도로 건설현장의 디지털트윈 구현을 위한 디지털 건설정보구조에 관한 연구

A Study on the Digital Construction Information Structure for the Implementing Digital Twin of Road Construction Sites

정 태 원* · 지 현 욱** · 복 진 훈***

* 주저자 : (주)한맥기술 기술개발센터 사장
** 교신저자 : (주)삼안 기술개발센터 책임연구원
*** 공저자 : (주)삼안 기술개발센터 수석연구원

Taewon Chung* · Hyon Wook Ji** · Jin Hoon Bok***

* Research and Development Center, Hanmac Engineering
** Research and Development Center, Saman Corporation
*** Research and Development Center, Saman Corporation

† Corresponding author : Hyon Wook Ji, b23025@hanmaceng.co.kr

Vol. 23 No.1(2024)
February, 2024
pp.153~166

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.1.153

Received 6 September 2023
Revised 23 September 2023
Accepted 26 January 2024

ⓒ 2024. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

스마트건설을 위한 업무의 디지털화는 상호 간의 디지털데이터를 원활하게 교류할 수 있어야 효과가 있으나, 디지털데이터의 표준화 및 활용방안이 부족하다. 본 연구는 도로 건설현장의 정보를 효과적으로 디지털로 변환할 수 있는 디지털 건설정보구조를 제안한다. 연구대상은 도로건설업무에서 중요도가 높은 작업계획, 일정관리, 안전관리, 품질관리이다. 건설정보구조의 핵심은 건설정보를 객체와 작업으로 분리하고, 이 두 정보의 결합으로 단위업무를 정의함으로써 건설정보의 표현 및 수정의 유연성을 확보하는 것이다. 객체와 작업은 각자의 계층구조를 가지며, 이 계층구조는 실제 내용에 맞추어 가변형으로 정의하였다. 이는 효율성과 상세성을 동시에 만족하는 구조다. 이 구조를 고속도로 건설공사에 시범적용 하였고, 범용 포맷을 이용해 구조를 디지털로 구현하였다. 본 연구는 현실에 가깝게 도로 건설공사 과정을 디지털화할 수 있으며, 도로건설 전주기의 디지털트윈의 토대가 되어 토목산업의 디지털전환을 가속화 할 것이다.

핵심어 : 건설정보구조, 표준화, 도로 건설현장, 디지털 계층구조, 디지털트윈

ABSTRACT

The digitalization of tasks for smart construction requires the smooth exchange of digital data among stakeholders to be effective, but there is a lack of digital data standardization and utilization methods. This paper proposes a digital construction information structure to transform information from road construction sites into digital formats. The study targets include significant tasks, such as work planning, scheduling, safety management, and quality control. The key to the construction information structure is separating construction information into objects and activities, defining unit works by combining these two types of information to ensure flexibility in representing and modifying construction information. The objects and activities have their respective hierarchical structures, which are defined flexibly to match the actual content. This structure achieves both efficiency and detail. The pilot structure

was applied to highway construction projects and implemented digitally using general formats. This study enables the digitalization of road construction processes that closely resemble reality, accelerating the digital transformation of the civil engineering industry by developing a digital twin of the entire road construction lifecycle.

Key words : Construction information structure, Standardization, Road construction site, Digital hierarchy, Digital twin

Ⅰ. 서 론

1. 연구 배경 및 목적

건설산업의 생산성 향상, 공기 단축, 건설안전의 확보를 위한 스마트건설기술 개발을 위한 건설산업계의 노력이 다방면에서 이루어지고 있는 가운데(Institute for Science and Technology Strategy, 2019), 국토교통부에서는 스마트건설 활성화방안에 따라 건설 전주기에서 다양한 업무에 적용되는 개별 기술을 2030년까지 디지털화 및 자동화하는 것을 목표로 제시하고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2022). 건설의 개별 업무를 디지털화하는 기술들은 상호간에 디지털데이터를 원활하게 전달할 수 있을 때 큰 시너지 효과를 발휘할 수 있다. 그러나 아직 건설현장에서 필요한 정보를 다양하게 활용할 수 있는 표준화된 방법이 없으며, 디지털데이터의 활용방안도 부족하다.

인프라시설 건설현장을 디지털 모델로 전환하기 위해서는 건설의 단계별 업무에서 필요한 건설정보를 원활하게 생산할 수 있어야 하고, 다음 단계의 업무를 수행하는 소프트웨어에 디지털 데이터를 전달하는데 어려움이 없어야 한다. 이를 위해서는 단계별로 완전히 구조화된 데이터의 정의가 필요하지만, 그것은 현실적으로 실현되기 어렵다. 따라서 현재의 조건을 고려한 디지털 데이터의 활용방안이 요구되고 있다(Royano Garcia et al., 2023).

건설산업의 디지털화는 건설정보를 생산하고 이를 저장 및 관리하는 영역을 넘어서 현실의 물리적 자산과 상호작용하는 사이버-물리적 통합(Cyber-physical integration)의 디지털트윈(Digital twin)을 지향하고 있으며(Qi and Tao, 2018; Boje et al., 2020), 궁극적인 목표는 건설 전주기에서의 종합적인 효율 및 생산성 향상이다. 본 연구는 디지털로 전환되고 있는 기존 도로건설산업으로부터 생성된 건설정보와 건설공법의 발전 및 건설환경의 변동 등을 반영할 수 있는 디지털 데이터 기반 건설정보구조(Construction information structure)를 개발함으로써, 도로 건설현장정보를 디지털트윈으로 구현할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서의 건설정보구조는 시공현장에서 발생하는 정보를 관리 및 교환을 목적으로 분류하고 구조화시킨 시스템이다. 건설정보구조는 일반적으로 사용하는 건축물의 생애 주기 동안의 정보처리 및 관리과정으로 정의하는 건설정보모델(Building information modeling; BIM)(Heaton et al., 2019)의 하위 개념으로, BIM의 정보흐름을 관장하는 기초 구조에 해당한다.

