



케이블 교량의 내풍설계 실무

2006. 11. 10

권순덕
전북대학교 토목공학과



케이블 강교량 설계지침(안)

- 내풍설계편 작성의 기본 틀
 - 도로교설계기준과 부합
 - 널리 사용되는 이론을 반영
 - 설계자의 창의성 보장
- 피드백 요청



내풍설계관련 기준

| 구분 | 한국 | 일본 | 구미 |
|-------|---------------|---------------------|-----------------------------|
| 일반 교량 | 도로교설계기준 | 도로교시방서 도로교내풍설계편람 | Eurocode(안) AASHTO BS |
| 장대 교량 | 케이블강교량설계지침(안) | 本四내풍설계기준 | 교량마다 별도 |

- 일본 도로교내풍설계지침
 - 200m이하 교량 대상
 - 근사식을 사용한 상세 내풍설계 여부 판단
- 本四내풍설계기준
 - 1976년, 1990(明石), 1994(尾道・今治), 2001년
 - 1990~ : 현장실측 자료를 사용한 보정계수 적용



풍동실험/해석의 설계 반영

- CFD해석
 - 정적 공기력계수 : 기본단면 산정
 - 동적 공기력계수 (플러터계수) : 내풍안정성 참고
- 2차원 부분모형실험
 - 정적 공기력계수 => 정적 구조해석
 - 플러터계수 => 플러터/버페팅 해석
 - 등류 응답 => 내풍안정성 평가
 - 난류 응답 => 내풍안정성 참고, 등가풍하중 산정
- 3차원 전교모형실험
 - 내풍안정성 최종 확인
 - 예측 못한 진동 발생 확인

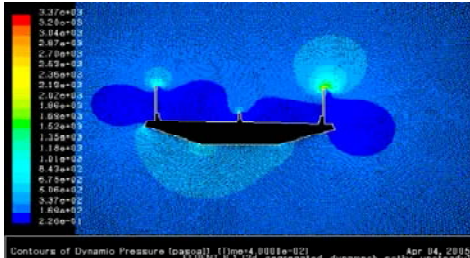
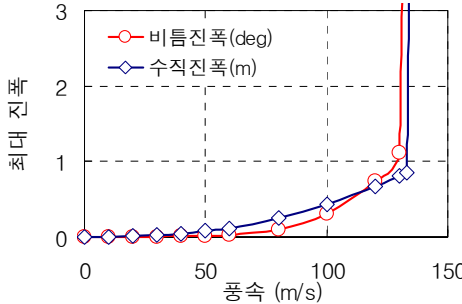
풍동실험/해석 결과의 설계 반영

- 정적 구조해석
 - 거스트계수 적용 => 응력 계산
- 플러터 해석
 - 상세한 시공단계별 내풍안정성 평가
 - 구조계의 변화시 내풍안정성 평가
- 버페팅 해석
 - 응답 산정 => 거스트계수에 의한 정적 해석과 비교
 - 완성계 : 피로 및 사용성 평가
 - 시공단계 : 주요 공정별 응력 검토

케이블교량의 내풍설계 실무(IABSE Workshop) 5/18

CFD해석의 설계 반영

- 정적 공기력계수 산정
 - 정적 구조해석
=> 기본 단면 산정
- 동적 CFD해석
 - 플러터계수 산정
- 플러터/버페팅 해석
 - 내풍안정성 평가 참조

