

출렁다리 설계 가이드라인

2021. 4.



국 토 교 통 부

목 차

제 1 장 총 칙	2
1.1 일반사항	2
1.2 용어	2
1.3 기호	3
1.4 설계 원칙	4
1.5 출렁다리의 구조형식	8
1.6 품질보증 요건	8
1.7 설계도에 기재할 사항	8
1.8 기록	8
1.9 관련기준	8
 제 2 장 계 획	12
2.1 일반사항	12
2.2 계획 요건	12
2.3 지반조사	12
2.4 형식 선정	12
2.5 계획 일반	13
2.6 교량 미학	16
 제 3 장 하중 및 하중조합	18
3.1 일반사항	18
3.2 하중조합	18
3.3 하중	19

제 4 장 구조 해석	24
4.1 일반사항	24
4.2 구조해석법	24
4.3 정적 해석	24
4.4 동적 해석	25
 제 5 장 부재일반	 28
5.1 일반사항	28
5.2 케이블재료	28
5.3 주케이블	28
5.4 행어케이블	28
5.5 케이블의 방식	29
5.6 탑	29
5.7 앵커리지	29
5.8 거더	30
5.9 바닥판	30
5.10 내풍케이블	30
5.11 난간	31
5.12 새들(Saddle)	31
5.13 케이블밴드	31
5.14 케이블정착구	31
 제 6 장 내풍 설계	 34
6.1 내풍설계 일반	34

6.2 풍속 및 난류특성	34
6.3 정적 풍하중	38
6.4 바람에 의한 진동	39
6.5 동적풍하중	40
6.6 풍동실험 및 해석	40
6.7 한계상태와 하중계수	41
 부록 A. 진동 사용성 검토	 46
A.1 일반사항	46
A.2 진동사용성 검토 절차	46

표 목 차

해설 표 1.4.1 설계 수명(ISO 2394)	4
해설 표 1.4.2 명시적인 설계 수명(Eurocode)	5
해설 표 1.4.3 파괴/사고 결과에 따른 등급(Eurocode 0)	5
해설 표 1.4.4 신뢰도지수의 최소 추천값(극한한계상태) (Eurocode)	6
표 3.3.1 보행하중	19
표 3.3.2 기존설계기준 및 지침의 보행하중	20
표 4.3.1 설계 목적별 감쇠비	26
표 6.2.1 지표조도구분에 따른 풍속 프로파일 매개변수	35
해설 표 6.2.1 지역별 풍속환산계수	37
표 A.2.1 보행교의 진동사용성 등급	47
표 A.2.2 보행교의 쾌적 수준	47
표 A.2.3 수직 진동에 대한 가속도 범위(m/s^2)	48
표 A.2.4 수평 진동에 대한 가속도 범위(m/s^2)	48
표 A.2.5 수직과 종방향 진동의 공진 위험 범위	49
표 A.2.6 수평방향 진동의 공진 위험 범위	49
표 A.2.7 보행교의 통행 상태	50
표 A.3.1 보행자 서비스 수준	52

그 림 목 차

그림 2.5.1 기초의 여유공간 및 경사지반 기울기	14
그림 3.3.1 설계기준 별 보행하중 비교	21
그림 6.2.1 지표조도구분을 위한 참조지역	36
그림 A.2.1 진동 사용성 검토 절차	46

제 1 장

총 칙

제 1 장 총 칙

1.1 일반사항

이 가이드라인은 출렁다리의 설계에 필요한 기본적 사항을 제시한 것이다. 대상 교량은 주요 하중을 케이블로 지지하고, 흔들림이 발생하는 다양한 형식의 보행자 전용 교량이다. 발주자 또는 설계자는 출렁다리의 창의적 설계를 위해 이 가이드라인에서 기술하고 있는 요구조건보다 높은 수준의 설계나 재료 및 시공의 품질을 요구할 수 있다.

출렁다리는 공원, 녹지, 유원지, 공공공지 등에서 관광 또는 놀이, 체험을 주목적으로 한다. 설치 위치별 사용 목적에 따라 통행 대상과 적용 기준에 대해 발주자의 판단에 따라 적절한 조정을 할 수 있다.

[해설]

이 출렁다리 설계 가이드라인은 교량설계 기술자들이 출렁다리로 통칭되는 케이블 지지 보행교를 설계하는데 필요한 주요 사항들을 제시한다. 이 가이드라인의 규정들은 기준서와 같은 구속력을 가지는 것은 아니며, 설계 실무자들이 케이블 지지 교량의 이론적 배경을 가지고 올바르게 설계 실무에 적용할 수 있도록 도움을 주는데 초점을 맞추었다. 기본적으로 상위 기준인 도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량편(2018)과 KDS 건설기준을 따르도록 하되, 출렁다리에 특화된 별도의 규정들만을 제시하고자 하였다. 다만, 출렁다리에 대한 최초의 설계가이드라인인 만큼 실무에 적용하는데 있어 부족한 부분이 있을 수 있다. 특히 이 가이드라인의 내용 중 하중 및 하중계수, 이에 따른 신뢰도, 진동, 피로, 내풍설계 세목 등은 향후 연구개발을 통해 지속적으로 검증 및 보완이 필요한 부분이다. 특히 출렁다리만의 특성을 반영한 보행하중 및 풍동실험관련 데이터 확보와 신뢰성해석을 통한 계수 조정, 극한하중상태에서의 대변위 해석, 진동 사용성 평가 등의 추가적인 연구를 통하여 관련 규정들을 보다 정밀한 안으로 개선해 나갈 필요성이 있다.

이 가이드라인의 대상이 되는 교량은 출렁다리, 흔들다리, 하늘다리, 구름다리 등 다양한 명칭으로 불리는 유연한 보행교, 즉 케이블부재에 의해 지지되며 보행시 흔들림을 허용하는 보행자 전용의 교량이다. 이 가이드라인에서는 이러한 교량을 총칭하여 “출렁다리”라는 용어를 사용하고 있다. 이 가이드라인의 대상이 되는 교량 형식은 주로 현수교 형식이다(1.5 참조).

출렁다리는 도로교나 일반적인 보행교에 비하여 고정하중 대비 활하중의 비율이 상대적으로 크고, 활하중(보행하중)에 의한 변위, 처짐 및 진동이 크게 발생한다. 이러한 구조 거동의 특성때문에 출렁다리 설계시 대변위 해석이나 기하학적 비선형성을 고려한 해석이 필요하며, 일반적인 보행교에 적용되는 진동 사용성 기준을 그대로 적용하기 어렵다.

1.2 용어

보행하중

보행자가 발생시키는 활하중

사용수명

출렁다리가 사용될 것으로 기대되는 기간

설계수명

하중, 부재 강도 등 물리적 상수들의 통계적 산출 근거 기간으로 이 가이드라인의 경우 50년

출렁다리

보행자 전용교량의 한 종류로서 케이블에 의해 지지되며 보행시 흔들림이 발생하는 보행교
중력식 앵커리지

인장을 받는 강재의 재단부분을 콘크리트 등에 묻어 넣어 인발 등이 생기지 않도록 정착시키는 구조물

지중식 앵커리지

인장을 받는 강재의 재단부분을 인발 등이 생기지 않도록 직접 견고한 암반에 정착시켜 암반 블록
 썰기의 자중과 마찰로 케이블 하중을 저항하는 방식의 구조물

통행제한풍속

강풍에서 보행자의 안전을 확보하기 위해 보행자의 통행을 제한하는 풍속. 이 가이드라인에서는 교
 면상 10분 평균 풍속 10m/s를 의미함. 그러나 통행제한풍속을 별도로 결정한 교량의 경우에는 그
 풍속을 적용

기하비선형해석

케이블을 주 부재로 하는 구조 형식에서 하중에 의한 부재 기하강도와 대변위에 따른 비선형 효과
 를 고려한 해석

초기평형해석

케이블을 주 부재로 하는 출렁다리에서 고정하중에 의해 케이블에 강성이 도입 되어 교량이 목표
 선형을 갖는 정적평형상태를 결정하기 위한 해석

평행소선케이블 (PWC)

5mm 또는 7mm 도금된 소선을 평행하게 집속시킨 케이블로서 피복을 두지 않는 PPWS와 피복을
 가지는 NPWS 케이블이 이에 속한다.

평행연선케이블 (PSC)

소선을 7~19가닥을 꼬아 만든 강연선을 개별 정착시키거나 여러 개를 집속시켜 구성하는 케이블

스파이럴로프 (spiral rope)

심선 주변에 여러 층의 소선을 꼬아 만든 것으로 둥근 소선만으로 구성된 케이블

록코일로프 (LCR, locked coil rope)

스파이럴로프를 중심에 배치하고, 외층에 이형선(Z형상)을 1층씩 역방향으로 2~5층 교대로 배치한
 케이블로서 단면 외형이 완전한 원 형상의 케이블

1.3 기호

L	보행하중 재하길이(m)
$P(x,t)$	보행자 1인 이동시 교량 교축 방향 위치 x 와 시간 t 에 따른 보행하중크기 (N)
$F(t)$	보행자 1인 보행하중의 시간 이력을 나타내기 위한 주기 함수 (N)
G_0	보행자 1인의 대표 정적 하중 크기 (N)
f_m	보행자 1인의 보행 진동수 (Hz)
B_R	대표길이(m): 데크의 경우 폭 또는 높이(m)
C_D	항력계수
C_{SF}	안전계수
ρ	공기밀도 (1.225kg/m ³)
V_D	설계기준풍속

V_{cr}	한계풍속
G	거스트계수

1.4 설계 원칙

1.4.1 설계 목표

출렁다리는 다음 설계 목표를 기본적으로 만족하면서 설치 목적에 부합하도록 설계한다.

- (1) 구조적 안전성 및 사용성
- (2) 기능성
- (3) 주변경관에 어울리는 구조미
- (4) 시공 및 경제성
- (5) 유지관리 용이성

출렁다리는 처짐과 비틀의 변형과 진동을 어느 정도 허용하되 최소한 보행자의 안전한 보행을 확보하여 보행자의 전도나 추락을 방지할 수 있도록 설계 되어야 한다. 또한 이를 보장하기 위한 구조 형식, 재료 강도, 부속 시설 등을 확보하여야 한다. 출렁다리는 이러한 설계 목표를 달성하기 위하여 규정된 한계상태에 대하여 설계하여야 한다. 또한 진동을 포함한 사용성, 점검의 편의를 위한 유지 관리 용이성, 시공성, 경제성 및 구조미를 확보하여야 한다.

[해설]

이 가이드라인에서 출렁다리는 원칙적으로 설계수명 50년, 주요 부재의 극한한계상태에 대해 일반 부재는 목표신뢰도지수 3.7(파괴확률= 10^{-4}), 주 케이블 부재는 목표신뢰도 지수 6.7(파괴확률= 10^{-11})을 기준으로 한다. 이 가이드라인의 설계수명 50년은 하중, 부재 강도 등의 통계적 산출 근거 기간으로서 설계자가 보장해야 할 사용수명은 아니며 교체 가능한 부재의 사용수명은 부재별로 다를 수 있다. ISO 2394 (1998) General Principles on Reliability for Structure에서는 구조물의 설계수명(Design working life)을 해설표 1.4.1과 같이 규정하고 있다. Eurocode 0 Basis of structural design(EN 1990)에서도 해설표 1.4.2와 같이 설계(사용)수명을 규정하고 있다.

해설 표 1.4.1 설계수명(ISO 2394)

Design working life category	Indicative design working life(years)	Examples
1	1~5	Temporary structures
2	25	Replaceable structural parts
3	50	Building structures and other common structures
4	100 or more	Monumental buildings, important structures, large bridges

해설 표 1.4.2 명시적인 설계 수명(Eurocode)

Design working life category	Indicative design working life(years)	Examples
1	10	Temporary structures
2	10 ~ 25	Replaceable structural parts, e.g. gantry girders, bearings
3	15 ~ 30	Agricultural and similar structures
4	50	Building structures and other common structures
5	100	Monumental building structures, bridges, and other civil engineering structures

이상의 규정들을 고려할 때 출렁다리의 설계수명은 대략 30~50년 정도로 정하는 것이 적절한 것으로 판단되며, 이 가이드라인에서는 50년으로 정하였다. 참고로 우리나라의 일반적인 도로교는 100년, 케이블교량은 그 중요도에 따라 100년 또는 200년을 설계수명으로 하고 있다. Eurocode에서는 교체 가능한 부재의 수명을 10~25년으로 규정하고 있으며, 교체 가능한 부재의 또는 부속장치의 수명과 목표신뢰도 수준 등은 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량편(2018)을 참조한다. 출렁다리의 목표신뢰도지수는 다음과 같은 사항들을 고려하였다. Eurocode 0 Basis of structural design(EN 1990)에서는 구조물의 등급을 파괴 혹은 사고의 결과 심각성에 따라 해설표 1.4.3과 같이 분류하고 있으며, 이에 따른 신뢰도등급을 해설표 1.4.4와 같이 규정하고 있다.

해설 표 1.4.3 파괴/사고 결과에 따른 등급(Eurocode 0)

Consequences Class	Description	Examples of buildings and civil engineering works
CC3	High consequences for loss of human life, economic, social or environmental consequences very great	Grandstands, public buildings where consequences of failure are high (e.g. a concert hall)
CC2	Medium consequences for loss of human life, economic, social or environmental consequences considerable	Residential and office buildings, public buildings where consequences of failure are medium (e.g. an office building)
CC1	Low consequences for loss of human life and economic, social or environmental consequences small or negligible	Agricultural buildings where people do not normally enter (e.g. storage buildings), greenhouses

해설 표 1.4.4 신뢰도지수의 최소 추천값(극한한계상태) (Eurocode)

Reliability Class	Minimum values for β	
	1 year reference period	50 years reference period
RC3	5.2	4.3
RC2	4.7	3.8
RC1	4.2	3.3

국내의 도로교설계기준의 경우 일반 도로교의 경우에는 100년 기준 3.7(파괴확률 10^{-4}), 케이블교량의 경우에는 1등급(중요)교량 3.7(파괴확률 10^{-4}), 특등급(매우 중요)교량 4.0(파괴확률 3.16×10^{-5})으로 규정하고 있다.