건설정보구조는 도로 건설공사를 적용 대상으로 한다. 건설 전주기에 걸쳐 다양한 형태와 내용의 건설정보가 발생하는데, 이러한 정보를 활용할 수 있는 형태의 디지털데이터로 처리하기 위해서는 대상 건설정보의 내용과 형태가 구체화 되어야 한다. 도로건설에서 사업 발주는 크게 설계와 공사로 나누어져 있다. 고속

도로 설계발주는 2020년부터 BIM 전면설계로 발주되고 있어 디지털화 수준이 높은 편이지만, 공사현장에서의 활용도는 비교적 낮은 편이다. 건설사업에서 공사단계가 차지하는 비중이 크므로, 공사업무를 디지털데이터 기반으로 전환하는 것이 상대적으로 더 중요하다.

건설현장업무를 디지털트윈으로 시뮬레이션하려면 구체적인 업무를 대상으로 정보를 분석하고 정보의 내용과 범위를 한정할 수 있어야 하는데, 도로 건설현장에서 발생하는 건설정보는 범위와 종류가 광범위하여 개발한 건설정보구조의 적용성을 시험하기 적합하다.

연구절차는 다음과 같다. 첫 번째, 변경이 잦은 현장정보를 다루기 위하여 먼저 도로 건설현장에서 수행되는 업무의 종류와 내용을 분석 및 분류하여 중요도가 높은 업무들을 선정하였다. 두 번째, 선정된 업무별로 발생가능한 현장여건의 변동과 지층구조의 변화 등에 따른 목적시설 및 건설공법 변경의 수용 방안을 검토하고 이를 수용할 수 있는 건설정보구조를 제시하였다. 세 번째, 건설에 참여하는 발주자, 건설관리자, 원청건설사, 전문건설사, 자재공급자 등과 건설주체의 추가 및 대상 업무의 확대 방안을 검토하였다. 네 번째, 건설정보구조를 고속도로공사에 시범 적용하고, 그 결과의 디지털화 방안을 검토하였다.

Ⅱ. 관련 문헌 고찰

1. 객체 중심의 BIM 관련 연구

디지털화를 위해서는 건설산업의 정보화 및 체계화가 선행되어야 한다. 1960～70년대에 미국과 유럽에서 건설정보분류체계에 관한 연구부터 활발하게 진행되기 시작하여(American Institute of Architects, 1966), 미국에서는 OmniClass(Annex and Rules, 2015), 영국에서는 UniClass(National building specification, 2023) 등의 통합분류체계를 제시하였다.

정보통신기술의 발전과 함께 건설산업에서 소프트웨어가 활용되면서 시각적인 형태로 건설정보를 표출하기 위해 다양한 노력이 있었으며 가상현실을 활용하는 방법들도 제시되었다(Moon and Kang, 2009). 건설정보를 시각화된 형태로 표출하기 위해서는 목적시설을 명확하게 특정할 수 있어야 하며, 특정시설의 형상정보도 정확히 분류할 수 있어야 한다. 이를 위해 건설정보를 BIM 기반으로 표현하려는 연구가 진행되었다(Yu et al., 2013). 초기의 연구들은 BIM의 활용 가능성을 확인하는 연구가 많았으나, 가시화된 객체를 중심으로 정보를 표현하려는 구체적인 연구결과도 발표되었다(Jung et al., 2013).

도로 건설현장에 BIM 정보를 활용하는 연구는 토목구조물을 중심으로 수량산출과 공사원가 산출을 시도하는 연구가 먼저 시행되었고(Nam and Jo, 2014), 건설현장의 공정관리에 관한 정보도 BIM 기반으로 처리할 수 있음을 보였다. 그러나 국내 건설정보분류체계와 BIM의 객체 개념이 직접 연결되지 않아 정보화하는데 어려움이 발생하는데, 분류체계상 하위단 세부 정보의 매핑을 통해 사용할 수 있음을 보여주기도 하였다(Cho et al., 2014). 또한, 건설정보의 대표적인 중립포맷인 Industry Foundation Classes (IFC)를 확장하여 토목시설물을 표현함으로써 건설현장에서 사용되는 BIM 소프트웨어간의 호환성을 향상하기 위한 연구가 진행되었고, ifcElement의 하위요소를 추가한 ifc user-defined property sets을 활용하는 방안이 제시되었다(Lee et al., 2017). 이러한 연구들은 대부분 목적시설을 특정하는 방법에 중점을 두고 있어, 공사단계에서 발생하는 공사업무를 정의하는 정보에 대한 고려가 부족하였다.

한국도로공사는 BIM 기반의 고속도로 스마트설계지침을 발표하여 객체를 중심으로 건설정보를 표현하도록 구체화하였다(Korea Expressway Corporation, 2020). 이 지침은 설계단계 활용에 한정되어 건설 전주기에

결친 정보의 연속성을 확보하지는 못하였다.

인프라 사업의 수량, 공정, 공사비를 통합적으로 관리하기 위한 통합 BIM 데이터베이스 개발에 관한 연구(Lee et al., 2019)는 국내에서 활용되는 대표적인 분류체계인 Cost Breakdown Structure (CBS), Work Breakdown Structure (WBS) 및 Object Breakdown Structure (OBS)를 통합 연계하여 사용할 수 있다는 것을 보였다. 기존의 WBS와 CBS는 기존 시행된 사업의 정보를 중심으로 고정되어 있어 쉽게 매핑할 수 있지만, BIM의 객체정보가 변경되거나, 공법이 변경되는 경우 일관되게 정보를 수정할 수 있는 방법을 제시하지 못하였다.

유사한 연구가 해외에서도 수행되었는데, 건설 사업정보의 수준을 공사비 산출이 가능한 규모로 작게 나눈 CBS와 단위작업을 정의하는 WBS를 통합하여 예산관리와 품질관리를 수행할 수 있는 방향을 제시하고, 이를 BIM과 연계하는 가능성을 제시하였다. 이는 공사비 중심으로 정보의 단위를 분할하고 가시화된 형태의 BIM을 이용하여 건설정보를 표출하는 방법이다(Cerezo-Narvaez et al., 2020). 이 방법은 공사비가 할당되는 단위작업에 따라서 공사업무를 특정할 수 있으나, 설계 및 공사단계에서 목적시설의 변경 또는 공법의 변경 시 정보처리가 어려워지는 문제를 극복해야 하는 한계가 있다.