케이블교량의 내풍설계 실무(IABSE Workshop) 6/18



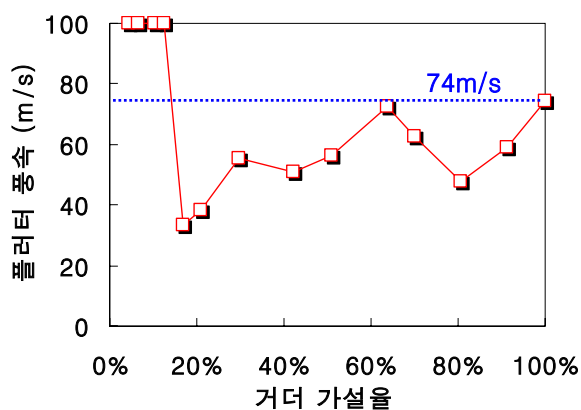
플러터 실험/해석의 설계 반영

- 플러터 발생 풍속의 검토
 - 완성계 : 안전계수 ≥ 1.2
 - 시공중 : 안전계수 ≥ 1.0

- 시공중 내풍안정성
 - 사장교 : 폐합 직전 위험
 - 현수교 : 가설방법에 의존
 - 비틀진동수의 변화 추적 => 일반적으로 낮을 때 위험



현수교의 시공단계별 플러터해석



<유선형 싱글박스 1500m급 현수교, 중앙=>타워 비대칭가설>

버페팅 응답의 설계 반영

- 버페팅 응답
 - 추정 응력(풍동실험 혹은 해석) ≈ 정적해석(거스트계수) 응력
 - 응력 평가 : 최대 응력 < 허용응력
 - 사용성 평가 : 최대 가속도($V \leq 25\text{m/s}$) $\leq 0.5\text{m/s}^2$

- 피로 평가
 - 확률론적 방법
 - Miner법칙 적용 : 누적피로도 < 1

케이블교량의 내풍설계 실무(IABSE Workshop)
9/18

버페팅 피로 평가 방법

$$n(S_j) = f_s \cdot f_v \cdot f_A \cdot T_{bridge} \cdot \omega$$

$$\text{누적피로도} = \sum_j \frac{n_j}{N_j}$$

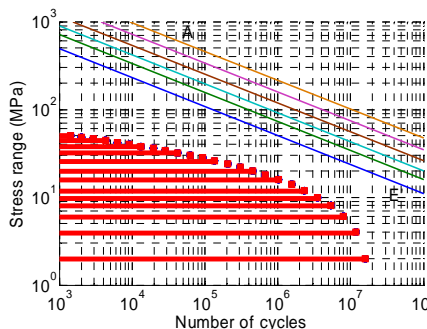
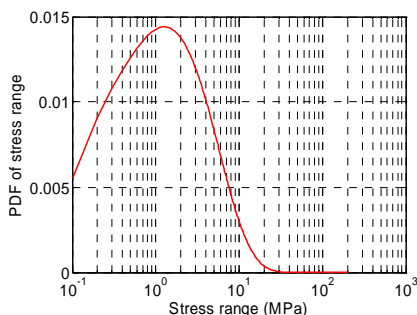
케이블교량의 내풍설계 실무(IABSE Workshop)
10/18



완성계 버페팅 피로 평가 예제

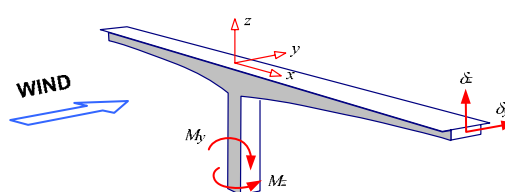
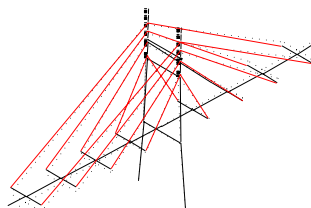
- 누적피로도(=0.4) < 1

O.K.



시공중 버페팅 응답

- 밸런스드 캔틸레버 공법

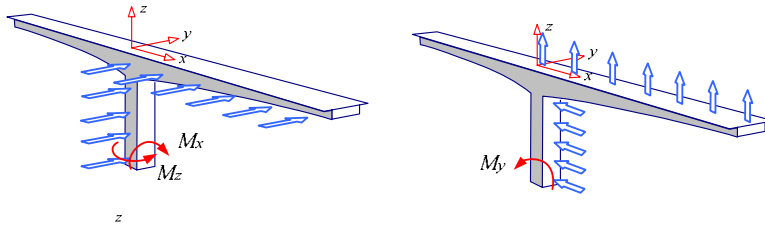


- 교각 하부에 큰 휨모멘트와 비틀림모멘트 유발
- 풍하중 등분포 재하 => 비대칭모드 고려 못함



시공중 버페팅 응답 검토 방법

- 반쪽 재하 방법(AASHTO)



