

참발강 횡단 사장교의 설계기준

Design Specifications of Cable Stayed Bridge Across Chambal River



김모세*
Mo-Seh Kim



유준열**
Jun-Yeol Yoo



조의경***
Eu-Kyeong Cho



이상민***
Sang-Min Lee

1. 서 론

참발강 횡단 사장교는 인도 델리에서 남서쪽으로 550 km 떨어진 인도 Rajasthan주 Kota시 부근, NH-76 도로의 참발강을 횡단하는 구간에 위치하게 된다. 이 지역에 서식하고 있는 야생 악어들을 보호하기 위하여 하상의 교각이 필요하지 않은 사장교로 교량의 형식이 계획되었다.

총연장 1,100 m에 이르는 교량은 접속교 구간과 사장교 구간으로 구성되었다. 사장교 구간의 설계에는 AASHTO, PTI, 및 인도 자국내 설계기준이 적용되었고, 접속교 구간의 설계는 인도 자국내의 설계기준을 따르고 있다. 본고에서는 사장교 구간에 적용된 설계기준 특히 AASHTO LRFD의 적용에 대해 중점적으로 살펴보고자 한다.<그림 1, 2>

2. 교량제원

접속교를 포함한 교량의 총연장은 1,100 m로 사장교 구간의 연장이 700 m, 접속교구간의 총연장은 400 m이고, 폭 30 m의 왕복 6차로를 수용하는 교량이다.

2.1 사장교 제원

사장교 구간의 형식은 주탑과 상부구조 모두 현장타설 콘크리트가 적용된 콘크리트 사장교이다. 경간 구성은 57.75 m+ 56 m+ 61.25 m+ 350 m+ 61.25 m+ 56 m+ 57.75 m로 중앙경간이 350 m이고 측경간에는 각각 2개의 중간교각이 배치되어 있다.

80 m의 콘크리트 주탑은 climbing formwork을 이용하여 가

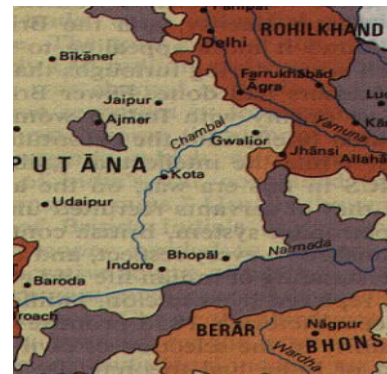


그림 1. 참발강 위치도

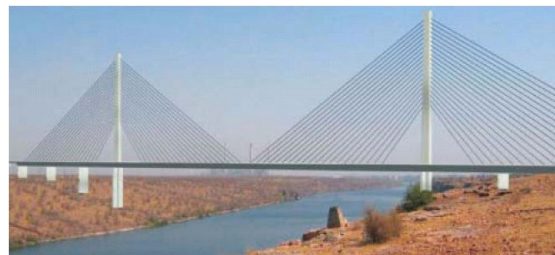


그림 2. 참발강 횡단 사장교 가상도

* 정회원, 현대건설(주)기술개발원 과장
mskim@hdec.co.kr

** 현대건설(주) Cable Stayed Bridge Across River Chambal 현장 소장

*** 정회원, 현대건설(주)기술개발원 부장대우

설된다. 상부구조는 1-cell의 콘크리트 박스로 형상은 <그림 5>와 같다. 측경간은 full staging method에 의해 가설되며 주경간은 cantilever method에 의해 가설된다.

케이블은 1면의 semi harp 타입으로 배치되며 교량상면 위에 7m 간격으로 케이블 정착부가 설치된다. 주경간과 측경간에 20개의 케이블이 대칭으로 배치되어 총 80개의 케이블에 의해 사장교가 지지된다.

2.2 접속교 제원

접속교는 사장교를 사이에 두고 Chittogarh측과 Shivpuri측으로 구분된다. Chittogarh측은 20m+14×25m의 경간 구성으로 총연장이 370m이고, Shivpuri측은 15m+15m의 경간 구성으로 총연장이 30m이다. 접속교의 상부구조는 프리캐스트 I형 거더와 현장타설 슬래브로 구성된다.

3. 사장교의 설계

3.1 적용 설계기준

사장교 설계에 적용된 기준들은 다음과 같다.

