

부잔교의 구조재료에 따른 성능특성 고찰



오재택 창해엔지니어링 대표
 배길중 해양수산부 사무관
 전경철 해양수산부 사무관

서론

항만과 어항 및 내수면(하천·댐)을 기반으로 하는 마리나, 친수레포츠, 수상태양광, 수산양식 등의 수상·수변 사업과 행사에 있어 친환경적·경제적 대안시설로 특히 각광받고 있는 부유식 구조물(부잔교, 부방파제, 가두리, 수상도로 등)의 효용성과 도입 전망성은 매우 탁월하다 하겠다.

이러한 부유식 구조물은 부체와 계류시스템의 성능특성에 따라 그 안전성과 기능이 결정되므로 이에 관한 정확한 이해와 접근이 구조물의 설계해석과 용도적용의 요체라 할 수 있다.

한편, 부체의 구성재질에 대해 살펴보면 외력에 대해 부재강성과 계류력으로 저항하는 강성체(강재/콘크리트/FRP)와 부재탄성과 조립변위로 외력을 흡수하는 탄성체(PE/PE조합)로 크게 나눌 수 있으며, 그 구조재료와 결합방식에 따라 거동 및 구조상의 상반된 특성차를 나타내는 점에 주목할 필요가 있겠다.

부체의 설계·응용에 관한 국내외 문헌에 의하면 강성부체에 대한 해양수산부(2014) 기준서와 Fu(2005), Wang(2008), Vecili(2014)의 다양한 연구사례는 있으나, 탄성부체에 대해서는 아직까지 표준화 또는 지침 제시되거나 심층 연구되지 못한 실정으로서 근간에 개발된 Engineering Plastic(토목용 구조플라스틱)에 기반한 탄성부체의 상용화와 보급추세를 뒷받침할 수 있는 설계연구와 기준정립이 절실히 요구되고 있다.

본 고에서는 부잔교의 차량주행 및 파랑 작용시의 구조재료(콘크리트와 PE)별 거동특성과 구조특성을 비교·분석하고 결과 고찰을 통해 장래 탄성부체 설계표준화와 지침연구의 단초를 제시하고자 한다.

부잔교 모델링

2.1 부잔교 구조계

본 장에서는 콘크리트 및 PE를 구조재료로 하는 단위 부유체(Float)를 연결한 연속형 부잔교(Continuous Floating Bridge) 모델의 전체 구조계, 구조재료별 모델링, 모델해석방법 및 검토조건 등을 제시한다.

1) 모델개요

- 차량주행시의 Pitching 동요는 탄성부체(PE)에서는 전구간 일정¹⁾하나 강성부체(콘크리트)의 경우 폰툰의 결합위치에 따라 현저히 달라지므로, 구조재료간 동일조건을 비교가 될 수 있도록 강성span의 동요대칭점 확보(평활화)를 위해 총 5span으로 모델링한다.
- 강성부체(콘크리트)의 종방향 한계연장²⁾을 감안하여 span당 40m, 총연장 200m로 모델링한다.
- 부잔교 계류시스템은 시중점부 각 2개소에 말뚝계류(x, y 변위제어)로 적용하고, 부체 연직방향의 부력스프링에 의한 6 DoF 구현조건(3D)으로 모델링한다.

2) 모델하중

- 상재하중 : 총중량 50kN(전륜 10kN, 후륜 40kN)과 주행모멘트 9kN·m, 주행속도 10m/sec, 1차선 2대 연행조건의 이동하중 및 정지하중으로 검토한다.
- 환경하중³⁾ : 부잔교 이용조건을 평상파(연직파압)를 적용하여 Sagging/Hogging에 의한 최불리 조건에서의 구조특성을 검토한다.
 - 파고 : $H_s = 0.5\text{m}$ (Airy Wave)
 - 주기 : $T_s = 5.29\text{sec}$ ($L_0 = 40.0\text{m}$)

