베트남 밤콩 사장교의 설계

Design of Vam Cong Cable Stayed Bridge in Vietnam

이용진^{1*} · 강정운² · 배상운³ · 윤연석⁴ · 노병철⁵

Yong-Jin Lee^{1*} · Jeong-Woon Kang² · Sang-Woon Bae³ · Yeon-Suk Yun⁴ · Byeong-Cheol Lho⁵

(Received August 16, 2013 / Revised September 6, 2013 / Accepted September 13, 2013)

Vam Cong Cable Stayed Bridge which has 450m main span length is one of the Central Mekong Delta Region Connectivity Project and is located in Cuu Long Delta Region. It has steel-concrete composite girder with 4 lane and the type of cable is multi strand cable. The improved H-shape pylon and cast-in-place bored piles were applied. High strength concrete is applied for pylon, precast concrete slab and Cast-in-Situ concrete pile to ensure the structural safety. The present paper describe the design specifications and main features of Vam Cong Cable Stayed Bridge design.

키워드 : 베트남의 사장교, 밤콩 교량, 합성거더, 상세설계

Keywords : Cable Stayed Bridge in Vietnam, Vam Cong Bridge, Composite Girder, Detailed Design

1. 서 론

호치민은 베트남의 경제 중심지이며, 두 번째로 큰 도시이다. 메콩강 하류의 꾸롱삼각주(Cuu Long Delta)는 호치민의 남서부 지역에 위치해 있으며 13개의 지방 도시로 이루어져 있다. 이 지역은 베트남 전체 면적의 12%정도를 차지하고 있으며 많은 하천과 운하로 지역이 구분된다. 이 지역의 도로 상황은 좋지 않고, 특히 우기시에 도로를 이용하는데 있어 많은 어려움이 있다. 메콩강 삼각주 연결도로 사업은 총 3개의 공구로 나누어져 있으며, 밤콩 교량은 하우강(Hau River)을 횡단하는 구간에 위치해 있다. 메콩강 삼각주 지역의 교통망을 연결하는 본 사업을 통하여 꾸롱 삼각주 지역의 경제적, 사회적 개발을 도모할 수 있는 초석이 되기를 기대해 보며, 본 논문을 통하여 밤콩 사장교의 설계를 소개하고자 한다.

2. 사업개요

본 사업은 Fig. 1에서와 같이 총 3개의 공구로 나누어져 있다. 1공구는 띠엔강(Tien River)을 횡단하는 중앙경간 350m의 까오란 사장교와 접속교 및 접속도로를 포함하며, 연장은 7.8km이다. 2공구는 까오란 교량과 밤콩교량을 연결하는 접속도로로서 연장은 15.7km 이다. 3공구는 3A와 3B로 구분이 되며 밤콩사장교는 3A공구에 속해있다. 3B공구는 밤콩교량의 접속도로로서 2.42km의 연장을 갖는다.

밤콩 교량은 총연장 2.97km로써 사장교와 접속교로 이루어져 있다. 주교량은 중앙경간 450m의 3경간 사장교(870m)로 설계되었고, 사장교 시 · 종점부의 접속교는 Super-T 거더 형식으로 이루어져 있다.

* Corresponding author E-mail: lyj011@empal.com

^{1,2,3,4}다산컨설팅 구조사업본부 (Structural Department, Dasan Consultant, Seoul, 138-200, Korea)

⁵상지대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Sangji University, WonJu, 220-702, Korea)

Fig. 1. Location map of Vam Cong Cable Stayed Bridge

Table 1. Specifications

No.	Specifications
1	Specification for Bridge Design, 22TCN272-05
2	Cable-Supported Bridge Design Specification, KSCE 2006
3	Minimum Design Loads for Buildings and Other structures, ASCE7-95/7-05 Commentary
4	Recommendation for Stay Cable Design, Testing and Installation, PTI Guide Specification(Fifth Edition, 2007)
5	Rules for Technical Classification of Inland Waterways, TCVN5664 : 2009
6	Freeway and Expressway, TCVN5727-97

3. 사장교의 설계

3.1 설계기준

밤공 사장교는 내구년한 동안의 안전성, 사용성, 시공성 등을 확보할 수 있도록 설계되었으며, 베트남의 교량설계기준인 "Specification for Bridge Design, 22TCN272-05, 2005"을 상위 설계기준으로 적용하였다. 그리고 베트남의 교량설계기준을 보완하여 Table 1의 기준을 추가로 적용하여 설계를 수행하였다.

