

ADINA 구조해석을 이용한 PCT 거더교 좌굴 평가에 관한 연구[§]

김 의 수^{*†} · 김 종 혁^{*}

* 국립과학수사연구원

Evaluation of Buckling in Prestressed Composite Truss Girder using ADINA Structure Analysis

Eui Soo Kim^{*†} and Jong Hyuk Kim^{*}

* National Forensic Service

(Received March 6, 2013 ; Revised August 20, 2013 ; Accepted August 22, 2013)

Key Words: Forensic Engineering(법공학), Buckling Behavior(좌굴 거동), Finite Element Analysis(유한요소해석), Instrumented Indentation Technique(계장화압입시험법)

초록: 최근에는 이러한 법공학 분야에 유한요소법 및 유한체적법을 이용한 다양한 시뮬레이션 기법을 활용하여 안전사고 및 재난사고에 대한 법적 책임문제를 해명하고 보다 정확한 원인분석을 통해 원인을 규명하고 있는 추세이다. 본 연구에서는 ADINA 구조해석을 이용하여 단경교 거더교 붕괴사고에 관한 좌굴 원인분석을 수행하였다. 본 연구에서 다루는 사고는 단경교 거더교 신축 중 상현 슬래브 구성을 위한 콘크리트 타설 중 교량이 붕괴된 사고로 원설계 공법에서 가설 공법이 변경되었고 상현 콘크리트 블록 및 격벽 콘크리트 등을 미시공한 상태에서 그 다음 단계인 상현 슬래브 콘크리트 타설을 진행함으로써 구조적 불안정을 가져와 거더가 좌굴이 발생하여 붕괴된 사고이다. 사고 재현 실험이 불가능한 경우 F.E.M 을 이용한 구조안정성 비교 평가는 정확한 공학적 사고의 원인을 규명하는데 효과적인 방법이다.

Abstract: Recently, to resolve problems regarding legal liability for accidents and disasters, various simulation techniques such as F.E.M. and F.V.M. have been used in the field of forensic engineering. In this study, we performed mechanical structure analysis using ADINA to investigate the cause of bridge collapse accidents. Such accidents occurred owing to modified and missing processes in comparison with the original design while filling with concrete. Modified and missing processes cause buckling of the upper plate and twisting of the main girder. Through this study, we determine the exact cause of bridge collapse by comparing the evaluation of the structure stability of the original design with the evaluation of the structure stability of the modified and missing process using ADINA structure analysis. Hence, this result indicates that buckling prediction through FEA is the most effective method.

1. 서 론

각종 사고에 관한 법적 문제에 대해, 이를 공학적으로 해명하는 학문 분야인 법공학(Forensic Engineering)은 공학과 관련된 분야에서 사고가 발생했을 경우 이 분야의 전문적인 지식과 경험을 갖추고 있는 전문가가 법적인 관점에서 문제점을 규명하는 학문이다^(1,2). 사고 원인 규명 과정에 있

어서 일반적인 공학적 관점이 사고가 발생하는 메커니즘을 설명하고 파악하는데 주안점을 둔 반면 법공학은 안전사고 및 재난사고에 대한 법적 책임 문제를 해명하는 목적 외에 전문지식을 가지고 있는 법공학 조사관들의 정확한 원인분석을 통해 원인을 규명하고 이를 예방하기 위해 각종 제도 및 법적 규제에 대한 규격 및 정책을 제안하여 안전하고 안정된 사회를 실현하는데 공헌하는 것이라 할 수 있다. 사회가 점점 고도한 기술사회로 접어들고 국내 공판중심주의 도입으로 인해 공학과 법이 함께 관련된 문제들을 다루는 법공학에 대한 필요성은 더욱 대두되고 있다. 본 연구에서는 법공학에서 다루는 내용 중 교량 구조물이 붕괴되면

§ 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2013년도 춘계학술대회(2013. 3. 27.-29., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, eui44013@lycos.co.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

