

장민서<sup>1</sup> · 이윤우<sup>1</sup> · 김승준<sup>2</sup> · 한휘석<sup>1</sup> · 강영종<sup>3</sup> · 한상윤<sup>4\*</sup> <sup>1</sup>박사과정, 고려대학교, 건축사회환경공학과, <sup>2</sup>조교수, 대전대학교, 건설안전방재공학과, <sup>3</sup>교수, 고려대학교, 건축사회환경공학과, <sup>4</sup>연구교수, 고려대학교, 초대형건설기술연구소

# Global Static Performance Analysis of the Cable-Stayed Bridges with Floating Tower according to Tendon Arrangement

Jang, Min Seo<sup>1</sup>, Lee, Yun Woo<sup>1</sup>, Kim, Seung Jun<sup>2</sup>, Han, Whi Seok<sup>1</sup>, Kang, Young Jong<sup>3</sup>, Han, Sang-Yun<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Candidate, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea
 <sup>2</sup>Assistant Professor, Dept. of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Daejon, Korea
 <sup>3</sup>Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea
 <sup>4</sup>Research Professor, Research Institute for Mega Construction, Korea University, Seoul, Korea

**Abstract** - In long-span cable bridges, the range of designable span length would be determined by the mast and foundation condition. The floating bridge using TLP(Tension Leg Platform) type mast is a type in which the superstructure is supported by the force of buoyancy without the pier mounted on the seabed so that the buoyancy of the floating bridge is balanced by the dead load and buoyancy of the structure. As a technique to overcome the weakness of existing long span bridges, it is possible to consider the type of cable-stayed bridges with floating tower. In this study, according to the tendon arrangement, the static global performance of the long-span cable-stayed bridges with floating tower were evaluated. When the intersection point of the tension line of the tendon and a pivot point of the mast coincided with each other, the tendon was no longer able to resist the rotation of the mast. Tendon arrangement design should be done considering not only increase of horizontal resistance due to tendon slope but total global performance according to tendon arrangement.

Keywords - Cable-stayed bridge, Floating Bridge, Geometric nonlinear analysis, Global static performance, Tendon arrangement

# 1. 서 론

해상 교량은 선박의 주행항로 확보 및 해상 교각공사 비용, 공 사기간을 줄이기 위하여 장경간 교량으로 설계되는 것이 일반적 이다. 해상 교량의 지간장은 주탑 및 기초, 지반에 따라 설계 가능 한 교량의 지간장 범위가 결정된다. 이에 따라 일정 수심 이상의 해역에서는 해상교량의 기술적, 경제적 건설 한계가 있다.

Note.-Discussion open until February 28, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 14, 2018; revised July 24, 2018; approved on July 24, 2018. Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

#### \*Corresponding author.

Tel. +82-2-927-7715 Fax. +82-2-921-5166 E-mail. kiss0521@korea.ac.kr



Fig. 1. The long-span bridge with floating tower  $^{\left[5\right],\left[10\right]}$ 

TLP(Tension Leg Platform) 형식은 해양 구조물의 부유식 지지형식으로, 물속에 잠겨 있는 부유체의 부력을 이용하여 구조 물에 작용하는 수직력과 부력이 힘의 평형을 이루는 구조형식이 다. 일정 수심 이상의 해역에서 TLP 형식을 이용할 경우 해저지 반에 고정된 교각 없이 상부구조물이 부력에 의한 지지가 가능하 다. 따라서 사장교의 주탑을 TLP 형식을 이용하여 해저지반에 연결된 계류선으로 변위를 제어하며 해상교량의 단점을 보완 할 수 있는 부유식 주탑을 갖는 초장대 케이블지지교량이 제안되었 다.<sup>[5],[10]</sup>

사장교 형식의 교량 설계 시, 구조물의 고정하중으로 인한 변 위를 최소화하기 위한 적절한 케이블의 초기장력을 결정해야 한 다. 즉, 초기형상 해석을 반복적으로 수행하여 고정하중으로 인 하여 발생하는 내력을 초기장력으로 반영하여 최소한의 변위를 발생하도록 설계해야 한다.<sup>[7],[8]</sup> 많은 연구에서 사장교 교량은 다 양한 비선형성 때문에 복잡한 구조 거동을 보이는 것을 확인 하였 다.<sup>[8],[9],[11],[12]</sup> 사장교의 비선형 거동은 케이블의 자체 무게로 인 한 새그(sag) 발생이나 거더와 주탑이 압축력과 휨을 동시에 받는 보-기둥 거동을 나타내기 때문이다. 또한 케이블로 연결된 거더 와 주탑의 상호작용으로 인한 대변위 효과로 인하여 구조물의 기 하학적 비선형 거동을 보인다.

