

프리캐스트 세그먼트를 이용한 조립식 수로암거구조물의 역학적 거동 특성

이규필¹, 황재홍², 신휴성^{3*}, 홍세균⁴

Mechanical behaviour of waterway culvert structure assembled by precast segments

Gyu-Phil Lee, Jae-Hong Hwang, Hyu-Sung Shin, Se-Kyun Hong

Abstract Due to the characteristic of culvert structure, the standard section of the culvert has been established and applied in field. However, this becomes a limitation in selecting a section design corresponding to various field conditions although it can improve the design and applicability of culvert structure. In order to overcome this limitation, we have developed the design and application technology of culvert structure corresponding to the field conditions that various shapes of culvert structure can be covered by assembly of precast segments. Because the structural characteristics of assembling-type waterway culvert structure, the thickness of structure and amount of reinforcing rods can vary according to the fixation or internal hinge status in the connection part of precast segments. This has a strong influence on the applicability and economic efficiency of culvert structure. Accordingly, in order to suggest a reasonable modeling technique of segment connection parts, this study has conducted the field experiment and numerical analysis. According to the results of field experiment and numerical analysis, the slab, wall and base slab with mortar splice sleeves have shown that the assembling-type of waterway culvert structure behaves like an integrated structure.

Keywords: Assemble waterway, waterway culvert structure, precast segment, mortar splice sleeve

요 지 암거구조물의 특성상 암거 표준도가 제정되어 실무에 활용되고 있다. 그러나 이는 암거구조물의 설계 및 시공성을 향상시킬 수 있으나, 다양한 현장조건에 부합하는 단면형상의 선정에 제약조건으로 작용하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 프리캐스트 세그먼트 조립을 통하여 다양한 형상의 암거구조물 시공이 가능한 현장 대응형 암거구조물 설계 및 시공기술을 개발하였다. 조립식 수로암거구조물의 구조적 특성상 프리캐스트 세그먼트의 연결부가 고정 또는 내부힌지 거동 여부에 따라 부재의 두께, 철근량 등이 변화하게 되며, 이는 시공성 및 경제성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 세그먼트 연결부의 합리적인 모델링 기법 제시를 위하여 현장실험 및 수치해석을 수행하였다. 현장실험 및 수치해석 분석 결과, 몰타르 충전식 슬리브를 이용한 슬라브, 벽체, 기초판 프리캐스트 세그먼트는 연결시공을 통하여 조립식 수로암거구조물은 일체화된 구조물로 거동하는 것으로 나타났다.

주요어: 조립식 수로, 수로암거구조물, 프리캐스트 세그먼트, 몰타르 충전식 슬리브

1. 서 론

프리캐스트 세그먼트를 이용한 암거는 현장타설 암거와 비교하여 급속시공이 가능하고, 공기를 단축할 수 있는 장점이 있어 최근 배수우수 및 하수 암거설치 공사에 널리 사용되고 있다. 단순반복적으로 시공되는 암거구조물의 특성상 통로 1련~2련 암거, 수로 1련~3련 암거

표준도(국토해양부, 2008)가 제정되어 실무에 활용되고 있다. 그러나 통로암거의 경우 최대 폭 6.0 m×높이 4.5 m, 수로암거의 경우 최대 폭 5.0 m×높이 5.0 m로 제한되어 있다. 이는 암거구조물의 설계 및 시공성을 향상시킬 수 있으나, 다양한 현장조건에 부합하는 단면형상의 선정에 제약조건으로 작용하게 된다.

본 연구에서는 상기 문제점을 해결하고 경제성 및 시공성 향상을 위하여 프리캐스트 세그먼트 조립을 통하여 다양한 형상의 암거구조물 시공이 가능한 현장 대응형 암거구조물 설계 및 시공기술을 본 연구에서 개발하였다. 프리캐스트 세그먼트를 이용한 조립식 암거구조

¹정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 연구원

²정희원, 오바야시건설 생산기술본부 도시토목기술부 주임

³정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원

⁴비회원, (주)서현컨설팅 대표이사

*교신저자: 신휴성 (E-mail: hyushin@kict.re.kr)

물 시공기술은 상부 슬라브, 벽체, 기초판 프리캐스트 세그먼트를 조립 시공함으로써, 다양한 형상의 암거구조물 시공이 가능할 뿐만 아니라, 세그먼트의 분절화를 통하여 부재의 경량화 및 시공성이 개선되었다.

