

장대사장교의 지진거동 분석시 지반특성 및 파동전달효과를 고려한 설계기준 적용에 대한 고찰

Study on Application of Wave Travelling Effect and Local Site Effect to Design Standard for Analysing Seismic Behavior of Long-Span Cable-Stayed Bridge

박 연 수* 송 영 봉** 현 기 환** 이 순 남** 양 원 열**
Park, Youn-Soo Song, Young-Bong Hyun, Ki Hwyun Lee, Soon Nam Yang, Won Yeol

Abstract

Number of long-span bridge construction has been increased recently so that seismic consideration of design has become significant. To adapt such significance to design, seismic design in the newly revised 'Cable Steel Bridge Design Handbook' specifies some of wave travelling effect and local site effect. In this study, a cable-stayed bridge with main span of 500m is analysed having variables of uniform excitation, wave travelling effect, and wave travelling effect plus local site effect. Result shows that wave travelling effect in cable-stayed bridge affects considerably to its seismic response under weak soil condition even though the span length is relatively short. What's more, regardless of soil type, the seismic response has become higher for analysis with wave travelling effect and local site effect than with wave travelling effect only. Consequently, in seismic response analysis of long-span bridge, consideration should be given to application of wave travelling effect and local site effect.

요 지

최근 국내에서 장대교량의 건설이 증가함에 따라 그에 대한 내진설계의 중요성도 증대되고 있다. 이와같은 여건을 반영하여 새로 개정된 케이블 강교량 설계지침(안)의 내진설계편에서 지진파의 파동전달효과와 지반 특성효과를 일부 반영하였다. 본 연구에서는 국내 설계규정에 따라 사장교(주경간500m)의 다양한(균등입력, 파동전달효과, 파동전달효과+지반특성효과) 지진응답해석을 수행하여 설계적용시 문제점에 대하여 검토해 본 결과 장대교의 파동전달효과는 지지점간 거리가 짧은 경우에도 지반이 연약한 경우 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 한편 지반의 종류에 상관없이 파동전달효과와 함께 지점별로 지반특성을 고려한 해석이 그렇지 않은 해석결과보다 큰 값이 산출되었다. 따라서 장대교의 지진응답해석시 파동전달효과 및 지반특성효과와의 적용에 대한 세심한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

Keywords : Cable-stayed bridges, Wave travelling effect, Multiple-support excitation, Uniform excitation, Local site effect, Cable steel bridge design handbook

핵심 용어 : 사장교, 파동전달효과, 다지지점 가진, 균등가진, 지반특성 효과, 케이블 강교량 설계지침(안)

* 정희원, 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사

** 정희원, 전남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

E-mail : ssyb@kcieng.com 011-220-3366

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2008년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 국내에서는 서·남해안의 도서지역을 연결하는 해상교량의 건설과 터키방식의 경쟁적 입찰제도의 확대 보급으로 인하여 사장교 및 현수교 등의 장대교량의 설계 및 건설이 증대되고 있다. 이에 따라 중·소교량 설계시 고려하지 않았던 바람 및 지진에 의한 동적거동에 대한 정확한 해석이 교량의 안전성 확보에 큰 역할을 담당하게 되었다. 특히, 장대교의 지진응답 해석은 그 결과에 따라서 너무 보수적인 접근으로 인해 주탑 및 기초부의 거대화로 시공성 및 경제성을 현격히 떨어뜨리며, 그 반대의 경우는 공용수명중 교량의 급격한 붕괴를 일으킬 수 있는 매우 중요한 설계 요소이다.

장대교의 지진하중에 대한 정확한 해석을 위해서는 입력지반운동의 공간적 변화를 고려하는 (1)파동전달효과(Wave Travelling Effect)와 (2)지점별 지반특성 효과(Local Site Effect)를 고려해야 하는 것으로 알려져 있다. 그러나 실무에서는 이론적 접근의 어려움으로 인하여 위 사항들을 정확히 반영하지 못하고 있는 것이 현실이다. 이와같은 현실에서 06년 개정된 케이블 강교량 설계지침(안)에 따르면 교장이 600m이상인 교량에 대해서 파동전달효과를 고려하도록 추가하여 지진응답해석의 정밀성을 높여가는 추세이다.