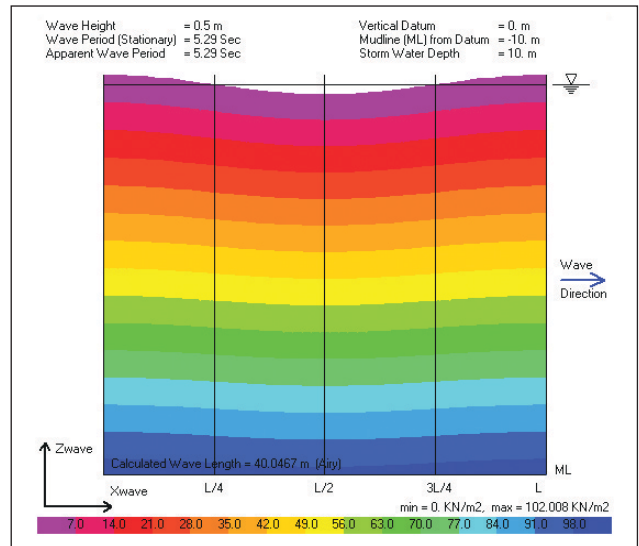
〈표 1〉 Wave Table (at $t = -1.35\text{sec}$)

위상 (m)	속도 (m/sec)	가속도 (m/sec ²)	파압 (kN/m ²)
0	0.000	-0.371	2.53
10	-0.313	-0.172	0.09
20	0.000	-0.152	2.53
30	0.313	-0.172	4.96
40	0.000	0.371	2.53

2.2 구조재료별 부잔교 모델링

1) 콘크리트 부잔교(강성부체)

- 단위유닛 : Span $L = 40\text{m}$, 폭원 $B = 6.5\text{m}$, 높이 $h = 1.2\text{m}$ 의 RC 콘크리트 폰툰
- 부잔교 연장 : 5 Unit, $L = 200\text{m}$
- 단면 모델링 : 상하부 슬래브 및 외측벽($t = 15\text{cm}$), 내격벽($t = 12\text{cm}$)의 3×4 격실구조의 shell요소로 모델링
- 결합 모델링 : 홍관영 등(2011)의 연구와 탄금호 대안설계(2011) 등에서 검토된 hinge 결합방식 중 폰툰간의 단차를 최소화할 수 있는 전단키 방식을 적용

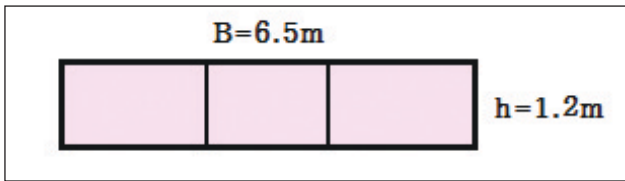


〈그림 1〉 Wave Pressure Contour

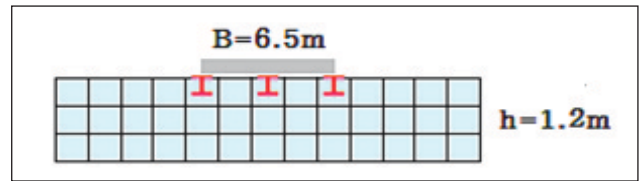
2) PE 부잔교(탄성부체)

- 단위유닛 : $0.5\text{m}(L) \times 0.5\text{m}(B) \times 0.4\text{m}(h)$ 의 멀티룸플로트⁴⁾ 13열×3층 조립에 의한 폭원 $B = 6.5\text{m}$, 높이 $h = 1.2\text{m}$ 의 연속형 PE폰툰

1) 비교 제외구간인 시중점부(Node S, E)를 제외함.
 2) 파랑조건과 상재하중에 지배되는 콘크리트 부체의 표준적인 한계 설계연장
 3) 상세설계가 아닌 성능특성 비교이므로 횡동요(풍하중, 횡파 등) 및 황천시 조건은 검토생략
 4) 스킵트라(주), Multi-Room Float(토목구조용 강화플로트)



