

RC 교각의 3차원 매개변수 모델링 및 비선형 구조해석 입력 데이터 생성 모듈 구축

3D Parametric Modeling of RC Piers and Development of Data Generation Module for a Structural Analysis with 3D Model of RC Piers

손유진¹⁾, 신원철²⁾, 이상철³⁾, 이헌민⁴⁾, 신현목⁵⁾

Son, You-Jin¹⁾ · Shin, Won-Chul²⁾ · Lee, Sang-Chul³⁾ · Lee, Heon-Min⁴⁾ · Shin, Hyun-Mock⁵⁾

Received August 29, 2013 / Accepted September 30, 2013

ABSTRACT: In Korea highway bridges, most piers are the type of one-column or multi-column ones. So, in this study, under an environment applying BIM so fast, to activate researches on two-column piers subjected to bidirectional seismic loading, a 3D parametric modeling method was selected when the model of two-column piers and one-column piers were formed. Also, interface module between input data in structural analysis and 3D model of RC pier was developed. The module can create the input data for non-linear structural analysis like material, geometric properties and additional coefficients.

KEYWORDS: BIM, 3D parametric modeling, RC pier, Non-linear structural analysis

키워드: BIM, 3차원 매개변수 모델링, RC 교각, 비선형 구조해석

1. 서론

1.1 BIM의 적용 움직임

최근 BIM(Building Information Modeling)이 건축·토목분야에 활발하게 적용되고 있다. BIM의 건설분야 적용은 기획, 설계, 시공, 유지관리 및 해체까지 구조물의 전 생애주기(Life Cycle)에 걸쳐 생성되는 모든 정보를 보다 편리하게 관리할 수 있는 시스템으로 건설산업의 다각화 요구, IT 기술 접목, 글로벌 경쟁력 향상이라는 내·외부 요인으로 인해 기존 방법의 혁신을 요구하는 현 상황에서 이를 이룰 수 있는 가장 적합한 시스템으로 평가되고 있다. 특히, 국내에서는 2012년부터 조달청이 500억 원 이상의 공공 발주공사에 BIM 적용을 의무화하면서 건설분야 BIM 적용 움직임은 더욱 활발해지고 있다.

1.2 기존 건설 프로젝트가 갖는 문제점 및 해결방안 BIM (3D CAD 기반 환경)

기존 건설 프로젝트는 기획, 설계, 시공, 유지관리 분야로 각 단계별 업무 프로세스가 분절되어있고 각 단계마다 사용하는 프로그램이 상이하여 서로 다른 업무당사자간 효과적인 정보공유가 어려웠지만, 최근 건설분야 BIM 도입이 활발해지면서 정보 호환성을 높여 연계된 업무간의 중복작업을 줄임으로써 업무 효율성을 제고하고 있다. 이는 기존 건설업계에서 사용한 2차원 CAD 기반 환경의 한계점을 인식하고 3차원 CAD 기반 환경으로의 전환을 추진하고 있음을 알 수 있다. 하지만 여전히 토목공사에 BIM을 적용하기에는 건축공사에 비해 많은 한계점이 있고 이를 극복하기 위한 연구는 계속 진행 중에 있다.

¹⁾정회원, 성균관대학교 대학원 초고층·장대교량학과 석사과정 (son880609@naver.com)

²⁾정회원, 성균관대학교 대학원 초고층·장대교량학과 석사과정 (swc1714@gmail.com)

³⁾정회원, 한국시설안전공단 진단본부, 공학박사 (leesch@kistec.or.kr)

⁴⁾정회원, 성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과 박사과정 (leeheonmin@hanmail.net) (교신저자)

⁵⁾정회원, 성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과 교수, 공학박사 (hmshin@skku.edu)

1.3 BIM(3D CAD 기반 환경) 기반 건설 프로젝트의 구축을 위한 연구들

건설교통기술평가원에서 지원한 국책사업인 가상건설시스템개발 연구단에서는 토목분야 3차원 설계를 위한 일반사항 및 적용 분야별 연동성 확보를 위한 세부항목을 정리하여 BIM 적용 설계 가이드라인을 제시하고 있고, 강인석 등(2011)은 비정형적, 수평적, 비반복적인 형태를 갖는 토목공사의 경우에 3차원 객체 모델을 활용하여 기획 및 설계단계의 BIM 적용 방안에 대해서 제안하였다.

조성훈(2009)은 BIM 적용시 필요한 3차원 객체 모델의 매개변수 설정 방법에 대한 연구를 위해 3차원 기반 PSC 박스 거더 교 설계를 위한 매개변수 연구를 수행하였다. 대상 모델을 설계 변경 요구조건을 만족시키기 위해 단위 부재별로 구분하고 설계자의 지식과 설계기준을 반영하였으며, 3차원 모델과 구조해석 프로그램을 연계하도록 인터페이스 프로그램을 구축하여 구조계산서 탑재 후, 구조물에 대한 안전성 평가를 할 수 있도록 하였다.

박재근 등(2008)은 3차원 객체 모델 생성시 필요한 연관 매개변수 모델링 기법과 구조해석에 필요한 다양한 변수를 고려한 제품계층구조(Product Breakdown Structure, PBS) 구축 방안을 제시하고, PBS 구성시 3차원 객체 모델의 정보로부터 해석 프로그램 입력 데이터에 필요한 값을 추출하여 3차원 객체 모델과 구조해석 시스템의 인터페이스 프로그램을 설계하는 방안을 제안하였다.