서 추락으로 이어져 큰 인명피해를 가져올 수 있는 P.C.T 거더교(Prestressed Composite Truss Girder)의 상현재 좌굴 거동에 관한 평가를 진행하고자 한다. 본 연구에서 다루는 사고는 단경교 거더교 신축 중 상현 슬래브 구성을 위한 콘크리트 타설 중 교량이 붕괴된 사고로 원설계 공법에서 가설 공법이 변경되었고 상현 콘크리트 블록 및 격벽 콘크리트 등을 미시공한 상태에서 그 다음 단계인 상현 슬래브 콘크리트 타설을 진행함으로써 구조적 불안정을 가져와 거더가 좌굴이 발생하여 붕괴되었다. 이와 같은 교량 붕괴사고는 발생시 대형 참사를 내재하고 있기 때문에 범공학적인 측면에서 전문화되고 체계적인 사고조사와 원인 규명을 통해 사전에 예방대책을 마련함으로써 유사 및 동종재해의 발생을 최소화해야 한다. 본 연구에서는 ADINA 구조해석을 이용하여 공정 누락에 대한 구조 안정성 평가를 원설계치와 비교 분석함으로써 상현재 좌굴로 인한 교량 붕괴 사고의 정확한 원인을 규명하였다.

2. 사고개요 및 공법이해

2.1 사고개요

사고 현장은 거더교 신설 공사 현장으로 전체 교량연장 592.6 m 중 군거부(접경지역에 설치되는 특성에 따라 군(軍등)협정 과정에서 유사시 시설 일부를 쉽게 폭파하도록 주교량과 분리하여 신축) 시설 용도로 신축 중이던 교량연장 55 m, 폭원 11 m 의 PCT(Prestressed Composite Truss Girder)공법이 적용된 단경간 P.C.T. 거더교가 상부바닥판 콘크리트 타설 중 붕괴되어 낙교된 상태이며 이를 Fig.1에 나타내었다. 붕괴된 단경간 거더교(이하 사고 거더교)는 P.C.T. 공법 중 상현재의 강재량을 절감시키고 좌굴에 의한 저항능력 증대와 구조형상 단순화 및 거더 자중을 경감시켜 크레인에 의해 일괄가설이 가능하도록 IH(Innovated Hybrid Girder)공법이 적용된 교량이나 크레인 접근이 불가능한 이유 등으로 인해 성토(흙쌓기)와 가설 지지대를 설치하여 강재가 거치될 교대와 교각에 직접 설치하는 실제 설계된 시공법 대비 변경된 시공법이 적용된 것으로 되었고 변경 공법 내용을 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 IH 공법이해

IH 거더의 구조적 특징은 상현재는 강재와 콘크리트를 이용한 이중합성구조(상현 콘크리트 블록)를 적용하여 좌굴에 의한 저항능력을 증대시키



(a) Side view of the accident scene



(b) Top view of the accident scene

Fig. 1 The scene of collapsed girder bridge

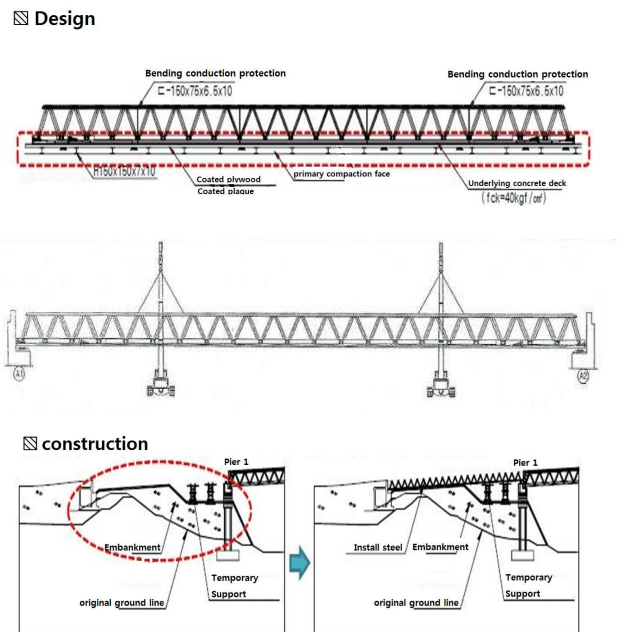


Fig. 2 Comparison between design and real work

고, 복부사재는 강관, 하현슬래브는 PSC 콘크리트 로 구성되어 복합트러스에 PS 강재를 이용하여 압

축력을 도입하는 공법으로 일반적인 명칭 및 구조를 Fig. 3 에 나타내었다. 붕괴 거더교는 STK490 강재의 복부사재를 SM570 강재의 상현재에 용접 연결하여 트러스 공장제작 완료 후 이를 현장으로 이동하여 하현슬래브 및 상현재 이중합성 콘크리트 타설(상현재 1 차 타설). 양생→ 프리스트레스 도입 후 그라우팅 실시→격벽 콘크리트 타설→ 상현 슬래브 타설. 양생 순으로 시공이 이루어지며 시공 단계별 요약 순서도를 Fig. 4 에 나타내었다.