사각형의 일체화된 조립식 암거구조물 시공을 위하여 상부 슬라브, 벽체, 기초판 프리캐스트 세그먼트는 시공 시 몰타르 충전식 슬리브(splice sleeve)를 이용하여 각 부재를 연결 시공한다. 이러한 구조물의 특성상 구조물 해석 및 설계 시 연결부는 내부현지로 모델링 하거나 또는 연결되는 2개의 프리캐스트 세그먼트의 주철근이 연결된 일체화 거동이 가능하도록 모델링 하여야 한다. 이러한 모델링 방법에 따라 세그먼트 부재의 두께, 철근 양 등이 변화하게 되며, 이는 시공성 및 경제성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 커플러 및 몰타르 충전식 슬리브를 이용한 프리캐스트 세그먼트 연결부의 모델링 방법에 대한 검토가 요구되므로, 본 연구에서는 현장시험 및 수치해석적 검토를 통하여 세그먼트 연결부의 합리적인 모델링 기법을 제시하였다.

2. 프리캐스트 세그먼트를 이용한 조립식 수로암거구조물 개요

수로암거 구조물은 그림 1에서 보이는 바와 같이 암거 표준도에 의한 사각형 형상이 일반적인 설계 및 시공사 레이나(이규필 등, 2008), 조립식 수로암거구조물은 그림 2에 나타난 바와 같이 절토 및 기초공 완료 후, 공장에서 제작한 기초판, 벽체 및 상부슬라브 프리캐스트 세

그먼트 조립 후에 현장 타설 콘크리트로 인버트부를 시공한 후 되메움공을 하는 일련의 공정으로 시공된다.

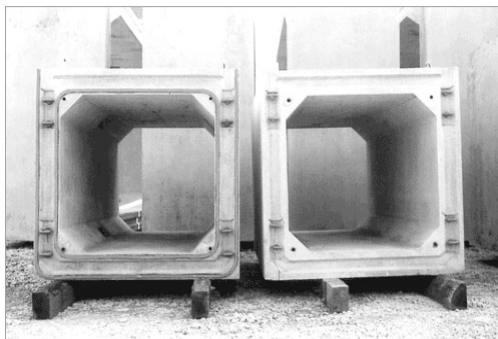
프리캐스트 세그먼트인 기초판, 벽체 및 상부슬라브를 일체화된 구조물로 시공하기 위하여, 기초판과 벽체는 2개의 강봉으로 체결하며 벽체와 상부슬라브는 몰타르 충전식 철근이음(mortar splice sleeve)을 이용하여 각 세그먼트를 체결하였다(그림 3 ~ 그림 5 참조). 또한 현장타설 콘크리트로 시공된 인버트는 그림 6에서 보이는 바와 같이 기초판 세그먼트의 공장제작 시에 설치된 커플러를 이용하여 기계적 철근이음으로 주철근을 연결하였다.

몰타르 충전식 철근이음은 강관(splice sleeve)과 이형철근 사이에 몰타르를 충전하여 이형철근의 마디에서 발생하는 응력을 몰타르를 통하여 강관으로 전달하는 방식으로 강관과 이형철근 사이에 5mm 정도의 클리어런스(clearance)가 있어 슬리브의 형상이 다른 이음보다 크게 되는 반면, 철근과 강관의 공극이 커서 시공오차의 흡수가 비교적 용이하고 철근의 신축이 없으므로 프리캐스트 부재의 이음에 적합한 방법이다(안병익 등, 2003).