- 교각 하단 모멘트

- M_x, M_y, M_z (토크)
- 버페팅 응력 = (반쪽재하 정적응력) × 거스트계수



시공중 버페팅 평가 예제-1

- 더블 캔틸레버보 : 총길이 150m

| 순서 | 변수 | 설명 | 값 | 단위 |
|----|-------------|--------------------------------|-------|-------------------|
| 1 | U_{basic} | basic wind velocity | 25.0 | m/s |
| 2 | ρ | air density | 1.25 | kg/m ³ |
| 3 | z_0 | roughness length | 0.05 | m/s |
| 4 | α | terrain factor | 0.16 | |
| 5 | b | horizontal dimension | 150.0 | m |
| 6 | h | vertical dimension | 4.0 | m |
| 7 | f_n | natural frequency | 1.000 | Hz |
| 8 | δ_s | logarithmic decrement | 0.050 | |
| 9 | m | mass per unit area | 500.0 | kg/m ² |
| 10 | C | shape factor(drag coefficient) | 0.6 | |
| 11 | z_{ref} | reference height | 50.0 | m |

시공중 버페팅 평가 예제-2

| 순서 | 변수 | 설명 | 값 | 단위 |
|----|--------------------------------|-----------------------------------|--------|-----|
| 12 | U_{ref} | mean wind velocity | 32.3 | m/s |
| 13 | I_u | turbulence intensity | 0.145 | |
| 14 | L_u | integral length scale | 162.1 | m |
| 15 | δ_a | aerodynamic damping | 0.024 | |
| 16 | δ | total damping | 0.074 | |
| 17 | $\phi_b = 3b/L_u$ | nondimensional parameter | 2.777 | |
| 18 | J_b^2 | nondimensional response variance | 0.069 | |
| 19 | k_b | background response | 1.098 | |
| 20 | S_u | spectral density function of wind | 0.047 | |
| 21 | $\phi_y = C_y b f_n / U_{ref}$ | nondimensional parameter | 46.386 | |
| 22 | $ J_y(f_n) ^2$ | joint acceptance function | 0.013 | |
| 23 | k_r | resonant response | 0.665 | |
| 24 | k_p | peak factor | 3.738 | |
| 25 | ϕ | gust factor | 1.437 | |

$$y_{max} = y_{static} + k_p \cdot y_{rms} = \phi \cdot y_{static}$$

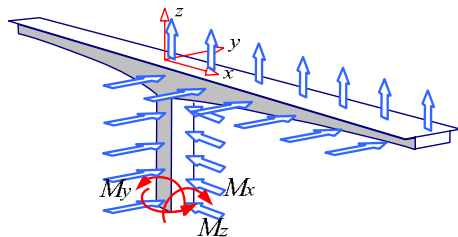
시공중 버페팅 평가 예제-3

■ 교각 하단의 모멘트

$$M_z = \phi \times \frac{1}{8} \left(\frac{1}{2} \rho V^2 C_D^{girder} I_{ref}^{girder} \right) L^2$$

$$M_x = \phi \times \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \rho V^2 C_D^{girder} I_{ref}^{girder} \right) LH + \phi \times \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \rho V^2 C_D^{pier} I_{ref}^{pier} \right) H^2$$

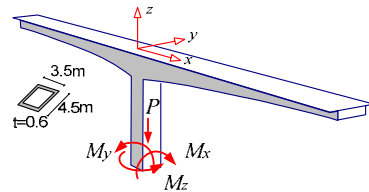
$$M_y = \phi \times \frac{1}{8} \left(\frac{1}{2} \rho V^2 C_L^{girder} I_{ref}^{girder} \right) L^2 + \phi \times \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \rho V^2 C_L^{pier} I_{ref}^{pier} \right) H^2$$





시공중 버페팅 평가 예제-4

| 변수 | 설명 | 값 | 단위 |
|--------------|------------------------|---------|----------------|
| A_{girder} | sectional area(girder) | 8.0 | |
| A_{pier} | sectional area(pier) | 8.2 | m ² |
| I_x | pier | 25.2 | m ⁴ |
| I_y | pier | 15.8 | m ⁴ |
| q_{1D} | drag force at pier | 1.144 | kN/m |
| q_{2D} | drag force at overhang | 1.569 | kN/m |
| q_{1L} | lift force at pier | 0.457 | kN/m |
| q_{2L} | lift force at overhang | 0.261 | kN/m |
| P | axial force | 40350.0 | kN |
| M_x | moment at pier | 10509.4 | kN-m |
| M_y | moment at pier | 1878.8 | kN-m |
| M_z | moment at pier | 6340.9 | kN-m |



맺음말

- 기본계획 단계에서 동적 CFD해석
- 풍동실험시 플러터계수 추출
- 시공단계별 내풍안정성 평가는 플러터 해석
- 완성계 버페팅 응답은 피로 검토
- 시공중 버페팅 응답은 교각 하단 응력 검토