3. 좌굴 안정성 평가

3.1 좌굴 형태 분석

사고 거더교는 총 5 개의 트러스 부재가 용접 작업에 의해 연결되고 교량에 인장력을 부여하기

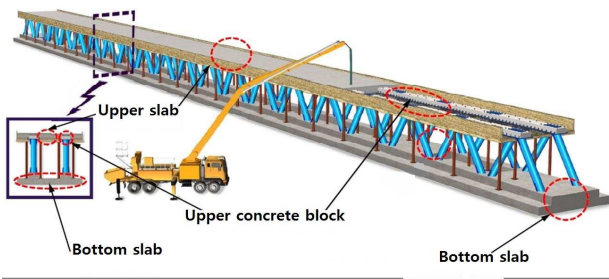


Fig. 3 Structure and part name of IH method

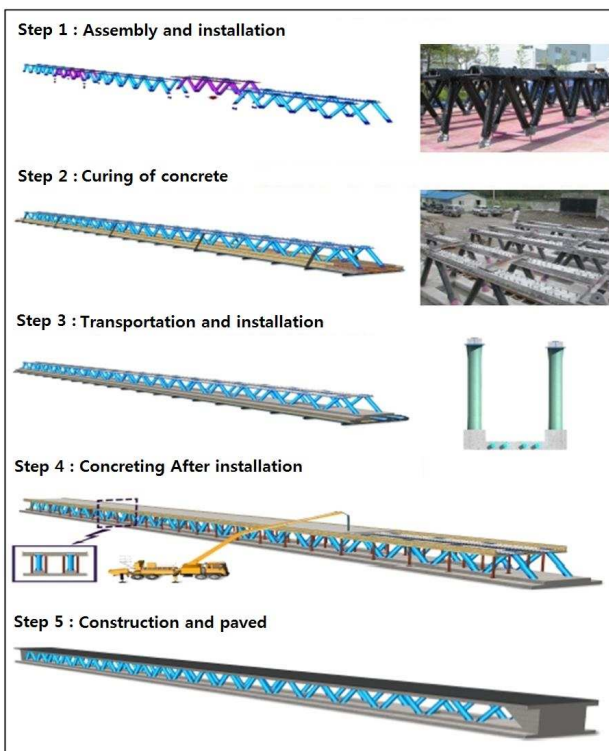


Fig. 4 Detail process diagram of IH method



(a) Right view of girder



(b) Left view of girder

Fig. 5 Buckling deformation shape of girder



(a) Side view of upper plate



(b) Top view of upper plate

Fig. 6 Skipping of concrete block build process

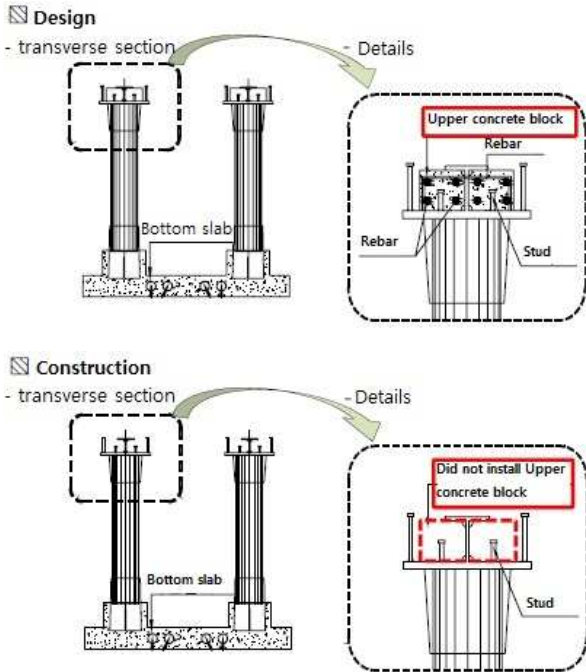


Fig. 7 Comparison between design and real concrete block build work

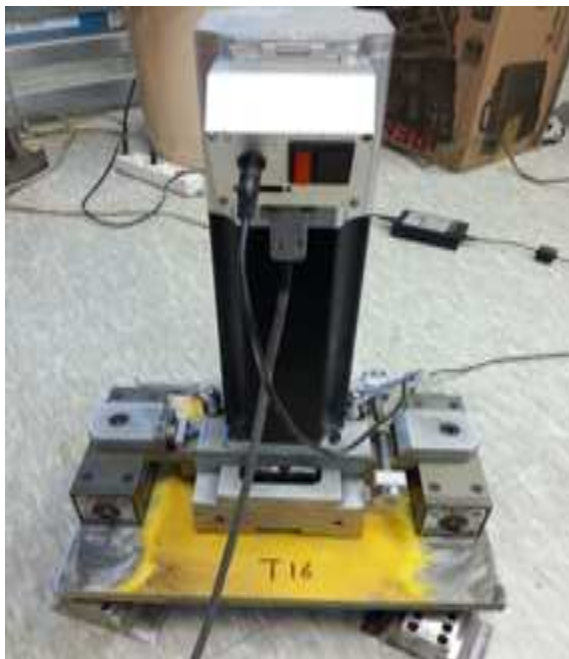


Fig. 8 Evaluation of mechanical property using nano indentation method

위해 PS 강선을 이용한 프리스트레스 인장 작업 후 성토와 가설 지지대를 제거하고 주교량 교각에서 약 10 m 지점 2 번, 3 번 거더부에 상현 슬래브 타설 중 붕괴된 상태이다. 총 3 개의 거더 중 2 번, 3 번 거더가 붕괴된 상태이며 Fig. 5 에서 보듯

