

케이블 강교량 설계지침 작성 연구

장 승 필

서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

요 약

케이블 강교량의 설계지침 개발을 목표로 지난 2003년 초부터 2005년 6월까지 총 30개월의 연구가 진행되고 있다. 도로교설계기준의 적용범위를 초과하는 장시간 교량에 적합한 하중 모델을 제안하고 설계지침을 작성하되 도로교설계기준과의 중복된 사항은 생략하거나 최소로 언급함으로써 최종적으로는 전 기간길이에 유효한 강교 설계지침 또는 기준을 구축하는 것을 목표로 하고 있다. 약 40% 정도의 공정이 진행된 현 시점에서 본 연구 과제의 배경, 목적, 방법, 향후 추진계획을 간략히 소개하고자 한다.

1. 서론

1973년 남해대교가 현수교로 처음 시공된 이래 우리나라 케이블교량의 역사는 30여년에 이르고 있다. 1980년도의 진도대교, 돌산대교, 올림픽대교를 거쳐 2000년의 서해대교와 영종대교의 성공적 건설로 우리나라도 본격적인 케이블교량의 시대가 열리게 되었다.

특히 1990년대 후반부터 도입된 턴키 방식의 경쟁적 입찰제도는 설계 기술의 급속한 발전을 유도하고 있다. 그러나 이를 뒷받침할 관련 기준 및 지침의 미비로 도로교설계기준이 장시간 교량에도 그대로 적용되고 있다. 또한 외국의 설계기준도 국내 여건에 대한 충분한 검토없이 적용되고 있는 실정이므로 설계 기술의 표준화와 신뢰도 제고가 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 그 간 설계·시공된 교량의 사례와 외국의 기준, 학계와 산업체에 축적된 기술 등을 바탕으로 케이블 강교량의 설계에 활용될 수 있는 지침(안)을 제안하고자 한다.

2. 연구 배경

최근 서남해안과 다도해를 L자형으로 잇는 77호선이 국도로 승격됨에 따라 관광벨트 조성 및 다도해 개발을 위한 연육·연도교 건설사업이 추진되고 있다(그림 1). 현재까지 국내에는 3개의 현수교와 8개의 사장교가 건설되었으며, 머지 않아 30여

개의 케이블교량이 추가적으로 건설 될 것으로 예상된다(표 1).

장시간 케이블교량은 설계와 시공 모든 면에서 고도의 기술의 필요하며 일본, 유럽 등은 이 분야의 고유 선진 기술력을 확보하고 있다. 일본의 경우, 본주사국연락교 건설과정을 통해 시간길이 200m를 초과하는 장시간 교량의 설계기준(HBS)을 개발하였다.

우리나라의 경우에는 도로교설계기준 외에는 별도의 기준 또는 지침이 없으므로 각 프로젝트마다 특별시방서를 작성하여 적용하고 있으나 아직 관련 기술에 대한 저변이 풍부하지 못한 상황에서 타당성이 결여될 우려가 있다. 특히 턴키 설계의 경우, 시간적 제약으로 적용 설계 기준의 합리적 결정이 쉽지 않은 실정이다.

이러한 어려움을 극복하고 나아가 국내 케이블교량 설계기술의 자립화를 위한 첫 단계로서 본 연구에서는 케이블 강교량 설계지침을 작성하고자 한다.

본 연구는 (사)대한토목학회와 (주)포스코간에 계약된 연구용역인 “강교량 설계기준 개선 및 고강도강의 교량적용 기술개발” 과제(총괄연구책임자 : 명지대학교 박영석 교수)의 제4세부과제로서 총 과제는 표 2와 같이 구성되어 있다. 연구기간은 2003.01~2005.06로서 총 30개월이며 현재 약 43%의 공정율을 보이고 있다.