본 연구에서는 지진파의 파동전달효과와 지점별 지반특성효과를 모두 고려하여 해석하였으며, 이를 균등입력해석법과 지진파의 파동전달효과만을 고려한 해석법에 대한 결과들과 비교하였다.

2. 이론적 배경

이상적인 지진응답 해석이 이루어지기 위해서는 진원으로부터 부지 기반암까지의 지진파의 전파, 기반암 위의 지반층에 의한 지표면 거동의 영향정도를 지진응답 해석시 고려하여야 한다. 이를 고려하기 위해서는 (1) 지진파의 파동전달효과(Wave Travelling)와 (2) 지점별 지반특성 효과(Local Site Effect)에 대한 이해가 필수적이다.

2.1 파동전달효과(Wave Travelling Effect)

지진발생시 지진파는 진원으로부터 여러 방향으로 방사되는 속도와 시간의 함수로써 지지점간 거리가 먼 다지지점을 가지는 장대교량의 지진응답해석에서는 각 지지점들에 입력되는 지반운동의 파동전달특성이 교량의 지진응답에 매우 큰 영향을 미친다. 사장교의 지진 입력은 주탑과 교각을 통해서 상부구조물로 전달되며, Fig. 1에서 보는바와 같이 사장교에 지진하중이 작용할 때 주탑과 교각에 작용하는 지진파의 방향과 진폭이 서로 다른 것을 볼 수 있다.

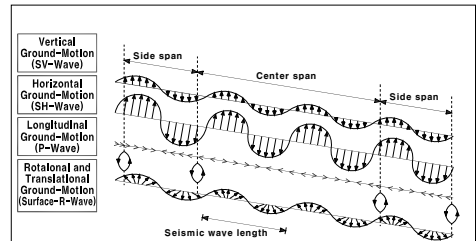


Fig. 1 사장교에 작용하는 지진파 유형

일반적으로 장대 케이블교량의 지진해석시 절대변위($\{u^{(t)}(t)\}$)는 준정적변위($\{u^{(a)}(t)\}$)와 동적변위($\{u^{(d)}(t)\}$)로 나누어 해석할 수 있다(Chopra, 2001).

$$u^{(t)}(t) = u^{(a)}(t) + u^{(d)}(t) \quad (1)$$

여기서 준정적성분은 각 지점 자유도의 단위변위에 의한 구조물의 정적변위 형상벡터(ψ_j)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u^{(a)}(t) = \sum_{j=1}^{nb} \psi_j x_j(t) \quad (2)$$

여기서, $x_j(t)$ 는 지점 자유도 j 에 입력된 변위이고 n 은 가진되는 지점 자유도의 개수이다

균등입력해석법에서는 준정적변위에 의한 전체교량의 응답은 강제운동이 되어 상대변위가 없기 때문에 부재력은 나타나지 않는다. 그러나 다지지점 지진입력

에서는 지진응답해석시 각 지지점의 서로 다른 운동으로 인해 준정적성분에 의한 부재력의 크기 정도로 증폭되어 나타날 수 있다(Abdel-Ghaffar & Rubin, 1982, 1993).

2.2 지점별 지반특성효과(Local Site Effect)

국지적 지반효과는 지진응답해석에 있어 매우 중요한 요소이며 지역적 특성을 고려하여 부지 고유의 지반증폭 현상은 지진응답해석시 고려하여야 할 주요사항이다. 이와 같은 인식은 1985년 Mexico City와 1989년 Loma Prieta의 지진에서 얻은 교훈으로 1992년 Borcherdt, Dobry, Seed와 Martin등을 중심으로 활발히 연구되었다. Loma Prieta지진 발생지역에 대한 실측데이터와 비선형/등가선형 부지응답해석을 수행하여 내진설계 기준을 위한 지반의 분류체계와 지반계수를 상부 30m 지반의 전단파속도 평균값을 이용하여 선정한다는 등의 NEHRP 1994가 제정되었고, 이후 NEHRP 1997로 개정된 후 UBC의 기준까지 변경되게 되었다.