Table 1 Mechanical property of upper plate

Thickness		Y.S (MPa)	T.S (MPa)	E (GPa)
T16	1	368.9	763.6	127.5
	2	384	761.2	145.9
	3	380.4	753.1	128.9
	4	356.6	760.6	123.4
	5	375.6	753.8	110.1
	Ave.	373.1	758.5	127.2
T22	1	349.8	713	134.8
	2	346.5	704.8	143.2
	3	362.2	725.5	123.3
	4	361	724.8	125.4
	5	361.1	731.1	133.1
	Ave.	356.1	719.8	132.0
T32	1	348.3	774.1	125.5
	2	349.6	772.3	122.8
	3	369.8	749.3	104.2
	4	354.5	773.5	119
	5	347.4	770.2	128.8
	Ave.	353.9	767.9	120.1
T34	1	373.8	790.1	138.1
	2	375.2	804	122.9
	3	365.7	811.9	127.7
	4	370.4	783.4	126.3
	5	382.1	758.2	126.3
	Ave.	373.4	789.5	128.3

10.68 m 지점의 1 차 트러스 부재 용접부에서 낙교 전 상현재의 심한 좌굴 변형 형태와 낙교 후 소성 변형 형태가 관찰된다. 좌굴이 발생한 원인은 Fig. 6 에서 나타낸 바와 같이 붕괴된 사고 거더교 전 면에서 상부 슬래브 타설시 좌굴 및 처짐 방지 목적으로 강재와 콘크리트를 이용한 이중합성 구조의 상현 콘크리트 블록 구성을 위한 상현재 1 차 타설 공정과 교대와 교각의 비틀림 방지를 위한 격벽 시공이 누락되었고 이를 설계와 실시공을 비

교하여 Fig. 7 에 나타내었다.