2. 실시간 건설정보처리모델 관련 연구

공사현장에서 처리해야 하는 정보는 현장에 설치된 센서들로부터 전달되는 실시간 정보들이 포함되어야 하며, BIM과 연동되는 방법이 제시되어야 한다. 건설현장의 Internet of Things (IoT) 센서들은 점차 지능형 센서들로 진화하고 있으며, 작업자, 시설물, 장비 등 다양한 자원으로부터 온도, 압력, 가속도, 동작 등 다양한 측정값이 oneM2M 표준에 따라 정규화된 데이터로 전달하는 방법이 제시되었다(Kim et al., 2019). 지능형센서로부터 수신되는 복잡한 정보를 BIM에 반영하는 효과에 대한 검토가 필요하며, 적정 수준의 제시 또한 필요하다.

건설현장에서 센서의 활용은 건설안전, 장비의 관제 등에 집중되고 있으나 센서의 사용은 점차로 확대될 것이고, 적용범위도 확장될 것이므로 현장의 디지털데이터 통합표준은 IoT센서정보를 포함하여 구축하는 것이 적절하다(Kim et al., 2021). 또한 건설현장을 디지털트윈으로 구현하기 위해서 IoT 센서를 이용한 실시간 정보획득과 엑츄에이터, 마이크로컨트롤러를 통한 양방향 통신으로 건설안전과 기계작동 등에 초점을 맞춘 연구들이 진행되었다(Lee and Kwon, 2019). 건설현장의 디지털트윈 구현 범위에 장비의 실시간 관제를 포함하지 않는 경우 BIM에 반영해야 하는 센싱 정보의 처리 방향에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3. 연구의 차별성

기존의 연구들은 설계와 공사단계의 정보관리를 위한 객체 모델링 중 어느 한 가지만을 고려한 BIM 개발에 집중하였으며, 완성체 위주로 개발되어 객체 정보의 변경이나 설계 변경, 공법 변경 등에 대응하기 힘든 유연성이 부족한 모델이었다. 공사 현장의 안전성 향상 및 자동화와 관련하여 실시간으로 공사 현장 정보를 습득할 수 있는 IoT 센서가 도입되고 있으나, BIM 분야에서는 연구가 미비하다.

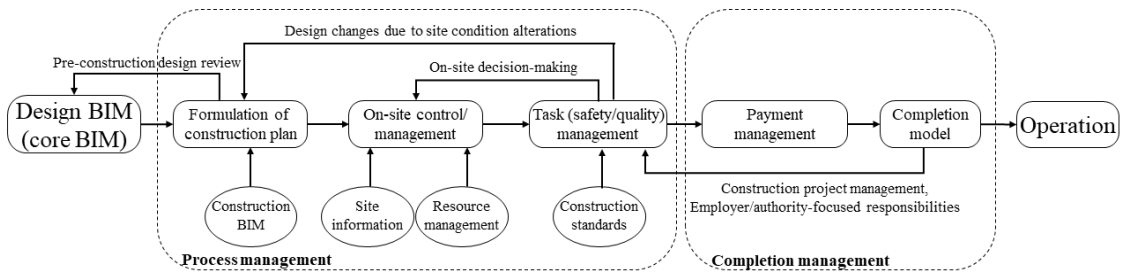
위와 같이 기존 연구에서 부족했던 점들에 착안하여, 본 연구는 3D형상의 객체와 건설공사 행위인 작업을 완전하게 이원화시키고, 이를 필요에 따라 분할 또는 병합함으로써, 공사 현장에서 생성되는 건설정보를 변형 없이 디지털로 표현할 수 있는 건설정보구조를 제안하였다. 실시간 계측, 시공, 점검 등 현장관리 시 IoT 기술이 필수적인데, 이를 고려하여 필수적인 센싱 정보를 제안하였다는 점에서 차별성이 있다.

Ⅲ. 디지털트윈 구현을 위한 다층가변형 건설정보구조

1. 도로 건설현장의 업무 분석 및 분석 대상 결정

국내 도로건설사업은 일반적으로 설계와 공사를 분리 발주한다. 설계단계에서 각종 조사와 공학적인 검토 및 의견수렴을 통하여 목적시설의 규모와 형식이 결정된 후 공사에 착수한다. 도로 건설현장에서는 발주자와 원청건설사 사이에 건설정보가 불규칙적으로 변경되는데, 이러한 변경사항을 반영할 수 있는 BIM이 필요하다.

공사의 개별업무는 설계정보에 기반하여 수행한다. <Fig. 1>은 일반적인 도로 건설현장의 업무흐름을 보여준다. 현장 업무는 목적시설을 적기에 완성하기 위하여 전체 공사계획을 수립하고, 계획에 따라 수행되는 업무를 관리하며, 단위업무들의 품질 및 현장의 총체적인 안전을 관리하면서, 동시에 기성 및 준공모델 관리를 수행한다. 공사계획의 수립은 공사 BIM을 기반으로 하며, 현장관제 및 관리는 현장정보와 현장자원을 기반으로 한다. 안전 및 품질관리는 공사기준을 반드시 준수할 수 있도록 해야 한다. 이 과정은 크게 공정관리와 준공관리로 구분한다. 공정관리는 작업, 자원, 품질 및 안전을 계획하는 공사계획과 일정관리, 작업집행, 설계변경을 주관하는 공사관리로 나눌 수 있다. 준공관리는 작업의 완수에 따라 공사비를 부분 정산하는 기성관리와 작업 또는 작업군의 완료를 표현하는 준공모델로 구분된다.



<Fig. 1> Workflow in road construction sites

업무수행 과정에서 발생하는 건설정보를 업무별로 분석하여 특정하여야 하지만, 공정관리와 같은 경우, 공사 수행과정에서 현장여건, 공사조건 등에 의해 건설정보가 지속적으로 변경된다. 이와 연계되어 작업자의 안전 및 단위작업의 품질과 관련된 작업관리 정보가 변경되며, 최종적으로 준공관리 정보도 수정된다. 따라서 건설정보의 변화에 민감한 업무는 공정관리(Process management), 작업관리(Task management), 준공관리(Completion management) 이다.

<Table 1>은 한국도로공사가 수행하는 고속도로 공사 현장관리 시 공정관리, 작업관리, 준공관리를 세분화하였고, 각 세분화한 업무를 작성, 승인, 지원하기 위한 책임한계를 표현하고 있다. 원도급, 전문건설, 건설관리, 발주자가 모두 참여해야 하는 업무는 상호 간의 데이터 교환이 발생하며, 또한 작성, 지원, 승인 과정이 따라오는 만큼 중요한 업무라고 할 수 있다. 이런 관점에서 작업계획, 일정관리, 안전관리, 품질관리 업무를 원활히 처리할 수 있는 건설정보구조를 개발하였다.