3. 조립식 수로암거 구조물 현장 실험 및 수치해석

3.1 현장실험 대상 구조물 개요

본 연구에서는 몰타르 충전식 슬리브를 이용하여 프리캐스트 부재를 연결 시공시, 연결부의 거동특성을 분석하기 위하여 현장실험을 수행하였다. 대상 구조물은



(a) 1면 암거



(b) 2면 암거

그림 1. 사각형 암거구조물

www.kci.go.kr



(a) 기초판 설치 및 벽체 조립



(b) 상부 슬라브 조립



(c) 인버트 현장타설



(d) 방수공 및 구조물 완성

그림 2. 조립식 암거구조물 시공 개요

그림 7에서 보이는 바와 같이 프리캐스트 세그먼트를 이용한 조립식 직사각형 수로암거 구조물로써 폭 7.9 m, 높이 2.75 m, 연장 16 m이며, 계획 성토고는 2 m이다 (한국건설기술연구원, 2009).

3.2 현장실험 계측 개요

본 연구에서는 몰타르 충전식 슬리브(splice sleeve)를

이용하여 프리캐스트 부재를 연결시공한 수로암거구조물의 역학적 거동분석을 위하여, 프리캐스트 세그먼트 제작시 철근 스트레인이지를 설치하였다(그림 8 참조).

현장실험 및 계측을 위하여 총 56개소에 철근 및 콘크리트 스트레인이지를 설치하였다. 몰타르 충전식 슬리브를 이용한 부재 연결부가 내부인지 거동 또는 2개의 프리캐스트 세그먼트의 주철근이 연결된 일체화 거동여부에 따라 부재에 발생하는 휨모멘트가 가장 큰 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 그림 9에서 보이는 바



그림 3. 기초판과 벽체 연결을 위한 강봉 긴장

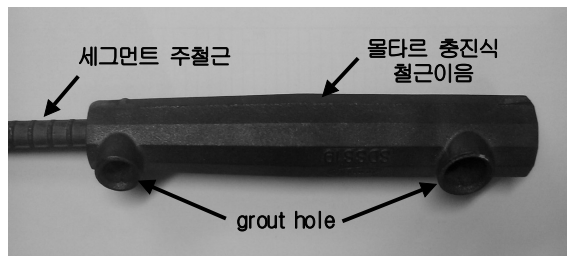


그림 4. 몰타르 충전식 철근이음

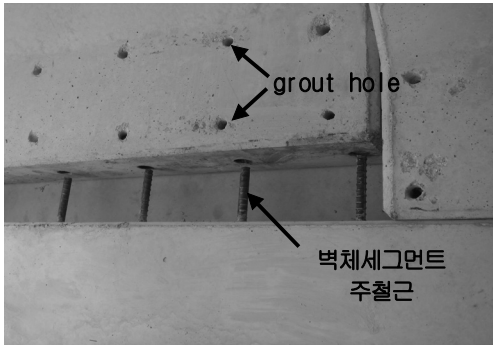


그림 5. 몰타르 충전식 철근이음 체결 전경



그림 6. 몰타르 충전식 철근이음 그라우팅 전경

와 같이 상부 및 하부 슬라브 중앙부 및 상부 슬라브 현치부 등 주요 휨모멘트 발생지점의 계측결과를 분석하였다.

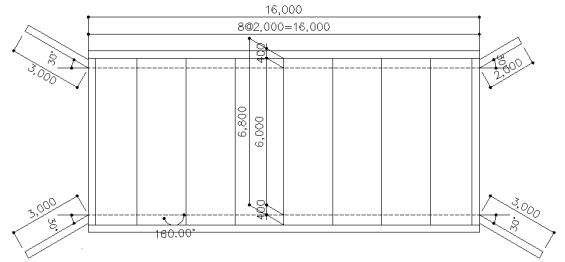
3.3 현장실험 및 결과분석

3.3.1 현장실험

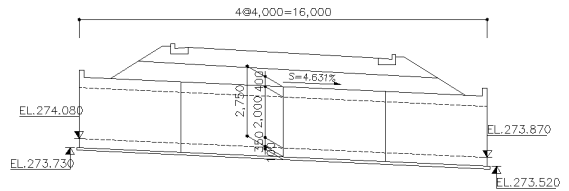
수로암거구조물의 역학적 거동분석을 위하여 화물적재 차량 후륜부를 구조물 중앙부에 위치시켰다. 현장실험과 동일한 조건에 대한 수치해석 및 결과 비교분석을 위하여 구조물에 작용하는 차량의 축하중은 그림 10에서 보이는 바와 같이 측정하였으며, 차량 후륜부 각 축의 축하중은 65 kN(=6.5 tonf)과 64 kN(=6.4 tonf)이다.

