

사장교의 설계

김 우 종* 조 경 식**

1. 서 론

사장교는 사장케이블(STAY CABLE)의 인장강도와 주탑(PYLON) 및 주형(DECK)의 휨·압축강도를 효과적으로 결합시켜 구조적 효율성을 극대화시킨 현대 중·장대교량의 대표적인 형태다. 구조적인 효율성 이외에도 외관이 수려하고 주행시 비교적 개방감이 있으며 주형의 구성형식, 주탑의 형상, 케이블 배치 등 설계자유도가 많아 주변환경에 용이하게 적용될 수 있다. 최근들어 고강도 신소재의 개발, 전자계산기를 이용한 구조해석능력의 향상, 새로운 시공법 등으로 사장교는 점차 장대화되고 있으며 이런 추세는 앞으로 더욱 가속화될 전망이다. 사장교를 설계하기 위한 주요 구조형식은 다음과 같다.

- (1) 지간의 결정(중간교각의 유무)
- (2) 주형단면 결정
- (3) 주탑의 높이 및 단면결정
- (4) 케이블의배열(종방향, 횡방향)
- (5) 케이블의 수
- (6) 케이블과 주탑의 결합조건 및 위치
- (7) 주형과 주탑의 연결조건
- (8) 주탑과 기초부의 연결조건
- (9) 인접지간과 연결상태
- (10) 기초형식

위의 사항중 (1)에서 (5)까지의 사항은 교량의 미관에 직접적인 영향을 주므로 구조적인 기능과 함께 조형적인 연구가 충분히 수행되어야 한다.

특히 (2)항의 주형단면은 장대지간의 경우 풍하중에 대한 안정성을 확보하기 위하여 풍동실험(WIND TUNNEL TEST)을 수행하여 결정되어야 한다.

다중케이블(MULTIPLE-STAY)을 가진 사장교는 고차부정정 구조물에서 케이블과 주탑 및 주형의 강성비에 따라 구조물의 거동이 변화하게 된다. 사장교는 주형을 구성하는 재료에 따라 PC사장교, 강합성사장교, 강사장교로 분류된다. PC사장교는 재료비가 적게 드는 반면 시공법이 한정되며 크리이프(CREEP), 건조수축(SHRINKAGE)의 영향으로 거동이 복잡해서 구조해석에 주의를 요한다. 반면에 강사장교는 거동이 단순하며 다양한 시공법이 가능하나 재료가 고가이고 엄밀한 시공단계해석이 요구된다. 강합성사장교는 압축이 강한 콘크리트와 휨·인장에 강한 강재를 함께 사용하므로써 가장 경제적인 단면구성이 가능한 반면, 크리이프와 건조수축으로 인한 내적부정정구조가 되어 구조해석에 세심한 주의를 기울여야 한다.

모든 구조물이 그렇듯이 사장교 역시 최적구조물이 되기 위해서는 많은 시행오차를 반복하여 사용성 및 내구성, 미관 등을 만족해야 한다. 사장교는 고차의 부정정구조를 이루어 해석 및 설계에 많은 시간과 노력이 소요되므로 다른 교량에 비해 예비설계 단계가 갖는 의미는 매우 크다. 전체적인 체계(SYSTEM) 결정은 각 부분의 세부설계보다 더욱 중요하게 평가되므로 많은 경험과 지식을 요구한다. 일반적인 사장교설계의 흐름은 표 1과 같다.

* 김우종 : (주)삼우기술단이사, 공학박사, 기술사

** 조경식 : (주)삼우기술단차장, 공학박사

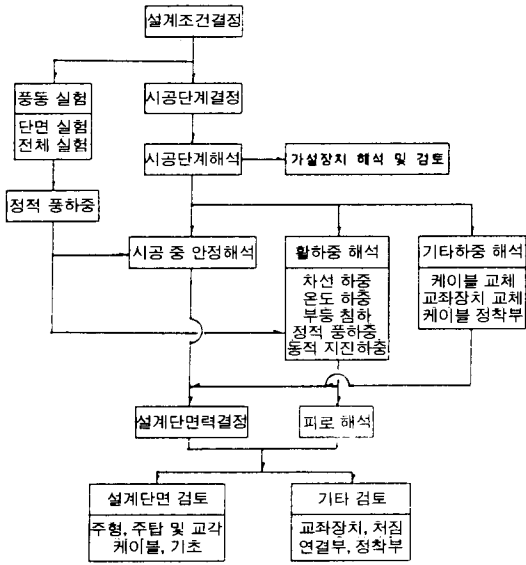


표 1. 사장교의 설계흐름

2. 사장교의 거동

2.1. 기본원리

사장교는 주압축부재인 주탑(PYLON), 주형(DECK)과 인장부재인 케이블(STAY CABLE)로 구성되어 있다. 즉 사장교의 주형은 케이블의 인장력으로 인하여 교축방향의 압축력과 정모멘트를 받게 된다. 따라서 이러한 압축력과 정모멘트가 캔틸레버 상태에서 발생하는 인장응력을 감소시키게 되어 구조물이 안정을 유지한다.