고정식 주탑과 다르게 부유식 주탑을 갖는 사장교는 추가적으 로 주탑과 연결된 부유체를 계류선으로 지지하기 때문에, 계류선 -주탑-케이블-거더들의 상호작용으로 인한 보다 더 복잡한 비선 형적 구조거동을 보인다. 또한 일반 TLP형식의 해양 구조물은 계 류선의 경사가 없는 수직으로 배치된 경우가 대부분이다. 부유식 주탑을 갖는 사장교의 경우 수평변위의 제어가 필요하기 때문에 계류선 배치<sup>[3].[4].[6]</sup>에 따른 구조물의 거동이 중요하며 이에 대한 연구는 미비한 상태이다. 또한 TLP 형식으로 사장교의 주탑을 부 유식으로 한 연구는 전무한 상태이다. 이러한 부유식 주탑을 갖는 사장교는 주탑을 지지하는 계류선의 배치 방식에 따라, 구조물의 지지조건 자체가 달라지는 구조형식이기 때문에 계류선의 배치 에 따른 구조물의 전체적인 거동평가가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 부유식 주탑을 갖는 사장교의 케이블, 계류선, 거더 그리고 주탑의 복합적인 비선형성 거동을 확인하기 위하여, 기본적으로 사장교에서 수행하는 초기형상 해석을 수행 하고 계류선의 배치 방식과 부유체의 직경, 초기부력의 크기에 따 른 전체계 기하비선형 정적거동해석을 수행하였다.

# 2. 구조 해석

본 연구에서는 3경간 2개의 부유식 주탑을 갖는 팬(FAN)형식 의 사장교의 고정하중 상태에서의 기하 비선형 전체계 정적해석 을 수행하였다. 해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 2018를 이용하여 분석하였다.

매개변수 해석을 진행하기에 앞서 초기형상해석을 수행하여 적절한 케이블과 계류선의 장력을 선정하였다. 초기형상해석을 통한 초기장력을 갖는 케이블과 계류선으로 각각의 매개변수 해 석에 따른 주탑의 교축방향 수평변위와 연직방향변위 그리고 중 앙 경간 거더의 중앙부 최대 처짐을 분석하였다.



Fig. 2. Fan type analysis model

	Girder	Mast & Mast-Cross	Floater	Cable	Tendon
Elastic modulus E $(kN/m^2)$	$2.1  imes 10^8$	$2.1\!\times\!10^8$	$2.1\!\times\!10^8$	$2.1\!\times\!10^8$	$2.1\!\times\!10^8$
Sectional area A $(m^2)$	0.75	0.37	2.51~7.54	0.01	0.0364
2nd moment of inertia I $(m^4)$	1.45	3.14	125 ~ 3392	-	-
Unit weight $\gamma (kN/m^3)$	77.01	77.01	77.01	77.01	77.01
Compression	Y	Y	Y	N	N

Table 1. Section properties



## 2.1 해석 모델

부유식 주탑을 갖는 사장교의 전체계 정적거동분석 연구를 위 한 해석 모델은 Fig. 2.와 같이 총 길이 920m, 중앙 지간장 480m, 주탑의 높이 130m(거더-주탑 최상단), 자유수면-거더 간격 25m의 사장교이다. 해석 모델의 수심은 500m로 가정하였 다.