3.3.2 계측결과 분석

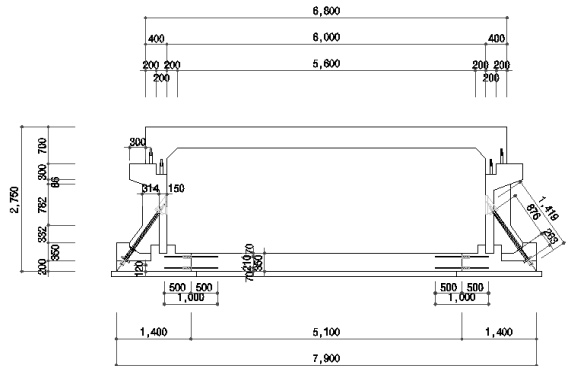
프리캐스트 세그먼트를 이용한 조립식 수로암거구조물에 대한 현장실험결과 하중재하에 의한 철근의 변형률은 표 1에서 보이는 바와 같다. 최대 변형률은 상부슬



(a) 평면도



(b) 종단면도



(c) 단면도(정면)

그림 7. 현장실험 대상 구조물 개요

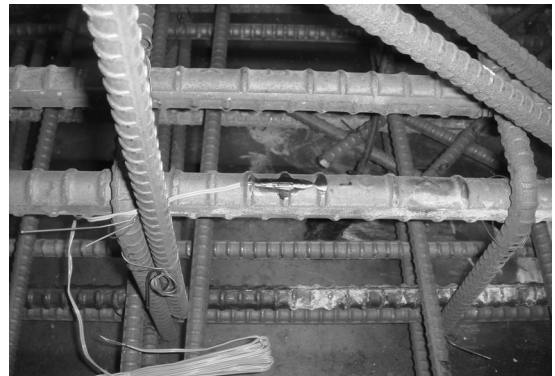


그림 8. 철근 스트레인 게이지 설치 전경

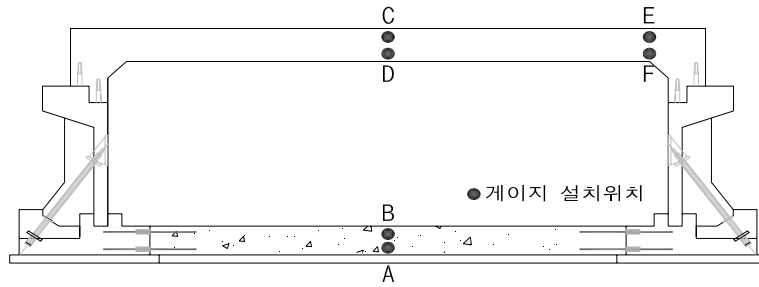


그림 9. 철근 스트레인 게이지 설치 위치



그림 10. 현장실험을 위한 축하중 측정

라브 중앙부에서 발생하였으며, 인장 및 압축변형률은 각각 31.3×10^{-6} , -25.7×10^{-6} 이다.

현장실험 결과 예측된 변형률은 철근콘크리트 구조물의 이론적 해석을 통하여 예측지점에 발생하는 휨모멘트를 산정할 수 있다. 최대 압축 변형률이 발생한 상부 슬라브 외측의 변형률이 31.3×10^{-6} 으로 압축측에 설치된 철근이 항복하지 않는 조건에 해당된다. 따라서 콘크리트가 최대변형률 0.003에 도달하기 전에 인장철근은 항복하게 되고, 압축철근의 변형률은 파괴시 극한변형률에 도달하지 않는다. 이 경우 세그먼트 부재의 압축측에 설치된 철근은 무시하고 인장측 철근만을 고려한 단

철근으로 해석할 수 있다(조효남, 1991).