〈그림 2〉 콘크리트 부잔교 Modelling(단면)



〈그림 3〉 PE 부잔교 Modelling(단면)

- 부잔교 연장 : 15,600 unit, L=200m
- 단면 모델링 : PE플로트 중앙상단에 차량주행용Deck spine(H-300×300) 3열과 Wearing deck (1,900×750×150)를 조합한 beam요소로 모델링
- 결합 모델링 : PE폰튼 구조특성상 무한연결이 가능하므로 별도의 span결합은 불적용

2.3 모델해석

1) 해석 프로그램

유한요소 해석법에 기반한 C&S사(USA)의 범용 3D 구조해석 프로그램인 SAP2000(v14.1)을 활용한다.

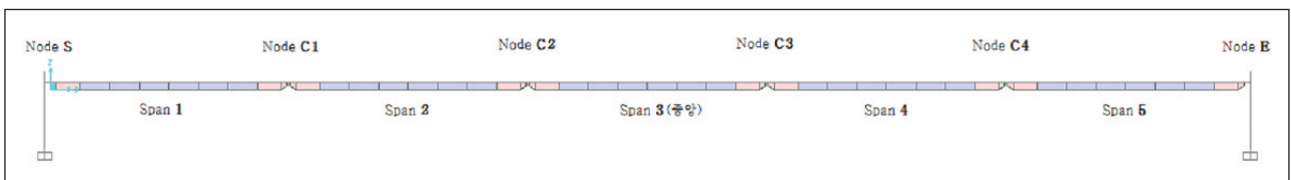
2) Load Case 및 해석방법

■ Load Case 설정

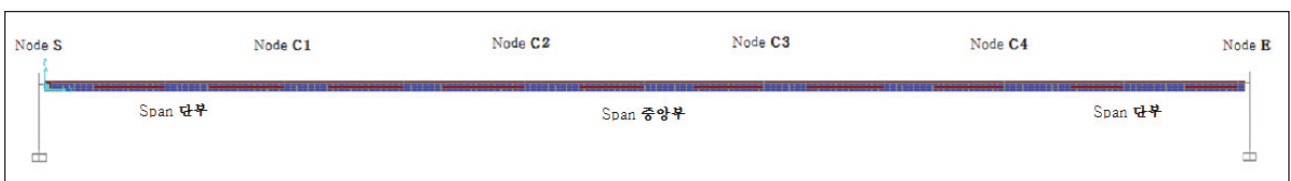
- 구조재료에 따라 적용 설계법을 이원화하여야 하나, 성능특성 비교를 위한 본 고의 검토방향에 따라 동일조건에서의 해석이 될 수 있도록 허용응력설계법(ASD)을 적용하여 〈표 2〉와 같이 Load Case를 설정한다.
- 또한, 횡방향하중에 대한 검토는 생략한다.

■ 하중적용 및 해석방법

- Moving Load : 차량(2대)의 축하중과 주행모멘트를 이동(Mv) 및 정지하중(P-Vehicle)으로 적용하고 최대 변위/응력 발생조건을 구현한다.
- Wave Load : 파동장해석에 의한 연직파압을 적용하고, 최대 변위/응력 발생 위상지각($t = -1.35\text{sec}$)으로



〈그림 4〉 콘크리트 부잔교 Modelling



〈그림 5〉 PE 부잔교 Modelling

〈표 2〉 Load Case 설정

Model	Load Case		하중 계수	적용구분
콘크리트 부잔교	Comb Wv+Mv	Moving Load +Wave Load	1.0	거동해석 중앙Span
	Comb All	자중+ Moving Load +Wave Load	1.0	구조해석 최대응력 경사도
PE 부잔교	Comb Wv+Mv	Moving Load +Wave Load	1.0	거동해석 중앙부
	Comb All	자중+ Moving Load +Wave Load	1.0	구조해석 최대응력 경사도

〈표 3〉 구조재료별 침하변위

Model	Case	침하량(m)	검토지점	Node No
콘크리트 부잔교	Wv+Mv	0.171	중앙Span (연결부)	C2 jLane19
	Mv	-0.066		
	자중+Wv+Mv	-0.802		
PE 부잔교	Wv+Mv	0.057	중앙Span (중앙부)	C2 jD291
	Mv	-0.087		
	자중+Wv+Mv	-0.202		

Sagging/Hogging 조건을 구현한다.