- AASHTO LRFD Bridge Design Specification(4th Edition, 2007)
- AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design(2nd Edition, 2000)
- AASHTO Guide Specifications for Design & Construction of Segmental Concrete Bridges(1999)
- IRC:6-2000 Standard Specifications & Code of Practice for Road Bridges, Section , Loads & stresses(4th edition-2000); 하중의 정의에만 적용
- IS:875(part 3)-1987 Code of practice for design

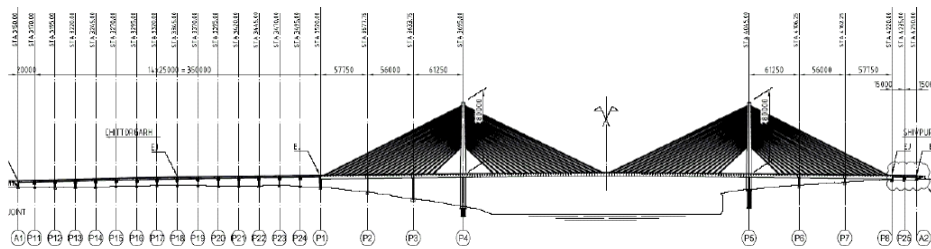


그림 3. 경간 구성

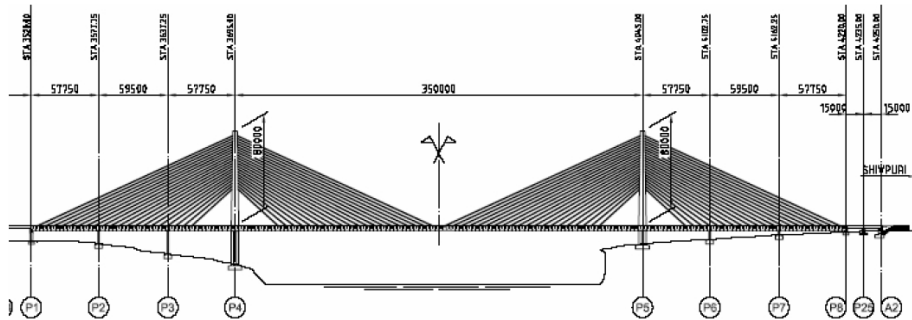


그림 4. 사장교 경간 구성

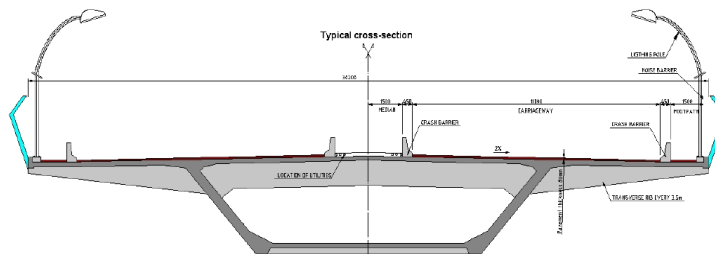


그림 5. 사장교 구간 상부구조 단면

loads(other than earthquake) for buildings and structures 풍하중에만 적용

·CEB-FIP code 1990

·PTI Guide Specification 4th edition(2001)

Recommendations for stay cable design, testing and installation

여기서

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

CEB: Comité Européen du Béton

FIP: Fédération Internationale de la Précontrainte

PTI: Post-Tensioning Institute

IRC: Indian Roads Congress

IS: Indian Standard

3.2 주요 하중

3.2.1 활하중

활하중은 인도 자국내 설계기준인 IRC:6-2000에 따라 적용된다. Class A와 Class 70R 활하중이 조합되어 3개의 차로를 가진 2개의 carriageway에 재하된다. 차선수에 따른 하중감소계수로 3차로의 경우 10%, 4차로 이상인 경우에는 20%가 적용된다.

IRC:6-2000의 209.7절 및 209.8절의 규정에 따라 P-1타입의 방호벽이 적용된다. P-1타입의 방호벽은 1.5톤의 차량이 110 km/h의 속도로 20도 각도로 충돌했을 때의 충격에 견뎌야 하며, 방호벽 하부로부터 교량의 상부구조에 전달되는 모멘트는 15 kN/m이다.