NEHRP 1997에서는 기존의 기준들과는 달리 단주기 영역에서 부지의 증폭정도를 고려하는 변수를 포함하고, 부지증폭현상으로 인한 지표면 자유장 최대 가속도의 증가를 기반암 노두 가속도의 변수로 제안함으로써 지진 발생시 하부 지반의 동적 특성에 따른 지표면 최대가속도의 변화정도를 설계에 반영하도록 하였다. 또 상부 30m 토층의 평균 전단파속도를 기준으로 지반분류 기준을 명확하게 정의하였으며 장주기와 단주기에 증폭영향을 평가할 수 있는 증폭계수를 도입하여 설계시 지반특성효과를 반영하도록 하였다.

3. 국내설계기준

3.1 내진설계기준연구(건설교통부, 1997)

지진공학회에서 제시한 내진설계기준연구는 기본적으로 NEHRP Guideline의 설계기준과 매우 유사하게 규정되어 있으며, 지반특성에 따른 지반증폭현상을 반영할 수 있도록 지반을 분류하여 그에 따른 지진계

수를 정의하도록 한다. 지반분류는 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 Table 1과 같이 분류하였다. 지반의 종류에 따른 직접적인 지진 증폭을 나타내는 지진계수는 장주기(C_v) 및 단주기(C_d)로 나누어서 정의되었다. 여기서 지진계수는 우리나라의 발생 지진과 문헌 및 실측자료 그리고 전문가의 의견을 종합하여 S_B 지반을 0.11로 기준하였으며 이로부터 S_A 지반은 대략 0.8배, S_C 지반은 1.18배, S_E 지반은 2배의 지반증폭효과를 고려하여 결정되었다.

Table 1 지반의 분류 by 내진설계기준연구

지반 분류	지반종류 호칭	상부 30m에 대한 평균지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 $N(\frac{N}{CH})$ (blow/foot)	비배수 전단강도 S_u (kPa)
S_A	경암지반	1500 초과	-	-
S_B	보통암지반	760~1500	> 50	> 100
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360~760	15~50	50~100
S_D	단단한 토사지반	180~360	< 15	< 50
S_E	연약한 토사지반	180 미만		
S_F	부지고유의 특성평가가 요구되는 지반			

Table 2 설계지진계수 by 내진설계기준연구

지진계수 지반종류	단주기 (C_d)		장주기 (C_v)	
	I 구역	II 구역	I 구역	II 구역
S_A	0.09	0.05	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07	0.11	0.07
S_C	0.13	0.08	0.18	0.11
S_D	0.16	0.11	0.23	0.16
S_E	0.22	0.17	0.37	0.23

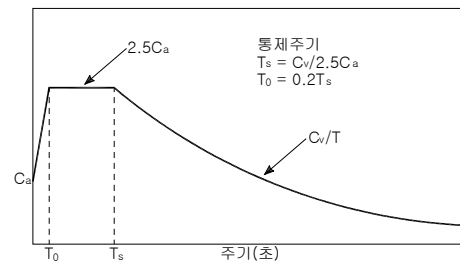


Fig. 2 표준설계응답스펙트럼 by 내진설계기준연구

3.2 도로교설계기준(건설교통부, 2005)

기존 내진설계기준연구와 가장 큰 차이점은 지반종류 S_A 와 S_B 를 지반종류 I로 통합한 것과 설계응답스펙트럼에서 단주기 영역의 최대값을 제한한 것이다. 이는 단주기 영역에서 지반의 종류에 따른 지반증폭현상을 반영하지 않았다는 것이다. 아래 Fig. 3에서 보이는 것처럼 탄성지진응답계수(C_s)의 최대값을 2.5A 이하로 규정하여 단주기에서 지반종류에 따른 지반증폭을 제한하였다.

