간으로 주경간만 가지는 현수교 형식으로서 주 케이블은 주탑에서 외부 정착불력까지 연결하여 정착시킨다. 케이블의 이 부분은 주탑이 수평방향으로 변형되는 것을 막아주는 역할을 한다. 그림 2-(b)는 3개의 주형을 모두 단순지지시킨 3경간 현수교 형식으로서 대부분의 현수교가 이러한 형식을 취하고 있다.

(2) 기본 고려사항

현수교의 설계시 구조형상에 대하여 기본적으로 고려해야 할 사항을 요약하면 아래와 같다.

1) 측경간의 길이는 주경간 길이의 1/2이하가 되도록 하는 것이 경제적, 구조적으로 바람직하며 backstay를 사용한 경우 약 1/4정도가 적당하다.

2) 케이블의 sag와 경간의 비는 케이블의 수평장력에 영향을 주며 주탑의 높이, 정착부의 인발력, 현수교의 강성에 영향을 주므로 중요한 고려인자이다. 이 비는 교량의 부재응력을 줄이기 위하여 가능한 한 크게 하는 것이 바람직하며 측경간이 주 케이블에 의해 지지되는 경우 1:8, backstay를 사용하는 경우 1:9가 적당하다. 실제로 사용되는 sag와 경간의 비는 일반적으로 1:8에서부터 1:12까지 범위의 값이다.

3) 보강 트러스의 깊이는 경간 길이의 1/60에서 1/170정도까지가 적당하다.

4) 보강 주형 단면의 형상은 공기역학적으로 매우 중요한 인자이며 이 형상의 선택기준은 4.2절에 기술된 내용에 따른다.

5.2 주요 부재의 설계

이 절에서는 케이블, 주형단면, 주탑, saddle,

정착부 등에 대하여 간략히 기술한다.

(1) 케이블

현수교의 케이블 특성으로 가장 중요하게 요구되는 것은 탄성계수와 인장강도가 높아야 하고 피로에 대한 저항성이 좋아야 한다는 것이다. 이외에도 부식방지의 우수성, 가설의 용이성 등도 케이블 선택에 고려되는 것이 좋다. 이러한 조건을 만족시키는 케이블로는 wire케이블과 strand케이블이 있으며 근래에는 주로 이 두종류의 케이블을 사용한다.

(2) 주형단면

현수교의 주형은 보통 평판 또는 트러스로 만들게 된다. 보강 주형의 기본 단면은 수평 web을 가진 H단면, 상판의 아래쪽에 두개의 수직 평판 또는 트러스로 보강한 단면, 평판 또는 트러스의 상자형 단면을 생각해 볼 수 있으며 실제로는 이 기본 형상을 조합·변형하여 사용한다. 여기서 H단면은 공기역학적 특성이 매우 나빠 근래에는 거의 사용되지 않으며, 수직 보강만한 것은 비틀림강성이 매우 작으므로 이 강성을 보강한 상자형 단면이 바람직하다. 실제로 사용된 전형적인 주형단면의 모양을 그림 3에 보였다. 이 그림에서 (a), (b), (c)는 보강 트러스이며 (d)는 상자형 강재 주형이다.

(3) 주탑

현수교의 주 케이블은 주형 단면의 양쪽을 지지하게 되므로 주탑은 기본적으로 두개의 다리를 가진 프레임 형상을 하게 된다. 이 프레임 형상은 수평 strut와 대각 브레이싱을 추가함으로써 횡(lateral)방향으로의 강성을 크게 해 준다. 주탑의 양단 지지조건은 주탑의 거동과 상세설계에 큰 영향을 주며, 근래의 현수교는 기초에서는 고정시키고 꼭대기에서는 roller saddle이 설치된 주탑을 이용한다. 실제 사용된 전형적인 주탑의 형상 및 제원을 그림 4에 보였다.

(4) saddle

주탑의 saddle은 강재를 鑄造한 일체식으로 또는 부분적으로 용접하여 그림 5와 같이 만든다. 이 saddle의 크기는 케이블에 가해지는 압력에 따라 결정되며 이 압력은 saddle의 곡률반경에 따라 결정된다. 특수한 saddle로서 측경간의 케이블을 정