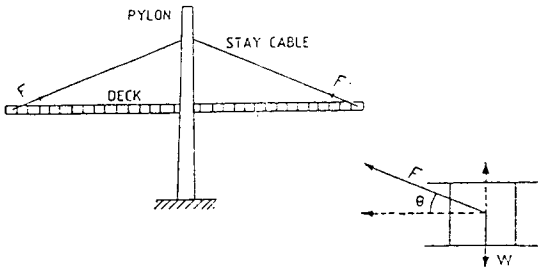


그림 1. 사장교의 기본원리

케이블의 장력은 자중과 평형이 되도록 하는 것이 기본개념으로 시공 중의 가설하중이나 순서 등

에 의하여 수차례 조정되는 것이 보통이다. 사장교의 거동은 주형의 강성과 주탑의 강성, 케이블의 배치와 경계조건으로 결정지어진다고 할 수 있다.

2.2 케이블(STAY CABLE)

사장교의 구조적 안정은 케이블의 인장력과 주탑 및 주형에의 정착에 좌우된다고 할 수 있다. 즉 주형의 강성은 주로 케이블의 배치간격 및 정착위치에 따라 좌우되며, 주탑의 강성 및 높이는 주탑의 케이블 정착간격 및 정착방법에 따라 결정된다.

주형의 케이블 정착위치에 따른 주탑의 케이블 정착방법에 따라 HARP TYPE, FAN TYPE으로 구별되며, FAN TYPE은 정착할 케이블의 수가 많으면 작업공간과 정착구 형태에 의해 주로 SEMI-FAN TYPE(SEMI-HARP TYPE)의 배치를 갖게 된다.

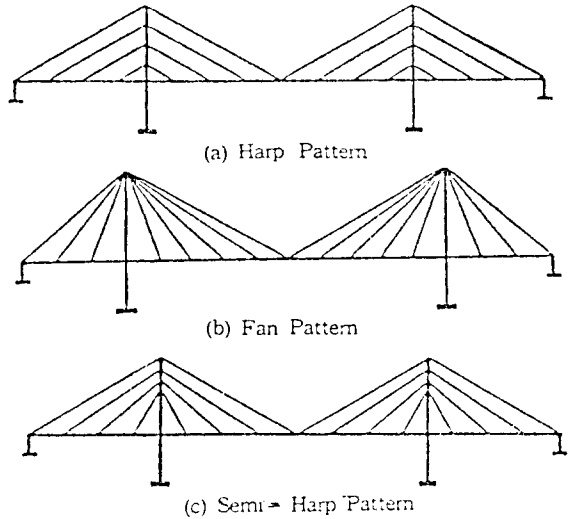


그림 2. 케이블 배치의 구분

케이블은 구성요소에 따라 스트랜드, 와이어, 록트코일, 강봉 등으로 구분된다. 이러한 케이블 용 강은 보통강의 5배, 고장력강의 2배 정도의 강도를 가지고 있는 반면에 일반구조용 강보다 5배 정도 많은 탄소함유량을 가지고 있어 용접성이 현

저히 저하된다. 따라서 케이블 및 정착구는 용접에 의하지 않고 기하학적으로 구속된 형태로 제작되므로 피로 및 부식, 가설의 편의성 등을 고려하여 신중히 선택되어야 한다.

2.3 케이블 구조 시스템의 유지

케이블은 인장재로서 압축에 대한 저항을 무시하게 된다. 즉, 케이블은 단면적에 비하여 길이가 매우 길므로 경사로 가설하였을 때 중앙부에 처짐(SAG)이 발생하게 된다. 이 SAG는 케이블의 길이와 작용인장력의 영향을 받는다.