Class A 활하중의 경우, 콘크리트 교량에 대한 충격계수는 $4.5/(6+ \text{유효지간})$ 의 식으로 구할 수 있고 <그림 8>에 시간에 따른 충격계수가 나타나 있다. Class 70R 활하중 중 wheeled vehicle의 경우, 12m 이하 지간에 대해서는 25%를, 12m 이상의 지간에 대해서는 <그림 8>의 충격계수를 적용한다. Class 70R 활하중 중 tracked vehicle의 경우, 5m이하 지간에 대해서는 25%를, 5~9m의 지간에 대해서는 25%부터 10%까지 선형으로 감소시킨 값을, 9~40m 지간에 대해서는 10%를, 그리고 40m 이상의 지간에 대해서는 <그림 8>의 충격계수를 적용한다. 피로 활하중은 1차선을 점유하는 Class A로 활하중케이블에 최대 장력변화를 유발하는 값을 사용한다.

3.2.2 풍하중

인도 자국내 설계기준인 IS:875(part 3)-1987의 5.3절에 따라 Kota시 부근의 기본 풍속(지상 10m 높이 3초간 최대풍속)은

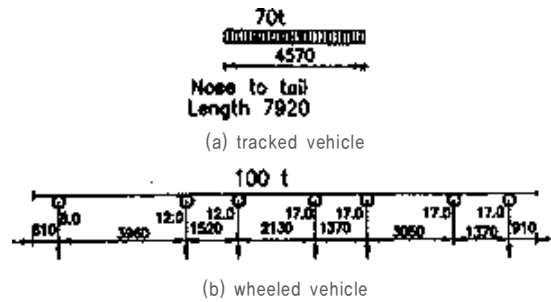


그림 6. Class 70R live load

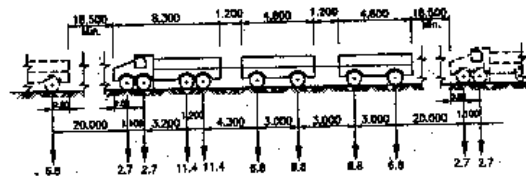


그림 7. Class A live load

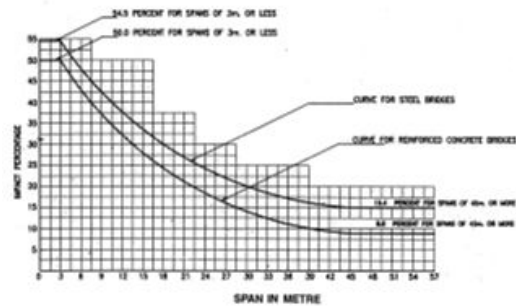


그림 8. Class A 및 Class B 활하중에 대한 충격계수

다음과 같이 계산된다.

·50년 재현주기: $0.99 \times 47 = 46.5$ m

·100년 재현주기: $1.07 \times 46.5 = 49.8$ m

상관높이(EL. 53 m)에서의 교축직각방향의 설계풍속은 다음과 같다.

·50년 재현주기: $1.14 \times 47 = 53.6$ m

·100년 재현주기: $1.07 \times 53.6 = 56.3$ m

풍동실험의 결과로부터 공기역학적 계수들을 구하고, 풍동실험 및 동적해석을 통해 galloping, flutter, vortex shedding 등 공기역학적 안정성 검토를 검토한다.

활하중 재하시의 풍하중은 300 kg/m로 도로면으로부터 1.5 m 위에 작용한다.