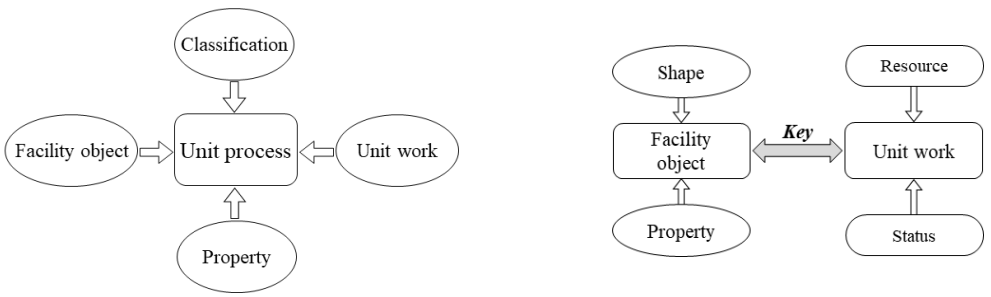
2. 건설정보구조 개발 방향

도로 건설현장에서 수행되는 업무는 도로를 구성하는 시설객체(Facility object)와 시설객체를 생성하는 과정을 표현하는 작업(Acitivity)의 관계로 정의할 수 있다. 기존 건설정보구조는 <Fig. 2(a)>와 같이 시설객체와 연결되는 작업을 결합하여 하나의 단위공정으로 정의하여 관련 정보들이 상호 연계되도록 하였다. 단위공정은 분류정보를 포함하고 있어서 WBS 분류체계 안에서 주요한 의미를 갖는다. 이 개념은 현장에서 이루어지는 단위공정을 명확하게 표현할 수 있지만, 시설객체 또는 작업의 내용이 일부 변경되면 단위공정 자체가 변경되어 전체 정보를 변경해야 하는 어려움이 있다. 건설현장에서 지층과 작업여건 등의 변화가 많은 경우에는 건설정보의 취급이 더욱 어려워지는 경향이 있다.

이에, 건설정보를 효과적으로 표현하기 위해서는 3차원 공간상에서 형상(위치와 형태)을 구현한 객체에 기반하여 정보를 표현하는 방법인 BIM을 활용하여 공정 중심이 아니라 객체 중심으로 건설정보의 구조를 재설정할 필요가 있다. 도로 건설현장의 건설정보를 시설객체와 작업과의 관계를 중심으로 재설정하면 <Fig. 2(b)>와 같이 정의할 수 있다. 객체와 작업을 분리하여 별도로 건설정보를 취급하는 방법이다. 기존의 단위공정은 객체와 작업이 혼재된 형태여서 관리하기가 다소 복잡하였으나, 객체와 작업을 분리함으로써 관리가 수월해진다. 시설객체와 단위작업은 key 값에 의해 서로 연결되며, 이 연결은 1:N의 복합적 관계를 형성한다.

<Table 1> Task allocation among stakeholders in road construction sites

Task			Task allocation (●Drafting, ◎Approval, ◇Support)			
			Construction company		Administrator	
			General contractor	Subcontractor	Construction management	Employer
Process management	Construction planning	Work planning	●	◇	◇	◎
		Resource planning	●		◇	◎
		Quality and safety planning	●			◎
	Project supervision	Scheduling management	●	◇	◇	◎
		Task execution	●	◇		◎
		Design changes	●		◇	◎
	Task management	Safety management	●	◇	◇	◎
		Quality management	●	◇	◇	◎
Completion management	Payment management		●		◇	◎
	Completion model		●		◇	◎



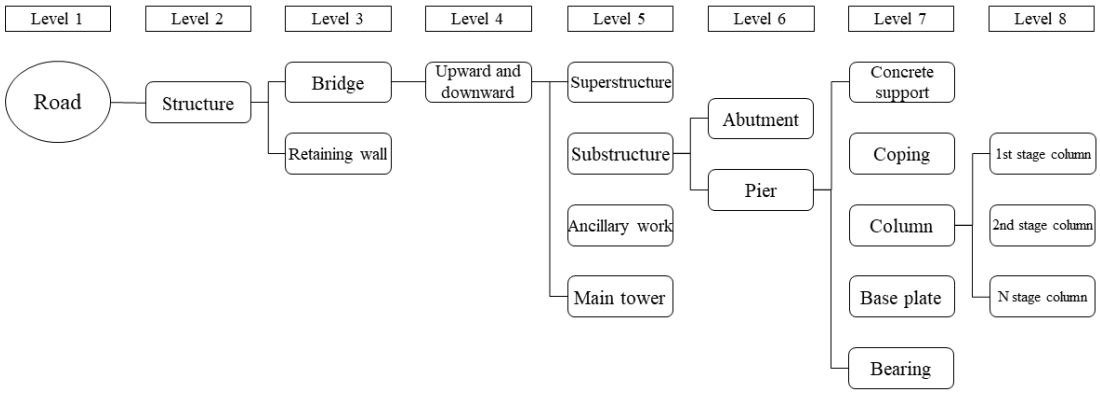
(a) Existing concept (b) Proposed Concept

<Fig. 2> Object-centric construction information system

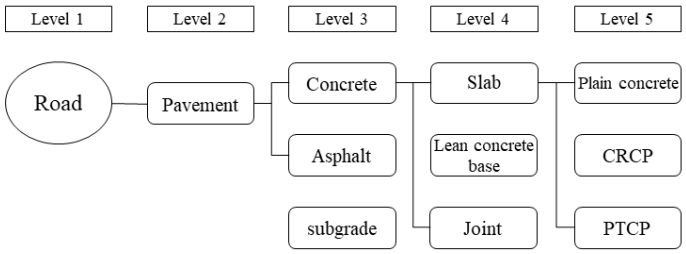
시설객체는 활용의 업무범위와 내용에 따라 객체의 분할 정도가 달라져야 하며, 이는 계층적 구조를 가져야 한다. <Fig. 3(a)>는 시설객체인 교량의 계층구조로서 개별 시설객체 사이에는 필요한 정보가 연계되어야 한다. 예를 들면, 설계단계 작업에서는 기둥 단면의 규모와 최대 부재력 발생 위치의 배근계획이 중요한 정보이므로 Level 7단계의 시설객체까지 정보가 할당되지만, 공사단계에서는 시공이음의 위치나 철근이음의 방법 또한 중요 정보에 해당하므로 Level 8단계까지 시설객체를 세분화하여 정의해야 한다. 즉, 업무 내용의 필요에 따라 적정 수준의 시설객체로 분할해야 하고, 시설객체에 연결되는 속성정보의 내용도 유연하게 변경할 수 있어야 한다. 이렇게 시설객체를 분할 및 병합하더라도 정보의 연속성을 확보할 수 있고, 연결되는 작업에는 영향을 미치지 않는다.