3.2 사장교의 설계

Feasibility Study(F/S, TEDI, 2010) 단계에서 밤공 사장교는 65+122+ 450+122+68=830m의 중간교각을 갖는 사장교로 계획되었으나, 실시설계에서 여러 제반 사항을 검토한 결과 210+450+210=870m의 중간교각을 배제한 2주탑 3경간 사장교로 변경되었다. 밤공 사장교의 F/S 설계에서는 측경간비를 일반적으로 추천하고 있는 0.42(190/420)를 적용하였고, 부반력의 분산을 위해

Fig. 2. Bird's-eye view of Vam Cong Cable Stayed Bridge

측경간에 중간교각을 설치하였다. 시공단계 검토결과, 측경간 단부 구간은 시공시 균형 캔틸레버 공법을 적용할 수 없고, 대용량의 해상크레인을 이용한 일괄가설을 해야 한다. 그러나 현지 여건상 대형장비 등의 수급이 원활하지 못하며, 측경간 가설시 대규모 가설벤트를 필요로 하여 경제성과 시공성 측면에 불리하게 작용하는 것으로 나타났다. 또한 시공완료후, 완성계 해석을 수행한 결과 측경간의 중간교각 설치로 부반력이 분산되었지만, 측경간비에 따른 불균형력의 절대적인 크기를 고려하지 못하여, 앵커교각에는 13,030kN, 중간교각에는 8,573kN의 부반력이 발생하였다. 현장 여건을 만족할 수 있는 부반력 제어대책으로 측경간비를 0.42(190/450에서 0.67(210/450)로 조정하여 부반력을 감소시키며, 동시에 중간교각을 배제하여 경제성을 확보할 수 있었다.

보강형은 2개의 엠티거더와 크로스빔으로 콘크리트 바닥판을 지지하는 합성단면으로 표준 세그먼트 길이 12m로 계획하였고, 엠티거더 외측면에 페어링을 부착하여 공기역학적 안정성을 확보

Fig. 3. Profile of Cable Stayed Bridge

Fig. 4. Bird's-eye view and General drawing of Pylon

Fig. 5. General drawing of Composite girder

Table 2. Main properties of Vam Cong Bridge

Item		Property
Span		210+450+210=870m
Girder		Steel-Concrete composite
Pylon		Improved H-shape
Foundation		Bored Pile(Concrete)
Width of bridge		25.8m
Alignment	Slpoe	2.5%
	Horizontal	Linear
Design velocity		80km/h
Live load		HL-93

하였다. 케이블은 12m간격으로 외측 엣지거더 상면의 케이블 앵커 리지에 정착된다. 케이블의 형식으로는 부식방지가 용이하고, 케이블의 교체 및 유지관리 등이 유리한 멀티 스트랜드 방식을 적용하였다. 주탑은 교축직각방향으로 높은 강성을 갖으며 좌굴에 유리한 중공 직사각형 단면의 개선된 H형 콘크리트 주탑으로 계획하였다. 주탑의 높이는 기초 상면으로부터 143.9m이고 오토 클라이밍폼을 이용하여 4m씩 가설하는 것으로 계획하였다. 교량 가설 지역은 암반층이 존재하지 않는 지층구조를 가지고 있다. 따라서, 기초 형식으로는 현장타설 콘크리트 말뚝을 적용하여 마찰말뚝으로 계획하였다. 사장교의 주요 특징 및 형상은 Fig. 3~5와 Table 2와 같다.

3.2.1 구조해석

말뚝을 포함한 사장교 전체 구조물에 대하여 3차원 유한요소 해석 모델링을 RM 2006 V9를 이용하여 구성하였고, 초기치 해석과 시공단계, 완성기에 대한 구조해석을 수행하였다.

초기 케이블 도입장력의 산정을 위해 반복 작업을 수행하여 주탑의 변위 및 부재력과 보강형 모멘트의 최소화, 균등한 케이블 장력 분포를 유도하였다.(Gimsing, 1997; 한국도로공사, 2001) 각 시공단계별 가설하중, 시간에 따른 콘크리트의 크리프와 건조수축, 가설벤트 등을 고려하여 시공단계 해석을 수행하였고, 가설 중 태풍의 영향을 고려하여 가설 중 내풍 케이블을 설계하였다.

해석에 적용한 각 부재별 물성치는 Table 3과 같으며, 구조해석 모델은 Fig. 6과 같다.