- 동요해석 : 차량과 파랑하중 작용조건에서, 모델별 검토지점의 Time step(moving influence)에 의한 Trim과 최대 침하변위⁵⁾를 산정하고, 해당 검토경간과 부체자중을 감안한 실 운영조건(Comb All)에서의 주행경사도를 분석한다.
- 구조해석 : 부체자중과 최대응력 작용조건의 차량(P-Vehicle) 및 파랑조건을 구현하여, 모델별 검토지점의 최대 단위 부재력(인장)을 산정한다.

구조재료별 성능특성 고찰

본 장에서는 콘크리트 및 PE를 구조재료로 하는 연속형 부잔교에 대해, 파랑하중과 차량하중 작용시의 침하변위, Trim동요, 진동 및 부재력, 하중분담, 내구성 등을 비교 검토하고 이에 바탕한 부잔교 구조재료별 거동특성과 구조특성을 고찰한다.

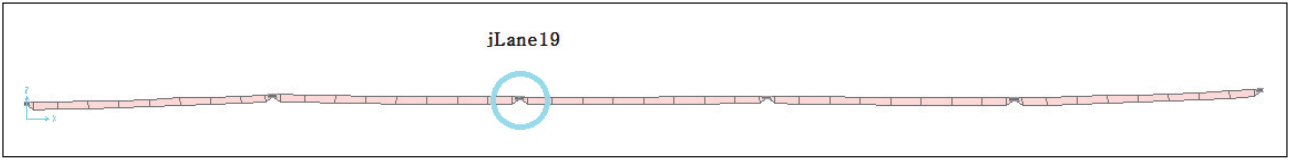
1) 거동특성 비교

■ 침하변위

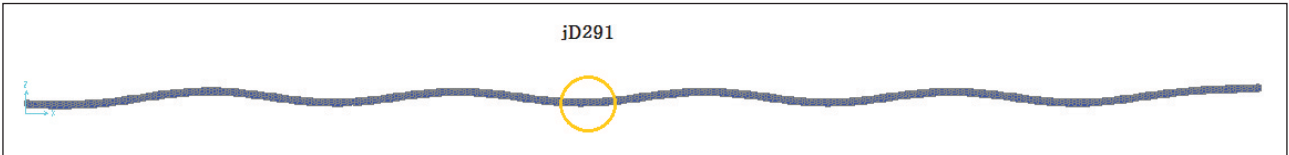
파랑(Sagging/Hogging) 고려시와 불고려시의 차량 이동(정지)하중 작용시, 모델별 최불리 조건에 대한 각 검토지점의 침하량, 상대 침하편차를 분석하였다.

- 구조재료별로 부재중량이 상위하므로 자중 제외시를 기준으로 〈표 3〉, 〈그림 6, 7〉과 같이 분석하고, 참고적으로 자중고려 조건에 대해서도 검토하였다.
- 차량주행에 따른 구조재료별 침하편차(자중 불고려시)는 파랑 고려시 67%, 불고려시 20%로서 동일한 조건일지라도 파랑영향에 크게 좌우됨을 알 수 있으며
- 차량주행에 따른 모델별 상대특성(자중 불고려시)을 분석해 보면, 강성체인 콘크리트 부잔교는 PE에 비해 파랑영향을 1.7배 크게 받는 반면 탄성체인 PE 부잔교는 콘크리트에 비해 침하영향을 2.2배 크게 받는 것으로 나타난다.