3.3 케이블강교량설계지침(안)(토목학회, 2006)

기존 도로교설계기준은 지간길이 200m 이내의 교량에 적용하는 것이 원칙이므로 이를 초과하는 장지간 케이블 교량에 대한 확대 적용이 불합리한 부분에 대하여 보완하여 토목학회에서 새로 개정하였다.

Table 3 지반의 분류 by 도로교설계기준

지반종류	지반종류 호칭	상부 30m에 대한 평균지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 $\overline{N}(\overline{N}_{CH})$ (blow/foot)	비배수 전단강도 \overline{S}_u (kPa)
I	경암지반, 보통암지반	760이상	-	-
II	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360~760	> 50	> 100
III	단단한 토사지반	180~360	15~50	50~100
IV	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50
V	부지교유의 특성평가가 요구되는 지반			

Table 4 지반계수 by 도로교설계기준

지반계수	지반종류			
	I	II	III	IV
S	1.0	1.2	1.5	2.0

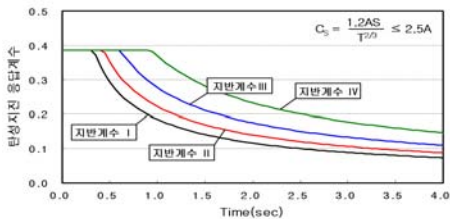


Fig. 3 탄성지진 응답계수

도로교설계기준의 내진설계편에 비하여 추가된 주요 내용을 정리해 보면 다음과 같다.

- 설계응답스펙트럼 작성시 주탑의 지반이 상이하여 동일한 설계응답스펙트럼을 적용할 수 없다면 지진응답이 크게 산정되는 설계응답스펙트럼을 사용하거나 부지 평균 설계응답스펙트럼을 사용한다. (9.3.3(3))

- 시간이력해석시 모든 고정된 주탑에서 동일시점에서 동일한 지반운동을 가정할 수 없다면 지반운동 시간이력의 차이를 고려한다. (9.5.2(2))

이상과 같이 지진편의 추가된 내용은 지진파의 파동 전달효과와 지반특성효과를 장대교량 설계에 반영하고자 한 것이다.

4. 지반종류별 지진특성을 고려한 수치해석

본 연구에서는 지반종류별로 파동전달효과의 영향을 파악하기 위하여 도로교 설계기준에 따라 지반 종류를 크게 지반 I, 지반 II, 지반 III으로 구분하여 균등입력 해석과 파동전달효과를 고려한 지진응답해석을 각각 수행하였다.

또한, 파동전달효과에 지점별 지반특성을 동시에 고려할 경우 구조물에 미치는 영향을 추가적으로 파악하기 위하여 지점별로 시간이력곡선을 변화시켜 지진응답해석을 추가로 수행하였다.

4.1 대상 구조물

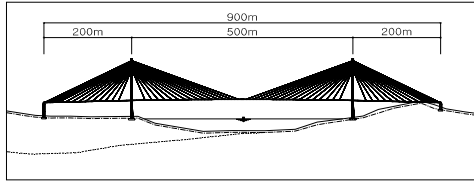
본 연구에서 사용된 구조물은 총 연장이 900m인 3경간 연속 사장교로 대상 교량의 제원 및 모델링 현황은 Table 5, Table 6과 같고 Fig. 4는 대상교량의 모델링 형상을 나타낸다.

Table 5 해석대상 교량제원(kN, m)

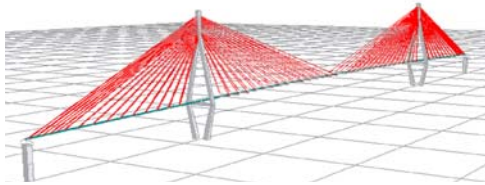
부재	Girder	Tower	Cable
탄성계수	2.059E8	2.746E8	1.961E8
단면적	1.225	7.625	0.007
비틀림상수	1.378	9.481	0.0
단면2차모멘트	3.447	22.393	0.0
단위중량	107.768	24.515	100.119