3.2.2 기초의 설계

본 사업구간은 점토, 실트, 실트질 모래 등의 퇴적층이 분포하고 있으며, 점토층의 N값은 6~22/30, 모래층의 N값은 4~100/30 이

Table 3. Material properties

Item		γ (kN/m ³)	E (MPa)	G (MPa)	Coeff. of thermal expansion(/°C)
Steel	G345	78.5	200,000	76,923	1.17x10 ⁻⁵
Con` c	C50	24.5	34,738	13,361	1.08x10 ⁻⁵
	C40	24.5	30,618	11,776	1.08x10 ⁻⁵
	C30	24.5	26,126	10,049	1.08x10 ⁻⁵
Cable		78.5	197,000

Fig. 6. Structural Analysis Modeling

Table 4. Result of Bored Pile

Item	D (m)	Spacing (m)	L (m)	No. (ea)	Pu (kN)	Ra (kN)	Settlement (mm)
AP1	1.5	3.75	73	27	6,872	7,410	12.1
PY1	2.5	7.50	113	32	29,545	31,871	33.3
PY2	2.5	7.50	116	32	28,979	30,930	36.4
AP2	1.5	3.75	80	27	6,800	7,476	16.4

상으로 매우 조밀한 상태로 조사되었다. 말뚝기초는 현장타설 콘크리트 말뚝으로 돌출부를 제외한 말뚝 근입 길이는 63~98m이며, 조밀한 모래층을 지지층으로 한 마찰말뚝으로 설계하였다.

말뚝 간격은 앵커교각(AP1, AP2)은 2.5D, 주탑부(PY1, PY2)는 3.0D를 적용하였으며, 현장타설말뚝의 허용지지력은 베트남 교량 설계기준을 따라 산정하였다.

3.2.3 주탑의 설계

주탑의 높이는 143.9m로써 중공 직사각형 단면의 개선된 H형

Fig. 7. Bending Moments of Pylon(Strength Limit State)

Fig. 8. Typical section of Pylon

Fig. 9. Prestress Bar at cable anchorage

콘크리트 주탑으로 계획하였고, 콘크리트 강도 50MPa의 고강도 콘크리트를 적용하였다. P-Δ 효과를 고려한 시공단계 및 완성상태 해석을 통하여 단면에 작용하는 부재력을 산정하였고, 단면검토를 통하여 각 시공단계 및 한계상태에 대해 안정성을 확보하였다. 주탑의 일반구간 단면은 Fig. 8과 같으며, 강도한계상태에서 주탑의 단면력도는 Fig. 7과 같다.

주탑의 일반구간의 단면은 강도한계상태에서 최대 발생하중인 $P=124,106\text{kN}$, $M=398,756\text{kN} \cdot \text{m}$ 에 대하여 2.17의 안전율을, 극한

Fig. 10. STM Analysis of cable anchorage

Fig. 11. FEM Analysis of cable anchorage

한계상태에서 $P=145,744\text{kN}$, $M=627,301\text{kN} \cdot \text{m}$ 에 대하여 1.03의 안전율을 확보하고 있다. 탑정부에는 사장재가 배치됨에 따라 케이블 장력에 의한 응력집중이 발생한다. 이와 같은 복잡한 응력상태에 대하여 케이블 정착부에는 Fig. 9와 같이 강봉으로 보강하였고, Fig. 10, 11과 같이 상세해석을 통하여 안정성을 확인하였다. 정착부 상세해석결과 20.5MPa의 최대 주응력이 발생하였으며, 이는 콘크리트의 허용응력인 $0.6f_c$ (MOT Vietnam, 2005) 이내에 있음을 확인하였다.

3.2.4 앵커교각의 설계

앵커교각의 높이는 28.2m이며, 중공직사각형 단면을 갖는 π 형 교각으로 계획하였고, 교각의 단면 형상은 Fig. 12, 13과 같다. PM 상관도 검토결과 극한한계상태의 최대 부재력인 $P=32,397\text{kN}$, $M=129,688\text{kN} \cdot \text{m}$ 에 대하여 2.07의 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 또한 사용한계상태에서 최대 부반력은 4,837kN로 나타났으며, 부반력을 제어하기 위해 타이다운 케이블(8EA x 19-15.7mm)을 계획하였다.