1) 케이블은 활하중이나 지점변동, 지반변동, 온도변화, 크리이프 및 건조수축 등의 해석시 케이블의 인장 및 압축강성을 고려하게 되는데 이것은 어떠한 정해진 하중조합의 경우에도 최대 발생하는 압축력이 초기 작용인장력을 초과하지 않는다는 가정하에 해석이 가능하다. 즉 어떠한 케이블에서 압축력이 초기 인장력보다 크게 되면 그 케이블은 없는것과 마찬가지로 구조계가 변경된다

2) 초기인장력을 포함한 어떠한 하중조합에 의해 케이블을 작용하고 있는 인장력 크기에 유의해야 한다.

구조요소로서의 케이블 탄성계수는 등가탄성계수 E를 사용하여 계산할 수 있는데 보통의 응력범위(6,000kg/cm²~8,000kg/cm²)에서는 탄성비(E/Es)가 97%이상이지만 케이블이 길거나(L>250M) 작용응력이 작은경우 E/Es는 1/10 정도로 작아질 수 있으므로 교량의 전체적인 형상이나 국부적인 늘어짐으로 인한 주변케이블 응력 집중을 피하도록 고려해야 한다.

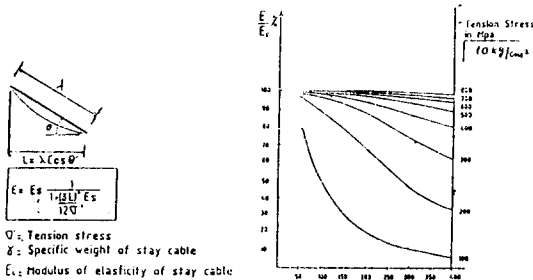


그림 3. 케이블의 비선형성

3. 사장교의 해석

3.1. 시공법의 검토

사장교는 크게 재료로 구분하여 강사장교, 콘크리트사장교, 강합성사장교 그리고 주형의 길이 방향으로 재료를 달리한 복합사장교(예를 들면 노르만디교와 같이 측경간이 콘크리트 단면이고 중앙경간은 강상형단면으로 구성)로 구분할 수 있다.

일반적으로 사장교의 시공은 이러한 재료의 속성과 주변가설 여건 규모에 따라 그 시공법이 결정된다. 사장교를 해석하기 위해서는 시공법을 먼저 결정하여 해석 및 설계 방향을 결정한다.

표 2. 사장교의 분류 및 시공법

구분	표준단면	주요 시공법
1	강사장교	강상형 - 캔틸레버공법 - I.L.M
2	콘크리트 사장교	P.C BOX P.C I-GIRDER - 캔틸레버공법 - I.L.M
3	강합성 사장교	I-GIRDER 콘크리트슬래브 - 캔틸레버공법 - 상판: 현장타설 또는 프리캐스트
4	복합사장교	1+2 - 측경간: I.L.M, M.S.S - 중앙경간: 캔틸레버공법

3.2 시간의 영향분석

사장교는 시간이 길므로 보통 시공이 수년에 걸쳐 이루어진다. 시간이 설계에 미치는 영향은 재료의 영향과 시공순서에 의한 영향으로 크게 나눌 수 있다.

1) 재료의 영향

● 콘크리트의 크리이프(CREEP) 및 건조수축, AGING

- 콘크리트 주탑
- 콘크리트 사장교의 주형
- 강합성 사장교의 상판콘크리트

● P.T의 릴랙세이션(RELAXATION)

- 모든 콘크리트 부재에 설치되는 P.T

● CABLE의 릴랙세이션(RELAXATION)

- 보통 0.5σ_{pu} 이하이므로 생략가능

2) 시공순서에 의한 영향

● 케이블 초기 인장 시기

● 케이블 재긴장 시기

- 상판타설 시기
- 임시 고정장치 설치 및 해제
- 작업하중 및 장비하중 이동시기

위와 같이 사장교를 설계할 때는 전체시공공기 및 작업순서 등을 명확히 설정하고 구조해석에의 영향을 분석해야 한다.

3.3 사장교의 시공단계분석

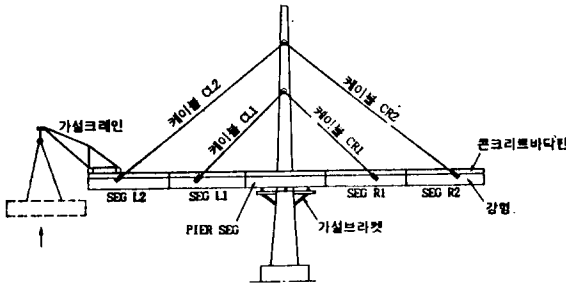


그림 4. 시공단계

사장교를 설계하기 위해서는 시공단계를 명확히 하여 구조적으로 영향을 미치는 공정을 구분해야 한다.