출렁다리의 경우 인명피해 측면에서는 최소 일반교량 또는 케이블교량의 1등급 수준으로 간주하는 것이 적절한 것으로 판단되며, 설계수명 50년 기준으로 극한한계상태에 대한 주요 부재 목표신뢰도를 3.7 (파괴확률 10^{-4}), 주 케이블 부재는 목표신뢰도 지수 6.7(파괴확률= 10^{-11})로 규정하였다. 다만 설계수명과 목표신뢰도 수준은 발주기관 또는 관리기관의 판단에 따라 적절한 조정을 할 수 있다.

1.4.2 한계상태

이 설계 가이드라인의 규정은 하중 저항계수 설계법(LRFD 방법)을 적용하였다. 별도의 규정이 없는 한 교량의 각 구성요소와 연결부는 각 한계상태에 대하여 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량(2018)편의 규정을 따른다.

1.4.3 시공 및 경제성

출렁다리는 시공에 앞서서 경제적 타당성을 검토할 수 있는 수준의 계획 설계를 수행해서 시공 및 경제성을 분석하는 것이 필요하다. 특히, 비용 분석에는 교량 건설 시점의 비용뿐만 아니라 교량의 생애주기를 고려한 비용도 포함해야 한다.

1.4.4 유지관리

설계시부터 유지관리가 어려울 것으로 예상되는 구조계는 배제하도록 한다. 출렁다리의 데크와 난간 등 구조시스템의 특성, 기후와 사용조건에 따라 교량 사용수명 이전에 교체할 필요가 있는 부재들은 설계서에 교체를 명시하거나 또는 구조적 보강을 제시해야 한다.

[해설]

앵커리지와 주케이블 등 사용기간동안 교체가 불가능한 부재를 제외한 교체 또는 보수 가능한 부재나 부속시설들은 향후 교체 또는 보수작업이 가능하도록 설계단계에서 충분히 고려하여야 한다.

1.4.5 내진 설계

- (1) 출렁다리 내진 설계는 KDS 17 00 00 을 따른다.
- (2) 출렁다리의 내진등급은 내진II등급으로 하되 발주자의 요구나 중요도에 따라 상위등급을 적용할 수 있다.

(3) 출렁다리의 내진성능수준은 붕괴방지수준을 원칙으로 한다.

1.4.6 진동

출렁다리의 진동은 일반적인 보행교에 적용되는 기준을 만족하지 않을 수 있다. 발주자가 요구하는 경우 진동 사용성의 평가는 부록 A의 검토 절차를 따를 수 있다.

[해설]

출렁다리의 진동은 사용성의 문제이며 진동의 주원인은 사람의 보행과 바람이다. 이 규정에서는 보행자에 의한 진동을 다루고 있으며 바람에 의한 진동은 이 가이드라인의 6장을 따른다.

출렁다리의 진동은 보행자가 매우 불편하거나 안전에 위협을 느끼지 않을 정도로 제어되어야 하지만, 현 시점에서 4.6의 동적 해석의 정확성이나 진동의 한계값에 대하여서는 추가적인 연구가 필요하다. 국내의 여러 출렁다리(지간 140~220 m)에 대해 보행자의 보행에 의한 실험에서는 최대수직가속도의 경우 1인 보행시 $0.65 \sim 2.68 \text{ m/s}^2$, 여러 명의 보행(4인 ~ 40인)의 경우 $2.52 \sim 6.8 \text{ m/s}^2$ 정도 나타났다. 최대수평가속도의 경우에는 1인 보행시 $0.14 \sim 1.8 \text{ m/s}^2$, 여러 명의 보행(4인 ~ 40인)의 경우 $0.4 \sim 4.74 \text{ m/s}^2$ 정도 나타났다. 또한 한 출렁다리에 대해 일반 보행자들에 의한 하루 동안의 상시 계측실험에서는 최대수직가속도 4.7 m/s^2 , 최대수평가속도는 0.68 m/s^2 정도 계측되었다. 이러한 진동의 크기는 Setra(2006)에서 제시하고 있는 일반적인 보행교에서 쾌적한 보행을 위한 가속도의 최대값을 초과하고 있으며, 현 단계에서 출렁다리에 적용할 수 있는 가속도의 제한값을 제시하는 것은 어렵다. 추가적인 연구를 통하여 보행자의 안전을 보장하는 정도의 제한값을 도출하는 것이 필요하다. 이 가이드라인의 부록 A에 일반적인 보행교에 대한 진동 검토 방법이 기술되어 있다.

1.4.7 진동 제어

보행하중, 바람, 지진 등에 의한 출렁다리의 진동을 제어하여 출렁다리의 사용성과 안전성을 높이기 위한 방법으로 감쇠장치(damper)등 과 같은 진동 제어 장치를 사용할 수 있다. 진동 제어 장치의 설계와 제작, 시공 및 성능 평가에 대해서는 발주처가 승인한 설계 및 평가 기준을 따른다.

1.4.8 피로 한계상태

피로한계상태는 예상되는 피로하중의 효과를 피로한계 보다 낮게 유지할 수 있도록 하여야 한다. 모든 부재, 볼트 그리고 용접상세의 응력범위는 식(1.4.1)을 만족해야 한다.

$$\gamma(\Delta f) \leq (\Delta F) \quad (1.4.1)$$

여기서 Δf 는 보행하중 및 풍하중으로 인한 공칭응력범위, ΔF 는 공칭피로강도, 그리고 γ 는 무한수명에 대한 하중계수로서 1.0을 사용한다.

출렁다리는 부재의 크기가 작아 피로균열 발생 후 파단에 이르는 시간이 짧고 파단 시 인명의 피해가 예상되므로 피로균열의 발생을 허용하지 않는 무한수명에 대해 설계한다. 공칭피로강도는 KDS 14 31 20 (4.1.2.3) 표 4.1-1의 일정 진폭 피로한계값을 적용한다. 케이블 부재의 일정 진폭 피로한계값은 도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량편의 값을 적용한다.

이 규정은 순인장응력을 받는 상세에만 적용한다. 하중계수를 적용하지 않은 고정하중이 압축응력을 발생시키는 부분의 경우, 보행하중 및 풍하중으로 인한 인장응력이 고정하중으로 인한 압축응력보다 큰 경우에만 피로문제를 고려한다.

[해설]

무한수명에 대해 설계하는 것은 상세에 피로균열이 발생하지 않도록 하는 것을 의미한다. 따라서 부재 파단에 이르기까지의 피로수명과 피로하중의 빈도를 고려할 필요가 없다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 피로상세에서 피로하중으로 인해 발생하는 공칭응력범위를 KDS 14 31 20 (4.1.2.3) 표 4.1-1의 일정 진폭 피로한계값 보다 낮게 유지해야 한다.

1.5 출렁다리의 구조형식

출렁다리는 주로 관광을 목적으로 설치되므로 산악 및 계곡부 접근통로, 정상 부근의 전망시설, 해안 및 도서지방의 해안둘레길, 동굴 탐험로 등의 다양한 통행시설에 활용되고 있다. 이 가이드라인의 규정을 적용하는 출렁다리는 일반교량에 비하여 케이블 의존도가 높고 거더의 휨강성이 작게 되므로 보행자가 체감할 수 있는 어느 정도의 흔들림이 발생하는 구조형식이다.

[해설]

출렁다리는 가볍고 유연한 구조로 이루어져 있으며, 여러 다양한 형식을 적용할 수 있다. 주요 구조형식은 데크가 케이블에 의해 지지되는 현수교의 형식이나 그 외 다양한 구조형식이 가능하다. 현수교 형식의 출렁다리는 (1) 주탑의 유무와 개수, (2) 평면 형식, (3) 거더 또는 바닥프레임의 종방향 강성 유무, (4) 케이블의 정착 방식 등에 따라 분류할 수 있다.

관광 목적으로 설치되는 보행자 전용 교량에는 현수교 형식 이외에 여러 가지 다른 형식, 예를 들어 사장교, 아치교, 스트레śli본교 형식 등을 적용할 수 있다. 어떠한 구조 형식을 갖든 교축방향 거더의 휨 강성이 작거나 없는 경우에는 출렁다리로 간주할 수 있고 이 가이드라인을 적용할 수 있다. 또한 이 가이드라인의 적용 대상이 아닌 보행자 전용의 교량이라도 발주자의 판단에 따라 이 가이드라인의 관련 규정을 참고하여 적용할 수 있다.

1.6 품질보증 요건

KDS 24 10 11(1.5)의 규정을 따른다.

1.7 설계도에 기재할 사항

KDS 24 10 11(1.6)의 규정을 따른다.

1.8 기록

KDS 24 10 11(1.7)의 규정을 따른다.

1.9 관련기준

이 가이드라인은 아래와 같은 도로교 관련 기준과 보행시설물 관련 법령을 기준으로 작성하였다.

- KDS 14 31 20 : 2017 강구조 피로 및 파단 설계기준(하중저항계수설계법)
- KDS 17 00 00 : 2018 내진 설계기준
- KDS 24 10 11 : 2018 교량설계 일반사항(한계상태설계법)

- KDS 24 12 11 : 2018 교량 설계하중조합(한계상태설계법)
- KDS 24 12 21 : 2018 교량 설계하중(한계상태설계법)
- KDS 24 14 21 : 2018 콘크리트교 설계기준(한계상태설계법)
- KDS 24 14 31 : 2018 강교 설계기준(한계상태설계법)
- KDS 24 14 51 : 2018 교량 하부구조설계기준(한계상태설계법)
- KDS 24 17 11 : 2018 교량내진 설계기준(한계상태설계법)
- KDS 24 90 11 : 2016 교량 기타시설설계기준(한계상태설계법)
- 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량편(2018)
- KS C IEC 62305 피뢰시스템
- 도시계획시설의 결정·구조 및 설치기준에 관한 규칙 (국토해양부령 2010.01)
- 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 (국토해양부령 2015. 07)
- 자전거 도로 시설기준 및 관리지침 (국토해양부 2016. 01)
- 장애인·노인·임산부등의 편의증진보장에 관한 법률 시행규칙 (보건복지가족부령 2012. 09)
- 시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침 (국토교통부, 2018.01)
- 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단 편)(국토교통부, 2018.06)
- 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)(국토교통부, 2018.06)
- 시설물 설계 시공 및 유지관리 편람 - 소규모강교 및 보도육교: 보도육교편 (서울특별시, 2001)
- 케이블강교량설계지침(대한토목학회, 2006)
- 장대교량용 케이블소재 적용 지침(2008)
- 도로용량편람(국토해양부, 2013)
- 신뢰도기반 하중-저항계수 (기문당, 이해성, 2019)
- AASHTO LRFD GUIDE SPECIFICATIONS FOR THE DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGES (2009)
- AASHTO LRFD Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaires, and Traffic Signals (2015)
- Footbridges : Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading, Setra Technical guide (2006)
- Human induced Vibrations of Steel Structures, Design of Footbridges Background Document, RFS2-CT-2007-00033, Research Fund for Coal and Steel (2006)
- Design of Lightweight Footbridges for Human induced Vibrations, JRC Scientific and Technical Report EUR 23984 EN (2009)

제 2 장

계 획

제 2 장 계 획

2.1 일반사항

총칙에서 정의한 출렁다리의 계획에 적용한다. 사람들이 안전하고 편안하게 이동할 수 있는 보행자 공간을 확보하는데 고려할 계획 요건, 지반조사, 시설한계와 교량미학에 대한 최소요구사항을 제시한다.

2.2 계획 요건

출렁다리의 기본계획은 다음 사항을 고려해서 수행한다.

- (1) 도심, 하천 및 산악을 횡단하는 보행자를 위한 안전한 공간의 연속성을 제공할 수 있어야 한다.
- (2) 출렁다리의 입지 선정과 형상계획은 도로선형과 지형, 지반조건, 환경, 주변 시설물 등 주어진 조건을 고려해서 자연경관 훼손을 최소화하고 주변경관과 조화를 이루도록 위치와 규모 및 교량형식을 선정한다.
- (3) 교량이 보행 이외의 복합 기능이 있는 경우에는 기본계획 단계에서 다양한 측면이 합리적으로 반영될 수 있도록 구체적인 요구사항을 도출한다.
- (4) 보행자의 안전망 확보를 위한 추가적인 고려가 필요한지 살펴본다. 이는 난간의 개방감, 가로등의 밝기, 기타 안전장치 확보에 영향을 미친다.
- (5) 출렁다리의 사용성과 유지관리를 위해서 설치하게 될 시설물들을 구조물 계획단계에 반영하도록 한다.
- (6) 공간적인 배치나 지형적인 이유로 출렁다리의 양 끝점의 고저차가 발생하는 경우, 보행자의 편의성과 구조물의 안전성을 동시에 확보할 수 있도록 조치하여 계획한다.

[해설]

- (3) 출렁다리에서 보행이외의 기능들(예: 전망시설, 번지시설 체험 등)이 추가될 경우에는 반드시 계획단계에 반영해서 관련시설물의 설치와 사용중 발생할 수 있는 사람들의 움직임에 대하여 사용자의 안전성과 구조적 안전성을 반드시 확보해야 한다.
- (5) 출렁다리의 진동 제어를 위해서 설치하는 윈드 케이블이나, 유지관리를 위한 추가적인 장치는 구조물 계획 단계에 고려하여, 구조물 완성 이후 추가적인 설치물에 의한 불합리성이나 경관 저하를 최소화한다.

2.3 지반조사

- (1) 하부구조의 설계에 적절하고 충분한 자료를 제공하기 위한 시추조사와 토질시험을 포함한 지반조사를 시행한다.
- (2) 교량가설 부지의 현 지형상태에 대한 조사는 교량의 입지여건과 교량형식에 따라서 결정한다.