1.4 연구의 목표 및 방법

지금까지 수행된 연구를 바탕으로 현재는 철근 콘크리트로 이루어진 교량의 하부구조에 대하여 설계기준 기반 3차원 매개변수 모델의 구축을 목표로 연구를 수행하고 있다. 설계기준 기반 3차원 매개변수 모델은 실시설계로 최종 결정되는 데이터를 매개변수로 활용하여 직접 3차원 모델을 구성할 수 있을 뿐 아니라 매개변수의 변경을 통한 간편한 모델의 수정을 기대할 수 있다. 또한 재료 및 파트별로 구분된 매개변수 데이터는 해당 구조물의 생애주기동안 수반되는 구조해석 및 물량산출 등 다양한 업무에 직접 연계되어 활용될 수 있다.

본 연구에서는 철근 콘크리트로 이루어진 교량의 하부구조 중에서도 국내 고속도로에서 많이 사용되는 원형단면의 T형 단주 및 2주형 철근 콘크리트 교각을 대상으로 하여 연구를 수행하였다. 연구의 목적은 Figure 1과 같은 프로세스 내에서 대상 구조물에 대한 3차원 매개변수 모델의 구축과 매개변수를 활용한 비선형 구조해석 입력 데이터 생성 모듈의 구축이다.

연구의 방법은 주요 매개변수를 결정하여 3차원 객체 모델을 구축하고 결정된 매개변수를 활용한 비선형 구조해석 입력 데이터 생성 모듈을 구축하는 것이다. 또한 비선형 구조해석 프로그

Process of BIM construction project

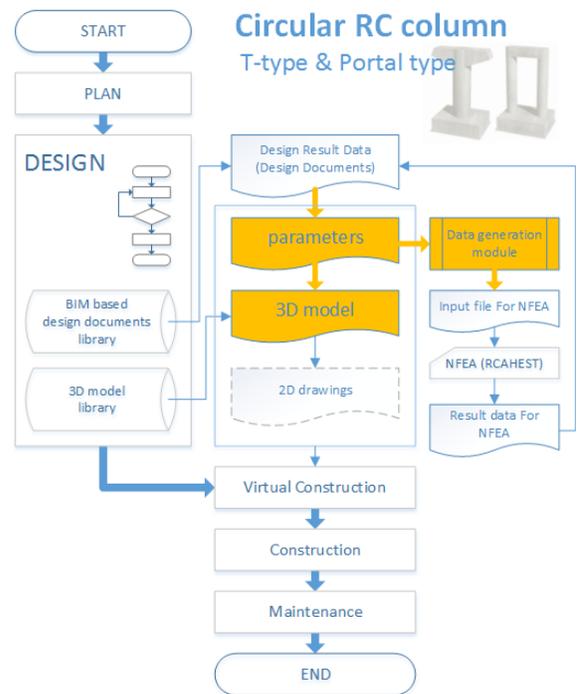


Figure 1 Overview of BIM process of a construction project

램과의 연동을 통해 수행된 해석결과와 대상 교각의 실험결과를 비교하고자 한다. 3차원 객체 모델의 구성은 매개변수 모델링이 가능한 CATIA(Computer Aided Three Dimensional Interactive Application)를 사용하였다.

2. 철근 콘크리트 교각의 3D 모델 구축

철근 콘크리트 교각의 3차원 정보 모델의 생성 방법에 대한 설명을 위하여 2주형 RC 교각을 예로 들어 PBS의 구축, 매개변수의 설정, 매개변수 모델링 등에 대한 내용을 실제 모델링 절차 순으로 상세히 기술하였다.

2.1 모델 생성 방법 - 매개변수 모델링

구조물의 설계는 발주자의 희망이나 사업계획의 변경 또는 지질, 용수 등 공사현장의 상태가 설계서와 다를 경우 등 여러 가지 이유로 인하여 설계변경 과정을 수반한다. 즉, 구조물의 생애주기에 걸쳐 발생하는 대표적인 업무들인 계획, 설계, 시공 및 유지관리 도중 발생하는 문제나 의견이 설계변경으로 이어진다. BIM 기반의 건설 프로세스는 각 업무분과들 간의 실시간 의사소통을 기반으로 성립되며 이러한 프로세스 하에서 구조설계 업무는 동시다발적으로 이루어질 수도 있는 설계변경에 대응하여 신속하고 정확하게 대처할 수 있는 프로세스 및 이를 수용

할 수 있는 의사소통 수단의 마련이다.

BIM 기반의 건설 프로세스에서 의사소통 수단은 3차원 정보 모델이다. 3차원 정보 모델은 실제 시공될 구조물과 동일한 정보를 가지고 있어야 하며 정보의 변경에 민감하게 반응할 수 있도록 모델링 되어야 한다. 모델링 구축의 관점에서 설계자가 마련할 수 있는 해결책은 연관 매개변수 모델링 방법을 이용한 3차원 정보 모델의 구축이다.

이 방법에 의해 구축된 모델은 설계자가 임의의 치수를 수정했을 경우 관련 모델의 형상이 자동적으로 수정된 모델로 변경될 수 있음을 뜻한다. 즉, 재설계로 많은 노력과 시간이 소요되었던 기존 방식과는 달리 매개변수의 변경만으로 설계자가 원하는 형상을 쉽고 빠르게 표현할 수 있다. 어떤 변수를 매개변수로 결정할 것인지는 설계자의 판단이 요구되며, 변수의 수를 최소로 하여 설계변경이 쉽게 될 수 있도록 해야 한다.