강합성 사장교가 PC 사장교 및 강사장교의 모든 요소를 포함하고 있으므로 이를 기준으로 시간을 포함한 시공단계의 분석에는 다음과 같다.

제 1 일 기초완성

제 300 일 주탑시공

임시고정장치 설치

제 310 일 PIER SEG 설치

상판 슬래브 타설 (혹은 설치) - 양생 10일

제 320 일 가설용 크레인 설치

제 330 일 세그먼트 1 GIRDER 인양 및 연결

CABLE 1의 1차 긴장

상판 슬래브 타설 (혹은 설치) - 양생 10일

제 350 일 세그먼트 2 GIRDER 인양 및 연결

CABLE 2의 1차 긴장

상판 슬래브 타설 (혹은 설치) - 양생 10일

제 360 일 CABLE 2의 2차 긴장

가설용 크레인 이동

여기서 알 수 있듯이 사장교의 시공단계 해석은

다음과 같은 기본적인 공정을 모사하는 것으로 시작된다.

- 시간의 개념 : 절대시간과 공정이 행해진 시간의 정의

- 수시로 경계조건 변화

- 작업차 하중의 설치 및 이동, 제거

- 세그먼트의 설치로 인한 구조계의 변경

- 케이블의 초기긴장 및 재긴장

- (텐던의 긴장)

여기서 특히 케이블의 긴장은 FORCE CONTROL과 DISPLACEMENT CONTROL의 기능이 필요하다. 위에서 알 수 있듯이 몇개의 공정모사 모듈을 확립해 놓으면 아무리 복잡한 시공단계를 가진 사장교라 할지라도 그 공정모사 모듈의 조합으로 표현할 수 있다.

이와 같은 개념으로 구조적으로 의미있는 공정을 파악하고 각 단계마다 해석을 하므로써 각 단계마다 응력검토 및 안정검토를 수행해야 한다. 특히 시공이력은 최종설계 종단을 확보하기 위한 솟음량(CAMBER) 결정에 직접적인 영향을 미치므로 주의를 기울여야 한다.

3.4 사장교 전용 프로그램의 사용

사장교는 『SAP』과 같은 범용프로그램의 기능 이외의 많은 핵심적인 기능을 필요로 한다. 특히 재료의 시간의존적 성질, 순차에 의한 영향, 케이블의 긴장모사, 수시로 변하는 경계조건, 하중의 이동, PT의 사용 등을 들 수 있다. 또한 검토해야 하는 LOAD CASE 및 SYSTEM CASE가 엄청나게 많으므로 번번히 모델링하는 것은 매우 지루한 일이다. 따라서 사장교 전용설계프로그램의 구축은 사장교설계에 있어서 필수불가결한 요소가 된다.

특히 강합성사장교 있어서 강형과 슬래브의 설치순서에 따라 응력분배가 틀러지며 슬래브의 건조수축 및 크리이프의 영향을 적절히 해석하기란 용이하지 않다.

본 장에서는 앞서 기술한 시공단계분석을 토대로하여 사장교 프로그램을 제작하여 강합성 설계에 사용한 예를 수록한다. 표 3은 국내에 소개되어 있는 교량전용 프로그램을 비교한 것이다.

표 3. 교량전용 프로그램의 비교

프로그램명	2차원 해석	3차원 해석		추가변형		단면형상	시공 단계	기하 비선형	재료 비선형	사용 요소		
		직선 부재	곡선 부재	뒤	찌그 러짐					MAIN FRAME	STAY CABLE	합성 부재
SIMPLA2		0		0	0	FLD,PL						
R M	0	0					0	(0)		6 dof	0	
B C	0											
SEGAN	0	0	0	0	0	1 CELL	0			8 dof		
KHALIL'S	0					3-LATER	0	0			0	0
SFRAME	0						0			3 dof		
SPCFRAME	0					M LAYTE	0	0	0	3 dof		
D 7	0	0		0		제약없음	0	0		7 dof		
CFRAME	0					M LAYER	0	0	0	3 dof	0	
PSDARI	0	0		0		제약없음	0			7 dof		
CUBTAP	0	0	0	0		제약없음	0		7 dof			
ASECAS	0	0		0		제약없음	0			7 dof	0	0