3.2.3 온도하중

PTI recommendations에 따라, 케이블과 다른 부재들 간

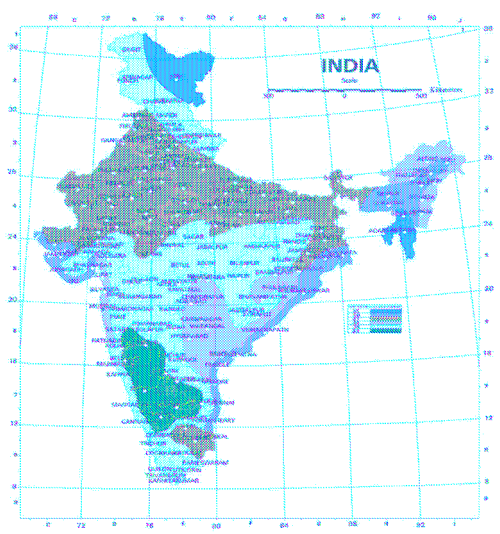


그림 9. 인도 지역별 50년 재현주기 기본풍속분포

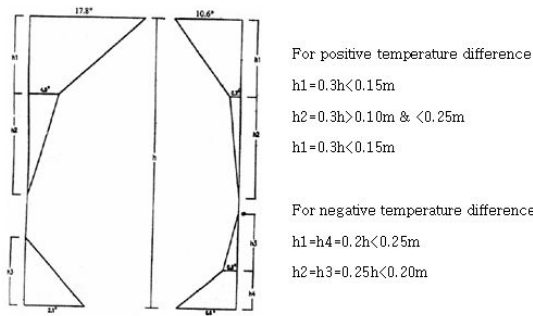


그림 10. IRC:6-2000의 온도 gradient

12.5°C의 온도차에 의한 하중을 활하중과 조합하여 검토한다. 장기하중으로 균일한 온도변화에 의한 하중을 고려한다. IRC: 6-2000의 218.3절에 따라 <그림 10>과 같은 온도 gradient를 단기하중으로 고려한다.

3.2.4. 지진하중

Kota지역은 seismic zone II로 교축방향에 대한 수평지진계수는 다음 식에 의해 주어진다.

$$A_H = \frac{(Z/2) * (S_a/g)}{R/I}$$

여기서

Z=0.1 (for seismic zone II)

I=1.5 (for important bridges)

R=2.5 (응답수정계수)

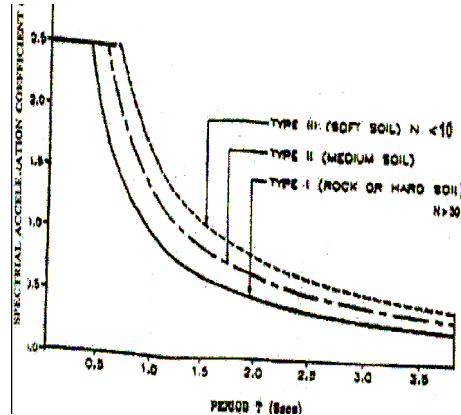


그림. 11 설계응답스펙트럼

S_a/g : 5% 감쇠에 대한 평균응답가속도계수로 구조물의 고유주기 T에 의존하며, rocky and hard soil sites에 대해 다음 식에 따라 구할 수 있다.

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 2.5 & \text{for } 0.1 \leq T \leq 0.4 \text{sec} \\ 1.0/T & \text{for } 0.4 \leq T \leq 4 \text{sec} \end{cases}$$

AASHTO LRFD에 따라 다음과 같은 지진하중조합이 적용된다.

$$EQ = EQ_x + 0.3EQ_y \tag{1}$$

$$EQ = EQ_y + 0.3EQ_x \tag{2}$$

3.3 하중조합

3.3.1. 가설 중 하중조합

<표 1>에 나타내었다.

3.3.2. 공용 중 하중조합

사장교 설계에 사용된 하중조합 및 하중계수, 강도감소계수 등은 AASHTO LRFD를 따른다<표 2>.

3.4. 부재 검토

AASHTO LRFD에 따라 하중조합, 하중계수, 강도감소 계수 등이 사용성 및 강도설계에 적용되었다. 강도한계상태(strength limit state), 극한한계상태(extreme limit state), 사용한계상태(service limit state) 및 피로한계상태(fatigue limit state) 등 4가지 한계상태가 고려되었다.

조합하중은 다음과 같이 계산된다.

표 1. 가설중 하중 조합

Load combination	Load factors										Stress limits		See note	
	Dead load	Live load			Wind load			Other loads			Flexural tension			
		DC	CLL	IE	CLE	WS	WUP	WE	CR	SH	TU	TG		Excluding "other loads"
a	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	γ_{rG}	$0.50\sqrt{f'_c}$	$0.58\sqrt{f'_c}$	-
b	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	γ_{rG}	$0.50\sqrt{f'_c}$	$0.58\sqrt{f'_c}$	-
c	1.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.7	0.0	1.0	1.0	1.0	γ_{rG}	$0.50\sqrt{f'_c}$	$0.58\sqrt{f'_c}$	-
d	1.0	1.0	0.0	0.0	0.7	1.0	0.7	1.0	1.0	1.0	γ_{rG}	$0.50\sqrt{f'_c}$	$0.58\sqrt{f'_c}$	1
e	1.0	1.0	1.0	0.0	0.3	0.0	0.3	1.0	1.0	1.0	γ_{rG}	$0.50\sqrt{f'_c}$	$0.58\sqrt{f'_c}$	2
f	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.0	0.3	1.0	1.0	1.0	γ_{rG}	$0.50\sqrt{f'_c}$	$0.58\sqrt{f'_c}$	3