3.2.5 케이블의 설계

케이블은 교량의 시·종점부에서 최소 4.5m간격으로 배치하였

Fig. 12. General drawing of Anchor Pier

Fig. 13. Typical section of Anchor Pier

으며, 일반구간은 12.0m의 간격의 팬타입으로 배치하였다. 케이블은 Fig. 14에서와 같이 인장강도 1,860MPa, 직경 15.7mm의 강연선을 사용한 멀티 스트랜드(Multi Strand) 방식을 적용하였으며, 각 케이블 당 최소 30개에서 최대 73개까지의 강연선을 사용하였다. 케이블의 길이는 측경간 주탑부에서 41.9m로 가장 짧으며 가장 긴 케이블은 234.7m이다. 케이블 정착구 형식은 제작성, 시공성, 안정성 및 경관을 고려하여 Fig. 15와 같이 보강형의 웹과 연속형태인 거셋 플레이트 형식을 적용하였다. 각 한계상태에 대하여 케이블의 안전성을 검토하였으며, 측경간 일부 앵커교각 부근을 제외한 모든 케이블에서 케이블 파단 및 교체 시 허용응력비가 케이블의 설계를 지배하는 것으로 나타났으며, 케이블 파단 및 교체시 중앙경간에서 88.5%, 강도한계상태의 측경간에서 91.8%로 나타

Fig. 14. MS(Multi Strand) Cable

Fig. 15. Cable anchorage at girder

Fig. 16. Result of Cable

났다. 각 한계상태에 대한 케이블의 허용응력 비 검토결과는 Fig. 16과 같다.

3.2.6 보강형의 설계

밤공 사장교는 높이 2.0m의 엣지거더와 가로보 그리고 단면 중앙부의 스트링거로 콘크리트 바닥판을 지지하는 강합성 보강형으로 계획하였다. 엣지거더간 간격은 25.8m이며, 가로보는 4.0m간격으로 계획하였다. 사용한계상태 검토를 통하여 바닥판의 지간 중앙부와 앵커피어 단부에 종방향 프리스트레스를 도입하였다. 바

Fig. 17. Construction Joint of precast slab

Table 5. Result of slab

Item		General Section	Pier Table	End Section
		(Precast Concrete)	(C.I.P Concrete)	(C.I.P Concrete)
Thickness		260mm	290mm	720mm
Long.	TOP	D22-C.T.C 125mm	D20-C.T.C 125mm	D25-C.T.C 125mm
	BOT	D18-C.T.C 125mm	D20-C.T.C 125mm	D25-C.T.C 125mm
Trans.	TOP	D16-C.T.C 150mm	D16-C.T.C 150mm	D25-C.T.C 150mm
	BOT	D16-C.T.C 150mm	D16-C.T.C 150mm	D25-C.T.C 150mm

Fig. 18. Forces on Girder(Extreme Limit State)

다크판은 공사기간의 단축, 공장제작으로 인한 콘크리트의 품질향상, 시간에 따른 콘크리트의 크리프와 건조수축량 감소 등의 장점을 갖는 프리캐스트 슬래브로 계획하였으며, 운반 및 가설 장비를 고려하여 그 크기는 3.6m x 12.25m, t=260mm로 계획하였다. 바닥

Table 6. Result of Girder

Item			Center Span	Side Span
Flexural	Positive Moment	Mu	89,121kN · m	104,167kN · m
		ΦMn	95,792kN · m	125,065kN · m
		S.F	1.07	1.20
	Negative Moment	ftu,max	262.6MPa	329.6MPa
		Φftn	345.0MPa	345.0MPa
		S.F	1.31	1.05
		fcu,max	216.7MPa	274.4MPa
		Φfcn	345MPa	345MPa
		S.F	1.59	1.26
Compression-Bending		Positive	0.98<1.00	0.91<1.00
		Negative	0.76<1.00	0.96<1.00

(Mu : Ultimate Moment, ΦM_n : Normal Resistance Moment
ftu,max : Max. tensile stress, Φf_{tn} : Allowable tensile stress
fcu,max : Max. comp. stress, Φf_{cn} : Allowable comp. stress
S.F : Safety Factor)

판은 전단연결재에 의한 강거더와 완전합성으로 거동 하도록 설계하였으며, 루프이음부에 무수축 콘크리트를 타설하여 프리캐스트 바닥판을 연결하였다. 프리캐스트 바닥판과 현장타설 이음부 구간은 Fig. 17과 같고, 설계결과는 Table 5와 같다.

