

중공트랙형 단면의 프리캐스트 에코필라 사방댐 공법개발

김현기

가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과

Development of Precast Concrete Method for Eco-Pillar Debris Barrier with Hollow Cross-Section

Hyun-Gi Kim

Department of Energy Plant Engineering, Catholic Kwandong University

요약 본 연구에서는 현장타설 콘크리트를 사용하는 친환경 에코필라 사방댐의 시공성과 경제성을 향상시키기 위해 프리캐스트공법을 제안하고 성능검증을 수행하였다. 강재를 이용한 사방댐 형식은 공사비가 높고 부식으로 인한 환경문제도 발생하고 있어, 최근에는 콘크리트를 이용한 친환경 사방댐의 설치가 늘고 있다. 그러나 국내에서 사방댐 설계기준으로 명확하게 제시된 자료가 없어 경험적으로 설계되고 있을 뿐 아니라 에코필라 사방댐에 대한 기준은 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서 에코필라 사방댐의 설계외력 산정방법에 대해 제안하고 중공트랙형 단면을 적용하여 설계를 수행하였다. 또한, 구조적으로 비교적 간단한 캔틸레버 기둥으로 최대 휨모멘트가 작용하며 프리캐스트 공법의 핵심기술이라 할 수 있는 연결부 공법을 3가지로 제안하고 실물모형 실험을 통해 성능검증을 수행하였다. 실험결과, 루프철근 이음을 적용한 실험체가 가장 큰 강성을 보였고 앵커철근으로 연결된 실험체가 작은 값을 보였으나, 제시된 3가지 형태의 연결공법은 모두 극한하중에 따른 최대 휨모멘트를 충분히 넘어서는 성능을 나타내었다. 실물 실험체의 제작과정에서 각 공법에 대한 시공성에 대해 검토한 결과 앵커식 연결방법이 가장 우수한 것으로 평가되었다.

Abstract In this paper, the precast method of a concrete eco-pillar debris barrier was proposed to improve the construct ability and economic efficiency. The performance was validated by experimental and structural analysis. The steel debris barrier has a high construction cost and causes environmental damage with corrosion. The construction of a concrete eco-pillar debris barrier has been increased recently. On the other hand, there are no design standards regarding debris barriers in Korea, and debris barriers are being designed by the experience and sense of engineers. Therefore, in this study, a method to determine the design external forces was proposed and the design was performed by applying a hollow cross-section to the debris barrier. In addition, three types of connection methods of a concrete cantilever column with the maximum bending moment acts were proposed, and validation of the performance of each type was performed with a real-scale experiment. The experimental results showed that the type with loop reinforcement had the highest rigidity and the type with anchorage performance exceeded the maximum bending moment according to the ultimate load. In the manufacturing procedure of mock-up debris barriers, the type with an anchorage-bar was found to have superior construct ability.

Keywords : Construct ability, Debris flow, Eco-Pillar, Hollow Cross-section, Precast Column.

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

*Corresponding Author : Hyun-Gi Kim(Catholic Kwandong Univ.)

Tel: +82-33-649-7374 email: hyunky@cku.ac.kr

Received January 23, 2018

Revised February 26, 2018

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

1. 서론

지구온난화로 인해 전 세계적으로 기후변화가 진행되고 있으며, 우리나라 기후변화의 최근 추세도 현재와 비교하여 21세기말(2071~2100)에 기온이 4℃ 상승하고, 강수량은 17%가 증가 될 것으로 전망되었다[1]. 최근 30년간 우리나라 여름철 누적 강수량 및 집중호우, 극단적 강수도 점차 증가되는 것으로 나타났다[2]. 국토의 70%가 산악지형인 우리나라의 경우 산지경사가 급하고 유로도 짧아 집중호우 시 홍수와 산사태 발생빈도가 높은 편으로 인명과 재산피해가 자주 발하고 있으며[3], 국지성 호우로 인한 계곡부 토석류 피해사례가 증가하고 있다. 특히, 2011년 여름철 우면산 산사태는 17명의 인명피해와 고층공동주택에도 막대한 재산피해를 발생시켜, 토석류에 대한 국민적 관심과 방지대책에 대한 연구가 주목 받는 계기가 되었다[4].

산사태를 예방하거나 복구하기 위한 목적으로 토석류 유출저감 시설이 설치되어, 집중호우 시 계곡물의 유속을 완화시키고 흘러내리는 토석류를 미리 차단하여 하류 농경지, 주택 등의 재해예방에 크게 기여하고 있다. 능동적이고 효과적인 토석류 유출저감 시설인 사방댐은 크게 투과형과 불투과형으로 구분되며, 투과형 사방댐은 평상시 퇴적된 토사를 서서히 유하시키고 홍수 시에는 급격한 유목과 토사의 유출을 조절하기 위해 설치되고, 그 종류로는 슬릿댐, 버트레스댐, 에코필라댐 등이 있다[5][6]. 고가의 강재를 이용한 형식은 용접제작 소요비용이 크고 물에 대한 장기간 반복적인 노출로 부식, 경관불량 및 유지관리 비용을 발생시키고 있으나, 콘크리트재료로 시공되는 에코필라댐은 2단으로 설치되어 유목등을 걸러내고 재해예방은 물론 상하류간 생태투과율과 생태차단높이가 낮아 생태계 보호와 자연훼손을 최소화 하고, 설치비가 적게드는 효율적인 공법으로 사용사례가 증가하고 있다[7][8].

그러나 기존의 에코필라 사방댐은 거푸집을 조립하고 현장타설콘크리트를 양생하는 방법으로 공종이 복잡하여 인건비가 증가되고 공기가 길어지며 품질확보가 어려운 점이 있으며, 설치위치가 산지인 특성상 타설시간이 제한된 레미콘 차량의 진입에도 제약을 받고 있다. 또한, 국내 투과형 사방댐에 대한 설계는 명확한 기준없이 하천설계기준이나 산악지 도로설계 매뉴얼 등에 따라 경험적으로 설계되고 있으며, 투과형에는 원칙적으로 콘크리

트 사용을 배제하고 있어 에코필라 사방댐의 경우 적절한 설계기준과 구조검토가 철저히 요구되고 있다[9][10].