3.2 좌굴 형태 분석

상기 항에서 언급한 SM570 강재의 상현재는 좌굴 및 소성변형이 심한 상태로 설계와 실제 시공된 상현재의 기계적 특성치를 비교하기 위해 Fig. 8 과 같이 계장화 압입 시험법(ISO TR29381 과 KS B 0950:2002 의 압입시험을 이용한 인장물성 평가 방법)에 근거하여 상현재 두께별로 인장 물성을 평가하였다. 본 평가에서는 사고 시편의 경우 기존의 기계적 물성 평가법들이 가지는 시편 제작의 단점으로 인해 적용될 수 없었던 다양한 분야들에 대해 폭넓게 응용되고 있는 계장화 압입시험법을 이용하였다. 계장화 압입시험법은 다양한 기계적인 특성을 비파괴적으로 측정하는 최신기술로서 재료에 하중 인가 및 제거 과정 중 하중과 변위를 연속적으로 측정하여 획득된 압입하중-변위곡선의 분석을 통해 유동물성, 잔류응력, 파괴 인성 등의 기계적 특성을 평가할 수 있는 방법이다.⁽³⁻⁵⁾ 실제 사용된 상현재 대한 기계적 특성(항복강도, 인장강도)을 측정된 결과, Table 1 에 나타낸 바와 같이 평균 항복 강도는 약 364 MPa 이며, 평균 인장 강도는 759 MPa 로 제시된 강재의 기계적 특성치인 항복 강도 460 MPa 을 만족하지 못하며 설계치 허용인장응력 260 MPa 의 값은 만족함을 확인하였다. 여기서, Y.S 는 항복강도, T.S 는 인장강도, E 는 영계수를 나타낸다.

3.3 유한요소해석

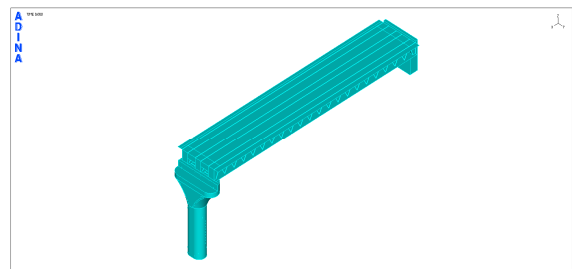
3.3.1 유한요소 모델 및 해석 조건

본 붕괴 거더교는 당초 설계 대비 변경된 공법이 적용되었고 상현 콘크리트 블록 미설치와 격벽 콘크리트 미시공 등으로 인한 구조안정성 영향 평가를 위해 비선형 해석 상용프로그램인 ADINA 을 이용하여 유한요소해석을 통한 영향 평가를 수행하였다. 모델링 구성을 위해 트러스 및 콘크리트 모델은 총 98,439 개의 범요소를 사용하였고 모

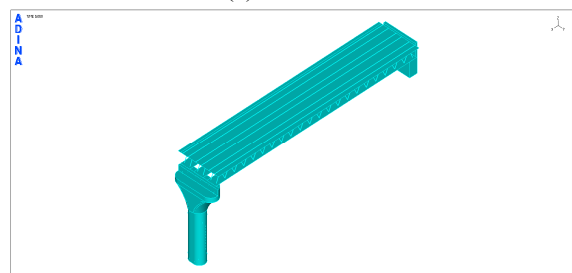
델링 조건은 Table 2 에서 보듯 모델 A 는 정상 공법 적용시 거더교를 나타내고 모델 B 는 실제 적용된 상현 콘크리트 블록 미설치와 격벽 콘크리트 미시공 상태의 거더교를 형상화 하였다. 구성된 3D 모델은 Fig. 9 와 같고 경계조건은 Fig. 10 에서 보듯 상부슬래브 철근 중량을 35.7 ton, 거푸집 중량을 40 kg/m², 타설용 콘크리트 중량을 90 ton 으로 사고 당시 콘크리트를 타설하던 지점(교각쪽에

Table 3 Section configuration of girder

Part	Truss	Model A	Model B
TYPE1	Ø318.5 x 9t	440 x 184	600 x 16
TYPE2	Ø318.5 x 9t	440 x 184	600 x 22
TYPE3	Ø267.4 x 8t	440 x 184	600 x 32
TYPE4	Ø190.7 x 8.2t	440 x 184	600 x 34