2.4 형식 선정

- (1) 출렁다리의 형식은 승강높이를 최소화하고 보행자의 안전성과 편의성을 보장할 수 있는 형식을 선정한다.
- (2) 자연지형 및 지반조건을 고려하여 상·하부 구조가 일관성을 가지고 주변경관과 조화를 이루는

형태를 구현할 수 있는 형식이 되도록 한다.

- (3) 랜드마크 기능을 가진 출렁다리의 경우에는 합리적인 구조형식에서 얻을 수 있는 구조형태를 랜드마크화 할 수 있도록 한다.
- (4) 산악 및 계곡에 위치하는 출렁다리의 경우에는 지형적 여건을 최대한 활용할 수 있는 친자연환경적 구조형식으로 한다.
- (5) 하중전달경로가 효율적이고 합리적인 구조시스템으로 계획한다.

2.5 계획 일반

2.5.1. 폭원

출렁다리 보도의 유효폭은 교량 설치목적에서 요구하는 보행자의 통행량과 입지 지역의 주변 현황을 고려해서 결정하되, 최소 1.5m 이상으로 한다. 다만, 최소 기준을 만족할 수 없는 불가피한 경우에는 교량 발주자, 설계자를 포함해서 관계자들의 협의를 거쳐서 폭원을 결정할 수 있다.

[해설]

출렁다리의 폭원은 일반 보행교에 비해서 설치 목적과 지형적인 여건들이 매우 다양하다. 이에 출렁다리 설치목적, 지형적인 여건, 이용자 수를 고려해서 폭원을 결정하되 사용자의 안전성과 보행성은 반드시 확보되도록 한다.

2.5.2 바닥판

- (1) 바닥판의 형상과 재료의 선정은 구조적 안전성과 사용자의 편의성을 고려한다.
- (2) 바닥판의 개방 또는 막힘의 정도는 구조물의 내풍 거동과 밀접한 관계가 있으므로 내풍전문가와 협의하여 선정한다.
- (3) 개방형 또는 그레이팅 바닥판의 경우, 보행자의 발빠짐 문제가 없어야 한다.
- (4) 바닥판의 형상과 재료는 건기 및 우기시 보행자의 미끄러짐을 방지할 수 있는 것으로 한다.
- (5) 바닥판은 사용수명 동안 쉽게 마모되지 않은 것으로 하고, 교체가 용이 하도록 한다.
- (6) 바닥판의 배수는 원활해야 한다.

2.5.3 다리밀공간

- (1) 하천 혹은 항로상에 건설되는 출렁다리의 다리밀공간은 유관기관과 협의하여 설정한다.
- (2) 출렁다리의 연직 및 수평처짐으로 인하여 다리 주변의 시설물과 간섭되지 않도록 한다. 이때 온도변화, 보행하중, 풍하중에 의한 영향을 고려한다.
- (3) 도로변의 보수등을 고려하여 여유높이를 잡아 두는 것이 좋다. 도로상에 설치하는 출렁다리의 경우에는 300mm이상 여유높이를 둔다.
- (4) 하천을 지나는 출렁다리는 KDS 24 10 11 에서 제시하는 계획홍수량별 다리밀공간을 확보한다.
- (5) 선박운행이 예상되는 항로상의 경우에는 선박통과를 고려한 다리밀공간을 확보해야 한다.
- (6) 수상에 설치되는 출렁다리의 경우, 구조물의 처짐으로 인해서 사용성이 방해되거나, 교량 부재가 물에 닿아 손상되지 않도록 한다.

2.5.4 교각

- (1) 출렁다리의 교각 위치 및 구조는 보행자에게 방해가 되지 않도록 배려함과 동시에 자동차 운전자의 시야에도 장애를 주지 않도록 한다.
- (2) 자동차가 충돌할 가능성이 있는 경우에는 교각을 보호할 수 있는 충돌방지 방호벽을 설치한다.
- (3) 선박이 충돌할 가능성이 있는 경우에는 교각을 보호할 수 있는 선박충돌방지 방호공을 고려해서 계획하는 것이 좋다.

2.5.5 기초

- (1) 출렁다리의 기초는, 상부구조의 규모, 형식 지반조건, 지하매설물 및 시공법등을 종합적으로 검토해서 적절한 구조를 사용한다. 특히, 지하매설물이 많은 곳에 출렁다리를 설치하는 경우에는 기초구조의 설치 및 시공에 대해 특히 주의해야 한다.
- (2) 경사지반에 위치하는 출렁다리의 기초는 지반조건에 따라서 요구되는 기초설치의 여유공간을 그림 2.5.1과 같이 확보해서 경사지반 경계면으로부터 이격하여 설치한다.
- (3) 경사지반에 위치하는 출렁다리의 기초는 지반조건에 따라서 경사지반의 기울기가 그림 2.5.1의 기울기이내가 되도록 한다.
- (4) 만약 부득이하게 여유공간과 경사지반의 기울기를 충분히 확보할 수 없는 여건이라면, 지반에 대한 조사(지표지질면조사, 암질리조사 등)를 면밀히 수행하고 기초의 안전성을 확보할 수 있는 대책을 수립하여 설계에 반영하여야 한다.

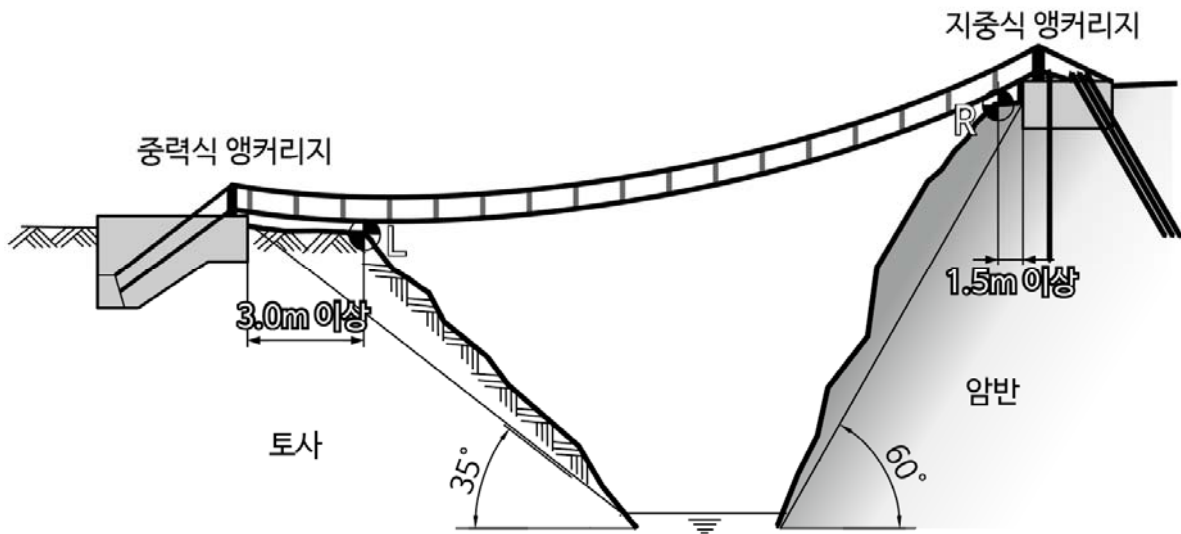


그림 2.5.1 기초의 여유공간 및 경사지반 기울기

2.5.6 교량접근시설

- (1) 출렁다리는 인접한 접근로와 연속성을 유지하여 사용자의 보행안전성을 확보한다.
- (2) 출렁다리에 접근하기 위한 대기공간에 설치되는 구조물은 사용자의 밀집도를 고려해서 구조적 안전성을 확보하도록 한다.

- (3) 출렁다리의 접근을 위한 승강방식 또는 출렁다리위에 설치하는 승강방식은 이용자의 사용성을 고려해서 결정한다.
- (4) 출렁다리의 접근시설로 엘리베이터 또는 에스컬레이터 등을 사용할 경우 과도한 자연훼손이 발생되지 않도록 한다.
- (5) 계단, 경사로 및 경사로식 계단의 기울기는 이용자의 사용성을 고려한다. 경사로의 기울기는 18분의 1 이하로 한다. 다만, 지형상 곤란한 경우에는 12분의 1까지 완화할 수 있다. 안전성 측면에서 보다 완만한 경사가 바람직하다. 계단을 설치하는 경우에는 25%이하의 기울기로 한다.
- (6) 상기 기준보다 급한 경사를 가진 승강방식에서는 통행자의 보행안전성 확보를 위한 미끄러짐 방지 시설 및 주의사항에 대한 조치를 같이 계획하도록 한다.

[해설]

- (2) 폭이 좁은 출렁다리를 통행하기 위한 이용자의 수가 많은 경우에는 대기공간에 밀집된 대기자의 수로 인해서 구조물의 안전성이 위협을 받을 수 있다. 이에 대기공간에 설치되는 구조물은 예상되는 이용자의 밀집도를 고려해서 구조 및 비구조(난간) 요소들에 대한 구조적 안전성을 반드시 확보해야 한다.

2.5.7 난간

- (1) 출렁다리와 계단, 경사로 양 옆에는 높이 1.1 m 이상의 난간을 설치한다.
- (2) 손잡이 난간의 불연속성으로 인한 이용자의 불편은 발생하지 않도록 한다.
- (3) 난간은 구조적으로 안전해야 한다.
- (4) 난간의 부재는 유아가 빠지지 않을 정도로 난간살의 형상과 간격을 유지해야 한다.
- (5) 난간살의 배치는 출렁다리의 내풍안전성에 악영향을 미치지 않도록 설치되어야 한다.

2.5.8 조명

- (1) 출렁다리의 접근시설과 출렁다리에는 조명시설을 설치할 수 있다.
- (2) 조명시설의 구조 및 설치에 관하여는 「산업표준화법」 제12조에 따른 한국산업표준의 도로조명 기준을 따른다.
- (3) 보행자가 안전하게 다닐 수 있는 충분한 조도를 확보한다.
- (4) 설치된 조명시설은 자연생태계에 악영향을 주지 않도록 한다.
- (5) 조명시설은 구조물의 구조적 거동에 악영향을 끼치지 않아야 한다. 따라서 조명시설은 구조전문가와 협의하여 설치한다.

2.5.9 색채

출렁다리의 색채는 주변환경을 고려해서 조화를 이루도록 계획한다. 사용재료에 따라서 열화나 부식으로 인한 색상변화가 미관을 훼손하지 않도록 내구성을 고려한다.

2.5.10 피뢰침

출렁다리에 낙뢰의 피해가 우려되는 경우에는 피뢰대책을 수립하여야 한다. 이때 수뢰부, 인하도선, 접지 등에 대한 세부적인 사항은 KS C IEC 62305 (피뢰시스템)에 따라서 설치되도록 계획단계에 반영한다.

2.5.11 비구조요소

출렁다리에는 가능한 한 비구조요소 부착물을 최소화한다. 출렁다리는 도로교에 비해서 경량이므로 부착물과 같은 비구조 요소에 대한 하중효과의 영향을 크게 받을 수 있다. 이에, 불가피한 비구조요소 부착물에 대해서는 미리 교량계획에 반영하도록 하며, 이러한 부착물에 의해서 발생할 수 있는 추가적인 하중효과를 구조물 설계에 반드시 반영한다.

[해설]

교량의 난간에 설치되는 현수막 등은 교량 구조물에 불리한 풍하중 조건을 유발할 수 있다.

2.6 교량 미학

- (1) 출렁다리의 기능에서 요구되는 규모와 비례에 적합한 구조형식을 선정한다.
- (2) 출렁다리의 구조형태는 힘의 흐름을 따르는 형상과 비례를 기준으로 구조시스템 본연의 구조적 조형미가 드러나도록 한다.
- (3) 교량을 포함한 전체 맥락적 차원에서 총체적 미학적 질서를 세워서, 교량전체에서 상세에 이르기까지 일관된 미학적 질서를 유지하도록 한다. 즉, 교량 주변배경과 교량형태의 상호관계, 교량 전체시스템과 구성하는 부분 구조와 부재와의 상호관계, 교량 전체시스템과 비구조 요소(가로등, 난간, 기타 전기 및 우수처리 시설물 등)와의 상호관계를 고려한다.
- (4) 교량형태의 물리적 요소와 색채 및 질감의 시각적 요소가 잘 어우러져서 교량 전체의 통일감을 상승시키도록 한다.
- (5) 부재의 부식, 도막의 열화나 녹이 발생하여 내구성과 미관을 훼손시키지 않도록 주의한다.
- (6) 데크나 거더의 단면에 의한 중압감을 느끼지 않는 구조형식으로 한다.
- (7) 번잡스럽고 과도한 장식적인 비구조 요소로 인해서 교량형태가 드러내는 본연의 아름다움을 저감시키지 않도록 주의한다.

제 3 장

하중 및 하중조합

제 3 장 하중 및 하중조합

3.1 일반사항

이 기준은 출렁다리 설계에서 사용되는 하중들에 대한 최소한의 요구 조건, 적용한계, 하중계수 및 하중조합에 대해 규정한다. 또한 이 규정은 기존 출렁다리의 구조적 안전성 평가에도 적용될 수 있다. 이 규정들은 하중에 대한 최소 요구조건이므로, 필요한 경우 발주자의 판단에 따라 이 기준 이상의 하중을 사용할 수 있다.

3.2 하중조합

출렁다리의 하중계수를 고려한 총 설계하중 및 하중조합은 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량편(2018)을 따르되 다음 예외 조항을 적용한다.

- (1) 극한한계상태 하중조합Ⅱ, 극한한계상태 하중조합Ⅳ 는 고려하지 않을 수 있다.
- (2) 극한한계상태 하중조합Ⅰ의 보행하중(PL) 계수는 1.4를 사용한다.
- (3) 극한한계상태 하중조합Ⅴ의 보행하중(PL) 계수는 1.0을 사용한다.
- (4) 극한한계상태 Ⅴ, 사용한계상태 Ⅰ의 통행제한풍속은 보행자의 통행위치를 기준으로 10분 평균 풍속 10 m/s를 적용한다.
- (5) 피로한계상태 하중조합의 보행하중(PL) 계수는 1.0을 사용한다.