2.2 모델 생성 TOOL – CATIA

본 연구에서는 CATIA를 이용하여 3차원 매개변수 모델링을 수행하였으며, 콘크리트 및 각 종류의 철근을 나누어 파트 라이브러리를 구축하였다. CATIA는 프랑스 Dassault Systems사에서 개발한 강력한 3차원 CAD 프로그램으로 객체 모델을 활용하여 PBS 구현이 가능하고 형상 정보와 속성 정보 및 관련 정보를 연계하여 형상 모델 및 PLM(Product Lifecycle Management) 기반 데이터베이스 구축이 가능하다.

2.3 PBS(Product Breakdown Structure)

철근 콘크리트 교각의 설계는 설계조건에 따른 단면가정과 하중산정 및 구조해석을 거쳐 부재의 설계로 이어지는데 부재의 설계는 말뚝 기초부를 제외하면 일반적으로 두부보 및 코핑부의 단면검토와 기둥의 단면검토, 확대 기초부의 안정검토로 나뉘어져 있다. 본 연구에서는 구조설계 흐름에 따른 데이터 연결을 위하여 철근 콘크리트 교각을 부재단위인 두부보(Pier Cap), 기둥부(Column), 기초부(Footing)로 나누고 다시 각 부재에 사용될 재료인 콘크리트와 철근으로 나누어 파트 라이브러리를 구축하였다. Table 1에서 볼 수 있듯이 하위 part model들의 assembly를 통하여 상위 part model이 성립되고, 최종적으로 sub product들의 assembly로 최종 목표인 target product(RC-pier)가 구축되도록 설계하였다.

2.4 Parameter 정의

설계기준 기반의 매개변수 모델링은 구조설계의 결과로 생성되는 데이터 중 형상결정에 관여된 데이터를 매개변수로 설정하고 각 변수로 직접 모델의 형상을 결정하는 방법이다. 모델의 형상에 관여하는 변수는 크게 나누면 dimension parameter(치

수 매개변수)와 location parameter(위치 및 배치 매개변수)의 두 종류로 설정할 수 있다.

Dimension parameter는 최하위 part model의 형상결정에 관여하며, location parameter는 part model들의 assembly 방법에 관여한다. 형상의 결정 이외에 구조해석에 사용될 수 있는 데이터로는 material parameter(재료물성치 매개변수) 및 boundary condition parameter(경계조건 매개변수)가 있다(Figure 2). 이러한 매개변수의 선택은 변수 사이의 상호종속관계를 잘 파악하여 그 수를 최소화 할 수 있도록 해야 하며 정의된 파라미터명은 관련자 모두가 쉽게 파악할 수 있도록 적절한 규칙이 필요하다.

특히 철근 콘크리트 교각의 비선형 해석에 요구되는 데이터는 탄성해석과는 달리 가장 신뢰성 높은 최신의 비선형 해석 모델을 사용해야 하는 해석의 특성 때문에 Table 2와 같이 비교적 상세한 데이터 정의를 요구하고 있을 뿐 아니라 같은 구조물이라 하더라도 해석의 용도에 따라 다른 재료모델을 사용할 수 있기 때문에 3차원 모델의 매개변수 모델링 시 해석모델의 변화 및 추가적인 해석모델의 탑재 등 비선형 해석에 필요한 요구

Table 1 PBS of 3D information model of RC pier

Target Product	Sub Product	Part	
RC Pier	Pier Cap	CC	Pier Cap Concrete
		CRM1	Pier Cap Reinforcement Main 1
		CRM2	Pier Cap Reinforcement Main 2
		CRC1	Pier Cap Reinforcement Confining 1
		CRC2	Pier Cap Reinforcement Confining 2
	Column	PC	Pier column Concrete
		PRM	Pier column Reinforcement Main
		PRC1	Pier column Reinforcement Confining 1
		PRC2	Pier column Reinforcement Confining 2
	Footing	FC	Footing Concrete
		FRM1	Footing Reinforcement Main 1
		FRM2	Footing Reinforcement Main 2
		FRC1	Footing Reinforcement Confining 1
		FRC2	Footing Reinforcement Confining 2

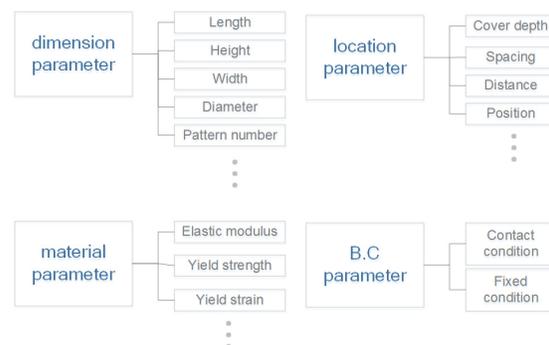


Figure 2 Type of parameters

Table 2 Parameters for NFEA with 2D/3D–Nonlinear Flexibility Beam–Column Element

Type	Formation	Parameters	
for material model (2D/3D–Nonlinear Flexibility Beam–Column Element)	MATE, #USER,20	section number, number of Gauss points, fatigue, index for solution type, definition of axis, tolerance of element and section state determination, specific mass density, Rayleigh damping coefficients, GJ of member, element load, proportional load	
for definition of material specificities (concrete & reinforcement)	mtrl	concrete	compressive strength of concrete, f_c , tensile strength of concrete, f_t , adjust factor for f_c adjust factor for f_t , stress & strain curve (alpha & hizzo), unit conversion factor
		reinforcement	elastic modulus, yield strength, ratio of reinforcement, epsilon u, confining coefficient (rho_x, rho_y, K_e, rho_c), f_{yx} , f_{yy} , E_s
for division of section	sect	section number, division number, scale factor, origin of coordinates, axis number, z–coordinate, y–coordinate, shape factor, hollow factor, reference point coordinate, definition of division, number of sensor	

파라미터의 유동성 대응 관점으로 볼 때 가장 자세한 수준의 LOD(Level Of Detail)를 정의하여 모델링하는 것이 바람직하다.