DC: Weight of the supported structure, CLL: Distributed construction live load
 IE: dynamic load from equipment, CLE: longitudinal construction equipment load, if any
 WS: Horizontal wind load on structure, WE: horizontal wind load on equipment
 CR: Concrete creep, SH: Concrete shrinkage, TU: Uniform temperature variation, TG: Temperature gradient
 Note 1: 장비 정지시, Note 2: 보통의 가설작업 중, Note 3: 장비 이동시

표 1. 공용 중 하중조합

Load combination	DL	EL	SIDL	LL ⁽³⁾ IM BR PL	WS	WL	TU CR SH	TG TS PG	EQ
limit state									
Strength-I	0.9/1.25 ⁽²⁾	1	0.65/1.5 ⁽²⁾	1.75			0.5/1.2 ⁽¹⁾		
Strength-III	0.9/1.25 ⁽²⁾	1	0.65/1.5 ⁽²⁾		1.4		0.5/1.2 ⁽¹⁾		
Strength-IV	0.9/1.5 ⁽²⁾	1	0.65/1.5 ⁽²⁾				0.5/1.2 ⁽¹⁾		
Strength-V	0.9/1.25 ⁽²⁾	1	0.65/1.5 ⁽²⁾	1.35	0.4	1	0.5/1.2 ⁽¹⁾		
Extreme-event-I	0.9/1.25 ⁽²⁾	1	0.65/1.5 ⁽²⁾	0.5					1
Service-I	1	1	1	1	0.3	1	1/1.2 ⁽¹⁾	0.5/1 ⁽⁴⁾	
Service-III	1	0.8	1	0.8			1/1.2 ⁽¹⁾	0.5/1 ⁽⁴⁾	
Service-IV	1		1		0.7		1/1.2 ⁽¹⁾		
Fatigue				1 ⁽³⁾					

BR: Braking forces, CR: Creep, DL: Dead load of structural components
 EL: Accumulated locked-in force effects resulting from the construction process, including the secondary forces from post-tensioning
 EQ: Ultimate Earthquake, IM: Dynamic Impact (used to compute the Coefficient of Dynamic Amplification)
 LL: Live loads, PL: Pedestrian live load, SH: Shrinkage, SIDL: Superimposed dead loads
 TG: Temperature gradient loading in the deck, TU: Temperature uniform variation loading in the deck
 TS: differential temperature between the deck and the stays
 PG: Pylon gradient, WS: Wind load on structures, WL: Wind load on live load

Notes

- (1) : 변위가 아닌 하중영향을 계산할 때는 작은 값을 사용
- (2) : 극한 하중 영향이 최대가 되도록 계수를 사용. 각 하중조합에 대해 양의 극한 및 음의 극한에 대해서 모두 조사
- (3) : 최대값이 발생하는 하중조합을 조사하여 적용
- (4) : 활하중 미고려시 1, 활하중 고려시 0.5적용
- (5) : 3.2.1)에서 정의된 피로 활하중에 대하여 1적용

$$Q = \sum \eta_i \lambda_i Q_i \quad (3)$$

여기서

- Q: 계수화된 하중영향의 합
- η_i : 하중수정계수, 강도한계상태의 경우 1.05, 그 외는 1.0
- Q_i: 각 하중의 영향
- λ_i : 하중계수(3.3.2)절 참조)

교량의 각 부재와 연결부에 대해 다음의 식이 만족되어야 한다.

$$Q = \Phi R_n \quad (4)$$

여기서

- Φ : 저항계수
- R_n : 단면의 공칭저항
- Q: 각 한계상태의 계수화된 하중영향

강도한계상태에 대한 저항계수는 다음과 같다.