따라서 본 연구를 통해 친환경 에코필라 사방댐의 품질향상, 공사기간 및 사업비 절감을 위한 프리캐스트 공법과 콘크리트 구조체의 설계외력 산정방법, 조립식 부재의 수직연결공법을 제안하였으며, 최적 단면설계와 구조해석을 수행하였고, 실물실험을 통해 구조적 안정성과 적용성을 검토하였다.

2. 설계기준 검토

2.1 사방댐의 계획 및 설계

사방댐의 계획규모 결정시 유역면적 산정, 계획홍수량의 산정은 일반적인 댐의 설계순서와 동일하지만 토석류 유목의 처리계획 확정과 제석계획이 요구된다. 현재 국내의 설계자료는 퇴적된 토석류 제거에 관한 내용을 포함하지 않고 있다[11]. 일반적으로 투과형 사방댐의 경우 Fig. 1과 같은 순서로 설계한다. 댐 형식의 선정은 토석류·유목 대책시설 및 배치계획 단계에서 이루어지며, 투과형의 경우 댐 높이, 기초, 댐둑어깨 등의 크기가 결정된다.

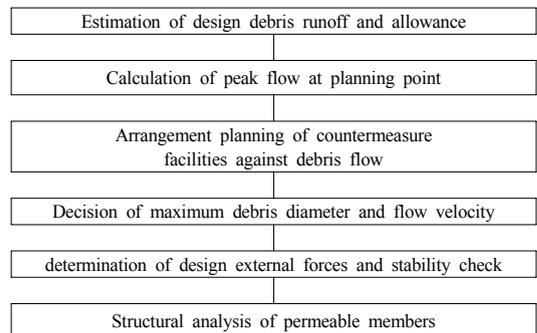


Fig. 1. Design procedure of permeable debris barrier

국내 사방시설에 대한 설계기준으로는 하천설계기준, 산악지 도로설계 매뉴얼을 적용하고 있으며, 사방공학(1983)과 일본 국토교통성의 하천사방기술 기준(2005)이 설계자료로 이용하고 있다. 하천설계기준(2009)에서는 비교적 간단하게 사방댐의 형식을 결정하고 본체와 기초 및 댐어깨 등에 관해 설계하도록 하고 있으나, 산악지 도로설계 매뉴얼(2007)에서는 유송잡물의 발생조사,

차단시설의 종류, 예정지선정, 차단시설의 결정 및 설치 장소에 관한 사항 등 유지관리를 포함한 구체적인 고려 방법을 제시하고 있다[11][12].

2.2 투과형 사방댐의 외력산정 기준

투과형 사방댐의 설계는 방수로 단면결정, 개구부 설계, 월류부 설계로 이루어지며, 구조부재의 단면검토를 위한 설계외력 산정의 명확한 국내기준이 없는 실정이다.

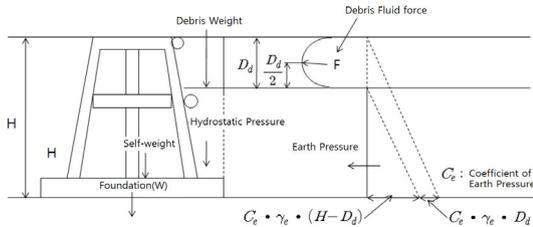


Fig. 2. Diagram of silt pressure and fluid force

하천설계기준의 제36장 사방시설에서는 사방댐의 단면계산은 댐 설계기준과 동일한 방법으로 하며, 작용외력에는 수압, 퇴사압, 양압력 등이 있으나 댐의 형식과 분류에 따라 각각 취해야 할 값이 다르므로 설계조건에 따라 선택하도록 하고 있을 뿐이다[11].

일본의 강제사방구조물편람과 LH연구보고서에 따르면 Fig. 2와 같이 퇴사압은 토석류가 상재되는 것으로 사다리꼴 분포를 보이며, 투과부분에서 골재 및 물은 막히지 않은 상태로 자중을 계산한다. 또한, 퇴사압과 유체력을 외력으로 제체의 안정성과 부재의 안전성을 검토한다. 토석류의 자중이 상재하중이 되므로 퇴사압은 사다리꼴 분포가 된다[13][14].

퇴사압의 경우 식(1)과 같이 토사계수 C와 수중단위중량 W로 계산되며, 정수압은 단위중량이 작용높이에 정비례하여 식(2)로 산정된다.

$$P = C \times W \tag{1}$$

$$P_w = r \times H \tag{2}$$

단위폭당 유체력은 식(3)으로 산정할 수 있다.

$$F = K \times (r/g) \times d \times U^2 \tag{3}$$

여기서, K는 유체력계수(1.0)이고 g는 중력가속도(9.8

m/s²)이며, d는 토석류의 수심(m), U는 유속(m/s)을 나타낸다. 유속의 추정은 식(4),(5)와 같이 관측치를 바탕으로 토석류의 전체체적(M)에 따른 침투 토출량(Q_p)과 발생지와 퇴적지 사이의 경사(S)에 따른 유속을 경험식으로 제시한 Rickenamnn(1999)식을 적용할 수 있다[15].

$$Q_p = M^{0.833} \tag{4}$$

$$v = 2.1 Q_p^{0.33} S^{0.33} \tag{5}$$

Table 1. Load combination for structural analysis

Case	Debris Flow	Sedimentation (Full-Sanding)	Temp. Var.
Self-Weight	○	○	○
Fluid Force	○		
Silt Pressure	○	○	
Temp. Var.			○
Additional Factor for ASD	1.5	1.0	1.15

Table 1.에 나타난 구조계산을 위한 하중조합을 보면, 토석류는 단기하중이므로 일본에서는 그간의 경험을 바탕으로 허용응력의 1.5배를 할증하고 있으며, 토석류 포착후 퇴사압은 장기간 작용하므로 만사시의 허용응력은 할증하지 않는 것으로 보았다. 온도변화에 대해서는 일반적으로 1.15를 할증하도록 하였고, 토석류 유체력이 구조물에 편심 작용할 경우에도 안정성을 확보할 수 있도록 규정하고 있다.