본 연구에서는 현장실험결과 예측된 변형률을 토대로 수로암거구조물에 발생하는 각 지점별 휨모멘트를 계산하였다. 각 지점별 발생하는 휨모멘트는 표 2에서 보이는 바와 같이 상부 슬라브 중앙부에서 최대 100.7 kN-m의 휨모멘트가 발생하며, 상부 슬라브 현치부 및 하부 슬라브 중앙부에서 각각 -37.5 kN-m, -6.4 kN-m가 발생하는 것으로 나타났다.

3.4 수치해석기법을 이용한 현장재하실험 분석

개착식 터널구조물 및 수로암거구조물의 설계방법은, 설계상의 간편성으로 인하여 구조물에 대한 구조해석적 기법인 강성뼈대해석(rigid frame analysis)이 널리 사용되고 있다(배규진 등, 2001). 본 연구에서는 구조해석 프로그램을 활용하여 프리캐스트 세그먼트를 이용한 수로암거 구조물에 대하여 현장실험과 동일한 조건에 대한 구조해석을 수행하였다. 상부 슬라브와 벽체의 연결부는 고정조건 및 내부힌지조건 각각에 대하여 구조해석을 수행하였다(그림 11 참조). 구조해석시 프리캐스트 세그먼트는 빔요소(Beam Element)로 모델링하였으며, 설계강도 40 Mpa 조건에 대한 콘크리트 탄성계수 및 설계도면을 토대로 단면 2차모멘트를 산정하였다. 또한

표 1. 현장실험 예측위치별 변형률(3회 측정 평균치)

측정위치	변형률 ($\times 10^{-6}$)	지점	측정위치	변형률 ($\times 10^{-6}$)	지점	측정위치	변형률 ($\times 10^{-6}$)	지점
하부 슬라브 외측	0.0	A	상부슬라브 외측	-25.7	C	상부슬라브 현치부 외측	11.9	E
하부 슬라브 내측	2.0	B	상부슬라브 내측	31.3	D	상부슬라브 현치부 내측	-7.6	F

※ (+): 인장, (-): 압축

표 2. 현장실험 계측위치별 휨모멘트

지 점	휨모멘트(kN-m)	비 고
상부 슬라브 중앙부	100.7	
상부 슬라브 현치부	-37.5	
하부 슬라브 중앙부	-6.4	

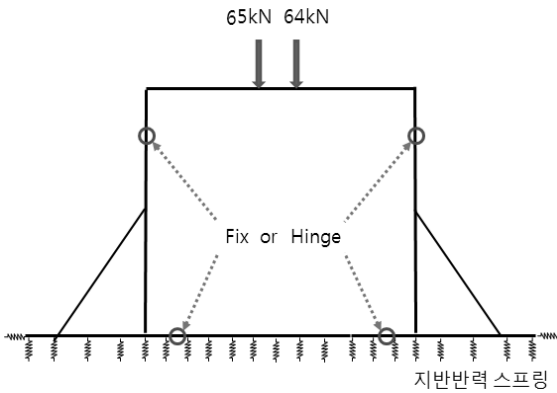


그림 11. 구조해석 개요

성토체 단위중량 19 kN/m³, 내부마찰각 30°로 조건에 대하여 연직방향 상재하중 및 정지토압 조건에 대한 횡방향 토압을 산정하였다.

수치해석시 연직방향의 지반반력계수(K_v)는 다음과 같이 산정하였다.

$$K_v = \beta K_{(B \times B)} = 0.7511 \times 280.0 \times \left(\frac{200.0}{30}\right)^{-\frac{3}{4}}$$

$$= 50.687 \text{ N/cm}^3 = 50,687 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{여기서, } K_{(B \times B)} = K_{vo} \left(\frac{B}{30}\right)^{-\frac{3}{4}}$$

$$K_{vo} = \frac{1}{30} \times \alpha \times E_0 = 280.0 \text{ N/cm}^3$$

$$E_0 = 84.0 \text{ Mpa (지반변형계수, 24N 적용)}$$

$$\alpha = 1 \text{ (상시)}$$

$$B_v = \sqrt{A_v} = \sqrt{2.0 \times 2.0} = 2.0 \text{ m} = 200.0 \text{ cm}$$

$$\beta = \frac{\left(1 + \frac{0.5B}{L}\right)}{1.5} = \frac{\left(1 + 0.5 \times \frac{2.0}{7.9}\right)}{1.5}$$