5) 최대변위 발생조건은 자중 포함시이나 모델별로 자중이 상위하므로 동요특성 비교시는 자중 불고려함



〈그림 6〉 콘크리트 부잔교 침하변위 (Wv+Mv)



〈그림 7〉 PE 부잔교 침하변위 (Wv+Mv)

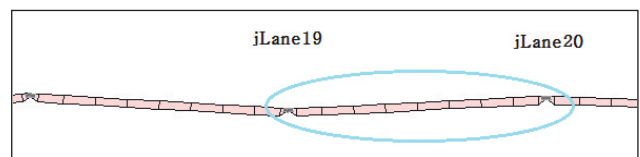
■ 동요특성

파랑 고려시와 불고려시의 차량 이동(정지)하중을 적용하여, Time step에 의한 Trim, 경사도 및 진동특성 등에 관한 모델별 동요특성을 비교 분석하였다.

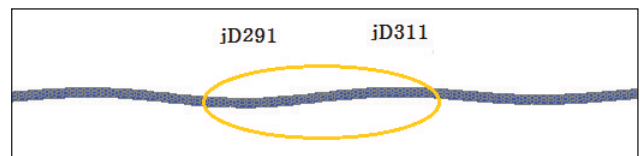
- 파랑 및 이동(Moving), 정지하중(P-Vehicle) 작용시의 모델별 최불리 조건과 부잔교 자중을 감안한 실 운영조건에서의 Trim과 경사도를 산정한 결과는 다음의 <표 4>, <그림 8, 9>와 같다.
- 먼저, 파랑을 고려하지 않을 경우(Mv)의 순동요량을 보면, 콘크리트 및 PE 부잔교의 Trim은 0.08m, 0.09m로서 상호 동일한 값을 보이며
- 파랑작용(Wv+Mv)시는 콘크리트 0.1m, PE 0.3m로서 콘크리트 부잔교는 파랑작용에 무관하게 동요량이 일정하나 PE부잔교는 20cm 증가한다. 이는 콘크리트 부잔교는 중량체로서 순침하량은 크나 자중과 강체저항에 의해 파동요⁶⁾를 작게 받지만, PE는 경량체로서 Heaving에 의한 파동요에 상대적으로 민감하기 때문이다.
- 한편, Trim에 의한 주행경사도(파랑 작용시)를 비교해 보면, 콘크리트 0.25%, PE 1.48%로서 모두 5.0% 이하의 평지에 해당해 해당하여 일반 승용차의 주행한계 경사도인 32.5%(등판각도 18°)를 기준해 볼 때,

〈표 4〉 구조재료별 Trim 및 주행경사도

Model	Case	Trim (m)	경사도 (%)	검토 경간	검토지점 Node No
콘크리트 부잔교	Wv+Mv	0.100	0.25	40m 1파장	중앙 Span (1.0LS) jLane19 jLane20
	Mv	0.082	0.21		
	자중+Wv+Mv	0.100	0.25		
PE 부잔교	Wv+Mv	0.296	1.48	20m 반파장	중앙 Span (0.5LS) jD291 jD311
	Mv	0.090	0.45		
	자중+Wv+Mv	0.296	1.48		

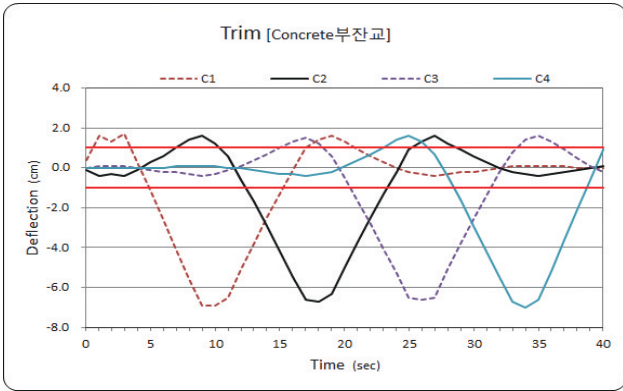


〈그림 8〉 콘크리트 부잔교 Trim (자중+Wv+Mv)