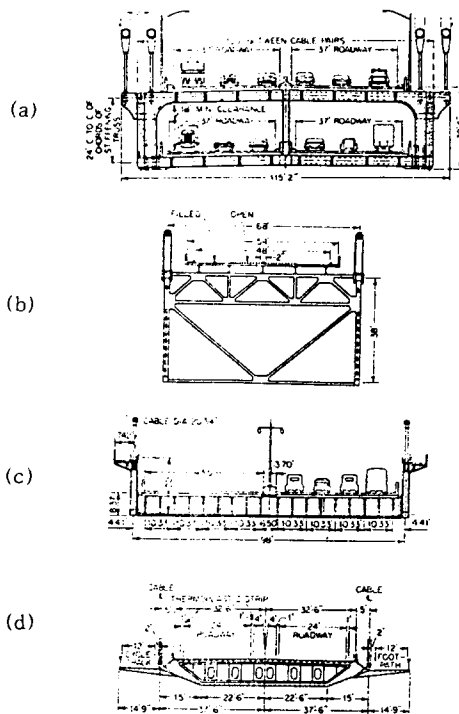


그림3. 현수교의 전형적인 단면 : (a) Verrazano-Narrows
(b) Mackinac
(c) Triborough
(d) Severn

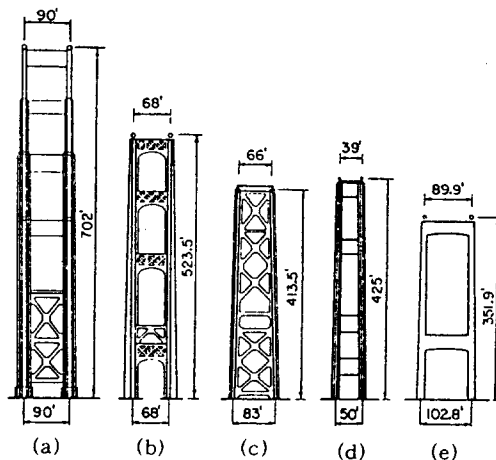


그림4. 현수교의 주탑 : (a) Golden Gate
(b) Mackinac
(c) San Francisco-Oakland Bay
(d) First Tacoma Narrows
(e) Walt Whitman

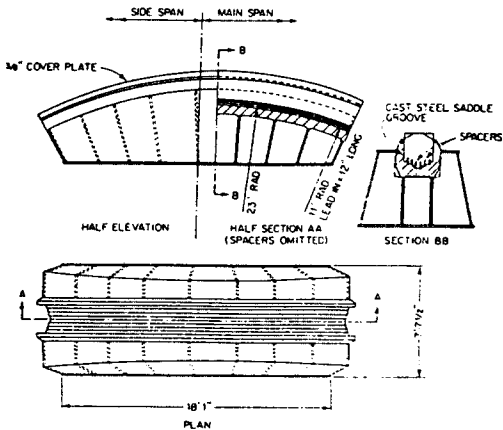


그림5. Forth Road교의 주탑 Saddle

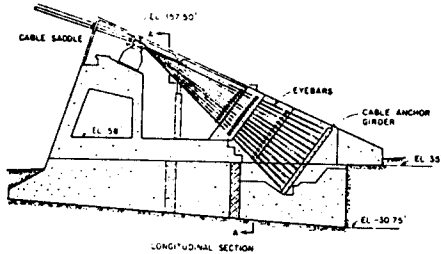


그림6. Verrazano-Narrows 교의 정착부

착부로 전향시켜주기 위해 주탑에 knuckle를 사용할 수도 있으며, 케이블의 strand를 벌어지게 하기 위해 정착부에 splay saddle를 사용하기도 한다.

(5) 정착부

현수교의 정착부는 보통 매우 무거운 블럭을 이용하여 블럭의 무게와 마찰력이 주 케이블의 인발력에 의한 전도 및 미끄러짐에 저항하도록 설계한다. 이 정착부에는 강재 eyebar chain을 파묻어 주 케이블의 wire와 연결한다. 지역조건이 허락한다면 암반에 터널을 만들어 정착시키기도 하며, parallel-wire strand 케이블의 경우는 strand socket을 사용하여 파이프 형태의 정착부에 정착시킨다. 전형적인 정착부의 예를 그림 6에 보였다.

6. 맺음말

현수교는 상당히 오래전부터 가설되어온 교량 형식이기 때문에 구조해석이론도 일찍부터 개발되어 왔다. 그러나 외부 하중에 민감한 구조물이어서, 특히 동적인 하중에 대한 정확한 구조해석 방법, 내풍설계방법 등은 아직도 연구가 계속되고 있다.

본 고에서는 현수교의 기본 형상을 소개하고 미력하나마 구조해석방법, 내풍설계방법, 설계시 고려해야 할 기본적인 사항들에 대하여 간략히 정리하여 보았다. 아무쪼록 우리나라에서도 우리 기술만으로 현수교를 설계할 수 있는 날이 빨리 오기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. Gimsing, N.J., Cable Supported Bridges, John Wiley & Sons, 1983.
2. Merritt, F.S., Structural Steel Designer's Handbook, Section 14, McGraw-Hill, 1972.
3. Timoshenko, S.P. and Young D.H., Theory of Structures, 2nd ed., McGraw-Hill, 1965.
4. Hayashikawa, T. and Watanabe, N., "Suspension Bridge Response to Moving Loads", J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.18, No.EM6, Dec.1982, pp.1051-1066.
5. 小西一郎, 鋼橋, 設計編 II, 丸善株式會社, 1977.
6. Simiu, E. and Scanlan, R.H., Wind Effects on Structures, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1986.
7. 윤정방, 현창헌, 류제남 "랜덤 풍하중에 대한 현수교의 기하학적 비선형거동의 동적해석", 대한토목학회논문집, 제8권 제2호, 1988.6, pp. 185-196.
8. Baron, F. et al., The Effects of Seismic Disturbances on the Golden Gate Bridge, Report No. EERC 76-31, Univ. of California, Berkeley, CA, 1976.
9. 현창헌, 윤정방, "다지지점 지진하중을 받는 현수교의 비정상거동 해법", 1989년도 대한토목학회 학술발표회 논문개요집, 1989.10.
10. 윤정방, 현수교의 내풍설계, 한국강구조학회지, 제3권 제2호, 1991.6, pp.11-17.