3. 투과형 사방댐의 형식 및 설계법

3.1 투과형 사방댐의 형식

투과형 사방댐이란 계류의 수리적 연속성이 손상되지 않고, 평상시에 토사는 유하시키고, 토석류(유목)를 포착 또는 홍수 시에 토사유출을 조절하는 사방댐을 말한다. 투과형 사방댐은 설치 위치 및 기능에 따라 투과형 모듈러 강제사방댐, 슬릿사방댐, 골막이 등으로 나뉘며 현지 조사를 통하여 필요한 기능에 따라 사방댐의 형태를 선정한다. Fig. 3의 버트리스(Buttress)나 슬릿(Slit)형식은 부재를 공장제작 후 현장에서 조립하는 공법으로 가장 많이 사용되는 형식이지만, 강재로 이루어져 공사비가 높고 부식에 대한 대책이 필요하다.

사방댐은 토석류 이동제어로 매년 쌓이는 토석류 준설, 상하류 생태단절, 주변환경과의 부조화, 미관불량 등의 문제점들이 나타나고 있어, 최근에는 차단위주의 사방댐에서 개방형사방댐이 각광 받고 있다.

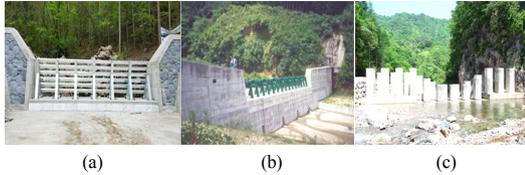


Fig. 3. Type of permeable debris control dam
(a) Buttress (b) Slit (c) Eco-Pillar

특히, 에코필라 사방댐은 부식의 우려가 없으며 상하류간 소통을 통해 어류, 양서류 등 동물의 이동이 자유롭고 자연경관과 조화로운 뿐만 아니라, 폭우시 상류의 토석류 및 유목의 지지효과도 우수한 것으로 나타났다. 중력식 콘크리트 사방댐의 48%, 다기능사방댐의 71%의 사업비가 소요되어 경제적인 형식이다[7].

그러나, 기존의 시공법은 거푸집을 조립하고 현장타설 콘크리트를 양생하는 방법으로 시공되므로 품질확보가 어렵고 경제성이 저하되는 문제가 발생되고 있다. 따라서 본 연구에서 프리캐스트로 제작된 에코필라 부재를 현장에서 조립하는 공법을 제시하였다. 프리캐스트 에코필라 공법은 현장타설 공법에 비해 단순한 공종으로 공기단축과 공사비 절감, 가시설 최소화, 일정한 품질 확보, 표면연출 등이 가능하여 현장 적용성이 높을 것으로 예상된다.

3.2 콘크리트 투과형 사방댐의 설계법

기존의 투과형 사방댐은 원칙적으로 콘크리트의 사용을 배제하였으나[9], 프리캐스트 에코필라 사방댐은 콘크리트에 대한 부재설계가 필요하므로, 콘크리트 구조설계 기준에 따라 강도설계법을 적용하였다. 소성이론에 의해 부재를 파괴 상태로 만드는 극한하중 하에서 구조물의 파괴 형상을 예측 하는 설계법인 강도설계법에서 강도는 식(6)과 같이 극한 단면력에 대한 최대 저항 능력을 갖는 부재단면의 강도를 의미한다.

$$M_d = \phi M_n \geq M_u \quad (6)$$

여기서, M_n 은 공칭강도, M_u 는 소요강도, M_d 는 극한 외력으로 설계된 부재의 공칭강도에 강도감소계수(ϕ)를 곱한 강도이다[16].

기존의 에코필라 사방댐은 구조계산 없이 경험적으로 설계되어, 설계외력 산정에 대한 명확한 기준이 없으므로, 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 설계외력 산정방법을 제시하고 구조해석을 통해 최대 단면력을 산출하였다.

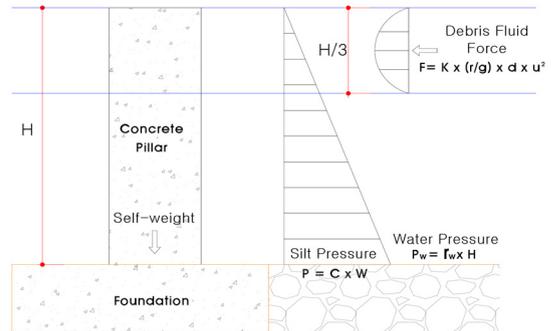


Fig. 4. Design force estimation for eco-pillar debris barrier

토석류시 하중종류에 따른 조합은 기존의 설계법과 같이 적용하였으며, 토사압과 유체력에 대한 하중증가계수는 1.2D(Dead)+1.4H(Earth)+1.4W(Water)를 적용하였다.

에코필라 사방댐의 경우 상류측 하저와 기초부의 높이가 동일하므로, 퇴사압과 정수압은 기둥 전체에 작용하는 하중으로, 토석류의 유체력은 기둥 높이의 H/3을 수심으로 보고 정량적으로 산정하도록 제시하여 설계편의와 추가적인 안정성을 고려하였다.

4. 프리캐스트 에코필라 설계

4.1 단면가정

프리캐스트 에코필라의 설계를 위해서는 유역면적에 따른 토석류의 피크유량 산정에 따라 설계외력이 산출되는 것이 일반적이나, 본 연구의 목적은 에코필라 사방댐의 프리캐스트 시공에 초점을 두고 있으므로 특정지역에 기 설계된 자료를 이용하였다.