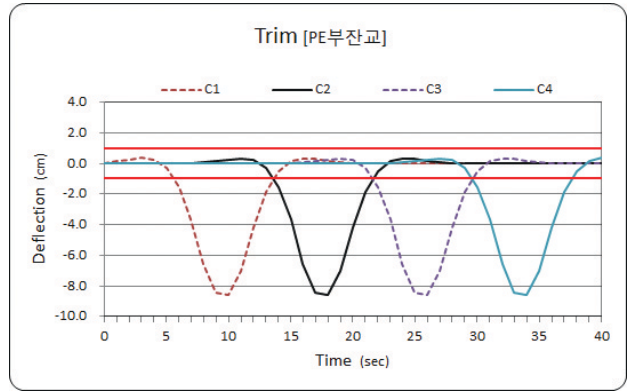


〈그림 9〉 PE 부잔교 Trim (자중+Wv+Mv)

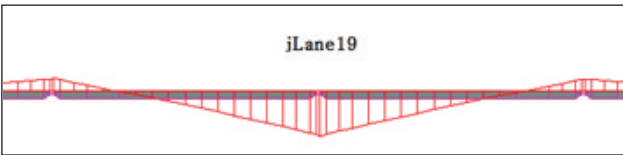
6) Hydrostatic analysis에 의한 단순평가로서 고파랑 조건이나 해석방법 등에 따라 달라짐



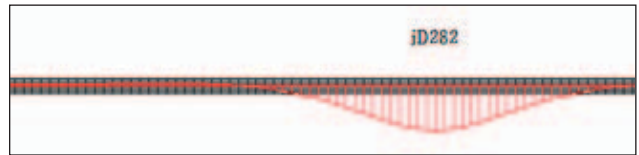
〈그림 10〉 콘크리트부잔교 Trim Influence(Mv)



〈그림 11〉 PE부잔교 Trim Influence(Mv)



〈그림 12〉 콘크리트부잔교 Deflection Influence (P-Vehicle Load)



〈그림 13〉 PE 부잔교 Deflection Influence (P-Vehicle Load)

구조재료에 불문하고 차량주행성은 매우 우수함을 알 수 있다.

- 또한, 부잔교 자중을 감안할 경우, 모델별 총 침하량은 콘크리트 0.80m, PE 0.20m로서 부체중량에 따라 현저한 차이가 발생하며, Trim과 주행경사도는 자중 불고려시와 동일하다. 이는 대칭구조(Weight Balance)에 의해 동요 상쇄되기 때문이다.
- 한편, 〈그림 10~13〉의 Time step에 의한 모델별 주행영향도(Trim influence)에서 보듯, PE 부잔교는 매 해당지점에서 단차진동이 소멸되거나 콘크리트 부잔교는 차량주행시의 직간접 Trim 영향으로 인접한 2개 span 통과시까지 단차진동($\pm 10\text{mm}$ 기준)이 전달되어 반복피로도가 가중됨을 알 수 있다.
- 이는 콘크리트 부체는 비탄성 중량체로서 변위저항성이 크고 PE 부체는 탄성 경량체로서 변위흡수성이 크기 때문이며, 부재규격에 제한받지 않는 PE 부체와 달리 부체연장의 제한(span간 불연속 결합)이 불가피한 콘크리트 부체의 구조적 한계이기도 하다.

2) 구조특성 비교

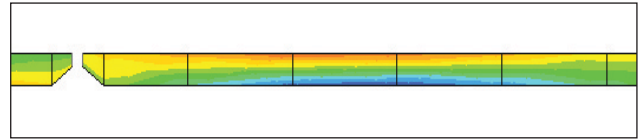
■ 부재력

부체자중 및 파랑하중(Sagging/Hogging)과 차량 이동(정지)하중 작용시의 구조재료별 부재력의 크기와 분포 등에 관한 구조특성을 비교·분석하였다.