2.5 Part Model

2.5.1 교각 기초부(Footing) Part Model

교각 기초부는 기초부 콘크리트(FC : Footing Concrete)와 기초부 철근으로 나누어 모델링한다. 철근은 배근 형태와 방향에 따라서 기초부 주철근(FRM : Footing Reinforcement Main1), 구속철근(FRC : Footing Reinforcement Confining)으로 나누어 설계 데이터 값을 부여받은 매개변수 모델링을 하였다. 기초부 주철근(FRM)은 상단 1열에 배근된 FRM1과 상단 1열을 제외한 나머지 열에 배근된 주철근 FRM2로 다시 part를 나누었고, 구속철근(FRC)도 크기에 따라 FRC1과 FRC2로 나누어 모델링하였다. 즉, 기초부의 최하위 part는 Table 3과 같이 총 다섯 개의 part model로 구성된다.

교각 기초부의 각 part는 설계 데이터와 연결된 매개변수를 다음 Table 4와 같이 설정하였다.

Table 3 Part model of footing

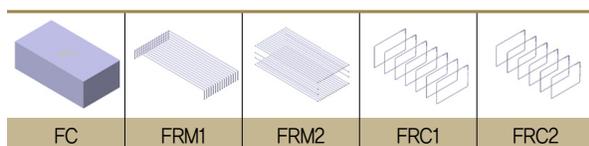
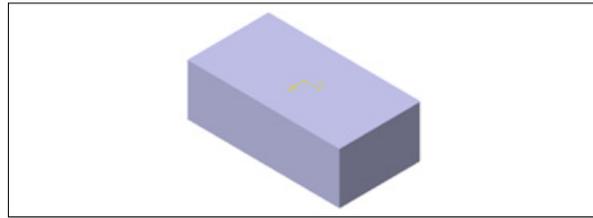


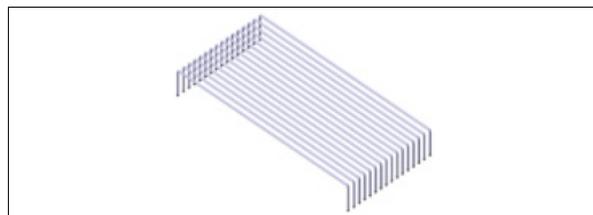
Table 4 Parameters of footing (continue)

(a) Part1 – FC (Footing concrete)



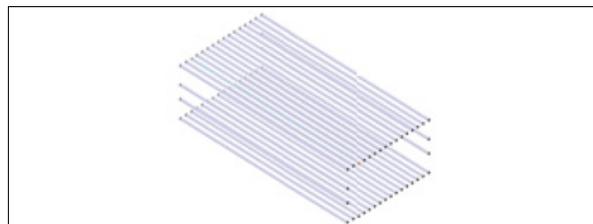
Parameters	Definition	unit
FC_W	Width of footing concrete	mm
FC_D	Depth of footing concrete	mm
FC_H	Height of footing concrete	mm
FC_E	Elastic modulus of footing concrete	MPa
FC_CS	Compressive strength of footing concrete	MPa

(b) Part2 – FRM1 (Footing reinforcement_main 1)



Parameters	Definition	unit
F_R_M1_D	Diameter of main reinforcement 1	mm
F_R_M1_L1	2-dir Length1 of main reinforcement 1	mm
F_R_M1_L2	3-dir Length2 of main reinforcement 1	mm
F_R_M1_S	Spacing of main reinforcement 1	mm
F_R_M1_Se	End spacing	mm
F_R_M1_CD1	1-dir Cover Depth 1	mm
F_R_M1_CD2	2-dir Cover Depth 2	mm
F_R_M1_CD3	3-dir Cover Depth 3	mm
F_R_M1_N	Arrangement number of main reinforcement 1	EA

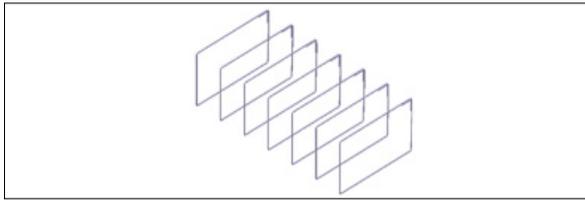
(c) Part3 – FRM1 (Footing reinforcement_main 2)



Parameters	Definition	unit
F_R_M2_D	Diameter of main reinforcement 2	mm
F_R_M2_L	2-dir Length1 of main reinforcement 2	mm
F_R_M2_S	1-dir Spacing of main reinforcement 2	mm
F_R_M2_Se	End spacing	mm
F_R_M2_S1	Spacing from upper 1st row of main reinforcement 2	mm
F_R_M2_SR	Ratio of 2nd spacing and 3rd spacing	
F_R_M2_S2	2nd Spacing2 (3-dir direction)	mm
F_R_M2_S3	3rd Spacing3 (3-dir direction)	mm
F_R_M2_CD1	1-dir Cover Depth 1	mm
F_R_M2_CD2	2-dir Cover Depth 2	mm
F_R_M2_CD3	3-dir Cover Depth 3	mm
F_R_M2_N	Total arrangement number of main reinforcement 2	EA
F_R_M2_N1	Number of upper and lower main reinforcement 2	EA
F_R_M2_N2	Number of middle part main reinforcement 2	EA