<SIMPLA2>, TEXAS AT AUSTIN대학
 <RM-SPACE>, 오스트리아의 TDV사, 1-Axis Bending
 <B C>, 프랑스의 EUROPE ETUDES사,
 <SEGAN>, 1978년 BERKELEY 대학의 VAN ZYL,
 <KHALIL'S>, 1979년 CALGARY 대학의 KHALIL,
 <SFRAME>, 1986년 BERKELEY 대학의 KETCHUM,
 <SPCFRAME>, 1989년 서울대학교의 강영진 교수
 <D 7>, 1991년 서울대학교의 박사학위논문(김우종)-<SNUBR>
 <CFRAME>, 1991년 서울대학교의 박사학위논문(이재석)
 <PSDARI>, 1992년 삼성기술연구소, 프로그램<D7>의 일부분 상용화
 <CUBTAP>, 1992년 서울대학교의 박사학위논문(조경식)
 <ASECAS>, 1992년 (주)삼우기술단(조경식, 김우종)

* 3-LAYER : 3층복합단면
 * M-LAYER : MULTI LAYER 복합단면
 * FLD PL : FOLDED PLATE조합단면

3.5 강합성형의 해석

강합성교는 압축에 강한 콘크리트 바닥판과 인장에 강한 강형을 전단연결재로 상호 구속시키므로써 구조적 효율성을 높인 구조형식이다. 반면에 성질이 다른 두 재료가 결합되므로써 교차의 내부 부정정 구조가 되어 기둥이 복잡해 진다. 따라서 보다 엄밀한 해석을 위해서는 바닥판과 강형의 이상화 방법, 시공순서에 따른 응력 분포에 대한 명확한 이해, 시간에 따라 변화하는 콘크리트 재료 성질의 구현과 이에 따른 제반 상수값 결정들의 과정이 필요하다.

a) 강합성형의 모델링 방법

강합성형의 모델링 방법으로는 콘크리트 바닥판과 강재주형을 각각의 보요소로 이상화하여 절점에서만 두 요소를 강결시키는 방법이 일반적인

다. 이 방법은 적용방법이 단순·명료하나 요소내에서는 적합조건을 만족하지 못하므로써 발생하는 오차로 인하여 결과에 대한 신뢰도가 떨어진 다. 보다 정확한 해석을 위해서는 많은 요소분할이 필요하고 따라서 대용량의 전자계산기와 많은 계산시간이 요구된다. 서해대교 사장교 해석시에는 바닥판과 강형의 강도행렬을 각각 구한 뒤, 정해에 근거한 적합조건식을 이용해 합성요소의 강도행렬로 변환한 BEAM-SLAB요소를 개발하여 사용하였다.

b) 시공순서에 따른 응력변화

강합성형은 합성 전·후의 단면 상수값이 다르므로 전·후의 시공상태를 파악하는 것이 중요하다. 서해대교 사장교의 대표적인 SEG. 가설방법을 예로 들어 강형 연결부에서의 시공순서별 응력분포

의 변화를 예시하면 다음과 같다.

- 가설 예) ①
- ② 케이블 1차 긴장
- ③ 바닥판 타설
- ④ 양생 후 케이블 2차 긴장
- ⑤ 가설크레인 이동

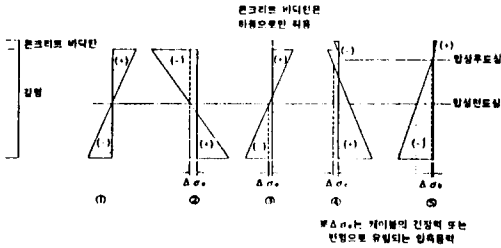


그림 5. 각 시공단계별로 추가되는 응력

그림 5에서 알 수 있듯이 합성시점 전·후의 응력분포 양상이 달라지므로 시공개념을 명확히 이해하고 시공단을 적용하는 것은 대단히 중요하다.

c) 시간경과에 따른 단면변화

콘크리트는 시간이 지남에 따라 강도가 증가하는 AGING 현상, 응력이력에 따라 변형율이 증가하는 크리프(CREEP) 현상과 지속응력과는 무관하게 발생하는 건조수축(SHRINKAGE) 등으로 인해 중립축의 변화는 물론이고 외부하중 없이도 변형이 발생하게 되어 모멘트 재분배현상은 물론이고 단면내 부정정력을 발생시켜 구조물의 거동이 복잡해진다. 이와 같은 부정정력은 특히 강형의 상부 플랜지에 과도한 압축력을 유발시키며 심한 경우는 상부플랜지의 응력상태에 의해 주형의 단면이 결정되기도 한다. 이런 현상은 일반 균일재료로 구성된 주형에서는 볼수 없는 현상이며 강합성교의 설계에서 특히 유의하여야 할 사항이다.