$\phi=0.90$ for tension-controlled of reinforced concrete sections(*)

- $\phi=1.00$ for tension-controlled of prestressed concrete sections(*)
- $\phi=0.90$ for shear and torsion
- $\phi=0.75$ for compression-controlled with spiral or ties (*)
- $\phi=0.70$ for bearing on concrete
- $\phi=0.70$ for compression in strut-and-tie models
- $\phi=0.80$ for compression in anchorage zones
- $\phi=1.00$ for tension in steel in anchorage zones

(*) 단면이 인장지배와 압축지배의 사이에 있을 경우, 인장부 강재의 순인장변형률(net tensile strain, 0.002~0.005)에 따라 압축지배시의 저항계수 0.75로부터 선형으로 증가시킨다.

극한한계상태의 경우 저항계수는 1.0이 사용된다. 구조물 및 각 부재들이 극한의 이벤트에 대해 붕괴되지 않도록 저항해야 된다.

사용한계상태에서는 부재에 작용하는 인장응력과 압축응력에 제한을 두었고, 응력의 제한은 프리스트레스 도입여부, 프리스트레스 손실 발생 여부에 따라 다르게 적용되었다.


4. 국내 기준과 비교

활하중의 경우, 국내 기준과 마찬가지로 설계에 사용된 IRC:6-2000에서도 3개의 등급으로 차량하중이 분류가 되어 있다. 재하 차선수에 따른 하중의 감소율은 3개 차선일 경우 10%로 동일했으나, 4개 이상의 차선일 경우 20%로 25%인 국내기준보다 보수적으로 적용되었다. 반면에 충격계수는 같은 기간에 대해 국내 기준보다 작은 값이 적용된다.

풍하중의 경우, 국내 기준이 10m 높이에서 10분간의 평균풍속을 기본풍속으로 하고 있는데 반해, IS:875(part 3)-1987에서는 10m 높이에서 3초간의 평균풍속을 기본풍속으로 적용하고 있다. 온도하중 중 케이블과 구조물의 온도차에 의한 영향이 PTI recommendation에 따라 12.5°C로 적용되었다. 국내 도로 교 설계기준에는 케이블과 구조물의 온도차에 의한 영향에 대해 규정하고 있지 않지만, 케이블 강교량설계지침에서는 PTI와 같은

규정을 사용하고 있다. 도로교 설계기준의 강도설계법도 형식적으로 유사한 하중과 강도에 계수를 사용하고 있지만, AASHTO LRFD에서는 신뢰성이론에 따라 보정된 계수들이 사용되고 여러 가지 한계상태에 대해 적절한 안전수준을 고려할 수 있다.

5. 결 론

참발강 횡단 사장교를 설계하는데 있어, 개별 하중의 정의에는 IRC, IS 등 인도 자국내 기준이 적용되었고, 규정되지 않은 하중에 대해서는 PTI 등을 참조하였다. 또한 하중조합 및 부재 검토에 있어서는 AASHTO LRFD를 적용하였다. 본고에서는 각 개별하중과 하중조합 및 적용된 하중계수 및 강도감소계수 등 기본적인 설계조건들에 대해 기술하고 간단하게 국내의 설계기준과 비교하였다. AASHTO LRFD는 설계자와 사용자의 의도가 폭넓게 반영될 수 있는 설계기준이다. LRFD가 적용된 본 공사를 수행함으로써, 사용자의 요구에 부합하는 교량을 시공하고 우리나라의 교량시공 기술을 대외적으로 알리는 기회가 되는 한편, 국내 설계기준에 도입될 LRFD의 정착에도 기여할 것으로 기대한다. 

Abstract The bridge across Chambal River consists of two approach bridges and a cable stayed bridge with concrete girder and pylon. And the main bridge has been designed mainly based on AASHTO LRFD. This article covers design specifications from AASHTO LRFD, which are applied to load combinations and structural verification. And it also covers local standards applied in definition of loads such as live load, wind load, temperature, etc. In addition, the difference between applied design specifications and Korean standards is mentioned in this article briefly.

Keywords Chambal river, cable stayed bridges, AASHTO LRFD, design standards, IRC:6-2000, IS:875 (part3)-1987

학회지 광고 게재 안내

1. 광고게재면

게재면	광고 협찬금	게재면	광고 협찬금
표 2	80만원	간지	70만원
표 3	70만원	내지(전면)	50만원
표 4	100만원	박스 광고	30만원

2. 할인혜택 : 1년 계약시 10% 할인, 2년 계약시 20% 할인, 회원사는 추가 5% 할인(단, 일시불 납부 시 적용됩니다.)