해석 모델의 주탑은 Fig. 4.와 같이 단실박스형태의 H형 주탑 에 케이블은 2면배치 형식이다. 주탑과 거더는 빔요소(B31)를 사 용하였으며 ABAQUS MPC-LINK 옵션을 이용하여, 주탑의 크 로스빔에 거더가 얹힌 상태로, 힌지 연결로 가정하였다. 주탑과 연결된 마지막 케이블의 위치와, 거더와 주탑이 연결된 부분에 주 탑의 크로스빔이 위치 하고 있는 모델이다. 거더의 단면은 Fig. 5. 와 같이 4박스 다실박스형 단면으로 가정하였다. 모든 케이블의 단면적은 0.01m2로 가정하여, 2면식으로 총 80개의 케이블이 지지하는 팬(FAN) 형식의 사장교로 모델링 하였다. 수면에 잠겨 있는 각각의 부유체는 강재 (API X65 grade)로 제작된 강관형식 으로 빔요소(B31)를 사용하였으며 12개의 텐던(tendon) 계류 선으로 계류되었다. Table 1 은 해석모델의 주요 단면제원을 나 타낸다.



Fig. 4. Mast & cross section of mast



Fig. 5. Girder cross section

케이블과 계류선은 원형 강관으로 압축력을 받지 못하는 트러 스요소(T3D2)로 모델링 하였다. 해석 모델의 부유식 주탑 하단 부유체는 두께 0.04m 원통형 강관 형식으로 가정하였다.



부유식 주탑을 갖는 팬(FAN) 형식 사장교의 비선형 전체계 거 동을 확인하기 위하여 다양한 기하학적 변수를 고려하였다.

첫 번째로는, Fig. 6.와 같이 부유체의 두께와 잠긴 부피는 고 정하고 부유체의 최외각 직경(OD, Floater outer diameter)을 OD=20m~60m 까지 매개변수로 선정하였다. 부유체의 잠긴 부 피는 부력의 크기이므로 부력의 크기를 고정시킨 것이다.



두 번째로, Fig. 7.와 같이 계류선의 배치 형식을 기울기를 주는 배치로 해석 변수를 선정하였다. 계류선이 수직일 때의 기울기 90°기준으로, 60°~120°기울기의 매개변수 해석을 수행하였다.



세 번째로, Fig. 8.과 같이 수직 하중 대비 부력의 비율을 변수 로 선정하여 해석을 수행하였다. 부유체의 잠긴 부피를 변화시켜 수직 하중 대비 부력비(BVR, Buoyancy-vertical load ratio) 의 매개변수 해석을 수행하였다. 이때 부유체의 직경과 두께는 고 정시키고 부유체의 잠김 깊이(draft)를 조절하여 부력비를 1.6~2.4까지 해석 변수로 선정하였다.

해석모델의 하중은 전체 구조물의 고정하중만을 고려한 정적 해석을 수행했다. 물 속에 잠겨 있는 부유체와 계류선의 경우 물 에 잠긴 부피를 고려하여 부력을 반영하였다. 해석모델을 왕복 6 차선 도로의 교량으로 가정하였고 도로교설계기준<sup>[1],[2]</sup>에 입각하

196 한국강구조학회 논문집 제30권 제4호(통권 제155호) 2018년 8월

여 총 폭 27m, 두께 0.25m의 콘크리트 바닥판을 고려하여 바닥 판이 강성을 발휘하기 전 상태의 바닥판 고정하중의 질량을 고려 하여 선하중으로 재하였다.

#### 2.2 초기형상 해석

초기형상 해석은 완성된 케이블 교량에서 구조물의 고정하중 만으로 인해 발생되는 휨모멘트와 변위 최소회를 목적으로 한다. 초기형상 해석 방법으로 시산법과 초기부재력법, TCUD 방법이 있다.

본 연구의 목적은 부유식 주탑을 갖는 사장교의 전체적 거동특 성 분석이다. 이에 따라 다양한 매개변수에 따른 방대한 해석모델 의 양 때문에 약식 초기부재력법을 활용 하였다. 고정식 주탑을 갖는 팬형식 사장교의 기하비선형 해석을 기반으로 초기부재력 법을 사용한 3번째 반복해석 결과의 케이블 장력과 무응력장 길 이를 부유식 주탑을 갖는 사장교 케이블의 초기장력으로 사용하 였다. 또한 부유체에 작용하는 부력과 수직하중의 차이를 계류선 의 경사를 고려하여 각각의 계류선의 초기장력으로 반영하여 부 유식 사장교의 기하비선형 해석을 수행하였다.