Table 6 교량요소 모델링

요소	모델링 방식	요소 수
상부구조 요소	2절점 Frame요소	132
주탑 및 교각 요소	2절점 Frame요소	54
케이블 요소	2절점 End-Release요소	120
교좌장치	탄성 스프링 요소	12



(a) 대상교량 전경



(b) 대상교량 모델링
Fig. 4 해석대상교량의 모델링 형상

모든 지진응답해석은 상용프로그램인 MIDAS Civil 2006 v7.2.0의 Multiple Support Excitation 기능 (다수의 지점을 가진 구조물에 각 지점별로 서로 다른 시간하중함수를 지반가속도로 입력하여 수치해석 수행)을 이용하여 지점별로 지반가속도의 지연시각 및 지반종류에 따라 서로 다른 시간하중함수를 지반가속도로 입력한 후 시간이력해석을 통하여 수행하였다.

4.2 균등입력에 의한 지진응답해석

균등입력에 의한 지진응답해석에서는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 모든 지지점에 동일한 입력을 적용하였으며, 설계응답스펙트럼은 도로교 설계기준에서 명시한 지반종류 I, 지반종류II, 지반종류III에 대한 각각의 응답스펙트럼을 기준으로 작성한 인공 지진파를 적용하였다. Fig. 6은 각 지반종류에 따른 설계응답스펙트럼과 지진응답해석에 사용된 입력지진파의 응답스펙트럼을 나타낸 것이다.

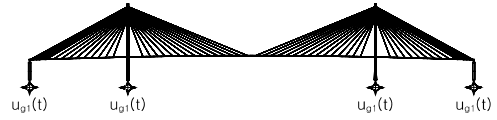
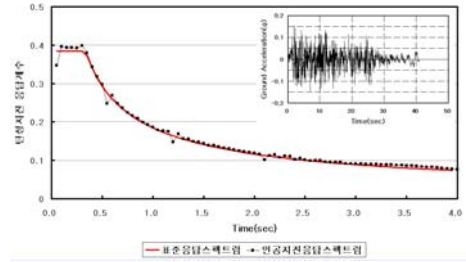
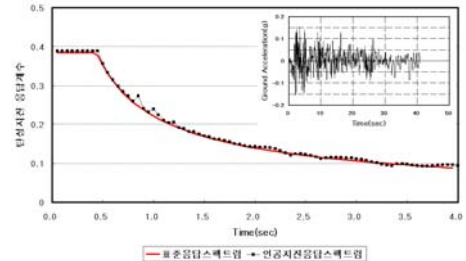


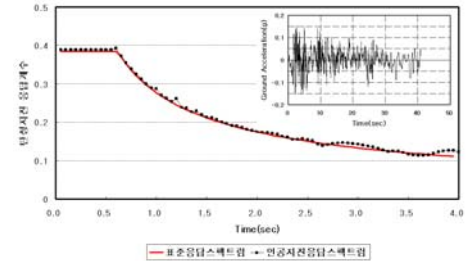
Fig. 5 균등입력에 의한 지진응답해석



(a) 지반종류 I



(b) 지반종류 II



(c) 지반종류 III

Fig. 6 지반종류별 설계응답스펙트럼 및 지진가속도

4.3 지진파의 파동전달효과를 고려한 지진응답해석

각 지반별 응답해석에 사용된 입력지진파는 4.2절에 사용한 지진파와 동일하며, 지진파의 파동전달효과를 고려하기 위한 파동전달속도(v_{app})는 각 지반의 전달파 속도를 고려하여 Table 7과 같이 각각 상이하게 적용하여 수행하였다.