<Fig. 3(b)>에는 포장에 대한 객체의 계층구조를 제시하였는데, 교량은 Level 8단계의 계층구조이지만, 포장은 Level 5단계로 구성될 수 있다. 기존의 작업분류체계와 같이 교량, 포장의 계층구조가 동일 7레벨의 계층구조가 아니라 필요에 따라 계층 구조가 확장되거나 축소될 수 있다.

이렇게 계층화된 시설객체에 적절한 작업을 연계하여 설계, 공사, 유지관리단계의 업무를 정의할 수 있으므로, 건설정보를 효과적으로 표현할 수 있는 건설정보구조를 구축할 수 있다.



(a) Bridge construction



(b) Pavement construction

<Fig. 3> Example of application of multi-story variable hierarchy objects

3. 도로 건설현장의 다층가변형 건설정보구조

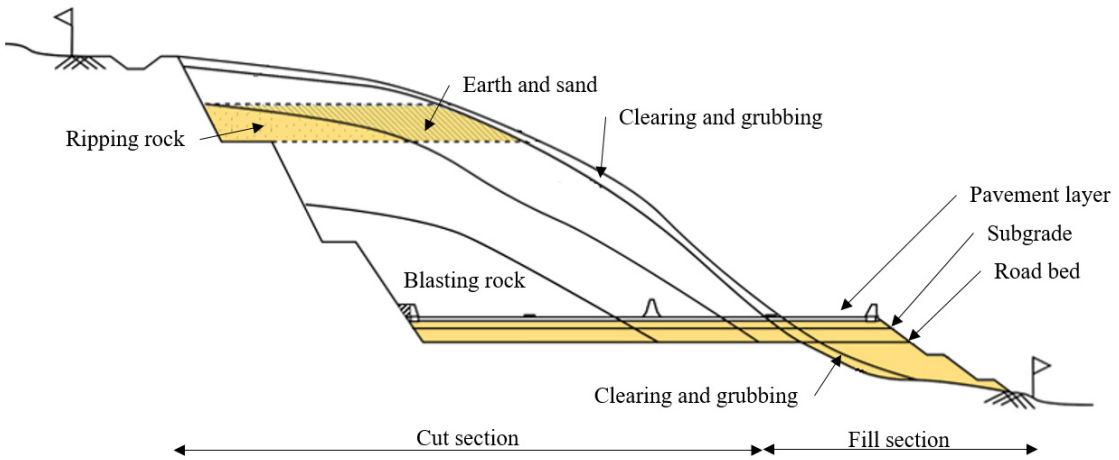
1) 시설객체

도로 건설현장의 디지털트윈은 가시화된 시설물을 중심으로 건설정보를 표출해야 하므로 시설객체를 정

의하는 방법이 중요하다. 시설객체는 도로건설 지역의 지형과 지층 등이 구체적인 형상을 갖도록 분할한 객체로서, 도로시설물의 기능별 요소를 체계적으로 분류한 형상으로 정의하여야 한다. 시설객체는 3차원 형상과 속성정보를 가지고 있으며, 작업과 연결정보를 가져야 한다. 설계, 공사, 유지관리의 전주기 단계별 작업의 건설정보는 서로 상이하므로, 효과적으로 필요한 정보를 전달하기 위해서는 시설객체를 최적의 상태로 분할 또는 병합할 수 있어야 한다.

시설객체를 분할 및 병합하는 방법은 시설객체의 성격에 따라 달라야 한다. 도로 건설공사는 원지형을 변화시키는 토공사와 시설물을 설치하는 공사로 크게 나눌 수 있다. 토공사는 자연 지형에서 지반을 깎고 토사 또는 구조물을 쌓는 작업으로, 현장의 지형과 지층구조에 따라 작업의 대상이 되는 시설객체를 정의해야 하는데, 정보의 변화가 상시 가능해야 한다. 또한, 지층구조의 변화는 시설객체의 분할체계와 속성정보, 그리고 이와 연결되는 작업의 변경까지 동반할 수 있다. 이러한 변화가 가능하도록 계층화된 다층가변형 시설객체 정의를 제안하였다.

<Fig. 4>에서 보는 바와 같이 깎고, 쌓는 공사가 혼합되는 구간에서는 설계단계에서 가정한 지형과 지층구조가 공사단계에서 필연적으로 변경되며, 깎기 시설객체가 쌓기 시설객체로 변하기도 하고, 토사깎기 작업이 연결되던 시설객체가 리핑암깎기 작업으로 변경되기도 한다. 시설객체의 분할과 연계되는 작업정보가 유연하게 변경되어야 함을 알 수 있다.



<Fig. 4> Construction information of roads

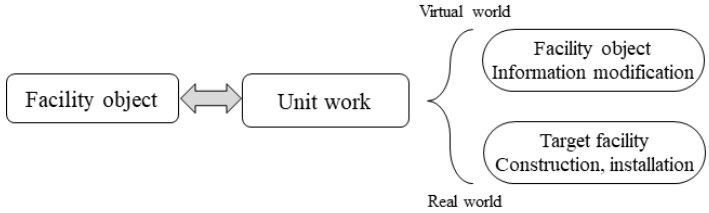
시설물을 설치하는 공사의 시설객체는 <Fig. 3>에서 보는 바와 같이 계층화된 시설객체 하나하나가 단계적으로 필요한 수준의 시설객체로 모두 정의되어야 한다. 수행되는 작업은 실제 작업의 진척도나 범위에 따라 적합한 단계의 시설객체와 연결되어야 한다. 작업에서 생산되는 건설정보는 여러 계층에 있는 시설객체의 속성정보 형태로 저장되며, 시설객체의 분할 및 병합 시에도 연계되는 건설정보는 손실없이 일관되게 전달될 수 있도록 완전한 계층구조를 가진 다층가변형 시설객체를 적용한 건설정보구조를 제시하였다.