## 2.3 매개변수 해석

주탑 최상단 수평·수직 변위, 부유체 최하단의 수평·수직 변위 그리고 거더의 최대 처짐을 각 매개변수 해석결과에서 확인 하였다.

### 2.3.1 주탑 최상단 수평 변위

계류선의 기울기와 부유체의 직경, 부력비에 따른 주탑 상단의 수평 변위를 Fig. 10. 그래프로 나타내었다. 변위의 측정 지점은 Fig. 9.에 나타내었다.



Fig. 9. Mast-Top horizontal displacement point





부유체의 최외각 직경 20m, 30m 의 경우 특정 계류선의 기울 기에서 구조물이 민감하게 거동하는 것을 확인하였다. 또한 부력 이 커질수록, 부유체의 최외각 직경이 20m, 30m의 경우 수평 변 위가 줄어드는 경향이 나타났다.

## 2.3.2 부유체 최하단 수평 변위

계류선의 기울기와 부유체의 직경과 부력비에 따른 부유체 하 단의 수평 변위를 Fig. 12. 그래프로 나타내었다. 변위의 측정 지 점은 Fig. 11.에 나타내었다.



Fig. 11. Floater-Bot horizontal displacement point

주탑의 최상단 수평 변위와 마찬가지로 부유체의 최외각 직경 별로 특정 계류선의 기울기에서 부유체 최하단의 수평 변위가 민 감하게 거동하는 것을 확인하였다. 부유체의 최하단 수평 변위에 서는 보다 명확한 거동 경향을 확인하였다. 부유체의 수평 변위의 경우 부력이 커질수록 계류선에 작용하는 초기장력의 크기도 증 가하기 때문에 계류선이 부착 된 위치에서는 부력에 따른 변화량 은 크게 나타나지 않았다.





#### 2.3.3 주탑 최상단 및 부유체 최하단 수직 변위

계류선의 기울기와 부유체의 직경과 부력비에 따른 주탑 상단 및 부유체 최하단 수직 변위를 Fig. 14. 그래프로 나타내었다. 각 변위의 측정 지점은 Fig. 13.과 같다.

수직 변위에서는 수평 변위 때와는 다르게 계류선의 기울기에 따른 민감하게 거동하는 부분은 나타나지 않았다.

주탑 상단의 수직 변위의 경우, 주탑 상단의 수평 변위와 유사 하게 부력이 커질수록 부유체의 최외각 직경이 20m, 30m 의 경 우 수직 변위가 줄어드는 경향을 확인 하였다. 부유체 하단의 수 직 변위의 경우, 부유체의 하단의 수평 변위와 유사하게 부력에 따른 거동특성 차이는 나타나지 않았다.



Fig. 13. Mast-Top & Floater-Bot vertical displacement point



2.3.4 거더 중앙 최대 처짐

계류선의 기울기와 부유체의 직경과 부력비에 따른 거더 중앙 최대 처짐을 Fig. 15. 그래프로 나타내었다.

거더의 처짐의 경우 케이블로 주탑과 연결되어 있으며 주탑의 경우 계류선에 의해 지지되어 있으므로, 주탑의 수평 · 수직 변위 와 부유체의 수평 · 수직 변위의 복합적인 영향성이 나타난다. 주 탑과 부유체의 수평변위에서 나타난 특정 계류선의 기울기에서 민감하게 거동하는 부분이 거더의 최대 처짐에서도 나타난다. 또 한 부유체의 최외각 직경이 20m, 30m 인 경우, 부력이 커질수록 주탑 상단 수평 · 수직 변위가 줄어들어 거더의 최대 처짐도 줄어 드는 것을 확인 하였다.