그림 1. 국도 77호선

3. 지침의 소개

3.1 설계 사례 분석

일반적으로 도로교설계기준에 따라 설계되고 있으나 케이블교량의 특수성과 관련된 내용은 별도의 특별 설계기준으로 적용하고 있다. 이 기준들은 주로 HBS, BS code, AASHTO, AASHTO LRFD, DIN, PTI recommendation, Eurocode 등에서 규정

표 1. 서남해안 연육·연도교 건설계획

위치		신안-진도			완도			고흥-여수		
		케이블 교량	타 형식	계	케이블 교량	타 형식	계	케이블 교량	타 형식	계
개수	시공중	1	1	2	2	0	2	0	0	0
	계획	12	11	23	10	7	17	8	13	21

표 2. 강교량 설계기준 개선 및 고강도강의 교량적용 기술개발 세부과제 구성

세부 과제	과 제 명	연구 책임자
제 1과제	강교량 설계기준 개선	이성철(동국대)
제 2과제	극후판 피로설계기준	배두병(국민대)
제 3과제	Open Steel Box 교량 설계지침	박영석(명지대)
제 4과제	케이블 강교량 설계지침	장승필(서울대)
제 5과제	강교량 제작 품셈	정경섭(충북대)
제 6과제	2주형 바닥판 설계기준 및 지침	김병석(건기연)

된 것으로서 주로 하중에 관련된 사항이다. 참고로 합성형을 포함한 한국의 대표적 케이블 강교량에 대한 설계하중을 표3에 비교 수록하였다.

3.2 작성 방향

본 설계지침은 다음과 같은 원칙에 따라 연구되고 있다.

- 지간길이 200m 이상의 케이블 강교량에 적용
- 허용응력설계법에 기초함
- 도로교설계기준과 중복되는 사항은 제외 또는 간단히 언급
- 2004년 개정판 도로교설계기준의 개정 범위를 반영하여 추후 지침의 범위를 탄력적으로 결정
- 외국의 기준과 사례를 최대한 활용하되 창의적 설계가 가능하도록 원론적 방향의 지침 제시

3.3 구성(안)

본 설계지침은 도로교설계기준의 형식을 따라 지침과 해설로 구성한다. 목차(안)는 다음과 같다.

- 1 .
 - 1.1.
 - 1.2.
 - 1.3.
- 2 .
 - 2.1.
 - 2.2.
 - 2.3.
 - 2.4.
 - 2.5.
 - 2.6.
 - 2.7.
 - 2.8.
 - 2.9. 가
 - 2.10. 가

	2.11.	
	2.12.	
3 .		
	3.1.	
	3.2.	
	3.3.	
	3.4.	
	3.5	
4 .		
	4.1.	
	4.2.	
5 .		가
	5.1.	
	5.2.	
	5.3.	
	5.4.	
	5.5.	
6 .		
	6.1.	
	6.2.	
	6.3.	
	6.4.	
	6.5.	
7 .		
	7.1.	
	7.2.	
	7.3.	
	7.4.	
8 .		
	8.1.	
	8.2.	

3.4 주요 내용

고려대상 강종을 현행 도로교설계기준(2000) 또는 개정판(2004)의 범위 내에서 취한다면 설계일반, 부재일반, 연결 등은 많은 부분 도로교설계기준(2000; 2004)의 규정을 따르게 될 것이다. 그러나 하중 분야는 케이블 교량의 지간 장대화과 동적 유연성 등을 감안할 때 수정이 불가피할 것이다. 특히 케이블과 관련된 항목이나 진동 등은 새롭게 추가가 되어야 할 것이다. 따라서 본 지침에서 가장 핵심적인 분야로 다루고 있는 것이 설계하중이다.

이하 주요 하중에 대해 기존 사례 및 중점 연구사항을 요약 정리하였다.

3.4.1 활하중

현황 및 기존 사례

도로교설계기준의 DB와 DL하중을 사용한다. DB하중은 표준트럭하중으로서 바닥

판과 바닥틀의 설계에 주로 사용되며 DL하중은 차로하중으로서 주케이블 및 보강형의 설계에 사용된다. 교량의 등급에 따라 하중의 크기가 다른데 장대교량에 주로 적용되는 1등급에 대한 하중강도는 그림 2와 같다. 재하 차선수에 따라 표 3과 같은 하중 감소율을 적용하고 있으나 지간 길이에 따라서는 별도의 보정을 가하지 않고 있다.