하중조합에 사용되는 하중 중 이 가이드라인에 명시되지 않은 하중에 대해서는 발주자가 지정한 하중 또는 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량편(2018)을 사용한다.

[해설]

하중저항계수설계법에서 하중계수는 저항계수와 함께 주요 부재의 주 한계상태에 대하여 목표신뢰도를 달성할 수 있도록 통계 분석과 신뢰도 해석을 통해 조정(calibration)된 값을 사용한다. 이 가이드라인이 참조하는 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량편(2018)은 그러한 과정을 거쳐서 조정된 값을 사용하고 있다. 그러나 보행하중에 대하여 적용되는 이 가이드라인의 하중계수는 이러한 조정과정을 거쳐 결정된 값이 아니므로 엄밀한 의미에서 이 하중계수 및 조합이 목표신뢰도를 보장하는 값이라고 할 수 없다. 따라서 이 가이드라인의 하중계수 및 조합은 추후 본격적인 연구를 통해 보다 합리적인 값으로 조정, 개선할 필요가 있다.

- (1) 이 가이드라인의 하중조합 및 하중계수는 기본적으로 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량편(2018)을 따르되 예외 조항을 적용하도록 하였다. 극한한계상태 하중조합Ⅱ는 특수차량, 통행허가차량에 대한 조합으로 출렁다리에 대해서는 일반적으로 해당하지 않을 수 있다고 보았다. 극한한계상태 하중조합Ⅳ는 고정하중이 활하중에 비하여 매우 큰 경우에 적용하는 하중조합으로서 출렁다리는 활하중이 매우 큰 교량이므로 고려하지 않을 수 있도록 하였다.
- (2,3) 도로교 케이블교량 설계기준에서 기본하중조합인 극한한계상태 하중조합Ⅰ의 활하중계수는 1.8, 사용상태 풍하중 조합인 극한한계상태 하중조합Ⅴ의 활하중계수는 1.4를 사용하는 것을 이 가이드라인에서는 보행하중(PL)의 활하중계수를 각각 1.4 및 1.0의 하중계수를 적용하도록 하였

다. 이는 케이블교량 설계기준의 주요 활하중인 차량활하중에 비하여 출렁다리의 보행 하중은 최대 수용 인원 밀도를 고려하여 결정되었으므로 향후 변화 가능성이 거의 없고 변동성의 폭도 크지 않을 것으로 판단하여 과도한 하중이 사용되는 것을 방지하기 위함이다. 신뢰도 기반의 하중-저항계수 산정법의 이론에 따르면 비통계적 하중성분 또는 모델 오차와 같은 최소의 불확실성만을 포함한 하중성분이 포함될 때 그 하중에 대한 목표신뢰도를 만족하는 하중계수는 보수적인 접근법을 사용할 때 1.2에 근접하는 값으로 나타난다*. 이러한 관점에서 주 하중조합에 제시한 활하중계수 1.4는 목표신뢰도를 만족할 수 있는 안전측의 값으로 판단할 수 있다. 그러나, 전술한 바와 같이 이러한 계수는 추후 신뢰도 해석을 포함한 추가적인 연구를 수행하여 합리적인 값을 결정해야 한다.

* 이해성 (2019) 신뢰도기반 하중-저항계수, 기문당; Supplemental Materials at <http://strana.snu.ac.kr/>

- (4) 통행제한풍속으로 제안된 10분 평균풍속 10m/s는 정상적인 통행이 어려운 풍속으로서 이 가이드라인에서는 설계 하중조합에 적용하기 위한 것이다.
- (5) 도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량편에서 단일설계트럭하중에 적용되는 하중계수 0.75는 대표트럭의 중량을 반영한 것이나, 보행하중에 의해 강재나 연결부에 발생하는 변동응력의 반복횟수와 누적피로에 대해서는 잘 알려진 연구성과가 없으므로 1.0의 하중계수를 적용하고 3.3.3에 피로를 검토하기 위한 보행활하중을 적용하도록 하였다. 추후 추가적인 연구를 수행하여 계수 및 피로 보행활하중을 결정해야 한다.

3.3 하중

출렁다리 설계에 사용하는 하중은 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량편(2018)을 따른다. 단, 보행하중, 풍하중에 대해서는 다음의 규정을 따른다.

3.3.1 보행하중 (PL)

출렁다리 설계의 보행하중은 다음 표 3.3.1의 등분포하중을 적용한다.

표 3.3.1 보행하중

구분	등분포하중 (kN/m ²)
바닥판	5.0
케이블 등 주부재	2.5이상 3.5이하 $2.0 + \frac{120}{L + 30}$ $L = \text{재하길이 (m)}$

[해설]

기존의 교량 설계 기준 및 가이드라인들에 적용된 보행 하중은 다음 해설 표 3.3.2와 같다. 이 가이드

드라인에서는 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량편(2018)과 같이 바닥판 설계시의 보행하중은 5.0 kN/m^2 을 사용하고 케이블 등 주 부재 설계시의 보행하중은 3.5 kN/m^2 를 상한 값으로 하되 재하길이가 길어짐에 따라 경감된 보행하중을 적용하도록 하였다. 재하 길이에 따른 경감 모형은 Eurocode EN1991-2:2003(E)을 따랐다. 재하길이에 따라 최소 2.5 kN/m^2 까지 경감된 등분포하중을 적용하도록 한 것은 경간이 길어짐에 따라 보행자 밀도가 낮아지는 것을 고려한 것이다.

현재 이 가이드라인에서는 보행에 따른 동적효과에 의한 응답 증폭을 고려하기 위한 충격 계수를 별도로 사용하지 않는다. AASHTO (2019)나 Eurocode 에서도 보행 하중에 대한 충격 계수를 별도로 고려하지 않고 있으나, 이들 기준에서는 하중 값이 (최대) $4.3\sim 5.0 \text{ kN/m}^2$ 로 상대적으로 커서 충격 효과를 포함한 값으로 여겨진다. 보행하중에 대한 출렁다리 응답의 동적 증폭 효과 및 충격 계수에 대해서는 추후 연구가 필요하다.

표 3.3.2 기존설계기준 및 지침의 보행하중

설계 기준, 지침	보행하중	비고
AASHTO (2019) LRFD Guide Specifications for the Design of Pedestrian Bridge	등분포하중 90psf ($4.31 \times 10^{-3} \text{ MPa}$)	Section 3.1
Eurocode EN 1991-2:2003(E)	등분포하중 5 kN/m^2 ($5 \times 10^{-3} \text{ MPa}$) for continuous dense crowd Other case, 2.5 to 5.0 kN/m^2 $q_{fk} = 2.0 + \frac{120}{L + 30}$ L = loaded length in [m]	Section 5.3.2.1
KDS 24 12 21 :2018 교량 설계하중(한계상태설계법)	등분포하중 바닥판 $5 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ 주거터 $L \leq 80$: $3.5 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ $80 < L \leq 130$: $(4.3 - 0.01L) \times 10^{-3} \text{ MPa}$ $L > 130$: $3.0 \times 10^{-3} \text{ MPa}$	4.3.4절
도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량편 해설 (2018)	등분포하중 $L \leq 80$: $3.5 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ $80 < L \leq 130$: $(4.3 - 0.01L) \times 10^{-3} \text{ MPa}$ $130 < L \leq 200$: $3.0 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ $L > 200$: $0.6/L \text{ MPa}$	2.6.2절
서울시 소규모강교 및 보도육교 (2001)	등분포하중 바닥판 500 kgf/m^2 주거터 300 kgf/m^2 지진, 충돌하중조합 100 kgf/m^2	4.4절 (허용응력설계법)
소규모현수교 지침 및 동해설 (1984)	바닥판 300 kgf/m^2 케이블, 주탑, 하부구조 200 kgf/m^2	3.4절 (허용응력설계법)

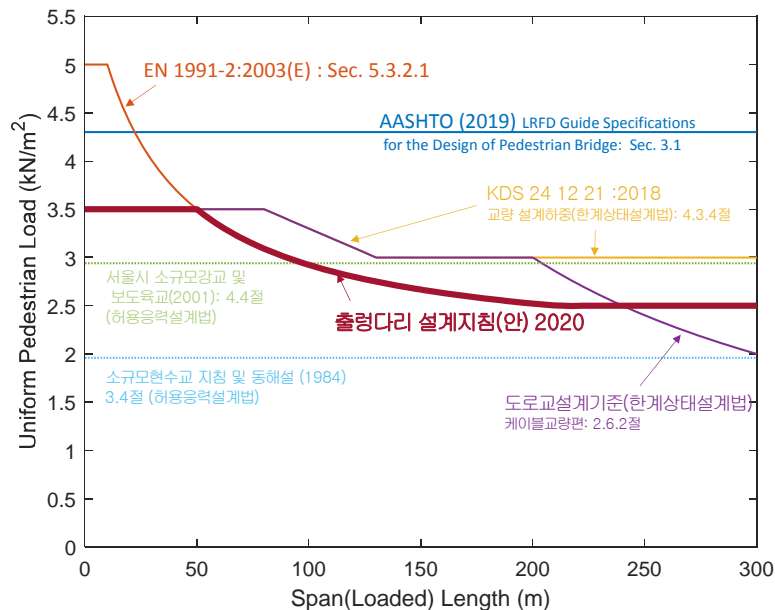


그림 3.3.1 설계기준 별 보행하중 비교

3.3.2 풍하중 (WS)

출렁다리 설계에 사용하는 풍하중은 기본적으로 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량편(2018)을 따르되 구체적인 사항은 6장 내풍 설계편을 따른다.

[해설]

출렁다리의 풍하중 효과 특성은 일반 교량 보다 케이블 교량에 가까우므로, 풍하중은 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량편(2018)을 따르도록 하였다.

3.3.3 피로의 영향을 검토하는 경우의 활하중

출렁다리는 연결 상세와 주요 부위에 피로균열 발생을 방지하기 위해 보행하중에 저항할 수 있도록 설계해야 한다. 이 하중들은 피로에 민감한 연결 상세에 작용하는 공칭응력범위를 계산하는데 사용된다. 필요한 경우 신뢰할만한 데이터로부터 구한 동적 하중 함수를 이용하여 동해석을 통해 구한 공칭응력범위를 사용할 수 있다.

피로 설계 시 보행하중 범위는 3.3.1의 보행하중의 50%를 사용한다. 풍하중에 대한 피로를 검토할 경우에는 6.4 바람에 의한 진동을 참고한다.

[해설]

출렁다리의 피로 검토와 관련한 보행하중의 통계적 특성, 진동 특성 등에 대한 연구가 아직 많이 부족한 상태이다. 3.3.1의 보행하중은 출렁다리에 보행하중이 만재되어 있는 경우를 나타내므로 피로검토를 수행하는데는 적절하지 않음을 고려하여 저감된 보행하중을 적용하여 1.4.8의 피로한계상태를 평가하기 위한 공칭응력범위를 구할 수 있도록 하였다.

제 4 장

구조 해석

제 4 장 구조 해석

4.1 일반사항

이 장에서는 출렁다리의 설계와 구조적인 평가를 위한 해석 방법을 규정한다. 규정된 해석 방법 이외에도 입증된 재료 특성을 사용하고 평형 조건과 적합 조건을 만족시키는 다른 해석 방법도 사용할 수 있다.

4.2 구조해석법

- (1) 완성계의 출렁다리에 대해 활하중해석이나 하중조합을 수행할 때는 고정하중에 의해 도입된 케이블 초기장력에 따른 강도변화를 고려한 선형화 유한변위해석법을 사용한다.
- (2) 구조해석 모델은 하중의 크기와 재하방법, 케이블부재의 초기장력, 기하학적 형상, 재료의 특성, 전단중심을 포함한 단면의 물성치 산정, 경계조건 등을 가급적 실제조건과 동일 또는 유사하게 표현하여야 한다. 또한, 다양한 하중효과 분석에 필요한 해석의 정밀도에 따라 해석 모델을 선정한다. 이에, 전문적인 지식과 충분한 설계경험을 가진 기술진에 의해 구조해석이 수행되어야 한다.
- (3) 케이블부재에 대해서는 반드시 초기평형해석을 실시하여 케이블의 형상과 이에 따른 무응력길이를 산정하고 시공단계별해석을 통해 검증한다.
- (4) 케이블 제작에는 실사하중을 기반으로 보완한 해석모델을 사용하고, 해석결과는 시공시 목표값으로 반영하여야 한다.
- (5) 정적 구조 안정성 및 부속장치 설계를 위해 최대 변위, 화전각이 발생하는 정적 풍하중 등을 고려할 때는 부재 기하강도와 대변위에 따른 비선형 효과를 고려한 기하비선형해석을 수행하는 것이 바람직하다.

[해설]

출렁다리와 같은 케이블 교량의 구조해석법은 크게 유한변위해석, 선형화 유한변위해석, 기하비선형해석(대변위해석)의 세가지 방법을 고려할 수 있다. 각 방법은 케이블부재에 도입된 장력이나 형상 변화에 의한 강도를 고려하는 방법에 따라 다음과 같이 구분된다.