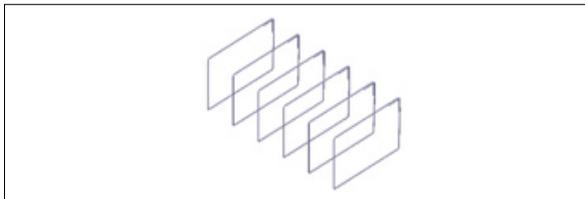
Table 4 Parameters of footing

(d) Part4 - FRC1 (Footing reinforcement_confining 1)



Parameters	Definition	unit
F_R_C1_D	Diameter of confinement steel 1	mm
F_R_C1_L1	1-dir Length1	mm
F_R_C1_L2	3-dir Length2	mm
F_R_C1_L3	Lap splice	mm
F_R_C1_S	2-dir Spacing	mm
F_R_C1_CD1	1-dir Cover Depth 1	mm
F_R_C1_CD2	2-dir Cover Depth 2	mm
F_R_C1_CD3	3-dir Cover Depth 3	mm
F_R_C1_N	Arrangement number of confinement steel 1	EA

(e) Part5 - FRC2 (Footing reinforcement_confining 2)



Parameters	Definition	unit
F_R_C2_D	Diameter of confinement steel 2	mm
F_R_C2_L1	1-dir Length1	mm
F_R_C2_L2	3-dir Length2	mm
F_R_C2_L3	Lap splice	mm
F_R_C2_S	2-dir Spacing	mm
F_R_C2_CD1	1-dir Cover Depth 1	mm
F_R_C2_CD2	2-dir Cover Depth 2	mm
F_R_C2_CD3	3-dir Cover Depth 3	mm
F_R_C2_N	Arrangement number of confinement steel 2	EA

2.5.2 교각 기둥부(Column) Part Model

단주형의 기둥부를 모델링 할 경우 2주형 철근 콘크리트 교각의 양쪽 기둥부는 동일하게 설계되므로 하나의 모델링만으로 두 기둥부를 표현할 수 있으며, 재료에 따라서 기둥부 콘크리트(PC : Pier Column Concrete)와 기둥부 철근으로 나누어 모델링한다.

철근은 배근 형태와 배근 간격에 따라서 기둥부 주철근(PRM : Pier Column Reinforcement_Main)과 구속철근(PRC : Pier Column Reinforcement_Confining)으로 나누어 매개변수 모델링 하였다. 이때 구속철근은 띠철근으로 가정하고 소성인지 구역과 비소성인지 구역을 구분하여 모델링하였지만, 띠철근의 간격만 다를 뿐 동일한 매개변수를 가지므로 하나의 part로 간주할 수 있다.

결과적으로 기둥부의 최하위 part는 Table 5와 같이 총 세 개의 part model로 구성된다.

Table 5 Part model of column

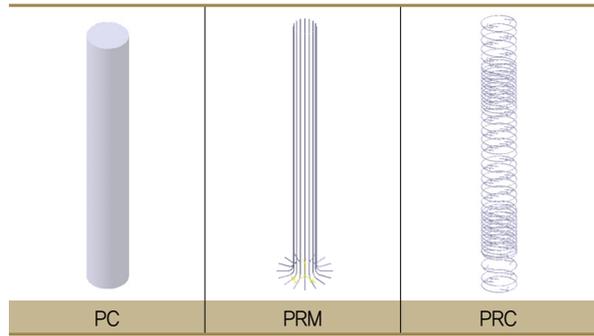


Table 6 Parameters of column (continue)

(a) Part1 - PC (Pier column concrete)

Parameters	Definition	unit
P_C_R	Section radius	mm
P_C_H	Height of column	mm
P_C_CS	Compressive strength of concrete	MPa
P_C_SS	Space between each column center (In case of two-column pier)	mm

(b) Part2 - PRM (Pier column reinforcement main)

Parameters	Definition	unit
P_R_M_D	Diameter of main reinforcement 1	mm
P_R_M_L1	3-dir Length (Length 1)	mm
P_R_M_L2	Bending length (Length 2)	mm
P_R_M_R1	Bending radius	mm
P_R_M_FH	Height from footing bottom to bending part	mm
P_R_M_CD	Cover depth	mm
P_R_M_N	Arrangement number of main reinforcement	EA

(c) Part3 - PRC (Pier column reinforcement confining)

Parameters	Definition	unit
Confinement Steel: Footing		
P_R_CF_D	Diameter of confinement steel	mm
P_R_CF_S	Spacing of each confinement steel	mm
P_R_CF_P	Position from footing bottom	mm
P_R_CF_R	Radius of hoop	mm
P_R_CF_HL	Hoop length	mm
P_R_CF_HR	Hoop radius	mm
P_R_CF_HA	Hoop angle	deg
P_R_CF_N	Total arrangement number of confinement steel	EA
P_R_CF_N1	Arrangement number - Odd order	EA
P_R_CF_N2	Arrangement number - Even order	EA
P_R_CF_P2	Position from hoop of main reinforcement	mm
P_R_CF_H	Total height of confinement steel in footing part	mm

교각 기둥부의 각 part는 설계 데이터와 연결된 매개변수 설정을 다음 Table 6과 같이 하였다.