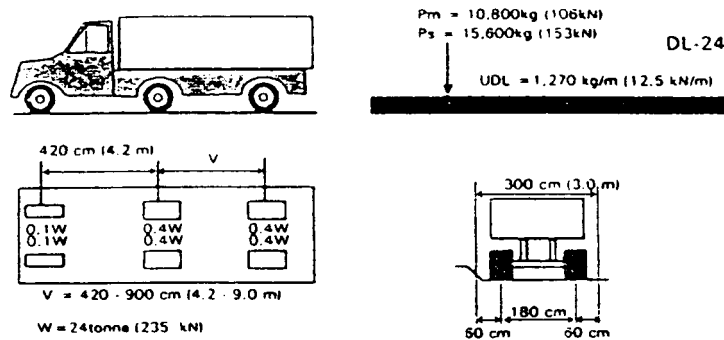


그림 2 DB 및 DL 하중

표 3 차선 수에 따른 하중 감소율

차선 수	하중 계수
1 또는 2	1.0
3	0.9
4 이상	0.75

주요 검토 사항

- DL-24를 200m 이상부터 줄임 (HBS 또는 BS)
- 보도하중도 200m 이상부터 줄임 (e.g. 60,000/L)
- 횡방향 재하는 multiple presence factor 보다는 주차선과 보조차선의 이원화 개념으로 접근

세부 사항

- Benchmarking test 수행중 - AASHTO (LRFD), BS, HBS, Eurocode
- 중소지간 교량 : 도로교설계기준이 다른 기준과 비슷한 수준의 활하중 효과 유발
- 장지간 교량(200m 이상) - 큰 하중효과 유발
- 기존 교량에 대한 각국 활하중 효과 검토 중
 - 사장교(서해대교, 470m) 등
 - 현수교(거금II교 설계안, 750m) 등

3.4.2 충격

현황 및 기존 사례

상부구조의 충격계수는 식 (1)에 따라 산정한다. 이 때 시간길이 L 은 일반적으로 영향선 해석을 통하여 해당 부재의 최대 단면력이 발생하는 분포하중의 재하길 이로 취하고 있다.

$$I = 15/(40 + L) \leq 0.3 \quad (1)$$

주요 검토 사항

- 충격계수 산정식은 도로교설계기준을 따름
- 시간장은 영향선 재하길로 함
- 행거 포함 현수교의 주케이블, 보강형, 주탑에는 충격을 고려하지 않음

3.4.3 풍하중

현황 및 기존 사례

도로교설계기준에 따르면 정적 설계를 위한 단위면적당 작용하는 풍하중 p 는 설계기준 풍속 V_d , 공기밀도 ρ , 항력계수 C_d 및 거스트 응답계수 G 를 사용하여 식 (2)에 의하여 구한다.

$$p = 1/2 \rho V_d^2 C_d G \quad (2)$$

항력계수는 부재별로 도로교설계기준에 따라 산정되며, 설계기준 풍속은 대상지역의 풍속기록과 구조물 주변의 지형 및 환경, 그리고 지상높이 등을 고려하여 합리적으로 산정하며 자료가 부족한 경우 식 (3)으로 추정할 수 있다.

$$V_d = 1.925(z/z_G)^\alpha V_{10} \quad (3)$$

여기서 기본풍속 V_{10} 은 재현기간 100년에 대한 최대풍속의 비초과확률 60%에 해당하는 개활지에서의 지상 10m의 10분간 평균풍속으로서 한국 내 지역별로 30~50 m/sec로 정의된 값이다.

주경간 길이가 200m 이상인 장대 특수교량의 설계에서는 이상의 정적 설계 결과

에 대하여, 동적해석과 풍동실험을 통하여 풍하중의 동적효과에 대한 교량의 제반 공기역학적 안정성을 검토하여야 하며 또한 가설단계에서의 내풍안정성에 대해서도 충분히 검토하도록 도로교설계기준에 규정되어 있다.