- 유한변위해석: 부재 내력에 의한 강도변화 현상을 고려하되 하중이 변화함에 따라 부재 내력이 변화되는 경우 이를 다시 고려하여 강도행렬을 재구성하는 비선형 해석법

$$\{F\} = \{[K1] + [K2] + [K3]\}\{U\}$$
 [K1] : 선형강성행렬
 [K2] : 초기 부재력에 의한 기하강성행렬
 [K3] : 추가 부재력에 의한 기하강성행렬
- 선형화 유한변위해석: 유한변위해석이 비선형법이기 때문에 하중조합 등에 어려움이 발생하므로 초기 부재력에 의한 기하강성행렬은 고려하되 추가 부재력에 의한 기하강성행렬을 무시하는 해

석법

$$\{F\} = \{[K1] + [K2]\}\{U\}$$

- 기하비선형해석(대변위 해석): 주 케이블의 형상이 크게 변화하는 초기 가설단계나, 주케이블이나 보강형의 변위가 수m 이상 발생하는 큰 하중상태에서 부재좌표계가 전체좌표계를 기준으로 변하는 것을 무시할 수 없는 경우 좌표계 변환행렬을 구조계 형상변화에 따라 계속 업데이트하며 해석하는 방법

$$[T] \text{를 변환행렬이라고 할 때 매 해석단계마다 다음과 같이 접선강도행렬을 업데이트}$$

$$[K]_g = [T][K][T]^T$$

출렁다리와 같은 현수교 형식에서 비선형 거동은 활하중 대비 고정하중 비중이 낮아질수록, 시공 중 도입된 장력 수준이 낮을수록 크게 발생한다. 도로교에 적용되는 일반적인 현수교 설계법은 교량 완성시 고정하중에 의해 도입된 주케이블의 장력 수준이 높고, 변동하중에 의해 발생하는 추가 장력이 상대적으로 작아, 고정하중 상태까지는 비선형 해석을 통해 케이블의 강성을 고려하고 변동하중 변화 구간에 대해서는 선형해석을 통한 하중조합으로 구조 안전성을 검토하는 선형화 유한변위해석방법을 주로 사용한다. 그러나 출렁다리의 경우 거더의 중량이 상당히 작아 교량 완성시 고정하중에 의해 도입된 주케이블의 장력 수준이 높지 않고, 보행하중 및 풍하중 등 변동하중에 의한 추가 장력이 상대적으로 클 수 있으므로, 변동하중에 의해 유발된 기하비선형 효과는 도로교에 비해 크다고 할 수 있다. 이 가이드라인에서는 설계의 편의를 위해 하중조합에 의한 부재설계 검토에서는 초기평형상태를 고려하는 선형화 유한변위해석을 사용하도록 하되, 큰 변위가 발생하여 기하비선형 효과를 무시할 경우 변위 및 단면 부재력 산정에 있어 상당 수준의 계산 오차가 발생할 수 있을 때에는 대변위 해석(기하비선형해석)을 수행하여 결과를 검토할 것을 권장하였다. 일례로, 하중조합을 사용하지 않는 강풍에 의한 안정성 검토를 수행하는 경우나 개별 활하중에 의한 주케이블 장력이 고정하중 작용시 주케이블 장력의 50% 보다 크게 발생하는 경우 이 개별 활하중을 포함하는 하중조합에 대해서는 비선형해석결과를 검토하는 것이 바람직하다.

4.3 동적 해석

4.3.1 고유치해석

- (1) 사용하중 상태의 출렁다리의 내진, 내풍설계 및 사용성 평가를 위한 고유치해석에는 보행하중재하에 따른 구조계의 질량 및 케이블 장력 변화를 고려한다. 질량 및 장력 변화에 따른 최소 및 최대 고유치를 산정하고 이에 따른 응답을 검토한다. 이 경우 대표적인 사용하중 상태로서 만재했을 때의 50%를 고려할 수 있다.
- (2) 설계풍속 상태에서 내풍안전성 검토를 위한 동적해석에는 보행하중을 고려하지 않은 상태에서의 구조계의 질량 및 케이블 장력으로 고유치를 산정하고 이에 따른 응답을 검토한다.

[해설]

고정하중 상태와 활하중이 작용하는 상태의 케이블 강성 및 운동 질량이 크게 차이가 날 수 있는 출렁다리의 경우에는 보행자의 재하 상태에 따른 고유 진동수의 변화폭을 고려해야 한다. 특히 사용성 평가를 위한 진동수 평가에서는 이러한 변화를 고려하여 검토하도록 해야 한다.

4.3.2 구조 감쇠

출렁다리의 동적해석에 사용되는 구조 감쇠는 구성요소의 역학적 거동특성을 고려하여 한정하여야 한다. 각 진동모드의 구조감쇠는 안전측으로 설계가 되도록 산정하거나 각 구성요소의 감쇠의 기여도를 고려하여 한정하여야 한다. 출렁다리 구조의 동적해석을 위한 구조 감쇠비는 설계 및 해석 목적에 따라 다음 값을 사용할 수 있다.

표 4.3.1 설계 목적별 감쇠비

설계 및 해석 목적	구조 감쇠비 (%)
내진 또는 사용하중	1.0
내풍	0.2~0.4

[해설]

출렁다리의 감쇠비에 대한 많은 연구 결과는 축적되어 있지 않다. 일부 출렁다리에 대한 동적 재하 시험 및 계측 결과(KIBSE, 2018)에 따른 감쇠비 측정 결과는 모드에 따라 0.2~1.4% 정도 까지 다양한 값을 나타내고 있으며, 목적에 따른 적정 설계 감쇠비를 정하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 이 가이드라인에서는 출렁다리의 경우 케이블의 동적 거동이 교량 전체의 주 거동이 되는 점을 고려하여 케이블 진동의구조감쇠비(케이블교량설계지침(한계상태설계법))를 참고하고 출렁다리의 동적 특성 값 계측결과를 고려하여 감쇠비를 제안하였다.

4.3.3 동적 보행하중

출렁다리의 진동 사용성 및 동적 효과 평가를 위한 동적 보행하중 모형은 해석 방법에 따라 입증된 모형을 사용할 수 있다.

[해설]

보행하중에 의한 출렁다리의 동적 해석은 일반적으로 불규칙진동 해석, 시간이력 해석, 진동수영역 해석 등을 생각할 수 있다. 어느 해석법을 사용하든지 적절한 동적 보행하중 모형이 필요하다. 이 가이드라인에서는 교량의 가속도 응답을 이용한 진동 사용성 평가에 활용할 수 있는 동적 보행하중 시간이력 모형을 부록 A.3에 제시하였다.

제 5 장

부재일반

제 5 장 부재일반

5.1 일반사항

출렁다리에 사용하는 재료는 원칙적으로 KDS 24 10 11 교량설계기준을 따른다.

5.2 케이블재료

출렁다리의 케이블에 관련된 재료에 관한 사항은 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량(2018)편 및 장대교량용 케이블 소재 적용 지침(2008)을 따른다. 이들 지침에 규정되지 않은 케이블 재료는 충분한 사용실적 및 실험과 연구 등의 합리적인 방법에 의하여 안전성과 성능이 입증된 경우 적용할 수 있다.

5.2.1 케이블의 구성

케이블은 평행소선케이블(PWC), 평행연선케이블(PSC), 스파이럴로프(spiral rope), 록코일로프(locked coil rope) 등을 가공하여 제작할 수 있다.

5.2.2 케이블의 탄성계수 및 설계인장강도

설계에 사용하는 케이블의 탄성계수 값은 별도로 제작사의 제시 값이 없는 경우에는 도로교설계기준(한계상태설계법)해설-케이블교량(2018)의 5.4.1의 값을 사용한다. 케이블의 설계 강도 계산 시에는 공칭인장강도(GUTS)를 사용하며, 소켓의 정착에 따른 효율을 감안하여야 한다.

5.3 주케이블

주케이블은 출렁다리의 사용수명까지 교체가 불가능한 주요부재임을 감안하여 소재, 배열 및 구성, 방식, 정착에 이르기까지 종합적으로 판단하여 선정하여야 한다.

5.3.1 주케이블의 배열 및 구성

출렁다리에서 단일케이블로 소요인장력을 만족시키기 어려운 경우, 다수의 케이블을 집속하여 주케이블을 구성할 수 있다. 다수의 케이블로 주케이블을 구성하는 경우 각 케이블이 목표하는 길이와 새그가 형성될 수 있어야 한다. 각 케이블의 전 구간(케이블밴드, 새들 및 정착구)에서 변형 및 과도한 응력집중이 발생되지 않도록 한다.

5.3.2 주케이블의 정착

주케이블은 케이블의 소재 및 형태에 적합한 정착장치를 계획하여 앵커리지와 연결될 수 있도록 하여야 하며, 가설시 및 유지관리시에 장력 또는 길이조정이 가능한 구조로 계획하여야 한다.

5.4 행어케이블

행어케이블은 주케이블과 거더를 연결하는 부재로서, 장력 및 길이 조절 기능과 정착 또는 연결이 용이한 구조를 가지고 있어야 한다.

5.5 케이블의 방식

케이블의 부식 방지를 위해 개별소선을 아연도금 또는 아연-알루미늄 도금으로 방식처리를 하거나, 스테인리스 재질의 소선으로 케이블을 구성하는 방식 방법과 케이블 외층에 피복 또는 도장을 사용하는 방식 방법 등을 사용할 수 있다. 피복은 자외선에 의한 탈색, 경화에 대한 저항성을 가져야 하며, 내부에 방청오일을 사용하는 경우 누유 및 화재에 대한 대비가 필요하다.

5.6 탑

5.6.1 일반사항

탑은 강재 또는 콘크리트로 하는 것을 원칙으로 한다.

5.6.2 강재 탑의 부재설계

출렁다리 강재 탑의 부재설계는 KDS 24 14 31 을 따른다.

5.6.3 콘크리트 탑의 부재설계

출렁다리 콘크리트 탑의 부재설계는 KDS 24 14 21 을 따른다.

5.6.4 케이블정착부의 보강

탑 상단에서 주케이블은 새들, 핀 정착 및 기타의 정착방법으로 연결되도록 한다. 케이블 정착부는 충분한 보강을 통해 응력집중이 발생되지 않도록 설계하여야 하며, 구조 상세에 따라서는 피로에 대한 검토를 수행해야 한다.

5.7 앵커리지

5.7.1 일반사항

출렁다리의 앵커리지는 가설지점의 지형, 지질 등을 고려한 후 적절한 방식으로 계획한다.

5.7.2 중력식 앵커리지

케이블의 인장력으로 인해 발생하는 외력을 앵커블록의 자중으로 저항하는 구조로서 침하, 전도, 활동에 대한 안정성을 확보하도록 한다.

5.7.3 지중식 앵커리지

주케이블에 발생하는 인장력보다 큰 사전 긴장력을 도입하여, 암반자체가 인발에 저항하도록 계획된 앵커리지로 재 긴장이 가능한 구조로 계획한다.

5.7.4 락볼트 앵커방식

암반에 설치된 앵커볼트의 인발저항력에 의해 지지되는 구조로 계획하며, 앵커볼트가 매입된 암반의 무게가 케이블장력보다 충분히 크도록 계획하여야 한다.

5.8 거더

5.8.1 일반사항

출렁다리의 거더는 강재를 사용하여 구성하는 것을 원칙으로 한다.

5.8.2 교축방향 주 거더 형식

거더를 형성하는 교축방향 부재의 단면이 교축직각방향 부재에 비해 같거나 크며, 교축방향으로 단면이 연속하도록 배치하는 거더형식을 말한다.

5.8.3 교축직각방향 주 거더 형식

거더를 형성하는 교축직각방향 부재의 단면이 교축방향 부재에 비해 큰 부재를 형성하고, 교축방향 부재는 바닥판을 지지하는 2차부재로 계획된 거더형식을 말한다.

5.8.4 보강거더의 부재설계

출렁다리 보강거더의 부재설계는 KDS 24 14 31 을 따른다.

5.9 바닥판

5.9.1 일반사항

출렁다리의 바닥판은 통행목적과 주변환경 및 내풍성능을 감안하여 종합적으로 검토하여 채택한다. 바닥판은 보행하중에 대한 견고한 지지 및 과도한 충격에 대한 탈락방지는 물론이며, 사용수명 내에 안정적인 결합이 유지될 수 있는 구조로 계획하여야 한다. 소규모 출렁다리에서 목재바닥판 만으로 거더를 형성하는 경우, 강성부족으로 인한 통행불편을 초래할 수 있으므로 주의가 필요하다.

5.9.2 목재 바닥판

목재는 변형(수축, 갈라짐, 뒤틀림 등)이 적으며, 강도 및 내구성이 높은 재료의 목재를 선정한다.

5.9.3 그레이팅 바닥판

내풍성능을 향상하기 위해 설치하며 결로현상 및 강우, 강설에 의한 미끄러짐이 발생할 우려가 높으므로 보완대책을 수립하여야 한다.

5.9.4 강바닥판

강바닥판 형식은 방수 및 배수 문제가 발생하지 않도록 계획한다.

5.9.5 유리바닥판

관광효과를 위해 설치되는 강화유리 또는 방탄유리 등 특수유리를 사용하는 바닥판은 진동 및 변형을 수용할 수 있는 접합구조 설계가 필요하며, 미끄러짐에 대한 대책이 수립되어야 한다.

5.10 내풍케이블

5.10.1 일반사항

장시간 출렁다리의 내풍안전성을 확보하기 위해 내풍케이블을 설치할 수 있다.

5.10.2 내풍케이블구조

내풍케이블은 장력의 도입이 가능하고 사용기간내 발생할 수 있는 변형량을 감안하여 길이조절이 가능한 구조로 설계하여야 한다.

5.10.3 내풍케이블 지지용 앵커리지

내풍케이블에 도입되는 장력과 출렁다리로부터 전달되는 활하중, 풍하중, 온도하중에 대해 안전성을 확보하여야 한다.

5.11 난간

5.11.1 일반사항

출렁다리 난간은 거더 형식을 감안하여 계획 한다.

5.11.2 강성난간

교축방향 주 거더 형식의 출렁다리에 주로 적용하는 난간으로, 거더 강성이 부족한 경우 난간이 변형될 수 있으므로 주의하여야 한다.

5.11.3 케이블난간

교축직각방향 주 거더 형식의 출렁다리에 주로 적용되는 난간으로, 활하중 작용시 케이블난간이 주케이블의 하중을 분담하게 되므로, 이를 감안하여 설계하여야 한다.

5.11.4 매쉬난간

얇은 와이어로프를 매쉬형태로 프레임에 설치하여 교축직각방향에서 내풍면적을 최소화하고 개방감을 향상시키는 난간으로, 거더 및 케이블의 하중이 전달되지 않도록 설계하여야 한다.

5.12 새들(Saddle)

주케이블의 장력에 의한 연직압력 및 측압의 영향을 검토하여야 하며, 새들을 통과하는 주케이블은 극한한계상태의 하중조합에서 미끄러지지 않아야 한다. 새들의 곡률반지름은 주케이블 지름의 최소 8배이상으로 하고, 록코일로프는 20~30배의 큰 곡률반지름을 적용하는 것이 좋다.