Fig. 15. Girder maximum vertical displacement

# 3. 해석 결과 분석

동일한 장력을 갖는 계류선이 기울기가 생기게 되면, 계류선 의 수직 저항력은 감소하며 수평 저항력은 커지게 된다. 또한 Fig. 16.과 같이 기울기 60°와 120°는 계류선의 분력을 살펴보면, 수 평·수직 저항력 측면에서는 동일한 지지 형태라고 할 수 있다. 하지만 구조 해석 결과 그래프를 살펴보면 계류선의 기울기 90° 를 기준으로 좌우 대칭을 이루지 못하는 결과를 보이고 있다. 계 류선의 배치가 예각인 경우와 둔각인 경우의 차이점은 두 계류선 장력의 교차점이 부유체를 기준으로 상부에 있느냐와 부유체 하 부에 있느냐의 차이점만이 발생한다.

고정식 주탑을 갖는 사장교의 거동과 상이한 부유식 주탑의 사 장교는 계류선의 기울기가 예각을 이루는 계류선 배치의 경우, 부 유체의 직경 별 계류선의 특정 기울기에서 구조물의 전체거동이 불안정하게 되어 정확한 대칭을 이루지 못하는 결과를 나타낸다.



Fig. 16. Component force of tendon tension

### 3.1 주탑 최상단 및 부유체 최하단 수평 변위

Fig. 17. 의 그래프와 같이 주탑과 부유체의 수평변위가 불안 정해지는 경우, 각 부유체의 직경과 계류선의 기울기에 따라 계류 선 장력 방향의 교차점이 동일한 특정 한 점에 모이게 되는 것을 확인하였다.





Fig. 18. Intersection point of the tendon tension line

Fig. 18. 과 같이 계류선 장력 방향의 교차점이 주탑과 거더가 연결되어 있는 부분에서 모이게 될 때 구조물의 변위들이 민감하 게 거동한다. 주탑과 거더는 힌지로 연결되어 있기 때문에 주탑의 회전중심점(pivot point)이 주탑과 거더의 연결된 부분이라고 할 수 있다. 부유체의 직경과 계류선의 기울기에 따라 계류선의 장력 방향이 주탑의 회전중심점에서 모이게 되면 계류선의 장력 은 더 이상 주탑의 회전에 대한 저항력을 잃게 된다. 이에 따라 주 탑은 회전에 대하여 불안정한 거동이 나타나며 이러한 주탑의 불 안정성이 거더 및 부유식 사장교의 전체거동에도 영향을 미치게 된다.

Table 2 는 계류선의 장력이 정확히 주탑과 거더의 연결점에 모일 때의 계류선의 기울기를 부유체의 직경별로 나타낸 것이다. 부유체의 직경이 작은 OD=20m 의 경우 계류선의 기울기가 81.8°~84.0° 정도만 있어도 쉽게 주탑의 회전중심점에 도달하 게 된다. 상대적으로 부유체의 직경이 큰 OD=60m 의 경우 계류 선의 기울기가 42.9°~45,9° 정도로 큰 각도에서 주탑의 회전중 심점에 도달하게 되어 부유식 주탑을 갖는 사장교의 불안정한 거 동이 나타나게 된다.

BVR	OD [m]	Critical Pivot Tendon Inclination [deg]		
1.6	20	81.8		
	30	71.1		
	40	60.0		
	50	50.4		
	60	42.9		
1.8	20	82.5		
	30	72.2		
	40	61.1		
	50	51.4		
	60	43.6		
2.0	20	83.0		
	30	73.2		
	40	62.2		
	50	52.4		
	60	44.4		
2.2	20	83.5		
	30	74.1		
	40	63.3		
	50	53.3		
	60	45.2		
2.4	20	84.0		
	30	74.9		
	40	64.2		
	50	54.2		
	60	45.9		

Table 2	2.	Critical	tendon	inclination
---------	----	----------	--------	-------------

또한 부력이 커질수록 부유체는 보다 큰 부력을 만들기 위해 부유체의 잠김 부피가 커지게 되며, 같은 직경일 경우 잠김 부피 증가를 위한 잠김 깊이가 증가하게 된다. 부력이 커질수록 이에 비례하여 계류선은 부유체의 잠김 깊이만큼 보다 하단에 부착되 어진다. 이에 따라 부유식 사장교의 불안정한 거동을 보이게 되는 계류선의 기울기는 부력이 커질수록 90°를 기준으로 작은 각도 변화에서 발생하게 된다.