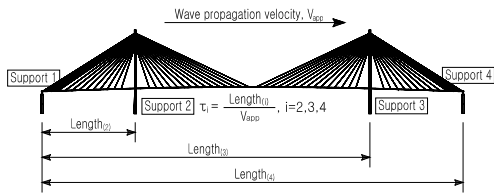


Fig. 7 파동전달효과를 고려한 지진응답해석

Table 7 지반별 파동전달속도(V_{app})
단위 : m/sec

구분	V_{app}^1	V_{app}^2	V_{app}^3	V_{app}^4	V_{app}^5	V_{app}^6
지반종류 I	500	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000
지반종류 II	300	400	500	600	700	800
지반종류 III	100	150	200	250	300	350

4.4 지진파의 파동전달효과와 지점별 지반 특성효과를 고려한 지진응답해석

각 지점의 국부적인 지반특성을 고려하기 위하여 각 지점별로 지반증폭계수를 달리 적용하였다. 지점 P1, P2에는 4.2절에서 구한 인공지진파를 적용하였으며 P3, P4 적용 인공지진파는 P1, P2에 사용한 지진파에 증폭계수(0.8)를 곱하여 감소된 지진응답을 적용하였다. 이는 케이블 강교량 설계지침(안)에서 규정한 설계응답스펙트럼 산정방법에 대한 검토를 위한 것이다.

또한 각 지점별 지반특성 효과와 동시에 지진파의 파동효과를 고려하기 위하여 4.3절에서와 같이 파동전달속도를 변화하여 지진응답해석을 수행하였다.

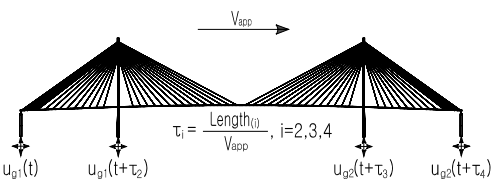
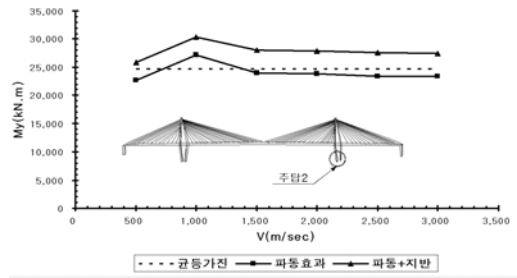


Fig. 8 파동전달효과와 지반특성효과를 고려한 지진응답해석

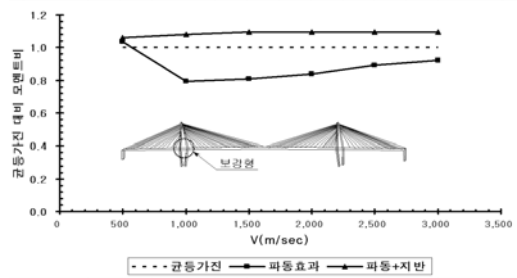
5. 해석결과 및 고찰

5.1 해석결과

각 지반종류별 지진응답해석결과는 다음과 같다.

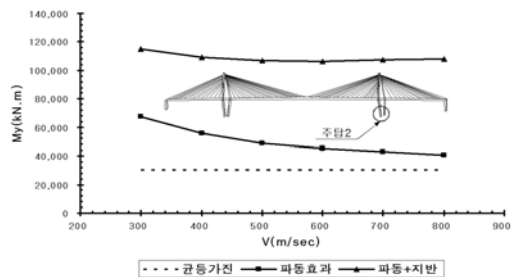


(a) 주탑하단 모멘트

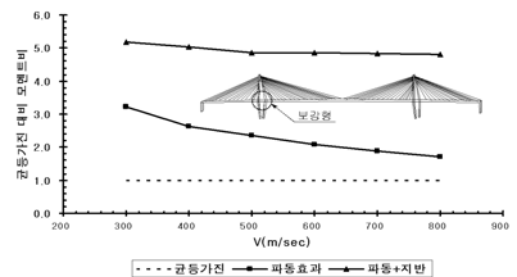


(b) 보강형 모멘트비

Fig. 9 지진응답 해석결과(지반종류 I)



(a) 주탑하단 모멘트



(b) 보강형 모멘트비

Fig. 10 지진응답 해석결과(지반종류 II)

지반종류 I의 지진응답해석결과 주탑의 최대부재력은 균등입력대비 파동전달효과만 고려한 경우 최대 1.09배, 파동전달효과와 지반특성효과를 고려한 경우 최대 1.22배 크게 나타났다. 또한 보강형의 최대부재력도 각각의 경우 최대 1.03, 1.10배로 크게 나타났다.