5.13 케이블밴드

케이블밴드의 체결구조는 볼트의 체결력에 의해 발생하는 내압과 이로 인한 마찰에 의해 결합된다. 케이블밴드는 극한한계상태조합에서 미끄러지지 않아야 하며, 분리에 대해 저항하여야 한다.

5.14 케이블정착구

출렁다리에 사용되는 케이블은 소켓이나 다양한 형태의 정착구를 사용하되 구조적으로 안전한 정착을 보장하여야 한다. 주케이블의 정착구는 도로교에서 적용되는 수준의 재료의 품질과 구조적 안전성을 보장하는 정착방식을 사용하는 것이 좋다.

5.14.1 앵커리지 케이블 정착구조

앵커리지에 설치되는 주케이블 정착구조는 응력집중이 발생되기 쉬우므로 상세구조해석을 수행하여 충분한 보강계획을 수립하여야 한다.

5.14.2 거더부 케이블 정착구조

거더에 설치되는 행어케이블 정착구조는 응력의 변동폭이 크고 면외방향의 꺾임 및 피로가 발생할 수 있으므로 충분한 검토를 통해 보강계획을 수립하여야 한다.

제 6 장

내풍 설계

제 6 장 내풍 설계

6.1 내풍설계 일반

6.1.1 일반

- (1) 출렁다리는 풍하중에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.
- (2) 출렁다리의 구조적 특성이 풍진동에 취약한 경우 풍동실험을 수행하여 내풍안정성을 확보하여야 한다. 이 때 출렁다리의 진동 특성을 최대한 반영한 풍동실험 기법을 적용할 필요가 있다.

[해설]

- (1) 계곡이나 해안에 노출되어 있는 보행교나 케이블로 지지된 세장한 보행교 등은 유연하기 때문에 바람에 민감하게 거동할 수 있다. 일반 보행교와는 달리 이러한 출렁다리는 도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량편(2018)을 참고하여 케이블교량 수준의 내풍설계와 검토가 필요할 수 있다. 따라서 본 절에 제시한 규정을 따라 내풍안정성을 확보할 수 있도록 하여야 한다.
- (2) 출렁다리는 케이블교량과 비교해 볼 때 횡방향으로의 변위가 크게 발생하며 개방형 단면을 취하고 있기 때문에 부재에 작용하는 풍하중을 적절히 산정하기 어렵고 공기역학적 진동 특성도 파악이 쉽지 않다. 따라서 풍진동에 취약하다고 판단될 경우, 풍동실험을 수행하여 불확실성을 최소화할 필요가 있다. 그러나 아직까지 출렁다리에 대한 풍동실험 기법이 정립되지 못하였으므로 본 가이드라인에서 제시하는 개념이 충족될 수 있도록 풍동실험에 대한 전문적 지식과 창의력이 요구된다. 풍진동에 대한 취약 여부는 그 간의 케이블교량 경험을 토대로 변장비(=지간길이/구조적폭원)를 예로 들어 다음과 같이 구분할 수도 있다.
 - 변장비 30 미만: 거스트계수를 적용한 정적풍하중으로 설계
 - 변장비 30 이상 60 미만: 정적풍하중으로 설계하되 출렁다리가 놓인 주변 풍환경, 구조 특성 또는 단면 형상을 고려하여 풍동실험 수행 필요성을 판단. 특히 거더의 외면 형상이 와류발생을 유도할 수 있는 형상을 취하는 경우, 해상 및 해안에 설치되는 경우, 주경간 길이가 100 m 이상인 경우에는 풍동실험을 수행하여 필요시 단면을 개선하는 것이 바람직
 - 변장비 60 이상: 풍동실험 고려

6.1.2 내풍설계순서

출렁다리의 내풍안정성은 적절한 절차를 거쳐서 검토하여야 한다. 여기에는 현지 풍환경과 풍속자료의 수집, 정적 설계, 풍동실험 및 공탄성해석을 통한 동적 풍하중 효과에 대한 안정성 확보, 동적 응답의 추정, 부재의 안정성 검토 등의 과정이 포함된다.

6.1.3 내풍안정성 확보를 위한 대책

바람에 의한 정적 변형 및 각종 진동(와류진동, 플러터, 갤로핑, 버페팅, 간섭효과 등)이 교량이나 교량 부재의 성능에 해로운 영향을 끼칠 경우 내풍안정성 확보를 위한 대책을 수립해야 한다.

6.2 풍속 및 난류특성

6.2.1 기본풍속

- (1) 기본풍속 $V_{10}(T)$ 는 표6.2.1의 지표조도구분 II인 개활지에서 지상 10 m 높이에서의 재현주기 T 년에 해당하는 10분 평균 풍속으로 정의한다. 출렁다리의 설계수명 $N(=50\text{년})$ 을 고려하여 비초과

확률 P_{NE} 가 37%에 해당하도록 하면 식(6.2.1)에 의해 재현주기 $T(=50\text{년})$ 를 결정할 수 있다.

$$T = \frac{1}{1 - (P_{NE})^{1/N}} \quad (6.2.1)$$

- (2) 기본 풍속은 대상 교량 가설 지역에서 가까운 지역의 기상관측소에서의 장기 관측 풍속 기록의 연 최대풍속 시계열을 극치분석한 결과와 그 인근 지역을 통과한 태풍 기록을 이용한 합리적인 태풍 시뮬레이션 기법을 통해 예측한 결과를 비교하여 안전 측의 풍속으로 결정한다. 출렁다리 가설 위치에 대하여 기상관측소의 풍속자료를 활용하기 어려운 경우에는 KDS 24 12 21 표 4.10-1의 지역별 기본풍속 값에 풍속환산계수($=0.93$)를 곱하여 재현주기 $T(=50\text{년})$ 에 해당하는 풍속을 산정할 수 있다.
- (3) 장기 관측 풍속기록을 이용하는 경우 기상관측소 주변 지형, 지표조도와 풍속계의 설치 높이 등을 고려하여 합리적인 방법에 의해 지표조도구분 II인 개활지에서 지상 고도 10 m의 풍속으로 관측 풍속을 보정하여야 한다. 이 때 지형 및 지표에 의한 영향을 고려한 관측 풍속의 보정은 적합한 국내외 기준에서 이용되는 방법에 준하여 수행되어야 하며, 관측 기간의 지표 변화, 관측 위치의 변화, 풍향 등을 고려하여야 한다.
- (4) 관측 풍속계 설치 높이의 보정은 식 (6.4.2)에 의해 풍속계 설치 고도 z_1 에서의 관측 풍속 V_1 을 지표조도구분 II, 지상고도 10 m에서의 풍속 V_2 로의 변환으로 정의한다.

$$\begin{aligned} V_2 &= C_t \cdot V_1 \cdot \left(\frac{z_2}{z_{G2}} \right)^{\alpha_2}, z_2 \geq z_b \\ &= C_t \cdot V_1 \cdot \left(\frac{z_b}{z_{G2}} \right)^{\alpha_2}, z_2 < z_b \end{aligned} \quad (6.2.2)$$

- (5) 지표조도계수 α_1 , 경도풍 고도 z_{G1} , 대기 경계층 최소높이 z_{b1} 그리고 지표조도길이 z_{01} 는 관측소 지역에 해당되는 지표조도구분에 대하여 표 6.2.1을 이용하여 결정한다. 또한 식 (6.2.2)에서 C_t 는 고도 및 조도 보정계수로 식 (6.2.3)에 의해 계산하며, α_2 , z_{G2} , z_{b2} 는 지표조도구분 II, 지상고도 10m에 해당하는 값을 이용한다.

$$C_t = \left(\frac{z_{G1}}{z_1} \right)^{\alpha_1} \quad (6.2.3)$$

표 6.2.1 지표조도구분에 따른 풍속 프로파일 매개변수

지표조도구분		α	z_G	z_b	z_0
I	해상, 해안	0.12	500	5	0.01
II	개활지, 농지, 전원 수목과 저층건축물이 산재하여 있는 지역	0.16	600	10	0.05
III	수목과 저층건축물이 밀집하여 있는 지역, 중, 고층 건물이 산재하여 있는 지역, 완만한 구릉지	0.22	700	15	0.3
IV	중, 고층 건물이 밀집하여 있는 지역, 기복이 심한 구릉지	0.29	700	30	1.0

- (6) 교량 가설 지역의 지표조도는 교축방향의 양쪽 풍향과 교축직각 방향의 양쪽 풍향을 모두 고려하여야 한다. 교축직각 방향의 경우 그림 6.2.1(a)에 보는 바와 같이 교량 상부 구조 높이의 100배 범위(최소 500 m)에서의 평균 지표상황으로 결정하며, 교축 방향의 경우 그림 6.2.1(b)에 보는 바와 같이 교량 최고 높이의 100배 범위에서의 평균 지표상황으로 결정한다.

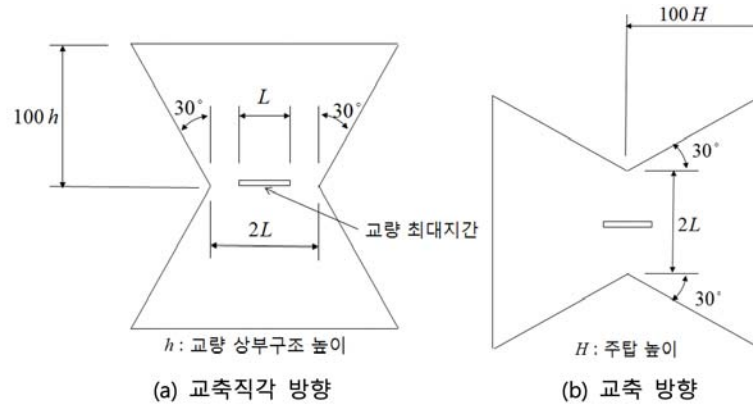


그림 6.2.1 지표조도구분을 위한 참조지역

- (7) 태풍시뮬레이션 기법은 국제적으로 공인된 과거태풍의 경로, 중심기압 등의 자료를 이용하여야 하며, 대상 교량 가설 지역을 중심으로 합당한 영역을 설정하여 해당 영역으로의 태풍 진입율, 중심기압, 이동속도, 이동방향, 최대풍속반경 등에 대한 통계적 모형을 포함하여야 한다.

[해설]

- (2) KDS 24 12 21 표 4.10-1의 지역별 기본풍속 값은 비록 풍공학자들로부터 과대하다고 평가받고 있지만 그럼에도 불구하고 선언적으로는 재현주기 100년의 풍속 값이다. 반면 총칙에서 출렁다리의 설계수명을 50년으로 제시하였으며 비초과확률 37%를 적용할 경우 기본풍속의 재현주기도 식 (6.2.1)에 따라 50년으로 산정되어 KDS 24 12 21 표 4.10-1의 기본풍속 값도 그에 따라 저감시킬 필요가 있다. 이 저감되는 풍속의 비율을 풍속환산계수로 정의하였다. 풍속환산계수를 산정하기 위하여 서울, 인천, 원주 등 내륙, 해안지역 도시 10 곳의 44년간 연최대풍속 자료를 분석하였다. 연최대풍속을 활용하여 지역별 재현주기 100년과 50년 풍속을 구하였으며 비율을 구하여 이를 풍속환산계수로 적용하였다. 해설 표 6.2.1과 같이 재현주기 50년 풍속의 경우 재현주기 100년 풍속에 비하여 10개 지역 평균값으로 0.93배만큼 감소하였기 때문에 이를 토대로 0.93의 풍속환산계수를 제시하게 되었다.

해설 표 6.2.1 지역별 풍속환산계수

대상 지역	재현주기 100년 풍속① (m/s)	재현주기 50년 풍속② (m/s)	재현주기 50년 풍속환산계수 (=②/①)
여수	37.6	34.4	0.92
목포	33.2	30.9	0.93
울산	27.4	25.5	0.93
부산	32.4	30.7	0.95
인천	29.3	27.5	0.94
서울	21.1	19.8	0.94
원주	18.2	17.1	0.94
대전	26.6	24.5	0.92
대구	25.4	23.7	0.93
광주	24.1	22.6	0.94
평균	27.5	25.7	0.93

6.2.2 설계기준풍속

- (1) 설계기준풍속 V_D 는 대상 지역의 기본풍속과 교량의고도, 주변의 지형과 환경 등을 고려하여 합리적인 방법으로 결정한다.
- (2) 대상 교량 가설 지역이나 설계기준고도에서 풍속자료가 가용치 못한 경우에는 6.2.1에서 산정한 기본풍속 V_{10} 을 이용하여 대상 교량 가설 지역의 설계기준고도에서의 설계기준 풍속을 산정한다.
- (3) 풍동실험이나 풍진동 검토를 위한 독립주탑의 풍속 설계기준고도는 주탑높이의 65 %로 간주한다. 설계 풍하중재하 시에는 주탑 하단에서 최상단까지 주탑 단면 및 풍속의 연직분포를 고려하여야 한다.
- (4) 출렁다리가 계곡 등에 설치되어 지형의 영향으로 상향풍 등이 발생할 것으로 예상되는 경우에는 그 영향을 반영하여야 한다.

6.2.3 한계풍속

- (1) 한계풍속 V_{cr} 은 발산진동(플러터, 갤로핑등)의 검토를 위한 풍속으로 다음과 같다.

$$V_{cr} > C_{SF} \cdot V_D \quad (6.2.4)$$

- (2) 안전계수 C_{SF} 는 1.1 이상을 적용한다.

[해설]

- (2) 케이블교량과 같은 중요한 구조물의 안전계수는 신뢰도분석에 의해 1.3 이상으로 결정된다. 바람이 심하게 불 때 출렁다리는 통행이 제한되며, 다리가 유연하여 발산진동이 발현되더라도 시스템 전체의 붕괴가 아닌 연결부 손상 정도에 국한된 사례도 있다. 따라서 출렁다리의 경우, 안전계수 1.3은 과다하다고 판단되어 전술한 특성을 고려하여 1.1 을 제안하였다.