Table 6 Parameters of column

(c) Part3 - PRC (Pier column reinforcement_confining)

Confinement Steel: Plastic-Hinge Part		
P_R_CP_D	Diameter of confinement steel	mm
P_R_CP_S	Spacing of each confinement steel	mm
P_R_CP_P	Position from PRC_F	mm
P_R_CP_R	Radius of hoop	mm
P_R_CP_HL	Hooing length	mm
P_R_CP_HR	Hooing radius	mm
P_R_CP_HA	Hooing angle	deg
P_R_CP_N	Total arrangement number of confinement steel	EA
P_R_CP_N1	Arrangement number - Odd order	EA
P_R_CP_N2	Arrangement number - Even order	EA
P_R_CP_H	Total height of confinement steel in plastic-hinge part	mm
Confinement Steel: Non Plastic-Hinge Part		
P_R_CNP_D	Diameter of confinement steel	mm
P_R_CNP_S	Spacing of each confinement steel	mm
P_R_CNP_P	Position from PRC_P	mm
P_R_CNP_R	Radius of hoop	mm
P_R_CNP_HL	Hooing length	mm
P_R_CNP_HR	Hooing radius	mm
P_R_CNP_HA	Hooing angle	deg
P_R_CNP_N	Total arrangement number of confinement steel	EA
P_R_CNP_N1	Arrangement number - Odd order	EA
P_R_CNP_N2	Arrangement number - Even order	EA
P_R_CNP_H	Total height of confinement steel in non plastic-hinge part	mm
Confinement Steel: Pier Cap		
P_R_CC_D	Diameter of confinement steel	mm
P_R_CC_S	Spacing of each confinement steel	mm
P_R_CC_P	Position from PRC_NP	mm
P_R_CC_R	Radius of hoop	mm
P_R_CC_HL	Hooing length	mm
P_R_CC_HR	Hooing radius	mm
P_R_CC_HA	Hooing angle	deg
P_R_CC_N	Total arrangement number of confinement steel	EA
P_R_CC_N1	Arrangement number - Odd order	EA
P_R_CC_N2	Arrangement number - Even order	EA
P_R_CC_H	Total height of confinement steel in pier cap part	mm



2.5.3 교각 두부부(Pier Cap) Part Model

교각 두부부는 두부부 콘크리트(CC : Pier Cap Concr-ete)와 두부부 철근으로 나누어 모델링한다. 철근은 배근 형태와 방향에 따라서 두부부 주철근(CRM : Pier Cap -Reinforcement_Main), 구속철근(CRC : Pier Cap Reinfor-cement_Confining)으로 나누어 설계 데이터 값을 부여받은 매개변수 모델링을 하였다.

두부부 주철근(CRM)은 상단 1열에 배근된 CRM1과 상단 1열을 제외한 나머지 열에 배근된 주철근 CRM2로 다시 part를 나누었고, 구속철근(CRC)도 종류에 따라 CRC1과 CRC2로 나누어 모델링하였다. 즉, 두부부의 최하위 part는 Table 7과 같이 총 다섯 개의 part model로 구성된다. 교각 두부부 각 part의 설계 데이터와 연결된 매개변수 설정은 기초부와 유사하므로 생략한다.

Table 7 Part model of pier cap

CC	CRM1	CRM2	CRC1	CRC2

2.6 Sub Product Model

앞서 모델링 된 part를 assembly하여 총 세 개의 sub product 인 교각의 기초부, 기둥부, 두부부의 완성 과정을 설명하였다. 각각의 구성 part는 앞서 설명한 매개변수를 바탕으로 조립되어 sub product model을 형성한다.

Table 8(a)의 그림은 교각 두부부의 각 part를 assembly하여 두부부(Pier Cap)를 생성한 모습이다. 이는 target product model의 바로 아래 단계 model로 총 다섯 개의 part가 하나의 sub product model로 완성된 것이다.

Table 8(b)의 그림은 교각 기둥부의 각 part를 assembly하여 기둥부(Column)를 생성한 모습이다. 이는 target product model의 바로 아래 단계 model로 총 세 개의 part가 하나의 sub product model로 완성된 것이다.

마지막 Table 8(c)는 교각 기초부의 각 part를 assembly하여 교각 기초부(Footing)를 생성한 모습을 보여준다. 이는 target product model의 바로 아래 단계 model로 총 다섯 개의 part가

Table 8 Sub product & Target product

(a) Sub product - Pier cap	
(c) Sub product - Footing	
	(b) Sub product - Column
(d) Target product : One-column RC pier	(e) Target product : Two-column RC pier

하나의 sub product model로 완성된 것이다.

2.7 Target Product Model - 단주 및 2주형 RC교각

앞에서 모델링 완료된 각 sub product인 교각의 기초부, 기둥부, 두부보를 assembly하여 최종 target product인 단주형 철근 콘크리트 교각과 2주형 철근 콘크리트 교각을 완성한다. 설계 데이터를 임의의 값으로 가정하여 입력하고 매개변수 값이 결정되었을 때, 다음 Table 8(d), (e)와 같은 모델이 형성된다.

3. 3차원 정보 모델을 활용한 비선형 구조해석 입력 데이터 생성 모듈 구축

3차원 정보 모델을 구축하면서 정의된 매개변수 데이터는 모델의 구축 이외에도 BIM 기반 건설 프로세스 관점에서 해당 구조물의 생애주기동안 수반되는 구조해석과 물량산출 및 시공 시뮬레이션 등 다양한 업무에 직접 연계되어 활용될 수 있다. 본 연구에서는 RC 교각의 국부 지진해석과 같은 특수 해석에 초점을 맞추어 3차원 정보 모델의 매개변수가 활용될 수 있는 사례를 원형단면 T형 단주 RC 교각의 비선형 구조해석의 입력 데이터 생성 모듈을 구축함으로써 소개하였다.

3.1 적용 비선형 구조해석 프로그램: RCAHEST

본 연구에서는 성균관대학교 구조해석연구실에서 개발한 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)를 사용하였다. 이 프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP을 수정, 보완하여 정적 해석과 자유진동 및 강제진동 해석, 응답스펙트럼 해석 등의 동적 해석을 수행할 수 있도록 개발된 비선형 유한요소 해석 프로그램이다. 본 연구에서는 fiber기법을 적용한 2D/3D Nonlinear Flexibility Beam-Column(Material nonlinear)요소와 받침을 묘사하기 위한 2D/3D Elastic or Elasto Plastic Shoe Element/Rigid Link 요소를 사용하였다.