2) 작업

시설객체가 건설업무의 대상이라면, 작업은 건설업무의 내용이며 과정이라고 할 수 있다. 건설정보구조는 작업이 수행되는 과정에서 필요한 건설정보를 디지털화 및 체계화했다. 작업은 현실의 공사과정에서 발생하

는 건설정보를 분석하여 건설정보구조상 해당 시설객체의 변경이 필요한 속성정보의 내용을 가짐으로써 실시간으로 변경되는 정보를 반영할 수 있다. 현실세계의 건설현장에서 작업을 수행하면 시설물이 생성된다. 해당 건설현장을 디지털트윈 수준으로 모델링하고, 시설객체에 대해 작업을 수행하면, 해당 시설객체의 속성정보가 변경되며 시설객체를 생성한다.

<Fig. 5>에서 보는 바와 같이 작업은 가상세계에서 시설객체의 형상 및 속성정보를 변경하는 기능을 수행하고, 현실세계에서는 대상시설을 생산, 변경, 운반, 설치 및 철거 등 실제 물체의 형상을 변경한다. 즉, 작업이 현실세계에서는 공사업무다. 작업이 일방적으로 시설객체를 선택하는 것이 아니라, 시설객체에 적합한 단위작업이 선택되어야 하므로 정보가 상호 간에 참조되어야 한다.



<Fig. 5> Linking facility objects and unit works

작업은 반드시 시설객체와 연계되어 수행되며, 작업은 자원, 시간, 업무주체들 간의 협업내용, 과정 및 결과의 검증에 관한 정보와 작업의 수행과정에서 발생하는 실시간 현장정보를 획득하는 IoT센서 정보 등으로 정의된다. 도로 건설공사 전체 업무를 세부적인 단위작업으로 분할 정의하여야 하는데, 세분화의 정도는 현장의 주요도가 높은 업무인 안전관리, 품질관리, 기성관리 등을 수행하기 적절해야 한다. 작업들도 세분화의 과정에서 부분적으로 계층적인 구조를 가질 수 있다. 원칙적으로 작업은 작업내용에 따라 개별적으로 구분하여 정의함으로써, 신규 공법의 개발, 공사 중 공법의 변경, 작업 범위의 변경 등을 유연하게 표현할 수 있도록 하였다.

작업정보는 안전 및 품질관리를 위해 현장에 설치된 IoT센서에서 획득한 정보도 포함한다. 다만 현장에 설치되는 IoT센서를 통해 획득되는 정보를 모두 저장하는 것이 아니라 건설관리에 필요한 <Table 2>에 열거한 기초물리량 정보와 계측결과를 중심으로 저장한다.

<Table 2> Key sensing information at the site

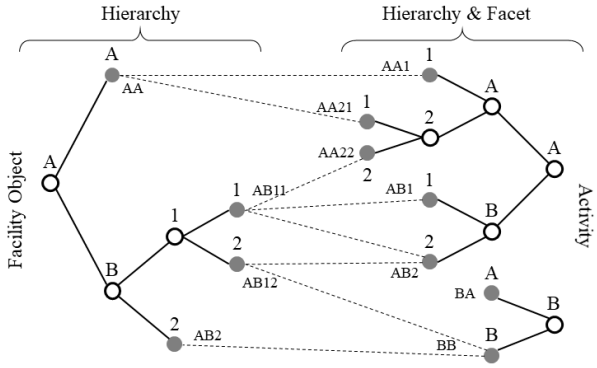
Key sensing information	Induced key sensing information
Length(m) / Time(sec) / Mass(kg) / Mol(mol) / Temperature(K) / Luminous Intensity(cd) / Electric current(A)	Angle(rad) / Area(m^2) / Volume(m^3) / Velocity(m/s) / Acceleration(m/s^2) / Discharge(m^3/s) / Density(kg/m^3) / Force(N) / Pressure(Pa, N/m^2) / Temperature(℃) / Humidity(RH, %) / Illuminance(lm/m^2) / Capacitance(F) / Electrical resistance(Ω)

3) 시설객체와 작업의 연결

도로건설사업은 설계, 공사단계에서 다양한 업무를 수행해야 하며, 구체적으로는 목적시설의 규격뿐만 아니라 작업의 내용도 공학 기술의 발전과 새로운 공법의 개발 및 사회적 여건의 변동 등에 따라 건설 전주기

에 걸쳐 변경될 수 있다. 따라서 건설정보는 개별 단계에서 변경되는 내용이 이전 단계의 정보와 연속성을 가질 수 있도록 기록되고 추적될 수 있도록 관리되어야 한다.

시설객체와 작업은 <Fig. 6>과 같이 상호 연결되어 있어서 시설객체를 중심으로 작업 내용들을 검토하거나, 작업을 중심으로 시설객체들을 검토하는 것이 가능하다. 건설계획이 변경되는 경우 수정 및 보완이 요구되는 정보를 쉽게 확인할 수 있다. 시설객체와 작업은 각각 수정할 수 있고, 계획과는 다른 작업으로 연결을 변경할 수 있다. 시설객체와 작업은 1:N으로 연결할 수 있어, 하나의 작업이 서로 다른 시설객체에 반복적으로 사용될 수 있으며, 하나의 시설객체를 만들기 위해 여러 가지 작업을 순서대로 연결할 수도 있다. 작업은 시설객체에 대한 메타데이터를 가지고 있어, 시설객체와 연결 시 자동으로 시설객체 건설을 위한 필요 기초정보들을 생성하고, 사용자는 환경에 맞추어 데이터를 수정함으로써 공사정보를 완성한다.