(a) Model A



(b) Model B

Fig. 9 3D model for F. E. analysis

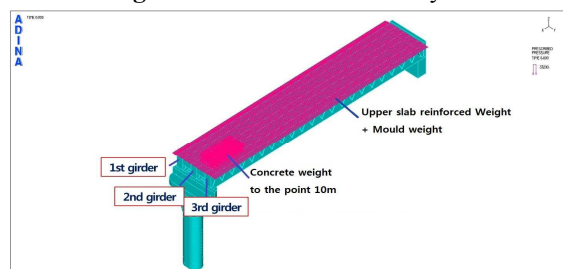


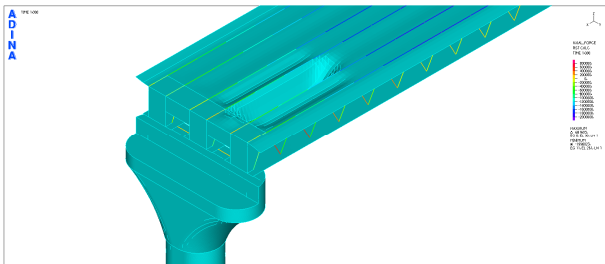
Fig. 10 Boundary condition for F. E. analysis

Table 2 Condition of model building

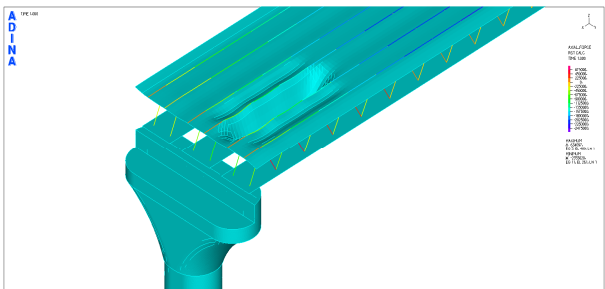
Model	Upper concrete block build	Bulkhead build	Bottom slab build
Model A	○	○	○
Model B	×	×	○

Table 4 Result of buckling stress and equivalent stress

TYPE	Model A			Model B		
	Allowable stress (MPa)	Comp. stress (MPa)	Decision	Critical buckling stress(MPa)		Comp. stress (MPa)
				$\beta=0.5$	$\beta=0.65$	
TYPE 1 ($t=16\text{mm}$)	260	49.94	O.K	50.3	29.8	52.1
TYPE 2 ($t=22\text{mm}$)	260	96.89	O.K	95.1	56.3	103.6
TYPE 3 ($t=32\text{mm}$)	260	100.92	O.K	201.2	119.1	115.9
TYPE 4 ($t=34\text{mm}$)	260	97.84	O.K	227.1	134.3	115.5



(a) Model A



(b) Model B

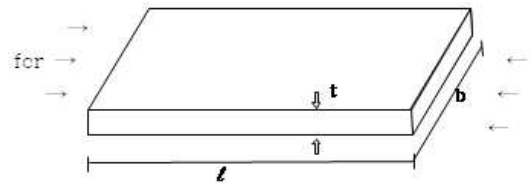
Fig. 11 Result of equivalent stress for F. E. analysis

서 10m 지점)에 분포하중으로 적용하였다. 단면 재원은 Table 3 과 같고 적용된 물성치는 상,하현 강재의 경우는 Table 1 의 계장화 압입시험에서 득한 값을 적용하였고 콘크리트와 복부사재의 경우는 도로교 설계기준에서 규정한 허용인장강도 40 MPa, 320 MPa 을 각각 적용하였다.

3.3.2 해석 결과 및 고찰

모델 A 와 모델 B 에 대해 동일한 경계조건을 부

여하여 ADINA 을 이용한 유한 요소 해석 결과 Fig. 11 에서 보듯 설계 거더교에 타설 하중이 부여된 모델 A 의 경우는 발생응력이 허용응력 이하로 구조안정성 측면에서 안정된 상태를 나타낸다. 반면 붕괴 거더교에 타설 하중이 부여된 모델 B 의 경우는 임계좌굴응력 대비 발생응력이 그 이상으로 실제 좌굴이 발생했던 지점에서 좌굴 변형이 발생하는 구조적으로 불안정한 상태가 나타나며 Table 4 에 정리해서 나타내었다.^(6,7) 모델 B 의 임계좌굴응력치는 식 (1) 에 나타낸 바와 같이 가장 극한의 1 번 타입(β 이론값=0.5, β 설계값=0.65)으로 가정하여 계산된 값을 적용하였으며 실제 현장의 임계좌굴응력치는 이보다 더 낮은 값을 나타낼 수 있다.^(8,9)



$$f_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kl}{r}\right)^2} \tag{1}$$