$$= 0.7511$$

여기서, $\beta \geq 1$ 일 경우 $\beta = 1$ 을 적용

K_{vo} : 지름 30 cm의 강체원판에 의한 평판재하시험 값에 상당하는 지반반력계수

α : 지반반력 추정에 사용되는 계수

β : 형상계수

구조해석결과 표 3에서 보이는 바와 같이 상부 슬라브 중앙부에서 최대 휨모멘트가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 상부 세그먼트와 벽체 세그먼트 연결부를 내부힌지 조건으로 가정한 경우 상부 슬라브 중앙부에 발생하는 휨모멘트는 약 159 kN-m로 고정조건으로 가정한 경우(약 103 kN-m)보다 약 1.6배 정도 크게 발생하는 것으로 나타났다(표 3 및 그림 12 참조).

4. 현장실험 및 수치해석 비교분석

몰타르 충전식 슬리브를 이용한 조립식 암거구조물 설계 및 시공시 구조물의 특성상 연결부의 모델링 방법은 구조물의 역학적 거동에 큰 영향을 미치게 된다. 따

표 3. 세그먼트 연결부 해석조건 변화에 따른 지점별 휨모멘트

구분	해석조건	고정조건(kN-m)	힌지조건(kN-m)	비 고
상부 슬라브 중앙부		102.7	159.2	
상부 슬라브 현치부		-47.5	-0.4	
하부 슬라브 중앙부		-14.5	-14.0	

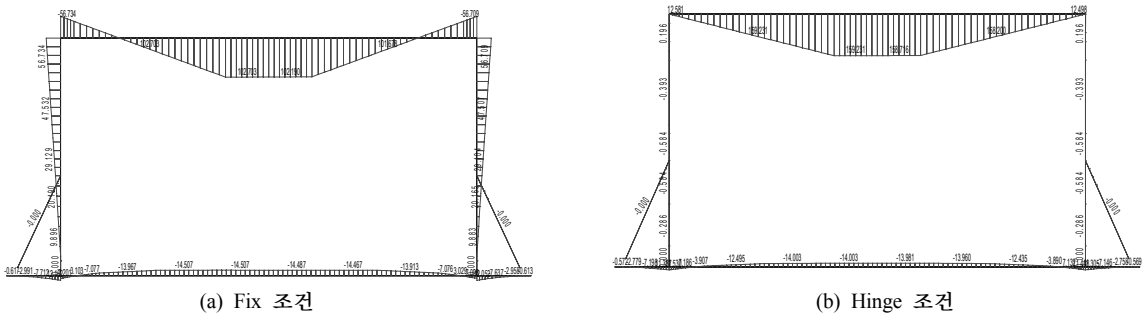


그림 12. 세그먼트 연결부 해석조건 변화에 따른 휨모멘트도

표 4. 현장실험 및 수치해석 결과비교

구분	해석조건	현장실험결과 (kN-m)	수치해석 결과			
			고정조건(kN-m)	오차(%)	힌지조건(kN-m)	오차(%)
상부 슬라브 중앙부(C,D)		100.7	102.7	2.0	159.2	58.1
상부 슬라브 현치부(E,F)		-37.5	-47.5	26.7	-0.4	98.9
하부 슬라브 중앙부(A,B)		-6.4	-14.5	126.6	-14.0	118.8

※ 오차 : 현장실험결과 기준

라서 본 연구에서는 세그먼트 연결부의 합리적인 모델링 기법 정립을 위하여 현장실험 수치해석적 검토를 수행하였다.

표 4에서 보이는 바와 같이 현장계측결과 구조물 부재에 발생하는 휨모멘트는 상부 슬라브 중앙부 100.7 kN-m, 상부 슬라브 현치부 -37.5 kN-m, 하부 슬라브 중앙부에서 6.4 kN-m로 나타났다.