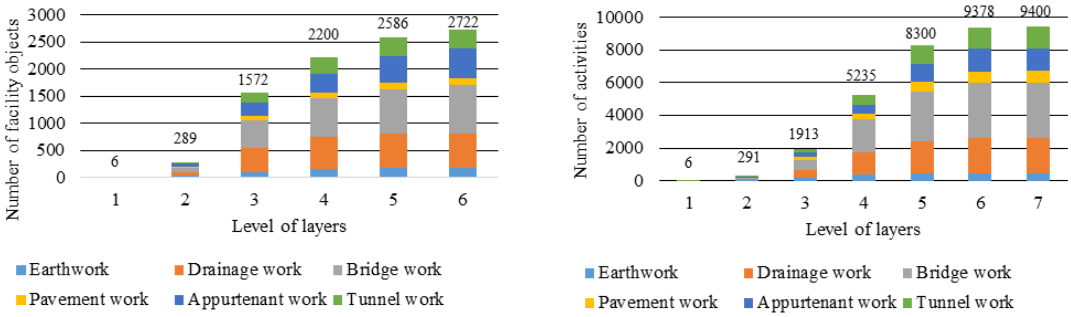


<Fig. 6> Relationship between facility objects and activities

4. 건설정보구조의 구현

도로건설사업의 디지털트윈은 현실에서 불가능한 다양한 검토 및 시뮬레이션을 수행할 수 있어야 하고, 그 결과를 시각적인 형태로 전달할 수 있어야 한다. 건설공사가 진행되는 과정의 검토와 시뮬레이션 결과를 유연한 형태로 표출하기 위한 건설정보구조는 인프라시설을 다양한 레벨로 정의하는 다층가변형 시설객체와 시설객체에 연결되는 독립적인 작업정보로 구성된다.

한국도로공사가 발주 및 감독하는 고속도로 건설현장을 임의로 선택하여 발주자와 원청시공사 간에 전달



(a) Classification of facility objects

(b) Classification of activities

<Fig. 7> Classification of expressway construction information

되는 작업계획, 일정관리, 안전관리, 품질관리를 수행하기 위한 건설정보를 분석하였다. 토공, 배수공, 교량공, 포장공, 부대공, 터널공의 6개 공종에 대해서 분류하였으며, 시설객체는 최대 level 6, 작업은 최대 level 7까지 분기되었다. 시설객체는 2,722종, 시설객체에 연결되는 작업의 종류는 약 9,400개로 분류되었다(Fig. 7). 정의된 시설객체와 작업정보는 같은 요구조건에서는 다른 공사현장에도 적용할 수 있다. 다만, 새로운 시설이 추가되거나, 적용 공법이 변경되는 경우에는 시설객체와 작업이 추가되어야 한다. 현장의 작업방법 변경 등은 객체와 작업의 추가, 조합 혹은 구성을 변경하여 반영할 수 있다.

디지털트윈은 3차원 공간정보를 이용하여 현실 세계와 상사율이 높은 가상공간을 구축하는 것으로, 시설객체의 3차원 형상정보를 상세하게 표현하면서 정보 교환이 원활하게 될 수 있는 데이터 형식을 사용하는 것이 좋다. 따라서 OBJ, 3DS, GLB와 같은 일반적인 공개 중립포맷을 활용하였다. 시설객체의 형상정보와 속성정보는 별도의 파일에 저장하고 고유ID를 통하여 연결하는 방법을 적용하였다. 건설정보구조에서 개별 시설객체는 상위 객체의 식별정보만을 가지도록 하여, 동일 계층의 요소 확장을 편리하게 하였고, 관계정보를 통하여 전체 계층구조를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

예를 들어, <Fig. 3(a)>에서 레벨4까지 교량의 형상별로 표현된 시설객체를 디지털화하기 위한 중립포맷으로 정의하면 아래 <Table 3>과 같이 표현할 수 있다. 시설객체 간 관계정보와 추가적인 속성정보는 직관적인 데이터파일 포맷인 JSON을 이용하였다. 만약, 시설객체의 속성정보가 레벨4에서 “상행(Upward)” 객체가 추가될 때, 데이터 행 하나를 추가하면 쉽게 수정 가능하다. 이러한 중립포맷을 활용하면 상이한 소프트웨어 간 호환성이 개선된다.

또한, 도로 건설현장에서 시설객체와 작업정보로 정의된 건설정보를 디지털 데이터로 전환하고, 공개된 Dictionary에 지속적으로 축적함으로써 원활한 정보 교환이 가능하고, 건설정보의 연속성을 확보할 수 있다.

<Table 3> Response to object addition within hierarchical structures (Examples: JSON)

Lv.1	Lv.2	Lv.3	Lv.4	JASON expression
Road				{“_name_obj_id”:“road”,“_property”:“.....”}
	Structure			{“_name_obj_id”:“structure”,“_up_obj_id”:“road”,“_property”:“.....”}
		Bridge		{“_name_obj_id”:“bridge”,“_up_obj_id”:“structure”,“_property”:“.....”}
		➡	Upward and downward	{“_name_obj_id”:“upward and downward”,“_up_obj_id”:“bridge”,“_property”:“.....”}
			Upward	{“_name_obj_id”:“upward”,“_up_obj_id”:“bridge”,“_property”:“.....”}
		Retaining wall		{“_name_obj_id”:“retaining wall”,“_up_obj_id”:“structure”,“_property”:“.....”}

Ⅳ. 토 의

전통적 건설정보분류체계 중 Uniclass2015(National building specification, 2023)와 Omnicalss(Construction Specifications Institute, 2023)는 Facet구조다. Uniclass는 콤플렉스, 활동, 엔티티, 요소 등 10개의 테이블로 구성되었으며, Omnicalss는 기능별 건설주체, 공간, 요소 등 15개의 테이블로 구성되었다. Facet구조는 특정유형의 정보를 분류하기 위해 독립적으로 사용 혹은 결합하여 복잡한 주제를 분류할 수 있는 장점이 있으나, 다양한 테이블의 클래스간 관계를 정확히 이해해야만 정확한 건설정보를 구현할 수 있는 어려움이 있다. 또한, 시설물의 관리, 관리자 중심의 공정관리 정보를 다루기 위하여 객체정보와 작업정보가 결합된 형태가 WBS 개념

이나, 실제 국내 도로 건설현장에서는 객체와 작업정보의 혼재라든가, 공정관리의 대상인 시설객체를 완성하기 위한 작업 간 연계성이 미흡함에 따라, WBS의 활용성은 극히 낮은 수준이다.

반면, 본 연구의 건설정보구조는 공사현장에서 발생하는 건설정보인 시설객체와 작업을 계층화된 구조로 연결함으로써 객체와 작업간 선·후행관계가 명확해짐에 따라 공정 및 기성관리가 가능하다. 시설객체와 작업을 각각 이원화 및 계층화하고, 상호 간의 다중 연결로 정의함으로써 도로 건설현장에서 발생하는 모든 상황과 건설정보를 표현할 수 있다. 객체가 분할 또는 병합되는 경우에도 객체정보의 상속관계를 통해 연속성이 유지되고, 객체와 연계된 작업의 내용 변화에도 유연하게 대응할 수 있다.