3.2 비선형 구조해석 입력 데이터 분석

3차원 정보 모델링 데이터와 비선형 유한요소해석 프로그램과의 연동을 위해서 해석 프로그램에서 필요로 하는 정보를 명확히 정의하는 작업이 선행되어야 한다(박재근 등, 2008). 유한요소해석에서 필요로 하는 정보는 해석 프로그램 내부에 탑재된 재료모델에서 요구하는 정보와 대상 구조물의 유한요소 모델링을 위한 정보로 나누어질 수 있다. Table 9는 사용되는 재료모델에서 요구하는 정보이며 Table 10은 요소 모델링을 위한 정보가

다. 재료모델에서 요구하는 대부분의 정보는 3차원 모델을 구축하면서 정의한 parameter들 중에 있지만 적용할 해석 프로그램의 입력 자료 작성 형식에 따라 재료 및 단면 정보를 내부 매개변수를 사용하는 경우가 있으므로 이러한 경우 구조해석을 수행하는 엔지니어가 입력할 수 있도록 설정하는 것이 바람직하다. 또한 구속철근에 의해 발생하는 콘크리트에 대한 구속효과의 고려와 같은 기존의 데이터들을 활용하여 새로운 계수를 산출 생성해야 할 경우 이를 함수로 구성하여 입력 데이터 생성 모듈 내부에 위치시킬 수 있다.

요소 모델링에 대한 정보에는 형상 정보, 요소분할 정보와 하중 및 경계조건 정보가 있다. 요소분할 정보는 구조해석을 수행하는 엔지니어의 판단으로 각 부재별 방향별로 입력할 수 있도록 설정할 수 있으나 철근 콘크리트 교각의 비선형 유한요소

Table 9 Material information

Issue	Information	Type	
Material type	Material type selection	Design Info	
Concrete	Compressive strength	Material Info	
	Tensile strength	Material Info	
Steel	Elastic modulus	Material Info	
	Yield strength	Material Info	
Main reinforcement	Reinforcing ratio to element area of x-dir	Design Info	
	Yield strength	Material Info	
Input info on confinement effect	Concrete	Diameter of confined concrete	Design Info
		Section ratio of confined concrete	Design Info
	Confinement steel	Yield strength	Material Info
		Elastic modulus	Material Info
		Spacing coefficient	Design Info
		Width of x and y-dir	Material Info
		Diameter	Material Info
		Longitudinal clear spacing	Design Info

Table 10 Element division information

Issue	Information	Type
Number of element division	Number of fiber	Design Info
Section shape	Section shape and rebar	Design Info
Section type	Solid or hollow	Design Info
Reference point	Refer. -point coordinate	Design Info
Material	Assigned material info. of each section	Design Info
Division	Fiber division	Design Info
Sensor	Stress sensor location	Design Info

3.4 비선형 구조해석 입력 데이터 생성 모듈 검토

3.4.1 검토 대상 교각

구축된 모듈을 검토하기 위해서 Figure 5와 같은 실험체 형상과 단면 상세를 갖는 철근 콘크리트 단주 교각 실험체(박창규 등, 2005)를 선정하였다.

기둥 본체에 타설된 콘크리트의 평균압축강도는 28 MPa이고, 주철근은 SD300인 D13을 사용하였고 띠철근은 SD300인 D6을 사용했다. 철근의 실제 항복강도는 D13의 경우 330MPa, D6의 경우 390MPa이다. 실험체 상세는 Table 11과 같다.

실험은 철근 콘크리트 단주 교각에 축방향력과 횡하중을 Figure 5와 같이 재하하여 수행되었다. 축방향력은 300kN, 횡

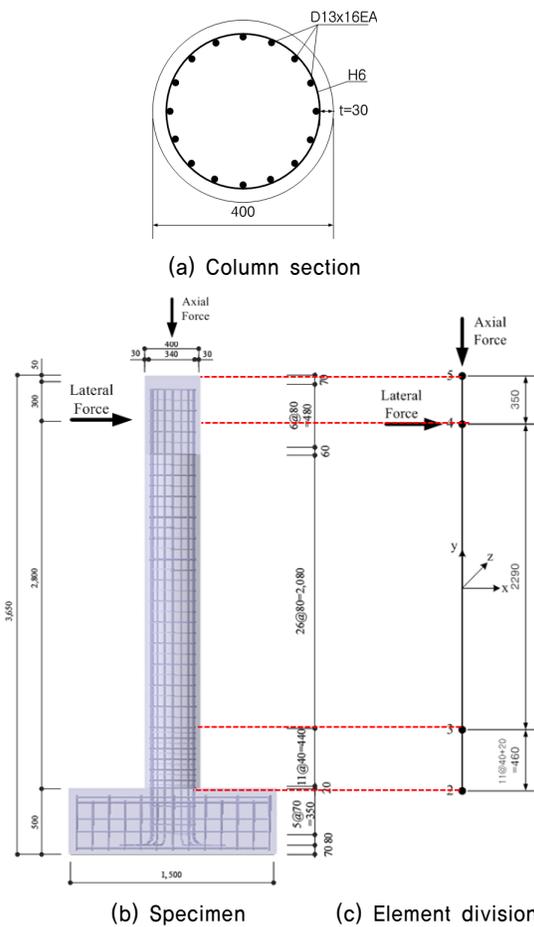


Figure 5 S1C-SP00 : One-column pier

Table 11 Properties of specimen : S1C-SP00

Name : S1C-SP00		Main rebar (16D13)	Confinement steel (D6)		Axial load (kN)
		Reinforcing ratio (%)	Reinforcing ratio (%)	Spacing (mm) PHR/NPHR*	
One-Column Pier	Seismic	1,61	0,867	40/80	300