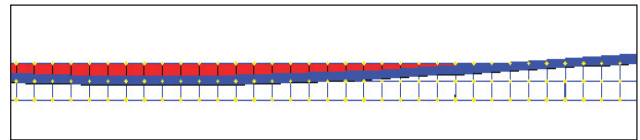
- PE 부잔교의 경우 단면상부에 조합배치된 Deck spine의 응력분담과 PE부재의 구조안전 관건이 인장항복인 점에 입각하여 모델별 하단부재의 단위 인장력(Comb All Case)을 산정하였으며, 그 결과는 다음의 〈표 5〉, 〈그림 14~17〉과 같다.
- 모델별 단면규격이 동일함에도 불구하고, 단위폭당 작용 모멘트는 콘크리트 $192\text{kN}\cdot\text{m}$, PE $5\text{kN}\cdot\text{m}$ 로서 구조재료에 따라 부재력에 큰 차이가 나타난다.

〈표 5〉 구조재료별 부재력(단위폭당)

Model	인장력 (kN)	인장응력 (kN/m ²)	모멘트 ⁷⁾ (kN·m)	Member No.
콘크리트 부잔교	168.7	1265.2	191.9 (바닥)	제 5Span 바닥 aBS35 상판 aTS183 격벽 aSS290
	131.2	986.5		
	173.7	1163.0		
PE 부잔교	4.31	-	5.1 (바닥)	제 2Span FTMn3307 FTMn8521
	3.41	-		

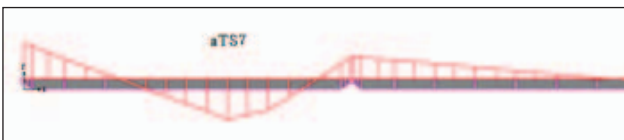


〈그림 14〉 콘크리트부잔교 응력도(격벽)

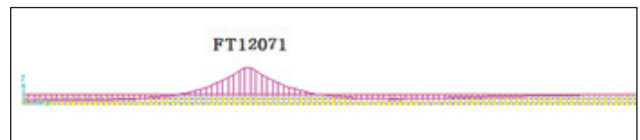


〈그림 15〉 PE 부잔교 모멘트도(중앙부)

- 이는 모델별로 상이한 조립형상 즉, 강성부재(Shell/Plate)의 box형 단일체인 콘크리트 부잔교는 상대변위가 작고 응력을 크게 받는 반면 탄성부재(Multi Room/Cell)의 벌집형 조립체인 PE 부잔교는 상대변위가 크고 응력을 작게 받기 때문이며, 또한 모델별 구조형상 측면에서 보더라도 하중분담 부재수가 적은 콘크리트(응력 집중형)가 PE(응력 분산형)에 비해 부재력이 크게 나타남으로써 구조재료별 대응특성이 상이하기 때문이다.
- 이러한 모델별 구조특성 차이는 다음의 〈그림 14, 15〉 모델별 부재별 응력도의 비교 분석을 통해서도 정성적으로 확인해 볼 수 있다.
- 또한, 다음의 〈그림 16, 17〉 모멘트 영향선도에서 볼 수 있듯이, 콘크리트 부잔교는 부재내 강성도가 깊고 결합부를 통한 인접부재의 강성전이 또한 급격한 확산형태를 보이는 반면 PE 부잔교는 강성도가 낮고 부재 전이도가 완만한 수렴형태를 나타낸다.



〈그림 16〉 콘크리트 부잔교 모멘트 Influence



〈그림 17〉 PE 부잔교 모멘트 Influence

- 이는 외력에 대한 콘크리트 부재의 하중 저항·전달과 PE 부재의 하중 흡수·분산이라는 상이한 구조 특성차로 해석해 볼 수 있으며, 전항의 동요특성 고찰 결과의 그 특성적 맥락과도 잘 일치함을 알 수 있다.