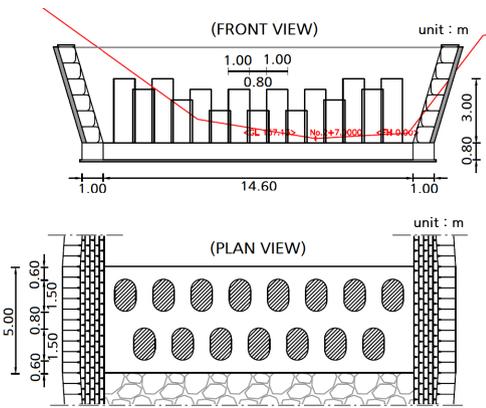


Fig. 5. Overview of eco-pillar debris barrier

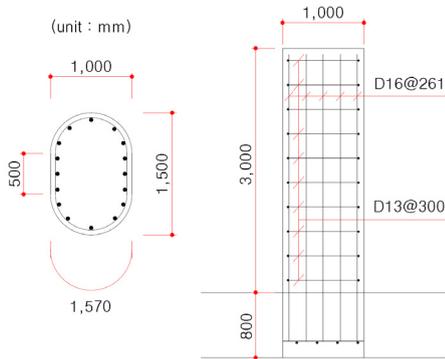


Fig. 6. Cross-Section and reinforcement for eco-pillar of existing type

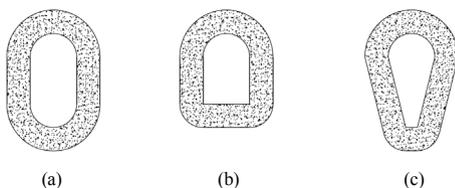


Fig. 7. Proposed hollow section shapes
(a) Track Section (b) Horseshoe Section
(c) Water Drop Section

Fig. 5는 강원도 고성군 현내면 화곡지구에 기 시공된 현장타설 에코필라 사방댐의 제원을 나타내며, 동일한 제원으로 프리캐스트 제작 및 시공을 위한 효과적인 단면을 제안하고 구조적 안정성에 대해 검토하였다.

에코필라 사방댐은 2열 배열된 기둥으로 인해 토석류나 유압물이 2차적으로 걸리는 구조로 배치된다. Fig. 6은 기둥의 단면과 경험적 배근방식이 적용된 철근배치

도를 나타낸다. 상류측의 우수저항력 저감을 위한 단면 형상을 Fig.7에 나타내었다. 항력계수가 가장 낮은 물방울 형식이 가장 효율적이나, 중공트랙 형과 말발굽 형 모두 현장여건과 미관을 고려하여 선택적으로 적용할 수 있으며, 주변 자연환경과 조화롭게 다양한 높이로 계획할 수 있다. 본 연구에서는 기존 에코필라 사방댐의 외형과 같은 중공트랙 형 단면을 적용하였다.

4.2 하중산정 및 설계

선정된 중공트랙형 단면기둥의 설계외력 산정을 위해 최대길이 L=3.0m를 기준으로 기둥간 거리 1.8m를 유효폭으로 적용하였고, 최대모멘트 산정시 기둥의 자중은 고려하지 않았다. 퇴사압은 내부마찰각 5°이하, 단위중량 19kN/m³인 모래진흙으로 가정하여 토사계수 1.0과 수중단위중량을 적용하였다. 토석류위 유체력산정을 위해 계수K는 1.0을 적용하고 유속은 최우일 등(2012)이 우면산 산사태를 경험식으로 추정한 결과[17]와 비교적 완만한 경사를 갖는 고성군의 지역현황을 감안하여 20% 저감된 11 m/s를 적용하였다. Fig.8은 퇴사압과 수압, 유체력에 대해 하중계수가 적용된 극한모멘트 산정도를 나타낸다.

기존의 에코필라 사방댐은 구조계산서 없이 경험적으로 설계되었고, 단면에 대한 최적화 설계는 유압물 저지나 생태환경을 위한 투과율 유지관점에서 무의미 할 수 있다. 따라서, 중공트랙형 기둥에 대해 강도설계법에 따른 주철근으로 외측에 D16, 내측에 D13철근을 적용하여 공칭 휨모멘트강도 818.5 kN·m를 확보하였으며, Fig. 9에 구조계산 결과에 따른 철근배치도를 나타내었다.

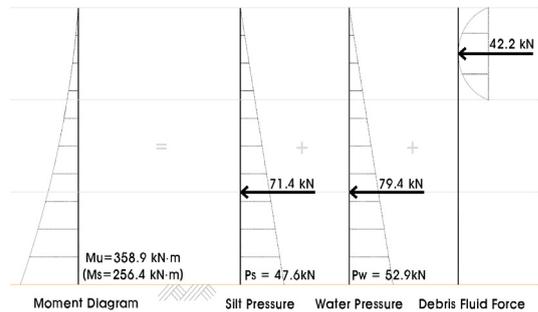


Fig. 8. Maximum bending moment diagram according to external force

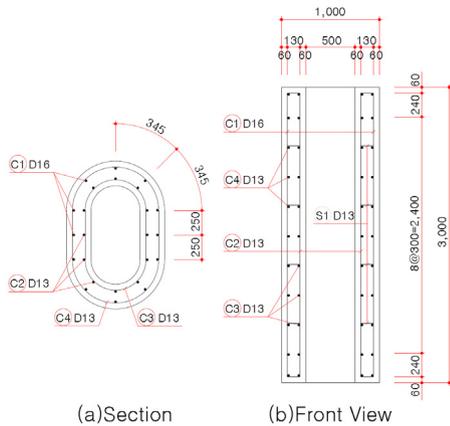


Fig. 9. Reinforcement drawing of column with hollowed track section

4.3 기초-기둥 연결 공법

프리캐스트 에코필라 사방댐은 비교적 단순한 캔틸레버 구조로 기둥부 하단에 최대 단면력이 발생하게 된다. 기존의 에코필라 사방댐의 경우 기초부와 기둥부 모두 철근 및 거푸집의 현장조립 후 콘크리트를 타설하고 양생하여 시공이 완료되지만, 프리캐스트 에코필라 사방댐은 사전에 시공된 기초부 상단에 프리캐스트 기둥부재를 연결시켜 시공성과 공기를 단축시키는 목적으로 제안되었으므로, 기초와 기둥간 연결부 강도를 확보하는 것이 핵심기술이라 할 수 있다.