설계풍속과 설계풍하중의 산정에는 일본 본주사국연락교공단 설계기준을 원용하기도 하며 최근에는 영국 BS5400의 상향 풍하중 규정을 적용하는 예가 많다.

주요 검토 사항

- 기준풍속의 세분화 - 기본풍속, 설계기준풍속, 가설기준풍속, 한계풍속
- 정적풍하중 구체화
- 난류 특성 구체화 (버페팅 하중)
- 기본모드에 대한 구조감쇠 추정 값 제안
- 영각별 한계풍속 저감안 제시
- 단면모델에 대한 풍동실험 시 추출해야 하는 계수 명시
- 공탄성해석으로 전교모형실험을 대체 (중소규모 케이블 교량)
- 사용성 및 진폭 기준 제시

세부 사항

- 거스트 응답계수의 적정 안 또는 고려 방안 검토 중
- 기본풍속 검토 중
- 풍동실험 상사율 제시 여부 검토 중

3.4.4 지진하중

현황 및 기존 사례

중약진 지대에 속하는 한국에서는 1980년대 초반까지는 내진설계가 고려되지 않았지만 그 이후에는 도로교설계기준 및 내진설계 성능기준(안)에 의거하여 내진설계가 수행되고 있다. 완성계의 교량에 대해서는 재현주기 1000년의 지진에 대해 붕괴방지수준으로 설계되며 내진 1등급이 주로 적용되어 위험도 계수를 1.4로 하고 있다. 가설시에는 재현주기 100년에 대해 기능수행수준으로 설계되며 위험도 계수는 0.57을 사용하고 있다. 다중모드 응답스펙트럼법이 주로 적용되며 지진파의 시간지연 및 상관도 손실을 고려하기 위한 다중지지 효과 와 SSI 효과를 고려하기 위해서 시간영역 해석법이 적용되는 경우도 많다. 주탑의 내진설계 시에는 성능스펙트럼법에 의한 비탄성 영역의 거동특성도 검토되고 있다.

주요 검토 사항

- ASD에 따라 기능수행수준 지진(재현주기 100년)에 대해 설계

- 허용응력 증가계수=1.5
- 다중모드스펙트럼해석법 적용
- 가설시에도 검토
- 붕괴방지수준의 지진(재현주기 1,000년)에 대한 performance를 검토
 - Damage level을 정의
 - 시간이력해석법 적용(전체 교량시스템에 대한 해석)
 - Stability 확보 우선
- 가속도계수, 위험도계수, 지반분류, 내진등급은 도로교설계기준을 따름
- 상부, 하부 구조별감쇠비를 고려한 모드별감쇠비 산정 방안 제시
- 다지점 해석 등 시간이력해석법 규정(모델링 방안 제시)

세부 사항

- ASD 내에서 performance based design 개념을 보완할 수 있는 최선의 방안 모색 중
- 주탑을 포함한 구성 부재별 allowable damage level 설정 검토
 - 탄성거동 또는 소성변형(소성율) 크기 설정
 - Stability 확보 방안 등을 검토 중

3.4.5 케이블 관련

검토 현황

허용응력에 대해서는 도로교설계기준을 따르되 PTI Recommendation에서 제시하고 있는 주하중 조합시는 $0.45f_{pu}$, 케이블 가설 및 교체시는 $0.56f_{pu}$ 를 적용하기도 한다. 케이블 피로규정은 Walther의 제안식, 일본 본주사국연락교공단 기준, PTI Recommendation의 규정을 상호 비교 후 안전측의 설계를 수행하는 것이 일반적이다. 케이블 진동의 평가 및 제진에 대해서는 필요 감쇠율을 확보할 수 있도록 다양한 방법을 검토하며 특히 풍우진동 검토를 위해 케이블 표면의 형상에 따라 PTI Recommendation이나 기타 제안식을 활용하고 있다.