지반종류II의 지진응답해석결과 주탑의 최대부재력은 균등입력대비 파동전달효과만 고려한 경우 최대 2.25배, 파동전달효과와 지반특성효과를 고려한 경우 최대 3.85배 크게 나타났다. 또한 케이블의 최대부재력도 각각의 경우 최대 3.21, 5.18배로 크게 나타났다.

지반종류III의 지진응답해석결과 주탑의 최대부재력은 균등입력대비 파동전달효과만 고려한 경우 최대 6.27배, 파동전달효과와 지반특성효과를 고려한 경우 최대 7.19배 크게 나타났다. 또한 케이블의 최대부재력도 각각의 경우 최대 7.53, 8.91배로 크게 나타났다.

지반이 연약할수록 그 크기의 차이는 더 커지는 것으로 나타났다.

5.2 고찰

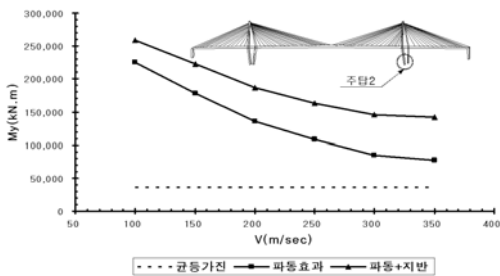
본 연구결과 지진의 파동전달효과를 고려한 해석결과는 기존의 많은 논문에서 발표한 것과 같이 균등입력 지진응답해석보다 지반의 종류에 따라 최소 1.09배에서 최대 6.27배까지 크게 나타났으며, 지반종류 I의 경우 그 차이는 최대 9% 이내로 큰 차이는 없으나, 지반종류II, III의 경우는 그 차이가 커서 설계시 파동전달효과에 대한 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다.

주탑 지반이 상이한 경우의 설계응답스펙트럼 적용시 지진응답이 크게 작용하는 동일 설계스펙트럼으로 해석한 지진응답(파동전달효과만 고려)은 주탑별로 상이한 설계응답스펙트럼을 사용하여 해석한 지진응답(파동전달효과+지반특성효과 고려)보다 모든 경우에 있어서 작게 산출되었으며, 이는 지반의 상대변위에 의한 차이 때문인 것으로 판단되어진다. 따라서 고정단 지반의 지반특성이 틀린 경우가 빈번하게 발생하는 장대교의 내진설계에 있어서 설계응답스펙트럼의 선정시 지점별 지반특성효과에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

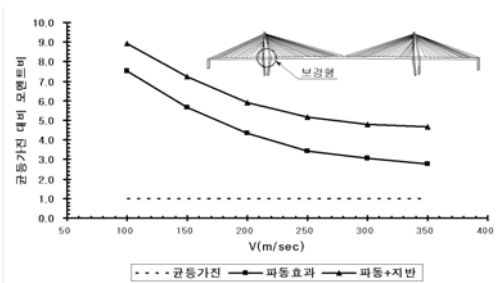
6. 결론

본 연구에서는 장대교의 지진응답해석시 지진파의 파동전달효과와 각 지점의 지반특성효과에 대한 설계기준의 적용성에 대하여 검토해보았다. 파동전달효과는 각각 기초에서의 변위 위상차를 고려하여 적용하였으며, 지반특성효과는 각 기초지반의 지반특성을 고려한 증폭계수를 고려한 시간이력곡선을 각각 적용하여 고려하였다. 예제 사장교에 대한 지진응답해석결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 케이블 강교량 설계지침(안)에서는 지반의 파동전달효과의 적용교량 선정시 교량의 연장(고정단 거리 600m 이상)에 대하여만 언급하였으나, 교량 연장이 작은 경우에도 지반의 종류에 따라 파동전달효과는 크게 나타날 수 있으므로 장대교의 내진설계시 지반종류 및 지지점간 거리를 고려하여 파동전달효과의 적용여부를 판단해야 될 것으로 사료



(a) 주탑하단 모멘트



(b) 보강형 모멘트비

Fig. 11 지진응답 해석결과(지반종류 III)

된다.