프리캐스트 공법은 건축물이나 교량뿐만 아니라 지하주차장, 빗물저류시설, 피암터널, 대형암거 등 다양한 구조물들의 급속시공과 품질확보를 위해 적용되고 있으며, 각각 별도로 제작된 부재가 현장으로 운반되어 연결되기 때문에 구조적으로 연결부의 강성을 확보하는 공법개발이 요구된다.

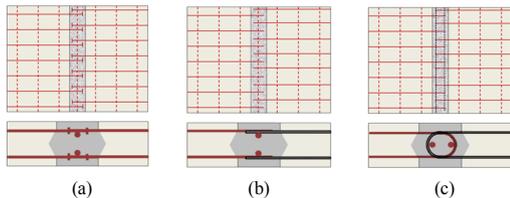


Fig. 10. Example of panel-to-panel connection details
 (a) Headed Reinforcement
 (b) Strait Reinforcement
 (c) Hairpin Reinforcement

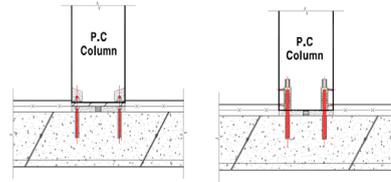


Fig. 11. Example of column member connection method

슬래브나 데크와 같은 수평부재에 대한 연결은 Fig. 10과 같이 철근의 일부를 연결면 밖으로 노출시키는 다양한 방법이 제시되고 있으나[18], 에코필라 사방댐과 같은 수직부재에 대한 연결은 Fig. 11과 같이 연결부를 강재로 보강한 후 커플러나 앵커철근을 이용하여 연결하는 방법이 주로 이용되고 있다. 본 연구에서는 연결공법을 제안하고 구조해석과 실험을 수행하여 상대적인 평가를 실시하였다.

즉, 기둥과 기초의 철근을 연속화 시키는 공법인 커플러를 이용한 이음공법과 연결부의 강성을 극대화시킬 수 있고 수평부재의 연결에 일반적으로 이용되는 루프철근 이음공법, 그리고 독립적인 앵커철근을 이용한 연결공법에 대한 연구를 수행하였다.

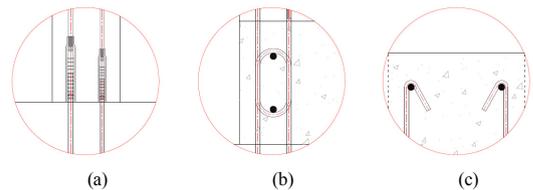


Fig. 12. Proposed connection method
 (a) Coupler (b) Loop Reinforcement
 (c) Anchorage

Fig. 12의 커플러 연결공법(a)은 기둥과 기초간 연결부 철근의 연속구조로 휨에 저항하고 커플러 내부를 그라우팅하여 현장타설 콘크리트 사용을 배제한 공법이며 사용실적도 풍부하지만, 정밀도 확보가 어려워 중공부 내부부 철근의 배근오차를 감안한 정밀시공이 요구된다. 루프철근을 이용한 연결공법(b)은 상하간 루프철근이 겹치도록 구성되고 현장타설 콘크리트를 적용하여 연결부 강성이 확보되며 모재보다 높은 강성확보가 가능하다. 다만, 현장타설부 양생완료시점까지 독립된 지지가 가능하도록 추가적인 부재설계가 필요하다. 앵커식 연결공법(c)은 상기 두연결공법과 달리 독립된 강성을 갖도록 구성되며 중공부 내부에 앵커철근이 배치되어 거푸집이 불

필요하고 시공성 극대화가 가능한 공법이다. 그러나, 상하철근의 이음이 연속되지 못하고 철근의 정착에 의존하므로 강도가 비교적 낮아 최소한의 요구강도가 확보되도록 철근량과 매입길이 조절이 요구된다.

4.4 구조해석 및 검토

세 가지 연결공법의 평가를 위한 모델링과 해석에 범용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS[19]를 사용하였고, standard 옵션을 이용하여 3차원 비선형 해석을 수행하였다. 콘크리트 비선형 거동을 위한 재료 모델로 콘크리트의 단순변형과 인장균열을 표현하는데 이용되는 smeared cracking 모델을 적용하였다. 철근은 선형 탄성 거동을 보이다가 항복 후 완전 소성 거동을 나타내도록 Embedded region 구속조건에 따라 콘크리트 모델 내부에서 연결되었다.

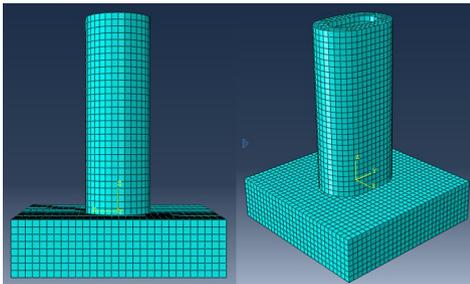


Fig. 13. Concrete modeling by solid element

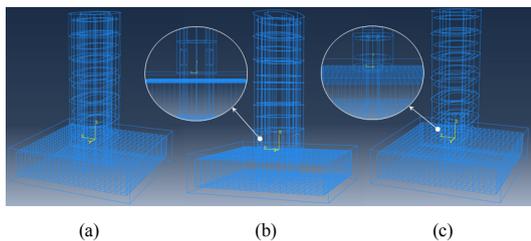


Fig. 14. Concrete and steel-bar modeling
(a) Coupler (b) Loop Reinforcement
(c) Anchorage

콘크리트 기둥과 기초는 Fig. 13과 같이 8절점 solid 요소를 이용하여 모델링하였고 철근은 beam요소를 이용하여 Fig. 14와 같이 제안된 연결공법에 따라 세가지 모델을 생성하였다. 기초하단을 고정단으로 두고 기둥상단에 수평하중을 변위제어방식으로 적용하여 비선형 해석을 수행하였다.