다만, 이 건설정보구조는 시각적인 객체의 관리를 목표로 만들어져 건설정보를 분류하기만 하는 용도로는 활용이 어렵다. 소프트웨어 및 디지털트윈을 통하여 시각적으로 가상의 객체를 표현할 때 유용하다.

Ⅴ. 결 론

도로 건설현장에서는 설계변경이 빈번하게 발생하는데, 이를 반영할 수 있는 디지털트윈을 만들기 위해서는 BIM의 기본 골조에 해당하는 정보의 연결구조를 현실에 가깝게 구성해야 한다. 본 연구의 건설정보구조는 객체와 작업의 분리를 통해 현장 업무 내용을 변형 없이 정보화할 수 있다. 건설정보구조는 3D객체와 건설현장정보, 설계정보 등의 건설정보와 시공자, 설계자, 발주자 등의 이해당사자를 이어주는 역할을 하며, 현실과 일치하는 객체와 작업의 분류체계는 BIM 사용자가 건설현장을 구현하고 관리하는데 편리함을 제공할 것이다.

국내에서 사용되고 있는 정보분류체계는 발주자의 기성관리 측면에서 개발되었기 때문에 BIM 적용과는 거리가 있다. 본 연구는 디지털트윈 구현을 위한 건설정보구조를 건설현장 및 사용자 친화적으로 체계화하였고, 이를 통해 건설업계의 디지털전환을 가속화 하여 생산성 향상에 기여할 것이다.

토목구조물은 일반 건축구조물과 달리 정형화된 구조물이 아닌 비정형 구조물, 선 형태의 연속된 구조물이 많다. 이러한 특성상 BIM을 제작할 때 표준화된 객체의 사용이 어려울 수 있다. 좀 더 원활하게 모델링을 하기 위해서는 정제된 설계 시나리오나 모듈, 인공지능을 이용해 설계자를 보조하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 공사단계에서 건설사와 발주자 간의 업무 중 작업계획, 일정관리, 안전관리, 품질관리 업무에 한정하여 건설정보구조를 제시하였으나, 향후 설계, 유지관리, 특정공법과 다양한 공사 주체 간의 업무에 대한 건설정보구조로 확장하고, 모델의 보편화를 위한 건설 Dictionary로 확대할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 "스마트건설기술개발 국가R&D사업(과제번호 RS-2020-KA156050)"의 지원으로 수행하였습니다.

REFERENCES

American Institute of Architects(1966), *Uniform System for Construction Specifications, Data Filing and Cost Accounting, Title One, Buildings*, American Institute of Architects, Washington DC,

USA.

Annex, A. and Rules, C.(2015), *National BIM Standard-United States® version 3*, Washington DC, USA.

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S. and Rezgui, Y.(2020), "Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research", *Automation in Construction*, vol. 114, 103179.

Cerezo-Narvaez, A., Pastor-Fernandez, A., Otero-Mateo, M. and Ballesteros-Perez, P.(2020), "Integration of cost and work breakdown structures in the management of construction projects", *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, 1386.

Cho, G. H., Ju, K. B. and Song, J. G.(2014), "Improvement of construction information classification for applying BIM", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 15, no. 10, pp.6379-6387.

Construction Specifications Institute, Omniclass, https://www.csiresources.org/standards/omniclass, 2023.07.13.

Heaton, J., Parlikad, A. K. and Schooling, J.(2019), "Design and Development of BIM Models to Support Operations and Maintenance", *Computers in Industry*, vol. 111, pp.172-186.

Institute for Science and Technology Strategy(2019), *Final Report on Smart Construction Technology Development Project*.

Jung, Y., Kim, Y., Kim, M. and Ju, T.(2013), "Concept and structure of parametric object breakdown structure (OBS) for practical BIM", *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 14, no. 3, pp.88-96.

Kim, G., Lee, J., Kim, E. and Shin, Y.(2021), "A Study on Architecture for Building Smart Safety Management Systems Based on Construction site IoT", *Journal of Korea Society of Information Technology Policy and Management(ITPM)*, vol. 13, pp.2305-2311.

Kim, H. J., Jin, H. B., Youm, W. S., Kim, Y. G. and Park, K. H.(2019), "Intelligent Sensor Technology Trend for Smart IT Convergence Platform", *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 34, no. 5, pp.14-25.

Korea Expressway Corporation(2020), *Highway Smart Design Guidelines*.

Lee, J. H., Lee, S. W. and Kim, T. Y.(2019), "A development of unified and consistent BIM database for integrated use of BIM-based quantities, process, and construction costs in civil engineering", *Journal of the Korea Society of Computer And Information*, vol. 24, no. 2, pp.127-137.

Lee, S. H., Park, S. I., Kwon, T. H. and Seo, K. W.(2017), "Civil infrastructure information modeling method based on extended IFC entities using BIM authoring software", *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, vol. 30, no. 1, pp.77-86.

Lee, S. J. and Kwon, S. W.(2019), "A Study on the Application of Cyber Physical System and Digital Twin for Smart Construction", *Proceedings of Korea Institute of Construction Engineering and Management*, p.59.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2022), *Strategies for Promoting Smart Construction*.

Moon, H. S. and Kang, L. S.(2009), "Development of VR Simulation Algorithm and System for Supporting Optimal Road Design Information", *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 10, no. 4, pp.101-110.

Nam, J. Y. and Jo, C. W.(2014), "Standardization of infrastructure information modeling based on

BIM information framework", *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 19, no. 3, pp.281-293.

National Building Specification, Uniclass download, https://uniclass.thenbs.com/download, 2023.07.13.

Qi, Q. and Tao, F.(2018), "Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison", *IEEE Access*, vol. 6, pp.3585-3593.

Royano Garcia, V., Gibert Armengol, V., Serrat Pie, C. and Rapinski, J.(2023), "Analysis of classification systems for the built environment: Historical perspective, comprehensive review and discussion", *Journal of Building Engineering*, vol. 67, 105911.

Yu, Y., Jeong, J., Jung, I., Yoon, H. and Lee, C.(2013), "Development of BIM-based work Process Model in construction Phase", *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 14, no. 1, pp.133-143.