주요 검토 사항

- 케이블 피로는 PTI 규정(ASD)을 따르는 것으로 함
- 케이블 허용응력은 현실적으로 적합한 수준으로 변경
- 케이블 교체는 1차선 통제로 검토함(허용응력 25% 할증)
- 케이블 파단은 전차선 활하중 재하로 검토(허용응력 33% 할증)
- 새들, 정착구, 행거밴드 등 구조세목 설계법은 detail을 가급적 피하고 상세

- 해석 후 응력집중을 어떻게 처리할 지에 대해 언급함
- 케이블에 대한 품질관리와 시험방법에 대한 기준을 제시함

세부 사항

- 사장교(2.2), 현수교(2.5), 행거용 로프(3.0)의 안전률을 검토 중
- 일본의 경우, JIS와 별도로 HBS(본사국기준) G 3501~3508을 규정 -> 부록 등에 KS를 보완할 규격을 제시하는 방향으로 검토 중

3.4.6 진동 및 제진

주요 검토 사항

- PTI 및 Cable Stays (CIP, recommendations of French interministerial commission on Prestressing)의 기준을 참고
- 바람에 의한 진동 (와류, 갤로핑, 풍우) 검토식 제안
- 지점가진에 의한 진동 검토식 제안 - 버페팅 해석과 연계
- 진동제어 설계법 제시
- 공기역학적 방법 (형상변화)
- 감쇠 증가에 의한 방법 (댐퍼) - 케이블 형식 별 구조감쇠율 제시
- 고유진동수 변화에 의한 방법 (보조케이블)

세부 사항

- 검토식이 너무 보수적이라 대부분 댐퍼 설치하게 됨 -> 해설에 제시
- 설계자는 댐퍼 설치 가능한 공간을 제공하되 parametric 진동 발생 여부를 검토하도록 하고
- 댐퍼의 설치는 공용 후 관리주체가 최종 결정할 수 있는지 검토 중

3.5 연구진 구성

연구진은 크게 두 그룹으로 구성되어 있다. 책임연구진은 초안 작성과 모의 설계를 통한 적용성을 검토한다. 참여연구진은 실무 경험이 풍부한 전문가를 위주로 구성되어 있으며 초안의 검토 및 보완, 현업 적용 시 발생 가능한 문제점을 검토한다. 현재 연구진을 그림 3에 나타내었으며 필요한 경우 탄력적으로 연구원을 보강하고 있다.