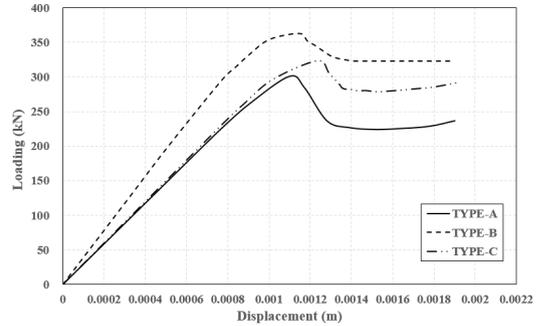


Fig. 15. Load-displacement curve

해석결과, 세가지 연결부 모델의 하중-변위 관계 그래프는 Fig. 15와 같으며, 각 모델은 변위 0.001~0.0013m 일 때 최대하중을 나타내었고, (b)의 루프 이음된 모델 (TYPE-B)이 362.71 kN으로 가장 큰 강성을 가진 것으로 평가되었다.

(a)와 (c) 모델은 선형 범위 내에서는 비슷한 양상을 나타내었으나, 발생변위 0.008 m 이후로 차이를 보이며 (a)철근 연속화 모델(TYPE-A)은 0.0011 m 변위에서 301.31 kN, (c)앵커식 연결모델(TYPE-C)은 0.0012 m 변위에서 323.34 kN의 최대하중을 나타내었다. 따라서 독립적인 앵커를 통해 연결하는 공법도 연결부 강성이 우수한 성능을 보이며, 모든 모델이 설계하중 넘어서는 충분한 강성을 가진 것으로 분석되었다.

5. 실물모형 재하실험

5.1 실험개요

에코필라 사방벽은 콘크리트 기둥(필라)간 유압물이나 토석류를 차단하는 시설로 앞절에 언급한 작용 외력에 저항하도록 설치되어야 한다. 기둥은 상단에 직접적으로 작용하는 외력이 없는 단순한 캔틸레버식 휨부재로 최대응력이 기초와 기둥의 연결부에서 발생된다. 프리캐스트 공법의 적용을 위해서는 기 생성된 기초상단과 기둥간 연결부 강성확보가 관건이므로, 본 연구에서 제시한 3가지 연결공법에 해당되는 실물 실험체를 제작하고 휨실험을 통해 성능을 검토하였다. 실험방법은 Fig. 16과 같이 기둥부 끝단에서 1000 kN 용량의 만능재하시험기(universal testing machine)를 사용하여 수직재하로 기초와 기둥 연결부에 휨모멘트가 작용하도록 계획하였으며, 반복해서 3가지 실험체에 대한 휨실험을 수행하였

다. 기초부의 회전을 구속하기 위해 별도로 제작된 지그를 사용하였고, 실험체의 이동과 거치에는 50톤급 크레인과 추레라가 이용되었다.

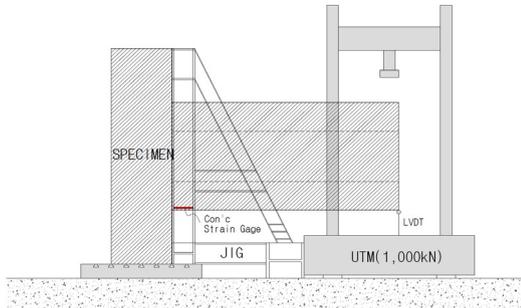


Fig. 16. Side view of test setup and specimen layout

5.2 실험체 설계 및 계측계획

실험체의 기초부는 극한하중 도달전에 파괴되지 않도록 강도설계법에 따른 철근 보강을 통해 충분한 강성을 확보하였으며, Fig. 17과 같이 연결부 철근을 고려하여 기초부의 크기는 최소화 하였다.

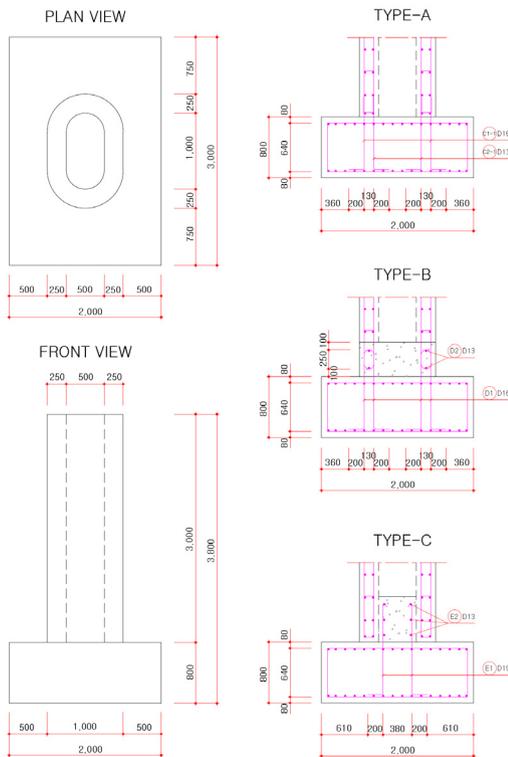


Fig. 17. Side view of test setup and specimen layout

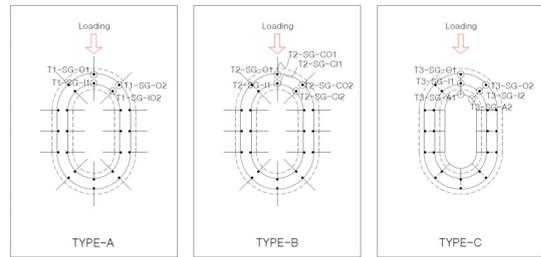


Fig. 18. Steel strain gage layout by specimen types



Fig. 19. Manufacture and setup of test specimen

기둥끝단 하부에 처짐계(LVDT), 연결부 콘크리트 하단 부분에 콘크리트 변형률 게이지(strain gage)를 설치하였고, Fig. 18과 같이 연결부 철근에 변형률 게이지를 설치하였다.