여기서,

f_{cr}: Buckling force

E: Young's modulus

$r = \sqrt{I/A} = \sqrt{\text{Moment of inertia/secting area}}$

k: Coefficient of effective buckling length

l: Effective length

4. 결 론

본 연구에서는 단경교 거더교 신축 중 상현 슬래브 구성을 위한 콘크리트 타설 중 교량이 붕괴된 사고의 원인을 규명하기 위해 범공학적 관점에서 ADINA 구조해석을 이용하여 좌굴 형태 분석과 구조안정성 영향 평가를 수행하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 붕괴된 단경간 실제 설계된 시공법 대비 변경된 시공법이 적용되었고 붕괴된 거더교에서 상현 콘크리트 블록과 격벽 설치 없이 타설이 진행되어 구조적으로 불안정한 상태에서 작업이 이루어졌다.

(2) 상현 콘크리트 블록을 타설하지 않는 경우

당초 설계시 계산된 저항능력이 감소하여 좌굴이 발생하고 콘크리트 타설순서 및 위치에 따라 좌/우측 쏠림현상이 발생하는데 상현 콘크리트 블록 미시공이 좌굴 발생에 큰 영향을 주었다.

(3) 계장화압입시험법을 이용하여 기계적 특성 (항복강도, 인장강도)을 측정된 결과, 평균 항복 강도는 약 364 MPa 이며, 평균 인장 강도는 759 MPa 로 제시된 설계치 허용인장응력 260 MPa 의 값을 만족하므로 이로 인한 사고 관련성은 낮은 것으로 판단된다.

(4) 좌굴 변형 해석 결과, 설계 거더교에 타설 하중이 부여된 모델 A 의 경우는 구조안정성 측면에서 안정된 상태를 나타내나 붕괴 거더교에 타설 하중이 부여된 모델 B 의 경우는 임계좌굴응력 대비 발생응력이 그 이상으로 구조적으로 불안정한 상태를 나타내는 것으로 보아 상현재 콘크리트 블록 미시공이 좌굴 변형에 주요인임을 검증하였다.

참고문헌

- (1) Sam, B., 2007, "Forensic Engineering : Reduction of Risk Improving Technology," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 14, pp. 1019~1037.
- (2) Brian, H. and Mohamed, T. K., 2007, "Non-Destructive Testing Techniques for the Forensic Engineering Investigation of Reinforced Concrete Buildings," *Forensic Science International*, Vol. 167, pp. 167~172.
- (3) Kim, K. H., Choi, Y., Kim, S. H., Lee, J. S. and Kwon, D. I., 2005, "Application of Instrumented Indentation Technique for Nondestructive/ Mechanical Properties Measurement of In-Service, Components and Materials," *Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting*, pp. 336~343.
- (4) Kim, S. H., Choi, Y. and Kwon, D. I., 2004, "Determination of Brinell Hardness Through Instrumented Indentation Test Without Observation of Residual Indent," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.28, No.5, pp. 578~585.
- (5) Jeon, E. C., Kwon, D. I. and Park, J. S., 2002, "The Optimization of Advanced Indentation Test for Tensile Properties Derivation," *Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting*, pp. 355~360.
- (6) Lee, M.K., Moon, H.W., Lee, H., Lee, T.S., Shin, S.W. and Jang, H., 2004, "Study of Buckling Evaluation for the Connecting Rod of the Engine," *Proceedings of the KSPE Autumn Annual Meeting*, pp. 677~680.
- (7) Temple, M.C. and Elmahdy, G., 1993, "Buckling of Built-up Compression Members in the Plane of the Connectors," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, pp. 895~909.
- (8) Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., 1961, "Theory of Elastic Stability," *Mcgraw-hill*, 2nd edition.
- (9) Jaspert, J.P., 1988, "Extending of the Merchantrankine Formula for the Assessment of the Ultimate Load of Frames with Semi-Rigid Joints," *J. Construct. Steel Research*, Vol. 11, pp. 283~312.
- (10) Jeong, B.W. and Lim, J.K., 2007, "Compressive and Torsional Buckling Behavior of Carbon Nanotube Bundles," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No.8, pp. 862~869.
- (11) Jin, J.W., Kwak, S.J., Kim, T.S., Noh, K.H. and Kang, K.W., 2012, "Determination of Mechanical Properties of Galvanized Steel Sheets Using Instrumented Indentation Technique and Finite Element Analysis," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No.5, pp. 529~535.