6.2.4 바람의 난류특성

- (1) 바람의 난류 특성은 교량 가설위치에서의 난류 강도, 난류의 특성 길이 및 난류 스펙트럼을 포함하여야 하며 인근에서 측정한 자료를 바탕으로 산정한 값을 사용하여야 한다.
- (2) 다만, 실측이 여의치 않으면 아래의 값을 사용할 수 있다. 즉, 고도 z 에서 난류의 기류방향(u), 수평방향(v), 수직방향(w) 성분의 난류강도(I)는 각 변동성분의 표준편차(σ)와 평균풍속(\bar{V})의 비율로 다음과 같이 정의된다.

$$I_i = \frac{\sigma_i}{\bar{V}} \quad (6.2.5)$$

- (3) 고도에 따른 기류방향 난류강도 I_u 는 식 (6.2.6)을 사용하여 산정할 수 있다. 이 때 지표조도 계수 α , 최소높이 z_b 그리고 조도길이 z_0 는 표 6.2.1의 값을 사용한다.

$$\begin{aligned} I_u &= \frac{1}{\ln(30/z_0)} \cdot \left(\frac{30}{z} \right)^\alpha, & z_b < z < 100m \\ &= \frac{1}{\ln(30/z_0)} \cdot \left(\frac{30}{z_b} \right)^\alpha, & z \leq z_b \end{aligned} \quad (6.2.6)$$

- (4) 수평방향(v) 및 수직방향(w)의 난류강도는 각각 식 (6.2.7)의 값을 사용할 수 있다.

$$I_v = 0.80 \cdot I_u \quad (6.2.7)$$

$$I_w = 0.50 \cdot I_u$$

- (5) 이 때 6.2.1에서 언급한 바와 같이 지표조도에 따른 난류 특성을 고려하기 위해 교축 방향의 양쪽 풍향 및 교축 직각 방향의 양쪽 풍향을 각각 고려하여야 한다.

6.3 정적 풍하중

- (1) 주 부재에 작용하는 기류방향 단위길이당 정적 풍하중은 식 (6.3.1)에 의하여 구한다.

$$P = \frac{1}{2} \rho V_D^2 C_D G B_R \quad (6.3.1)$$

여기서, ρ 는 공기밀도 ($=1.225\text{kg/m}^3$), B_R 는 항력계수 C_D 를 무차원화하기 위해 적용된 단면의 대표 길이(m)로서 데크의 경우 폭 또는 높이(m)를 사용한다.

- (2) 거스트계수 G 는 풍속의 평균성분과 더불어 짧은 시간 동안에 난류 성분에 의한 순간적인 변동에 따른 풍압의 변화를 고려하기 위한 계수이다. 고도 z 에서의 기류방향 거스트계수는 식 (6.2.6)의 난류강도를 사용하여 식 (6.3.2)로부터 구할 수 있다.

$$G = 1 + 7 \cdot I_u(z) \quad (6.3.2)$$

- (3) 거더와 바닥판의 항력계수 C_D 는 풍동실험 또는 수치해석으로 산정하여야 한다. 공기력계수가 잘 알려진 형태의 단면에 대해서는 기존 문헌을 참조할 수 있지만 합리적임을 입증해야 한다. 투과율이 높은 부재에 대해서는 풍동실험시 등가의 투과율을 확보하는 등 항력계수 측정에 주의할 필요가 있다.

- (4) 주탑 및 하부구조나 케이블과 같은 주 부재에 대한 항력계수 C_D 도 풍동실험 또는 수치해석으로 산정하여야 한다. 공기력계수가 잘 알려진 형태의 단면에 대해서는 기존 문헌을 참조할 수 있지만 합리적임을 입증해야 한다.

6.4 바람에 의한 진동

바람에 의한 각종 진동(와류진동, 플러터, 갤로핑, 버페팅, 간섭효과 등)이 교량이나 교량 부재의 성능에 해로운 영향을 끼쳐서는 안 된다. 특히 보행교가 계곡이나 산악에 설치된 경우와 같이 고도 보정이 어렵거나 상향풍의 효과 등이 예상되는 경우에는 이를 적절히 반영해 진동특성을 검토해야 한다.

6.4.1 와류진동

- (1) 와류에 의한 교량의 응답은 풍동실험이나 널리 알려진 수학적 해석모델을 사용하여 추정할 수 있으며, 이를 바탕으로 피로문제를 포함한 구조적인 검토를 해야 한다.
- (2) 와류진동의 발생 풍속과 진폭은 단면 형상에 따라 민감하므로 풍동실험을 통하여 추정해야 한다. 특히 와류진동은 난류특성과 구조감쇠비에 따라 응답의 크기가 매우 달라지므로, 현장 여건을 고려하여 적절한 난류를 구현해야 한다.

6.4.2 발산진동

동적 불안정현상(플러터, 갤로핑 등)의 발생 풍속은 식 (6.4.4)의 한계 풍속보다 커야 한다.

6.4.3 세장 부재의 진동

세장부재에서 독립적인 국부 진동이 발생할 수 있으므로 이에 대해서 충분히 안전하도록 설계해야 한다.

6.4.4 난류에 의한 진동

- (1) 난류에 의한 교량의 응답은 풍동실험이나 널리 알려진 수학적 해석모델을 사용하여 추정할 수 있으며, 이를 바탕으로 피로문제를 포함한 구조적인 검토를 해야 한다. 자연적인 난류에 의한 버페팅 진동은 완전히 억제할 수 없으나, 단면 형상이나 구조 특성을 개선하여 난류에 의한 응답을 줄이도록 설계해야 한다. 특히 매우 유연한 출렁다리에 대해서는 설계 풍속 내에서 과도한 비틀 및 횡방향 버페팅 응답이 발생하지 않는지 설계단계에서 검토해야 하며 필요시 버페팅 안정화 대책을 수립해야 한다.
- (2) 설계풍속 내에서 버페팅 부재력을 반영한 풍하중 조합에 대하여 부재의 안전성을 검토해야 한다.
- (3) 풍속, 풍향, 응력의 발생빈도를 고려한 확률론적인 방법을 사용하여 필요시 교량 사용수명 동안의 버페팅 진동에 대한 피로를 검토해야 한다.

6.5 동적풍하중

6.5.1 동적풍하중 산정

출렁다리 설계를 위한 동적 풍하중은 풍동실험에서 측정한 공기역학적 자료를 바탕으로 널리 알려진 수학적 해석모델을 사용하여 산정하여야 한다.

6.5.2 설계 감쇠비

동적 풍하중에 의한 출렁다리의 설계 감쇠비는 구조 형식, 재료, 형상 등을 고려하여 합리적인 방법으로 산정해야 한다. 설계단계에서는 4.4.2의 해석용 감쇠비를 적용할 수 있다. 그러나 설계 감쇠비는 추정값에 불과하므로 출렁다리 완공 이후 개통 전 현장계측을 통해 실제 구조 감쇠비를 확인하는 것이 필요하며, 이 값이 설계 감쇠비보다 작을 경우, 풍동실험을 재수행하여 와류 등 내풍안정성을 재검토할 필요가 있다.

6.6 풍동실험 및 해석

6.6.1 풍동실험

- (1) 풍동실험은 부분모형실험과 전교모형실험 등이 있으며, 상사법칙 또는 수학적 모델에 의하여 축소한 모형에 대하여 수행한다.
- (2) 출렁다리는 여러 모드가 함께 가진되기 쉽고 횡방향 거동도 나타난다. 이러한 출렁다리에 대하여 기존의 연직과 비틀 2자유도에 대한 2차원 부분모형실험만을 수행하는 경우 실험 방법의 한계에 대해 주의할 필요가 있다. 필요에 따라서는 6.6.2의 내풍안정성 해석을 병행하여 플러터풍속 판정 등 분석의 신뢰도를 높이는 것이 바람직하다.
- (3) 출렁다리는 구성 단면의 제원과 단위길이당 중량이 작기 때문에 낮은 축소율을 적용하게 된다. 이 때문에 한계풍속 구현이 어려울 수 있으므로 풍동실험 계획 시 이러한 특성을 충분히 고려하여야 한다.

6.6.2 전체 내풍안정성 해석

- (1) 부분모형 풍동실험에서 추출한 자료를 바탕으로 구성한 수학적 해석모델을 사용하여 교량의 내풍안정성을 평가할 수 있다.
- (2) 부분모형실험에서 관찰이 어려운 버페팅 거동은 버페팅해석을 통하여 검토되어야 한다. 이 때, 설계풍속 내에서 과도한 비틀 변형이나 횡방향 변위가 발생하지 않는지 검증하여야 하며 필요시 통행제한 풍속을 설정하여 보행자의 안전을 확보할 필요가 있다.
- (3) 부분모형풍동실험 시 제한된 자유도만을 활용한 플러터 안정성 평가가 수행되었다면 다중모드 플러터해석을 통하여 여러 모드가 연계된 플러터 안정성을 해석적으로 추가 평가할 필요가 있다.

6.7 한계상태와 하중계수

내풍설계를 위한 한계상태설계 개념은 1.4.2를 따르는 것으로 하고, 극한한계상태와 사용한계상태에 대한 기준을 만족하여야 한다.

6.7.1 극한한계상태

- (1) 내풍설계 시 3.4의 극한한계상태 하중조합 III, V, VI을 고려하여야 한다.
- (2) 극한한계상태 하중조합 III은 설계기준풍속을 적용하여 풍하중을 산정하고 구조물에 작용하는 풍하중계수는 1.7을 적용한다.
- (3) 극한한계상태 하중조합 V는 출렁다리 상 통행제한풍속의 바람이 불고 있는 상태에서 보행하중에 대하여 출렁다리의 구조안전성을 검토하기 위한 하중조합으로서 통행제한풍속인 10분 평균 10m/s에 상당하는 풍하중을 교량에 재하하고 보행자에 작용하는 풍하중도 고려한다. 구조물에 작용하는 풍하중계수 1.7과 보행자에 작용하는 풍하중계수는 1.0을 적용한다. 극한한계상태 하중조합 VI은 파랑하중을 고려하는 하중조합으로서 설계기준풍속을 적용하며 구조물에 작용하는 풍하중계수는 1.0을 적용한다.

[해설]

- (3) 최근 설계된 출렁다리 3개에 대해 버페팅 해석을 수행한 결과, 부록 표 A.2.4의 최소 사용성 기준인 0.8 m/s^2 의 수평가속도를 만족시킬 수 있는 10분 평균풍속은 대략 15~20m/s 수준임을 확인할 수 있었다. 케이بل강교량설계지침(2006)에서는 케이بل교량의 허용 최대 진동가속도로 연직 및 횡방향에 대해 0.5 m/s^2 을 제시하고 있고, 이에 부합하는 10분 평균풍속은 약 11-12 m/s 수준이다. 또한 박민영 등(한국풍공학회논문집, 2017)에 따르면 강풍시 소방대원의 작업제한 풍속이 등류조건에서 17 m/s로 제시되었다. 난류조건에서 순간최대풍속 17 m/s에 대응하는 10분 평균풍속은 대략 11-12 m/s로 볼 수 있다. 최근 한국교량및구조공학회에서 개발한 출렁다리 안전관리매뉴얼(안) (2021)에 따르면 출렁다리 통행제한풍속으로 10 m/s를 추천하고 있기 때문에 이러한 사항들을 반영하여 설계를 위한 출렁다리 통행제한풍속을 10 m/s로 제안하게 되었다.

6.7.2 사용한계상태

- (1) 교량의 사용성은 3.4의 사용한계상태 하중조합 I 및 IV에 대하여 검토하여야 한다.
- (2) 사용한계상태 하중조합 I은 출렁다리 상 통행제한풍속의 바람이 불고 있는 상태에서 보행자의 안전과 사용성을 검토하기 위한 하중조합으로서 통행제한풍속에 상당하는 풍하중을 적용하며 구조물에 작용하는 풍하중계수 1.0과 보행자에 작용하는 풍하중계수 1.0을 적용한다.
- (3) 사용한계상태 하중조합 IV는 프리스트레스 콘크리트 하부구조의 수평 풍하중에 대한 교량의 사용성을 검증하기 위한 하중조합으로서 설계기준풍속을 적용하며 구조물에 작용하는 풍하중계수는 0.6을 적용한다.
- (4) 바람에 의하여 출렁다리의 데크, 주탑, 케이블, 행어 등에서 주목할 만한 진동이 발생하지 않아야 한다.

부 록

부록 A.

진동 사용성 검토

부록 A. 진동 사용성 검토

A.1 일반사항

이 절차는 신설 보행교의 설계 단계에서 진동 사용성을 검토하는 목적 뿐만 아니라 기존 보행교의 평가에도 사용할 수 있다.

A.2 진동사용성 검토 절차

진동 사용성의 검토 절차는 그림 A.2.1과 같다. 절차 5 동하중 시험은 신형식의 교량, 장대지간의 교량, 특히 진동에 취약할 것으로 예상되는 교량(유연 보행교, 출렁다리 등)에 대하여 반드시 수행한다.

절차 1	보행교의 등급 결정
절차 2	보행자 쾌적 수준 결정
절차 3	고유진동수 해석
절차 4	동하중 해석 필요성 판단
절차 5	보행 상태 결정
절차 6	구조 감쇠비 결정
절차 7	각 보행상태에 대한 최대가속도 결정
절차 8	횡방향 Lock-in 검토
절차 9	진동 사용성 평가
절차 10	동하중 시험
절차 11	설계 보완

그림 A.2.1 진동 사용성 검토 절차

(1) 절차 1 : 보행교의 진동사용성 등급 결정

진동 사용성의 검토를 위하여 보행교는 표 A.2.1와 같이 분류된다. 원칙적으로 보행교의 등급은 관리기관에서 결정한다.