실험체는 기초부 24 MPa, 기둥 및 연결부는 40 MPa의 설계기준강도로 제작 되었다. Fig. 19는 프리캐스트로 제작된 기둥을 기초부에 연결하는 장면과 실험체를 세팅하는 모습을 나타낸다.

Table 2. Loading and bending moment by step

STEP	Bending Moment (kN · m)	Axial Load (kN)	Remarks
1	100.5	0	Self-weight
2	358.4	86.1	Design Strength
3	591.1	163.5	Crack
4	818.5	293.3	Fracture

기둥과 기초 연결부에 발생하는 최대 휨모멘트를 기준으로 Table 2.와 같이 각 단계별로 가력하여 균열, 항복, 파괴에 대한 거동을 관찰하도록 계획하였으며, 기둥부 측면재하 실험이므로 자중으로 인한 휨모멘트 100.5 kN · m가 가력하기 전에 1단계로 작용하는 것으로 보았

고, 2단계에서 설계강도 358.9 kN·m에 도달하도록 86.1 kN, 균열예상 모멘트시 163.5 kN, 파괴 도달시 293.3 kN로 가력되도록 하였다.

또한, 실험은 초당 0.02mm의 변위 제어 방식으로 수행하였으며, Fig. 20은 실험크기의 에코필라 실험 장면을 나타낸다.



Fig. 20. Experimental view of real-scale specimen

5.3 실험결과 및 분석

변위제하로 수행된 연결부 휨성능 실험에 대한 결과는 실험지그의 회전속도가 불안정하여 실험체의 파괴거동을 관찰하지는 못하고 가력이 가능한 범위까지만 실험이 수행되었다. 따라서, Fig. 21 그래프에 나타난 것과 같이 각 실험체별로 더 이상 가력되지 않는 하중을 최대 값으로 산출하였으며, Table 3에 연결부로 환산한 휨모멘트 강도를 나타내었다. 3가지 실험체 모두 극한하중에 따른 휨모멘트 358.9 kN·m를 넘어서는 충분한 성능을 나타내었다.

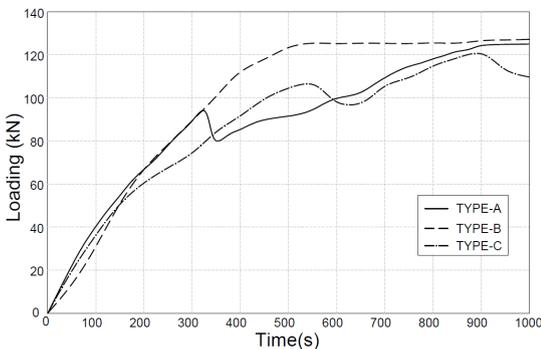


Fig. 21. Load-time relationship curve

Table 3. Results of test to evaluate for precast eco-pillar debris barrier

Specimen	Max. Loading (kN)	Conversion Moment (kN·m)	Ultimate Moment (kN·m)	Remarks
TYPE-A	126.79	480.87	358.9	OK
TYPE-B	128.39	485.67		OK
TYPE-C	116.34	449.52		OK

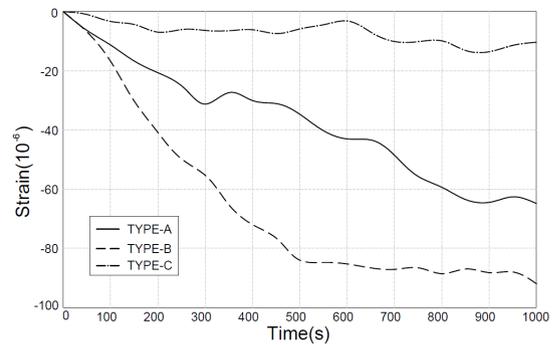


Fig. 22. Con'c strain-time relationship curve

Fig. 22는 연결부 하단에 설치한 콘크리트 변형률 게이지의 측정 결과를 나타내며, 앵커식 연결공법은 기초부와 기둥부간 분리된 구조이므로 가장 작은 값을 보였고, 상대적으로 루프철근 이음 실험체에서 콘크리트 압축 변형률이 크게 나타났다.

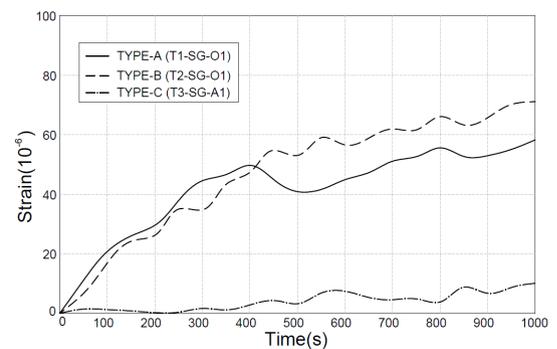


Fig. 23. Steel strain-time relationship curve

Fig. 23은 철근변형률 계측결과를 나타낸다. TYPE-A와 TYPE-B는 기둥부 최외측 인장철근, TYPE-C는 앵커 철근에서 계측된 결과로 각 실험체별로 최대 변형율을 나타내었다.

결과적으로 프리캐스트 공법의 연결부 성능실험에서

3가지 실험체는 모두 Table 3.과 같이 극한하중을 넘어서는 충분한 강성을 가진 것으로 나타났으며, 해석결과와 동일하게 선형탄성범위 내에서 루프철근 연결된 TYPE-B 실험체가 가장 강성이 크고 TYPE-A와 C의 차이는 작은 것으로 나타났으나, 시공성 측면에서는 TYPE-C가 가장 우수한 공법임을 실험체 제작과정을 통해 확인하였다.