수치해석결과 상부 슬라브와 벽체 연결부를 내부힌지로 가정한 경우, 구조물에 발생하는 휨모멘트는 상부 슬라브 중앙부 159.2 kN-m, 상부 슬라브 현치부 0.4 kN-m, 하부 슬라브 중앙부에서 14.0 kN-m로 나타났으며, 상부 슬라브와 벽체 연결부를 고정으로 가정한 경우, 구조물에 발생하는 휨모멘트는 상부 슬라브 중앙부 102.7 kN-m, 상부 슬라브 현치부 47.5 kN-m, 하부 슬라브 중앙부에서 14.5 kN-m로 나타났다.

현장실험결과 하부 슬라브 중앙부에서 발생하는 휨모멘트는 수치해석 결과의 약 43% 수준으로 작게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 이는 기초지반 보강을 위하여 하부에 모래치환층 20 cm 및 콘크리트층 10 cm를 타설하는 것으로 계획되었으나, 실제 시공시 모래치환층 20 cm를 콘크리트층으로 대체 시공하였다(그림 2(a)

참조). 따라서 현장타설로 시공된 하부 슬라브는 기초지반 보강을 위한 콘크리트층을 포함하여 총 60cm 두께로 시공되었으며, 실제 시공조건을 토대로 계산하면 하부 슬라브 중앙부에 -13.5 kN-m의 휨모멘트가 발생하는 것으로 나타났다.

현장계측결과 및 수치해석결과를 비교분석한 결과 몰타르 충전식 슬리브를 이용한 상부 슬라브와 벽체 세그먼트의 연결부는 2개의 프리캐스트 세그먼트의 주철근이 연결된 일체화 거동을 하는 것으로 판단된다. 또한 기초지반 보강을 위하여 타설된 콘크리트층과 현장타설로 시공된 수로암거구조물 하부 슬라브층은 일체화된 거동을 보이는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 상부 슬라브, 벽체, 기초판 프리캐스트 세그먼트를 조립 시공을 통하여 다양한 형상의 암거구조물 시공이 가능한 현장 대응형 암거구조물의 합리적인 설계기법 정립을 위하여, 몰타르 충전식 슬리브를 이용한 프리캐스트 세그먼트 연결부의 모델링 기법에 대하여 분석하였다.

참고문헌

- (1) 현장실험 및 동일한 조건에 대하여 세그먼트 연결부를 내부힌지 및 고정으로 모델링하여 수행한 수치해석결과를 비교/분석한 결과 몰타르 충전식 슬리브를 이용한 세그먼트 연결부는 세그먼트 연결부를 고정으로 모델링한 수치해석결과와 현장재하실험 결과가 유사한 것으로 나타났다.
- (2) 따라서, 본 연구대상인 프리캐스트 세그먼트를 이용한 조립식 수로 구조물은 일체화된 구조물로 거동하는 것으로 판단되며, 향후 동일한 형식의 세그먼트 조립을 통한 구조물 설계 및 시공시에는 세그먼트 연결부를 고정조건으로 모델링하는 것이 합리적이며, 따라서 이를 통하여 경제성 및 시공성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

1. 국토해양부 (2008), 도로암거표준도(설계기준표준도)
2. 배규진, 이규필 (2001), “개착식터널 라이닝 해석을 위한 모델링 기법에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, Vol. 3, No. 2, pp. 13-22.
3. 안병익, 김형기, 박복만 (2003), “몰타르 충전식 철근이음의 구속효과”, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 15, No. 1, pp. 102-109.
4. 이규필, 이성원, 신휴성, 황재홍 (2008), “리브 보강 프리캐스트 터널 Liner의 역학적 거동 특성”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, Vol. 10, No. 3, pp. 1-8.
5. 조효남, 심종성 (1991), 철근콘크리트 구조설계, pp. 101-111.
6. 한국건설기술연구원 (2009), “프리캐스트 세그먼트를 이용한 조립식 수로암거 거동계측 및 분석”, pp. 7-46.

접수일(2010.3.15), 수정일(2010.3.18), 게재확정일(2010.3.25)