서해대교 설계시 크리프의 영향에 의한 강형상판의 유발응력은 심각해 엄밀한 크리프 해석의 필요성을 절감하였다. 크리프에 의한 부정정력의 산정을 위해서는 경과시간과 지속응력에 따른 크리프 계수값과 크리프 계수 계산을 위한 환경 변수들을 정확히 추정할 수 있어야 한다. 서해대교 사장교 해석을 위해 개발된 구조해석 프로

그램 ASECAS에서는 DIRCHLET 급수를 이용하여 크리프 계수를 표현하고 지속응력의 크기와 작용시점에 따른 선형중첩법을 이용해서 크라이프변형을 구한 뒤, 초기 변형 문제로 이상화 하였다.

3.6 사장교의 처짐

사장교의 처짐관리(GEOMETRY CONTROL)는 사장교의 설계 및 시공에 있어서 매우 중요하다. 처짐의 관리는 사장교 해석이론치와의 비교 등으로 구조물의 안전성을 확인하고 만족스런 지점부 연결시의 단차발생을 최소화 할 수 있는 거의 유일한 방법이라 할 수 있다.

사장교에 있어서의 처짐의 조정은 케이블 인장력으로 조절하는 것이 원칙이다. 그러나 구조물이 현격히비대칭이거나 중간교각이 있거나 가설하중이 큰 경우 시공 중에 발생한 처짐형상을 시공완료 후 조정하여 완전히 보정하기 어렵다. 따라서 처짐의 조정은 시공 중과 시공 후에 모두 실시해야 한다. 그러나 처짐의 조정만으로 장력을 결정하면 구조물 시스템에 따라 일부 부재에 과도한 응력이 발생하게 되므로 매 조정시마다 응력검토를 수행해야 한다. 보통 사장교는 교차의 부정정이므로 시행오차법(TRIAL-ERROR METHOD)으로 조정하기란 쉽지않은 일이다.

따라서 각 케이블을 단위인장력으로 긴장하여 구조물 각 부분의 변위 영향 매트릭스를 구하여 방정식을 형성한 후 해를 구하여 조정력을 구한다.

콘크리트 주형, 강상형 및 강합성 주형의 온도 변화는 시방서에 규정되어 있다. 일반적인 연속교의 경우에는 종방향 변형과 휨 변형에 의한 부정정력이 발생하므로 응력 검토시 반영하면 되었으나, 사장교에서는 케이블의 인장력에 직접적으로 영향을 미치므로 온도의 영향은 매우 중요하다 할 수 있다. 시공시 온도에 의한 처짐을 구조물의 처짐관리(GEOMETRY CONTROL)에 매우 중요하므로 시공시에는 좀 더 정확한 거동을 파악하기 위하여 구조물의 온도를 계측해야 한다. 사장교에서는 구조물의 영향을 미치는 온도변화는 종방향 뿐만 아니라 단면내의 온도분포와 콘크리트와 케

이들의 온도차이 등을 규정하여 설계에 반영하여야 한다.

4. 결 론

본문에서는 서해대교 사장교 설계의 경험을 기초로 사장교의 거동원리와 구조해석시 유의해야 할 몇 가지 사항들에 대해서 기술하였다. 특히 강합성사장교의 주형해석시 바닥판과 강형의 모델링, 가설방법과 순서에 따른 명확한 이해와 이에 따른 구조계의 이상화, 시간경과에 따른 재료성질의 보다 엄밀한 구현 등이 설계에 미치는 영향과 중요성을 강조하였다.

사장교는 기존의 현수교에 비해 주형의 강성을 효율적으로 사용할 수 있고 미관이 탁월할 뿐 더러 주위환경에 따라 가설방법과 구조계를 변화시킬 수 있는 적응성이 뛰어나다. 이와 같은 측면 때문에 사장교는 현대 중·장대교량을 대표하는 형식으로 점차 그 영역을 넓혀가고 있다. 국내에서도 올림픽 대교를 비롯한 몇개의 사장교가 건설되었으며 이와같은 경험을 바탕으로 순수 국내기술에 의해 세계에서 10위권에 드는 장대사장교인 서해대교가 설계되기에 이르렀다. 이와 같은 경험의 조각들이 모여 국내 토목설계의 비약을 이룰 수 있는 전환점이 될 것임을 믿어 의심치 않는다.