■ 내구특성

부잔교의 내구성을 좌우하는 성능저하 요인 즉, 응력집중/피로, 균열/부식/열화 및 내수명 측면의 기능유지에 관한 구조재료별 유의특성에 대해 고찰하였다.

- 먼저, 성능상의 구조재료별 유의점을 살펴보면, 콘크리트 부체는 부재단면의 탄성균열과 marine growth 등에 의한 부식과 열화, 부재규격 한계로 인한 span간 결합부의 응력집중과 파손, 주행진동에 따른 피로 가중과 성능저하가 문제시 되며, PE 부체는 반복재하에 따른 조립절점부의 잔류변위와 응력이완 및 재질

7) 모델별 동일조건외 비교가 되도록 해당 검토위치의 각 부재력을 단위폭당으로 환산함

특성에 의한 소성열화⁸⁾가 문제시된다.

- 한편, 기능유지 특성을 보면, 콘크리트와 PE 부잔교의 내용연수는 공히 25~30년으로 알려졌으며,
- 콘크리트 부잔교의 경우 일체형 구조로서 손상이나 용도변경에 따른 보수/교체와 구조변경이 곤란한 반면, PE 부잔교는 조립형 구조로서 보수/교체와 구조변경/보관이 용이하고 경량체로서 수심대응성이 좋다.

향후 연구과제 및 제언


■ 부잔교 성능특성 연구

- 본 고에서는 정상조건의 Hydrostatic analysis에 국한하였으나, 황천시(고파랑)의 Hydrodynamic analysis 및 횡동요와 측방회전에 의한 부재 torsion과 부체간 결합강성 등의 연구가 수반되어야 하며
- 구조재료별 특성차에 입각한 균열, 진동, 피로 및 소성열화 등에 관한 정밀 구조해석과 조립·재료 물성 연구가 진전될 필요가 있다.
- 또한, PE 부잔교/방파제의 실용화와 Engineering Plastic의 이용 고도화를 앞당길 수 있는 총배수 설계 (Draft Controlled Float)와 PE조합 구조 등에 관한 심층연구와 실증실험이 전개되어야 한다.

■ 부잔교 설계기준 정립

- 강성 부잔교(강재, 콘크리트 등)의 적용·규격 제한과 탄성 부잔교(PE, PE조합 등)의 개발·활용에 관한 설계기준의 개선과 실무지침의 정립을 비롯하여 부잔교의 재료특성별 성능향상과 유지관리에 관한 시방지침의 수립 등이 절실하며

■ 제언

- 이상의 고찰 결과에 단초하여, 구조재료별로 상반되는 거동특성과 구조특성을 익히 파악함은 물론 구조재료별 유의특성에 입각한 설계적용과 응용을 권장하며
- 이를 뒷받침할 수 있는 산학연의 실증적이며 심층적인 연구·실험과 설계지침·기준 정립을 위한 제도적이며 지속적인 국가지원을 건의한다. 

|참고문헌

- 해양수산부(2014), 항만및어항 설계기준·해설 하권, pp.997~1001, pp.1336~1346
- Fu Shixiano et al.(2005), Hydroelastic analysis of a nonlinearly connected floating bridge subjected to moving loads, Marine Structures 18, pp.85-107
- Cong Wang et al.(2008), Hydroelasticity based fatigue assessment of the connector for a ribbon bridge subjected to a moving load. Marine Structures xxx(2008) pp.1~15
- Giannin, Vecili, et al.(2014), Transportation Optimization of Ribbon Floating Bridges, The Open Civil Engineering Journal 8(2014), pp.42-56
- 홍관영 등(2011), 파랑 주행시 연속폰툰형 부유식 교량의 동요특성, 대한토목학회 정기학술대회(2011)
- 청주시(2011), 탄금호 국제조정경기장(수상중계로) 조성사업 대안설계

8) 내용연수 이상의 과도한 폭로조건에 해당