6. 결론

본 연구는 현장타설 콘크리트를 사용하는 친환경 에코필라 사방댐의 시공성과 경제성을 향상시키기 위하여 프리캐스트 시공법 개발을 목표로 수행되었다. 경험적 설계를 대체할 수 있는 설계외력산정 방안 제안을 통해 단면설계를 수행하였고, 기초-기둥간 연결공법을 제시하였으며, 각 공법별 구조해석과 휨성능 평가를 위한 실물 실험을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 친환경 에코필라 사방댐의 프리캐스트 공법을 위한 유수저항최소, 자중저감 및 강성증대 기둥단면으로 중공부를 두었으며, 기초-기둥간 현장 조립을 위한 연결부 상세 3가지를 제시하였다.
2. 에코필라 사방댐에 대한 설계외력 산정기준을 제시하였고, 콘크리트 설계기준의 강도설계법을 적용하여 단면설계를 수행하여, 콘크리트 기둥부재가 도입되는 사방댐형식의 설계에 활용할 수 있도록 하였다.
3. 연결부 공법에 따른 3차원 비선형 구조해석 결과 모두 극한하중을 넘어서는 강성을 보였으며, 루프철근 연결공법이 최대하중 362.71 kN을 보여 강성이 크게 나타났고, 앵커식 연결공법도 약 12%정도 작게 나타났으나, 일반적인 철근이음 공법보다는 우수한 것으로 나타났다.
4. 연결부 휨성능 실험결과 3가지 실험체 모두 극한하중상태에서 발생하는 설계 휨 모멘트 358.9 kN·m이상의 성능을 나타내었고, 프리캐스트 실물모형 제작을 통해 시공중 나타나는 문제점과 특성을 분석한 결과 시공성 면에서 앵커식 연결공법이 가장 우수한 것으로 평가되었다.
5. 향후, 본 연구의 실험범위에 대한 한계를 보완하는

실물실험에 대한 추가연구가 필요하며, 제시된 설계법을 적용할 경우 외력에 비하여 충분히 안전측 단면설계가 이루어질 것으로 기대되나, 현장 여건에 따라 고려할 충격력 적용에 따른 성능평가와 표준화를 통한 단면 최적화 및 경제성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Y. H. Kim, C. G. Yeo, G. S. Seo, J. W. Song, "Estimation of Regional Probable Rainfall based on Climate Change Scenarios", *Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 11, no. 3, pp. 29-35, June, 2011. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2011.11.3.029>
- [2] W. B. Sim, S. H. Ji. *Analysis of vulnerability to heavy rainfall due to climate change and urban disaster prevention plan*. KRIHS policy brief, no. 388, Korea Research Institute for Human Settlements, 2012.
- [3] Korea Forest Service, "Unforeseen Flood of Valley will be predictable", Press release, January, 2016.
- [4] H. J. Kim, K. N. Jin, Y. B. Park, J. B. Park, J. S. Jeong, H. S. Lim, Y. J. Kim, S. J. Hwang, "A Review of Design Criteria of LH Infrastructures Due to Climate Change", p.55, Korea Land & Housing Corporation, 2015.
- [5] C. Y. Lee, *Earth and Sand of Mountain Region's Disaster Theory*, p.196, Kuhminsa, 2014.
- [6] S. K. Choi, J. M. Lee, H. B. Jeong, J. H. Kim, T. H. Kwon, "Effect of Arrangement of Slit-type Barriers on Debris Flow Behavior: Laboratory-scaled Experiment", *Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 15, no. 3, pp. 224, June, 2015. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.3.223>
- [7] Korea Forest Service, "Debris Control Dam, Establishment Completion contribute to accident prevention program Before rainy wet season", Press release, June, 2010.
- [8] G. B. Koo, M. S. Kim, C. Kim, S. M. Yu, "A Study on Type Classification of Erosion Control Dam using Ecosystem Connectivity", *Journal of Korean Forest Society*, vol. 100, no. 3, pp. 484, 2011.
- [9] W. H. Kim, B. W. Song, B. S. Kim, J. H. Kim, K. H. Lee, "The Points of Issue and Countermeasure for Sediment Control Dam Designs", *International Symposium on Urban Geotechnics*, Incheon, Korea, pp. 1062-1064, September, 2009.
- [10] W. H. Kim, B. W. Song, B. S. Kim, T. H. Kang, "Design Method of Permeable Debris Control Dam in Korea", *Korea Association of Professional Engineers in Soil Mechanics & Foundation Engineering Autumn National Conference*, pp. 118-119, 2010.
- [11] Korea Water Resources Association, *Commentary of rivers design standard*, 2009.
- [12] Ministry of land, Infrastructure and Transport KOREA,

Load design manual of mountain area. 2007.

- [13] N. Osanai, H. Mizuno, T. Mizuyama, “Design standard of control structures against debris flow in Japan”, *Journal of Disaster Research*, vol. 3, no. 3, pp. 307-314, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.20965/jdr.2010.p0307>
- [14] Land & Housing Institute, “A Review of Design Criteria of LH Infrastructures Due to Climate Change”, Research Report, 2015.
- [15] D. Rickenmann, “Empirical relationships for debris flows”, *Natural Hazard*, vol. 19, pp. 47-77
- [16] Korea Concrete Institute, *Explanation of concrete structure standard*, 2012.
- [17] W. I. Choi, S. G. Lee, B. K. Lee, S. J. Jang, “ A Study of Vulnerability of Structure by Debris Flow”, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 12, no. 3, pp. 141-144, June, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2012.12.3.141>
- [18] S. Aaleti, B. Petersen, S. Sritharan, “Design guide for precast UHPC waffle deck panel system, including connections”, no. FHWA-HIF-13-032, 2013.
- [19] ABAQUS/Standard User’s Manual-Version 6.2., ABAQUS, Inc., Pawtucket, R. I., 2001.

김 현 기(Hyun-Gi Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 9월 : 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2005년 10월 ~ 2012년 11월 : (주) 동호 기술연구소/구조부 부장
- 2016년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 해상풍력발전, 교량공학