2) 케이블 강교량 설계지침(안)에는 주탑의 지반이 상이하여 동일한 설계응답스펙트럼을 적용할 수 없을 때는 지진응답이 크게 산정되는 설계응답스펙트럼을 사용하게 되어있으나, 이 경우의 최대 부재력은 각 지점에 맞는 각각의 응답스펙트럼(인공 지진파)을 사용한 경우의 최대 부재력보다 작게 평가될 수 있다. 따라서 기초지반이 상이한 경우 설계응답스펙트럼(인공 지진파)을 산정시 상당한 주의가 필요한 것으로 사료된다.

또한, 연육교 및 연도교 등의 장대교량의 설계·시공이 증가하는 시점에서 지진파의 특성 (파동전달 효과와 지반응답효과)을 고려한 지진응답해석 방법에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 2006년도 전남대학교 학술연구비 지원사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능하게 한 학교당국에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김재민, 이명규, 신용우, “다지점 지진입력에 대한 현수교의 지반-구조물 상호작용해석”, 한국지진공학회 학술대회 논문집, 2003, pp. 182-189
2. 김호경, 서정인, “다중지점된 자정식 현수교의 비선형 지진응답 해석”, 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제3호, 1997, pp. 45-58.
3. 김효건, 최광규, 엄영호, 권영록, “기초-지반 상호작용을 고려한 교량의 다지점 입력 지진해석 기법”, 한국지진공학회 학술대회 논문집, 2006, pp. 284-291.
4. 현창현, “현수교의 풍하중과 지진하중에 대한 체계론적 거동해석”, 박사학위논문, 한국과학기술원 토목공학과, 1989, 2.
5. 건설교통부, “내진설계기준연구(II)”, 1997.
6. 한국도로교통협회, “건설교통부 제정 도로교설계기준”,

- 2005.
7. 대한토목학회, “케이블강교량설계지침(안)”, 2006.
8. 김두기, “구조동역학”, 구미서관.
9. Anil K. Chopra, “Dynamics of Structures”, Prentice-Hall.
10. Abdel-Ghaffar, A.M, “Cable-stayed bridges under seismic action”, Elsevier Science Publishers B.V, 1991.
11. Abdel-Ghaffar, A.M, and Nazmy, A.S. “Effects of Ground Motion Spatial Variability on The Response of Cable-Stayed Bridges”, Int. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, No. 1, 1992, pp. 1-20.
12. Baron, F., Arikan, M., and Hamati, E., “The Effect of Seismic Disturbances on the Golden Gate Bridge, Report No. EERC 76-31”, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, CA, USA.
13. Dumanoglu, A.A., Brownjohn, J.M.W., and Severn, R.T., “Seismic analysis of the Faith Sultan Mehmet(Second Bosphorus) suspension Bridge”, Earthq. Eng. & Strut. Dyn., Vol.21, 1992, pp. 881-906.
14. Ito, M., Fujino, Y., Miyata, T. and Naritama N. “Cable-Stayed Bridges”, Elsevier, 1991.
15. J. H. Ernst, Der E-modul von seilen unter Berucksichtigung des durchhanges, Der Bauingenieur 1965. 2.
16. Hyun,C-H., Yun, C-B., and Lee, D-G., “Nonstationary Response Analysis of Suspension Bridges for Multiple Support Excitations”, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol.7, No. 1, pp. 27-35.
17. Liu, W.D., Chang, K., Imsen, R.A., “Nonlinear Seismic Evaluation for Retrofit Design of Major Bridges Including SFSI Effects”, Proceedings of the National Seismic Conference on Bridges and Highways, Sacramento, CA, USA, July 8-11, pp. 299-313.

(접수일자 : 2007년 7월 10일)