### 3.2 주탑 최상단 및 부유체 최하단 수직 변위

주탑의 최상단 수직 변위는 부유체의 직경이 작을 경우 부력에 따라 수직변위가 줄어드는 경향이 나타난다. 부유체의 수직 변위 는 부력의 크기 증가에 따라 계류선의 초기장력 크기 또한 증가하 기에 부력에 따른 수직 변위에 대한 영향은 상대적으로 미비하게 나타난다.





계류선의 기울기에 따라 발생하는 장력 교차점과 주탑의 회전 중심점의 영향을 배제하기 위하여, 부력에 따른 거동평가는 계류 선이 수직한 90°인상태를 비교하였다. 부력의 크기 증가에 따른 수직 변위 감소는, 부력이 커짐에 따라 부유체의 잠김 깊이가 증 가하게 된다. 이에 따라 동일한 수심 150m에서 Fig. 19.과 같이 계류선의 전체 길이( $L_T$ )는 부력이 커짐에 따라 감소하게 된다. 이러한 계류선의 전체길이 감소는 Fig. 20.과 같이 계류선의 단

위길이 당 축강성 $(\frac{E_T A_T}{L_T})$ 의 증가 효과를 나타낸다.

동일한 계류선 장력의 차이가 만들어 내는 회전에 대한 저항성 은 부유체의 직경이 커질수록 모멘트 팔 길이 증가 효과로 커지게 된다. Fig. 21.은 부력비에 따른 주탑의 회전각을 나타낸 것이다. 계류선의 배치가 90°인 경우, 모멘트 팔 길이의 증가영향이 계류 선의 강성 증가효과보다 큰 구간은 Fig. 21.와 같이 부력이 1.8 까지 나타난다.

주탑 최상단 수직 처짐은, 계류선의 강성 변화와 부유체의 직

경에 따른 회전 저항성의 변화에 따라 수직 처짐과 회전에 의한 수직 처짐의 복합적인 작용으로 Fig. 22.과 같은 결과를 보여준 다.



Fig. 20. Tendon stiffness by BVR







Fig. 22. Mast vertical displacement by BVR

# 4. 결 론

본 연구에서는 기하비선형 유한요소해석을 통하여 부유식 주 탑을 갖는 사장교의 계류선 배치 및 부유체의 형상에 따른 전체계 정적 거동을 분석하였다. 고정하중만이 작용하는 상태에서도 부 유식 주탑을 갖는 사장교는 고정식 사장교에서는 나타나지 않는 거동특성을 확인하였다.

1. 부유식 주탑을 갖는 사장교에서는 계류선의 기울임에 따른 배치와 부유체의 직경에 따라 계류선 장력이 주탑의 회전중심점 인 거더와의 연결부에서 모이게 되면, 계류선은 더 이상 주탑의 회전에 저항하지 못하게 되어 불안정한 거동이 나타나게 된다. 주 탑의 정확한 회전중심점을 명확히 해석하여 확인해야 하며, 계류 선 장력의 교차점을 고려한 계류선의 배치 설계를 수행해야 한다.

2. 상대적으로 부유체의 직경이 작은 경우, 초기 부력의 크기 에 따라 잠김 깊이와 계류선의 전체 길이가 크게 달라진다. 계류 선의 길이 감소로 인한 기하강성 증가 효과와 부유체의 직경이 만 들어 내는 회전 팔길이의 영향성을 고려해야 한다. 또한 부유체의 직경과 적정 초기 부력을 고려하여 설계되어야 보다 안정적이고 경제적인 부유식 사장교 설계가 가능 할 것이다.

3. 부유식 주탑을 갖는 사장교 주탑의 수평 · 수직변위 영향성 이 거더의 최대 처짐에 영향을 미치게 된다. 계류선의 기울기와 부유체의 직경, 초기 부력비에 따라 거더 최대 처짐의 경제적 설 계가 가능하다. 일반적으로 부유체의 직경이 클수록 부력비나 계 류선의 기울기에 따른 영향성이 적게 나타난다. 상대적으로 부유 체의 직경(20m)이 작은 경우는 부력비가 2.0 이상에서 거더 처 짐은 가장 작은 결과를 나타내었다. 하지만 부유체의 직경이 작은 경우는 계류선의 기울기가 조금만 발생하여도 주탑의 회전에 불 안정한 거동이 발생하므로 명확한 기하비선형 해석을 수행하여 설계에 반영해야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지 원 (과제번호 17CTAP-C133500-01) 에 의해 수행되었습 니다.