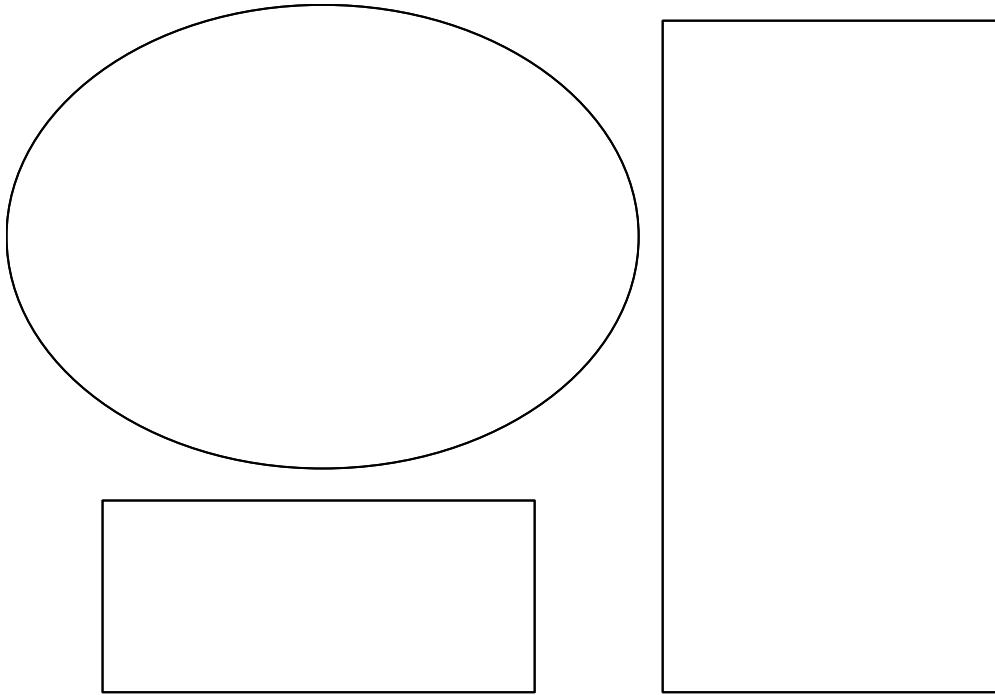


그림 3 연구진 구성

3.6 추후 일정

각 설계하중 별 초안 완성도는 분야별로 차이를 보이고 있다. 2004년 3월 중간보고서 제출 시를 초안 작성 시점으로 연구를 수행 중이다. 다만, 설계하중을 제외한 분야나 설계하중 중에도 실교량 해석 등을 통해 이론적 배경을 축적해야 하는 분야는 초안 작성에 보다 많은 시간이 필요할 것으로 예상된다. 후반기(2004.04 ~ 2005.06) 연구 추진은 실무 전문가 그룹(참여 집필진)에 의한 보완 연구와 더불어 그 간 필요성이 대두된 변수연구를 추가로 수행하여 지침의 근거자료를 확보하고 완성도를 제고할 예정이다. 특히 책임 집필진은 후반기 연구 기간 동안 기존 교량에 대해 지침 규정을 실교량 예제에 적용해 봄으로써 지침안의 문제점을 검토하고 실무 적용성을 제고할 계획이다.

4. 발전방향

본 연구의 성과물로 제출될 『케이블 강교량 설계지침』은 도로교설계기준과 같은 절대적 규정이라기 보다는 설계의 합리성을 높이기 위한 가이드라인의 성격으로 이해되어야 할 것이다. 제안될 설계지침이 케이블교량 건설 기술과 함께 올바르게 정착되기 위해서는 본 연구의 진행 중 또는 종료 후에도 지속적인 보완 노력이 필요할 것이며 구체적으로 다음과 같이 제안해 본다.

- 완성도 및 현업 적용성 제고
 - 초안 완성 후 실교량 또는 턴키 설계안에 대해 연구원 별 적용성 검토
 - 문제점 파악 및 보완 대책 토의 (참여 연구원과 협의)

- 지침의 활용
 - 사장교 및 현수교의 합리적 설계를 위한 실무 지침으로 활용
 - 기존 케이블교량의 성능평가 및 유지관리에 활용
 - 외국 설계사의 국내 프로젝트 참여시 국내 기준으로 활용
 - 건교부 심의가 필요한 설계기준으로의 발전을 위한 토대 구축

- 공인 지침을 위한 공론화 과정
 - 총괄연구팀과 집필진 외에 설계, 시공, 제작사 전문가 등 폭 넓은 전문가 그룹을 구성 (기존 참여연구진 활용 및 필요 시 보강)
 - 전문가 그룹에 건교부 담당 기술공무원을 영입
 - 예상 문제점 토의 및 지침(안)의 수정 방향 도출
 - 지침의 영속성을 위한 대한토목학회 강구조위원회 및 IABSE 한국지회 내에 케이블교량 소위원회 구성/운영 가능성 타진
 - 2004년 대한토목학회 학술발표회에 특별세션 운영

5. 결론

향후 10여년간 다수의 케이블교량이 설계·시공될 계획이나 현재까지 별도의 설계 기준 또는 지침이 없어 공인된 기준의 개발이 시급하다. 본 지침이 연구되는 과정을 통해 공인된 기준 제정의 연구 기반이 확보될 필요가 있으며, 비록 지침이지만 대한토목학회의 이름으로 발행됨을 감안할 때 직·간접적으로 파급효과가 클 것이며 당분간 케이블 강교량 설계의 표준 지침으로 활용될 것으로 판단된다.