* PHR : Plastic-Hinge Region, NPHR : Non Plastic-Hinge Region

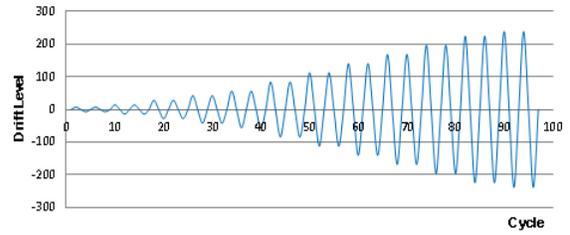


Figure 6 Loading history using drift ratio

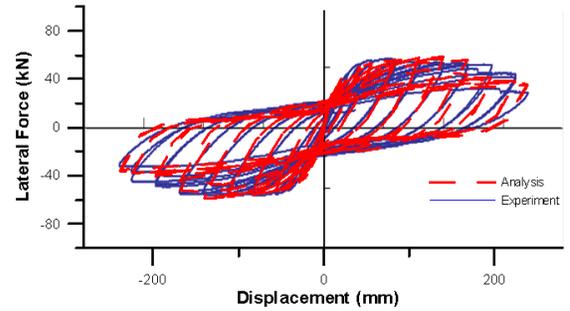


Figure 7 S1C-SP00 : Load-Displacement curve

하중은 Figure 6과 같은 반복하중 패턴으로 재하 되었는데, 이때 반복하중의 크기는 기둥의 유효길이에 대한 가력된 변위의 퍼센트(%)로 기초상단에서 높이 2.8m인 가력부에서 $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 4.0\%$... 단계별로 진행되었으며, 각각의 가력변위 크기(drift level) 마다 동일 변위 제어 하중은 2회 반복으로 파괴 시까지 재하 되었다.

3.4.2 모듈을 이용하여 생성된 입력파일의 검증

S1C-SP00 단주 실험체의 하중-변위 이력의 실험결과를 Figure 7 그래프의 실선과 같다(박창규 등, 2005).

본 연구에서 구축한 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST의 입력 데이터 생성 모듈을 활용하여 생성된 검토 대상 교각의 입력파일로 비선형 해석을 수행하여 그 결과를 Figure 7에 파선으로 나타내었다.

해석결과가 콘크리트의 균열 발생과 철근의 항복 및 극한 강도 이후의 강도와 강성의 감소와 같은 비선형 거동 특성 등을 모듈을 사용하지 않고 직접 입력파일을 작성하였을 때와 마찬가지로 비교적 높은 신뢰도를 보이며 적절히 예측하였다. 이를 통해 본 연구에서 구축한 비선형 구조해석 입력데이터 모듈의 신뢰성을 입증하였다.

4. 결론

본 연구는 교량의 RC 하부구조에 대한 BIM 기반 구조설계 프로세스 구축의 일환으로 수행되었다. 이를 위하여 원형단면

T형 단주 및 2주형 철근 콘크리트 교각을 선정하여 이에 대한 3차원 매개변수 모델링을 수행하였다. 또한 선정된 매개변수를 활용하여 비선형 구조해석 프로그램(RCAHEST)의 입력파일을 생성할 수 있는 모듈을 제안하였다. 마지막으로 구축한 모듈을 통하여 생성된 입력파일로 구조해석을 수행하고 실험결과와의 비교를 통하여 입력파일의 타당성을 검토하였다.

본 연구의 결과는 교량의 RC 하부구조에 대한 BIM 기반 구조 설계 프로세스 구축을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설기술혁신사업(과제 번호: 06첨단융합E01)의 지원에 의해 수행되었기에 이에 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Jo, S. H. (2009), "A Parametric Study on 3D Based PSC Box Girder Design", M. S. Dissertation, Sungkyunkwan Univ.
- Jung, H. S. (2006), "A Study of the Parametric Structure Analysis Method for Multi-Disciplinary Optimization Design", M. S. Dissertation, Gyeongsang National Univ.
- Kang, L. S., Kim, S. G., Kim, H. S. and Moon, H. S. (2011), "BIM application for civil engineering project in planning and design phases." *Journal of KBIM*, 1(1):pp.26-31.
- Lee, H. M., Lee, J. K., Yoo, J. M. and Shin, H. M. (2011), "Seismic analysis process of steel box girder bridge based on BIM." *Journal of Computational Structural Engineering*, 24(4):pp.421-428.
- Lee, H. M., Hwang, C. H., Cheon, J. H. and Shin, H. M. (2012), "3D-parametric modeling of RC-bridge column based on nonlinear finite element analysis." *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(2):pp.561-562.
- Lee, J. K. (2012), "Seismic Analysis Process with 3D Information Model", M. S. Dissertation, Sungkyunkwan Univ.
- Park, C. K., Lee, B. G., Song, H. W. and Chung, Y. S. (2005), "Experimental behavior of reinforced concrete column-bent piers under bidirectional repeated loading." *Journal of Earthquake Engineering*, 9(1):pp.17-24.
- Park, J. G., Kim, M. H., Lee, G. M., Choi, J. H. and Shin, H. M. (2008), "Design of interface between 3D object model and structure analysis program." *Journal of Computational Structural Engineering*, 21(3):pp.247-252.