표 A.2.1 보행교의 진동사용성 등급

등급	정의	기타
I	많은 보행자가 이용하는 도심지의 보행교 또는 밀집된 군중이 자주 이용하는 보행교	기차역, 지하철역 인근 또는 공연시설, 체육시설 출입구 인근 등
II	밀집 주거지역에 위치한 보행교 또는 간헐적으로 전체 교면에 보행자가 만재하는 보행교	
III	간헐적으로 여러 명의 보행자가 이용하는 보행교 (전체 교면에 보행자가 만재하는 경우가 거의 없는 경우)	
IV	관광지, 등산로 또는 산악지역에 위치한 체험 또는 관광목적의 보행교	출렁다리, 흔들다리 등

(2) 절차 2 : 쾌적 수준의 결정

쾌적 수준은 보행자가 느낄 수 있는 가속도의 크기에 의해 정의된다. 쾌적함은 매우 주관적이며 특정한 가속도에 대하여 각 개인이 다르게 느낄 수 있으므로 하나의 값이 아니라 범위로 정해진다. 쾌적 수준 역시 발주자 또는 관리자가 결정하는 것이 원칙이며 쾌적 수준의 선택은 대개 보행자 및 보행교의 중요도에 영향을 받는다. 보행교의 쾌적 수준은 표 B.2.2와 같다.

표 A.2.2 보행교의 쾌적 수준

쾌적 수준	정의	기타
최고	보행자가 구조물의 진동, 즉 가속도를 거의 느끼지 못하는 수준	
보통	보행자가 구조물의 가속도를 약간 느끼는 수준	
최저	자주 발생하지 않는 하중 상태에서 보행자가 가속도를 확실히 느끼나 참을 수 없는 상태는 아닌 수준	
최소안전	관광 또는 체험의 목적으로 일부 보행자가 무서움을 느끼는 수준이나 안전에 위협을 느낄 정도는 아닌 수준	

출렁다리(또는 흔들다리)의 경우 보행자가 이미 이 보행교가 흔들린다는 사실을 인지하고 있으므로 어느 정도의 흔들림을 수용할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 절차 5에서 규정하는 보행 상태에 대해 표 A.2.2에서 최소 안전의 쾌적 수준을 만족하면 될 것으로 판단된다. 쾌적 수준에 따른 가속도의 표 A.2.3과 표 A.2.4에 정의되어 있다. 표 A.2.3과 표 A.2.4에서 범위 1은 최대의 쾌적함, 범위 2는 평균적 쾌적함, 범위 3은 최소의 쾌적함을 나타낸다. 범위 4 구간은 일반적인 보행교에서 허용되지 않으나 출렁다리 등에 대해 적용하는 가속도 범위를 나타내며 그 최대값($a_{s,v}$, $a_{s,h}$)은 발주기관에서 정한다.

표 A.2.3 수직 진동에 대한 가속도 범위(m/s^2)

가속도 범위	0	0.5	1	2.5	$a_{s,v}$
범위 1	최고				
범위 2		보통			
범위 3			최저		
범위 4				최소안전	

표 A.2.4 수평 진동에 대한 가속도 범위(m/s^2)

가속도 범위	0	0.1	0.15	0.3	0.8	$a_{s,h}$
범위 1	최고					
범위 2			보통			
범위 3				최저		
범위 4					최소안전	

(3) 절차 3 : 고유진동수 해석

이 가이드라인 4.6의 동적 해석 규정에 따라 고유진동수를 구한다. 출렁다리와 같이 자중이 가벼운 경우 보행자의 체중이 고유진동수에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 해석시 보행자의 질량을 포함한 경우에 대해서도 고유진동수를 해석한다. 이 경우 보행자의 질량은 교면 $1m^2$ 당 1명(체중 700 N)의 질량을 고려한다.

(4) 절차 4 : 동하중 해석 필요성 판단

보행교의 경우 보행자에 의한 가진에 따라 공진의 위험성이 있다. 즉, 보행교의 고유진동수가 보행자의 보행에 따른 가진 진동수가 유사한 경우 공진이 발생하고 진동 사용성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 보행자의 보행 진동수는 연직 방향으로 평균 2 Hz, 표준 편차 0.2 Hz 정도이다. 수평 방향으로는 연직 방향의 1/2인 평균 1 Hz 정도이다. 공진의 위험 범위는 표 A.2.5과 표 A.2.6과 같다. 이 표들에서 범위 1은 “공진의 최대 위험 범위”를, 범위 2는 “중간 정도의 위험 범위”를, 범위 3은 “표준적 하중 조건에 대해 낮은 위험 범위”를, 범위 4는 “공진의 위험을 무시할 수 있는 범위”를 나타낸다.

절차 3에서 구한 보행교의 고유진동수가 표 A.2.5와 표 A.2.6의 범위 4에 해당하는 경우(즉, 수직방향의 1차 고유진동수가 5.0 Hz 이상, 수평방향으로 2.5 Hz 이상)에는 동하중 해석을 수행할 필요가 없으며 진동 사용성을 만족하는 것으로 판단한다.

다만, 진동사용성 등급 IV의 보행교로서 케이블구조를 적용하여 상대적으로 매우 가벼운 구조인 경우(출렁다리 등), 공진이 발생하지 않더라도 보행자의 보행 가진에 의해 매우 큰 가속도가 발생할

수 있다. 이런 경우에는 절차 5~10까지의 진동 사용성 평가를 수행한다.
만약 보행교의 고유진동수가 위에서 언급한 조건을 만족하지 못하거나 2차 모드가 문제가 되는 교량인 경우에는 동적 방법에 의한 진동 사용성 평가가 이루어져야 한다. 위의 조건을 만족하더라도 신형식의 교량, 매우 중요한 보행교의 경우에는 발주자의 판단에 따라 진동사용성 평가를 요구할 수 있다.

표 A.2.5 수직과 종방향 진동의 공진 위험 범위

고유진동수 (Hz)	0	1	1.7	2.1	2.6	5
범위 1						
범위 2						
범위 3						
범위 4						

표 A.2.6 수평방향 진동의 공진 위험 범위

고유진동수 (Hz)	0	0.3	0.5	1.1	1.3	2.5
범위 1						
범위 2						
범위 3						
범위 4						

(5) 절차 5 : 보행 상태 결정
이 절차는 절차 5에서 동적 해석에 의한 진동 사용성 평가가 필요하다고 판단되는 경우에 수행한다. 보행교는 여러 가지의 보행 상태가 있을 수 있으며, 어떤 보행 상태에서 진동 사용성을 평가하며, 이때의 쾌적수준은 어떤 수준인가를 결정한다. 이 절차는 원칙적으로 발주자가 결정한다. 표 A.2.7의 통행 상태와 표 A.2.2의 쾌적 수준을 참고한다.

표 A.2.7 보행교의 통행 상태

통행 상태	보행자의 밀도, d	설명
TC1	$d = 15P/(BL)$	교면에 15명의 보행자가 있는 상태
TC2	$d = 0.2P/m^2$	보행자가 자유롭게 이동할 수 있는 상태
TC3	$d = 0.5P/m^2$	보행자가 자유롭게 이동할 수 있으나 가끔 보행이 방해 받는 상태
TC4	$d = 1.0P/m^2$	보행자의 자유로운 이동이 많이 제약된 상태
TC5	$d = 1.5P/m^2$	보행자가 자유롭게 이동할 수 없는 상태

(6) 절차 6 : 구조 감쇠비의 결정

보행교의 감쇠비는 이 가이드라인 4.6.2에 규정된 값을 사용한다.

(7) 절차 7 : 각 보행 상태에 대한 최대가속도 결정

각 보행상태에 대한 출렁다리의 최대 가속도는 동적해석으로 평가할 수 있다. 동적 유한요소 모델을 이용한 시간이력 해석에 사용할 수 있는 동적 보행 하중을 A.3에 제시하였다.

(8) 절차 8 : 횡방향 Lock-in 검토

일부 보행교의 경우 동기화된 횡방향 공진(Synchronous lateral excitation)의 영향으로 사용성이 문제가 될 수 있다. 이를 Lock-in효과라고도 부르며 진동 사용성 검토에서 Lock-in효과에 대한 검토를 반드시 진행해야 할 필요가 있다. Lock-in효과는 일부 연구에서 일정 정도 이상의 보행자가 보행하는 경우 나타날 수 있다고 보고된 반면, 어떤 연구에서는 횡방향 가속도가 0.1 m/s^2 를 초과하면 발생하는 것으로 보고되고 있다. 다른 교량의 예나 문헌에서 Lock-in효과가 주로 많은 보행자가 건너는 경우에 발생됨을 보고하고 있으므로, 특히 개통식과 같이 일시적으로 많은 보행자가 보행하는 경우 Lock-in효과를 면밀히 관찰해야 할 것으로 판단된다.

(9) 절차 9 : 진동 사용성 평가

보행교의 보행자에 의한 진동 사용성은 보행교에 발생하는 최대가속도가 제한값을 초과하지 않으면 만족하는 것으로 판단한다.

(10) 절차 10 : 동하중시험

동하중 시험은 다음과 같은 경우에 수행한다.

- ① 고유진동수 해석에서 보행교의 고유진동수가 표 3.9.5와 표 3.9.6의 범위 1 또는 2에 해당하는 경우
- ② 절차 6의 동하중해석에 의한 진동사용성 평가 결과 진동사용성을 만족시키지 못하여 댐퍼 등 제진장치를 적용한 경우
- ③ 출렁다리(또는 흔들다리)와 같이 케이블구조를 적용하여 매우 가볍고 유연한 구조를 사용한 경우
- ④ 기존 보행교의 안전성 및 사용성 평가에 필요한 경우

동하중 시험의 목적은 크게 (1) 보행교의 동특성(고유진동수, 모드형상, 감쇠비) 분석, (2) 구조 해석 모델의 검증 및 개선, (3) 통상적인 상태에서의 교량 거동(처짐, 가속도) 분석이다. 이를 위하여 인위적인 가진 시험(FVT) 및 일반적인 보행자의 사용 상태에 대한 시험(PVT)을 수행한다. 인위적인 가진 시험은 보행자 또는 가진장치를 이용하여 보행교에 인위적인 가진을 함으로써 보행교에 자유진동 상태를 발생시키고 이때의 보행교 거동을 계측하는 시험이다. 통상적인 사용상태에서의 시험은 다수의 보행자의 정상적인 보행에 따른 보행교의 거동을 계측하는 시험이다.

(11) 절차 11 : 설계 보완

절차 9에서 진동 사용성 기준을 만족하지 못한 경우 설계 변경 또는 구조 변경을 통하여 진동 사용성을 만족시키도록 하여야 한다. 질량이나 강성의 변화를 통하여 고유진동수를 조정하거나, 추가적인 감쇠장치를 통해 진동을 제어할 수 있다(1.4.6 참조).

A.3 동적 보행하중

출렁다리의 진동 사용성 평가를 위한 동적 보행하중 모형은 해석 방법에 따라 입증된 모형을 사용할 수 있다. 시간이력 해석에 사용할 수 있는 동적 보행하중 시간이력은 다음과 같은 모형을 적용할 수 있다.

$$P(x, t) = F(t)\delta(x - vt) \quad (\text{A.3.1})$$

여기서,

v = 보행 속도

x = 교량에서 위치

$$\delta(x) = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases}$$

보행자 1인에 대하여 보행 하중 주기 함수 $F(t)$ 는 다음과 같다.

연직방향

$$F_v(t) = G_0 + 0.4 G_0 \sin(2\pi f_m t) \quad (\text{A.3.2})$$

교축직각방향

$$F_h(t) = 0.05 G_0 \sin\left(2\pi \left(\frac{f_m}{2}\right) t\right) \quad (\text{A.3.3})$$

교축방향

$$F_l(t) = 0.2 G_0 \sin(2\pi f_m t) \quad (\text{A.3.4})$$

여기서 보행자 중량 G_0 는 700N, 보행 진동수 f_m 은 1.6~2.4Hz의 값을 사용할 수 있다.

이 부록의 동적 보행하중 시간이력은 "Footbridges : Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading," Sétra technical guide (2006)의 모델을 사용한 것이다.

이 모델에서 동적해석을 위한 보행자 속도와 보행 인원수는 다음 표 A.3.1 의 보행자 서비스 수준 (도로용량편람, 국토해양부 2013)을 참고하여 정할 수 있다.

표 A.3.1 보행자 서비스 수준

서비스수준	보행교통류율 (인/분/m)	점유공간 (m ² /인)	밀도 (인/m ²)	속도 (m/분)
A	≤ 20	≥ 3.3	≤ 0.3	≥ 75
B	≤ 32	≥ 2.0	≤ 0.5	≥ 72
C	≤ 46	≥ 1.4	≤ 0.7	≥ 69
D	≤ 70	≥ 0.9	≤ 1.1	≥ 62
E	≤ 106	≥ 0.38	≤ 2.6	≥ 40
F	-	< 0.38	> 2.6	< 40

국토교통부

성 명	소 속	성 명	소 속
이상주	국토교통부	양성모	국토교통부
유병수	국토교통부		

집필위원

성 명	소 속	비 고
황의승	경희대학교	집필위원장
박원석	목포대학교	간사
김남희	서울대학교	
김호경	서울대학교	
신상훈	케이블브릿지	
유승민	한국교량및구조공학회	

자문위원

성 명	소 속	성 명	소 속
고현무	서울대학교	백도준	반디컨설턴트
권순덕	전북대학교	손윤기	엔비코
김세종	코리아에스이	이명재	유신
김윤석	티이솔루션	이승우	티이솔루션
문종훈	택현	이지훈	진화기술공사
박경룡	디에스글로벌이씨엠	이해성	서울대학교
박연철	한남대학교	조재병	경기대학교

출렁다리 설계 가이드라인

2021년 4월

국토교통부

작성기관 사단법인 한국교량및구조공학회
서울시 관악구 관악로13길 25, 세종오피스텔 1003호
☎ 02-871-8395, FAX 02)885-1081 E-mail : kibse@kibse.or.kr
<http://www.kibse.or.kr>

국가건설기준센터
10223 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)
Tel : 031-910-0444 E-mail : kcsc@kict.re.kr
<http://www.kcsc.re.kr>

※ 이 문건의 무단복제 및 배포를 절대 금합니다.