영향선 해석을 통해 바닥판의 유효폭을 산정하여 보강형의 휨강도 산정에 반영하였다. 단면의 세장비를 검토하여 조밀, 비조밀 단면에 대한 합성 단면의 공칭강도를 산정하였고, 단면에 작용하는 최대 정, 부모멘트에 대하여 휨강도 검토와 축력과 휨을 동시에 고려한 검토를 수행하였다. 단면력이 가장 크게 발생한 극한한계 상태에서의 보강형 모멘트와 축력 포락선도는 Fig. 18과 같고, 단면검토결과는 Table 6과 같다.

3.3 설계기준 비교

베트남 교량 설계기준은 AASHTO LRFD 1998에 근거하고 있다. 사장교 설계시 베트남 설계기준과 최신의 AASHTO LRFD 2007 기준을 적용하여 설계를 수행하였으며, 다음의 Table 7은 각 설계기준의 주요 항목에 대한 검토결과를 보여준다. 검토결과, 베트남 교량 설계기준은 AASHTO LRFD 2007에 비해 보수적인 경향을 보이며, 특히 콘크리트 구조물의 설계에 있어 그 특징이 두드러지게 나타난다. 따라서, AASHTO LRFD 2007을 적용할 경우 보다 경제적인 설계가 가능할 것이다.

Table 7. Comparison of specification

Item	22TCN272-05	AASHTO LRFD 2007
General/ Load combination	Load Combination strength 1~3, extreme, service, fatigue	· Span/ Depth Ratio · Dead Load factor
Load/ Analysis	· Impact factor:25% · Local standard : Wind, Earthquake, Temperature, Design Vessel	· Impact factor : 33% · downdrag Load · effective length constant of column
Concrete	· Simillar as AASHTO LRFD 1998 · Earthquake zone constant (Vietnam)	· Design of Bending and Compression based on ACI318-02 · min. reinforcement ratio /Crack · shear and torsion function · Con'c and steel properties · Allowable stress of PS concrete
Steel	· Simillar as AASHTO LRFD 1998	· Plastic moment · Load factor · Analysis check item
Sub- structure	· Simillar as AASHTO LRFD 1998	· Geotechnical survey and test · Load factor · Pile design

4. 맺음말

본 논문에서는 메콩강 삼각주 연결도로 사업과 밤콩 사장교의 설계내용을 설명하였다. 밤콩 사장교는 AASHTO LRFD 설계법을

준용하고 있는 베트남 교량설계기준을 바탕으로 설계되었다. 본 교량은 국내 사장교 기술을 베트남에 적용한 첫 번째 교량이며, 완공시 베트남에서 두 번째로 긴 사장교로 기록될 것이다. 또한 이 지역의 경제적, 사회적 발전에 기여하고 나아가 베트남의 발전에 기여할 수 있길 기대해 본다.

References

- Joint Venture of Dasan, Kunhwa and Pyunghwa, Final Report – Central Mekong Delta Region Connectivity Project–Vam Cong Bridge Construction Project(2013).
- Ministry of Transport, Vietnam, The Bridge Design Specifications 22TCN272–05(2005).
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications(1998).
- Post-Tensioning Institute, Recommendation for Stay Cable Design, Testing and Installation, fifth edition(2007).
- TEDI, Vol. 1 Statement–Feasibility Study on Vam Cong Bridge and Interconnection Road(2010).
- Niels J. Gimsing, Cable Supported Bridges. Second Edition, John Wiley & Sons(1997).
- Korea Highway Corporation, A Study on Design and Construction of Cable Stayed Bridges Considering Composite Behavior (2001).

베트남 밤콩 사장교의 설계

밤콩 사장교는 메콩강 삼각주 지역 연결 사업의 일환으로 메콩강 하류의 꾸롱 삼각주에 위치하고 있으며, 중앙경간 450m의 사장교로 설계되었다. 왕복 4차선으로 구성된 강합성 보강형과 멀티 스트랜드 방식의 케이블을 적용하였으며, 개선된 H형 주탑과 현장타설 콘크리트 말뚝 기초로 구성되어 있다. 주탑, 프리캐스트 콘크리트 바닥판 그리고 현장타설 콘크리트 말뚝에는 고강도 콘크리트를 적용하여 구조적 안정성을 확보하였다. 본 고에서는 밤콩 사장교의 설계에 적용된 설계기준 및 주요 설계 특징을 설명하고자 한다.