따라서 상반기 연구를 통해 초안이 작성되면 관련 전문가들의 충분한 검토를 거쳐 완성도를 보완해야 할 것이다. 특히 책임 연구진들은 하반기 연구 기간동안 실교량 설계 예를 다뤄 제안된 지침 안의 적용성을 검증하여야 할 것이며 이를 통해 기술교육 및 홍보에 주력할 필요가 있다. 무엇보다도 케이블교량을 직접 설계, 제작, 시공, 유지관리하는 대다수 엔지니어가 공감할 수 있는 지침이 될 수 있도록 최선의 노력을 경주해야 할 것이다.

참고문헌

한국도로교통협회 (2000), 도로교설계기준.

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (1998), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.

BSI (British Standards Institution) (1978), British Standard - Steel, concrete and composite bridges, Part 2: Specification for loads (BS5400-2).

HBA (Honshu-Shikoku Bridge Authority) (1989), Design Specification and Commentary for Superstructure.

PTI (Post-Tensioning Institute) (1993, 2001), Recommendations for stay cable design, testing and installation.

표 3 한국의 대표적 케이블 강교량(강합성형교량 포함)의 주요 설계하중 비교

구분	진도/돌산대교	서해대교	영종대교	영흥대교	광안대교	삼천포대교	제2진도대교
연도	1984	2000	2000	2001	2002	2003	2006(예정)
형식	강박스 사장교	강합성형 사장교	복층 트러스 현수교	강박스 사장교	복층 트러스 현수교	강합성형 사장교	강박스 사장교
경간구성 (m)	70+344+70/ 85+279.5+85	60+200+470+ 200+60	125-300-125 (자정식)	110+240+110	200-500-200	103+230+103	74+344+74
활하중	HS-20-44(AASHTO)	DB24/DL24	DB24/DL24/Q25	DB24/DL24	DB24/DL24	DB24/DL24	DB24/DL24
충격	15.24/(38+L)≤0.3	15/(40+L)≤0.3	미고려	15/(40+L)≤0.3	미고려	15/(40+L)≤0.3	15/(40+L)≤0.3
풍하중	BS5400	본사국규정 상향풍하중 미고려	본사국규정 상향풍하중 미고려	본사국규정 상향풍하중 미고려	본사국규정 상향풍하중 미고려	도로교설계기준 상향풍하중 고려	본사국규정 상향풍하중 고려
온도변화	BS5400 변화범위는 한국시방 서 적용	도로교설계기준 케이블과 타부재 온 도차 ±10°C (PTI)	15°C ±35°C	도로교설계기준 케이블과 타부재 온 도차 미고려	도로교설계기준	도로교설계기준 케이블과 타부재 온 도차 (-25~+45°C)	도로교설계기준 케이블과 타부재 온도 차 ±8°C (PTI)
지진하중	고려하지 않음	도로교설계기준	기본가속도 140gal	도로교설계기준	도로교설계기준	도로교설계기준	도로교설계기준
지점이동	고려하지 않음	-탑기면 회전각 (1.8L/H*10 ⁻⁴ rad) -지점침하(1cm)	-탑기면 회전각 (1.3L/H*10 ⁻⁴ rad) -축경간 지점침하 (L1/1,000m)	-탑기면 회전각 (1.8L/H*10 ⁻⁴ rad) -축경간 지점침하 (L1/1,000m)	-탑기면 회전각 (1.8L/H*10 ⁻⁴ rad) -앵커 새들 (δ=0.02L(cm))	-탑기면 회전각 (1.8L/H*10 ⁻⁴ rad) -지점침하(1cm)	-탑기면 회전각 (교축1.8L/H*10 ⁻⁴ rad) (교직0.9L/H*10 ⁻⁴ rad) -지점침하(1cm)
제작 및 가설오차	고려하지 않음	교축방향 탐정변위 (H/2,000)	교축방향 탐정변위 (H/2,000) 수직새그(L/10,000)	교축방향 탐정변위 (H/2,000)	교축방향 탐정변위 (H/2,000) 수직새그(L/10,000)	교축방향 탐정변위 (H/2,000)	교축방향 탐정변위 (H/2,000)
케이블교체 및 끊어짐	검토	검토(PTI)	관련 없음	고려하지 않음	관련 없음	검토(PTI)	검토(PTI)