# 참고문헌(References)

[1] 국토해양부(2012) 도로교설계기준(한계상태설계법).

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012) *Highway Bridge Design Standard (Limit State Design)*, Korea (in Korean).

[2] 한국도로교통협회(2014) 도로교설계기준(한계상태 설계법, 케이블 교량편).
 Korea Road Association (2014) *Highway Bridge Design*

Standard (Limit State Design): Cable-Supported Bridge, Korea (in Korean).

 [3] 김승준, 박우선, 원덕희(2016) 유한요소해석을 통한 해중터 널의 유체동역학 해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 36권, 제6호, pp.955-967.

Kim, S., Park, W.-S., and Won, D.-H. (2016) Hydrodynamic Analysis of Submerged Floating Tunnel Structures by Finite Element Analysis, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.36, No.6, pp.955-967 (in Korean).

[4] 김승준, 원덕희(2017) 불규칙 파랑 중 해중 터널 계류선의 단 기 피로 손상 분석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제 29권, 제1호, pp.49-60.

Kim, S., and Won, D.H. (2017) Investigation of Fatigue Damage of the Mooring Lines for Submerged Floating Tunnels Under Irregular Waves, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.1, pp.49-60 (in Korean).

- [5] Aas-Jakobsen, and COWI (2016) Design Basis, Norway.
- [6] Cifuentes, C., Kim, S., Kim, M.H., and Park, W.S. (2015)

Numerical Simulation of the Coupled Dynamic Response of a Submerged Floating Tunnel with Mooring Lines in Regular Waves, *Ocean Systems Engineering*, Techno-Press, Vol.5, No.2, pp.109-123.

- [7] Kim, K.-S., and Lee, H.S. (2001) Analysis of Target Configurations Under Dead Loads for Cable-Supported Bridges, *Computers & Structures*, Elsevier, Vol.79, pp. 2681-2692.
- [8] Kim, S., Won, D.H., and Kang, Y.J. (2016) Ultimate Behavior of Steel Cable-Stayed Bridges: I. Rational Ultimate Analysis Method, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.16, No.2, pp.601-624.
- [9] Kim, S., Won, D.H., and Kang, Y.J. (2016) Ultimate Behavior of Steel Cable-Stayed Bridges: II. Parametric Study, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.16, No.2, pp.625-636.
- [10] Ellevset, O. (2014) Norwegian Coastal Highway Route E39

   Status Overview, Material Presented at the 9th Annual Bridge to Integrated Marketing & Fundraising Conference, Association of Fundraising Professionals & Direct Marketing Association of Washington, Norway.
- [11] Ren, W.-X. (1999) Ultimate Behavior of Long-Span Cable-Stayed Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.4, No.1, pp.30-36.
- [12] Xi, Y., and Kuang, J.S. (1999) Ultimate Load Capacity of Cable-Stayed Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.4, No.1, pp.14-22.

요 약: 장경간 케이블 교량은 설계 가능한 지간장의 범위가 주탑과 기초지반 조건에 따라 결정된다. TLP 형식을 활용한 부유식 주탑 교량은 해저지반에 거치된 교각 없이 구조물의 부력을 이용하여 구조물의 사항증과 부력이 힘의 평형을 이루어 지지되는 형식이다. 기존의 장경간 교량의 단점을 보완할 수 있는 기술로써 부유식 주탑을 갖는 사장교 교량이 제안되었다. 본 연구에서는 계류선의 배치에 따라 부유식 주탑을 갖는 장경간 사장교 교량의 정적 전체계 거동특성을 평가하였다. 계류선의 장력 방향의 교차점이 주탑의 회전중심점과 일치하게 되는 경우, 계류선은 더 이상 주탑의 회전에 저항하지 못하는 불안정한 거동이 발생했다. 단순히 계류선 경사로 인한 수평 저항력 증가만이 아닌 계류선의 배치에 따른 전체계 거동특성을 고려한 계류선 배치 설계를 수행해야 한다.