

<기술노트>

수처리 콘크리트 구조물의 부력모멘트에 대한 안정성 검토

심의전*

Shim, Ui Jeon*

Stability Review on Buoyancy Moment in the Water Treatment Concrete Structure

ABSTRACT

Though the stability review of buoyancy is generally done, the stability review of buoyancy moment, which is generated from the eccentricity between the center of fixed load and that of buoyancy, is not done in the water treatment concrete structure and the architectural structure. In this review, as the buoyancy force become larger, the action point of the fixed load (ΣW) and buoyancy (B), and the reaction distribution were considered to confirm the formation of the buoyancy moment rotational point and obtained the rotational uplift stability review formula for buoyancy moment in the water treatment concrete structure and the architectural structure, and put forward the stability review method for buoyancy moment.

Key words : Buoyancy moment, Buoyancy, Stability, Eccentricity, Uplift force

초록

수처리 콘크리트 구조물과 건축 구조물 설계시 일반적으로 부력의 안정성 검토는 행해지고 있으나, 고정하중의 중심과 부력의 중심 사이의 편심으로 인한 부력모멘트에 대한 안정성 검토는 행해지지 않고 있다. 본 검토에서는 부력이 커짐에 따라 고정하중(ΣW)과 부력(B)의 합력의 작용점과 반력분포를 고찰하여 부력모멘트 회전지점의 형성을 규명함으로써 수처리콘크리트구조물과 건축 구조물의 부력모멘트에 의한 회전부상 안전율식을 도출하여 부력모멘트에 대한 안정성 검토방법을 제시하였다.

검색어 : 부력 모멘트, 부력, 안정성, 편심, 상향력

1. 서론

정수장이나 하수처리장 등과 같이 지중에 설치되고 속이 비어있는 수처리콘크리트구조물 그리고 건축 구조물 설계시 일반적으로 부력의 안정성 검토는 행해지고 있으나, 고정하중의 중심과 부력의 중심 사이의 편심으로 인한 부력모멘트에 대한 안정성 검토는 행해지지 않고 있다. 이는 수처리 콘크리트구조설계기준 해설(KCI, 2007) 및 ACI 350.4R-04 (ACI Committee 350, 2008)에서 “고정하중의 중심과 적용상향력의 중심사이의 편심도 고려하여야 한다”라고 언급되어 있으나 이에 대한 설명이 없어 실무자들이 부력모멘트에 대한 검토를 실행하기 어려웠다.

본 검토에서는 부력이 커짐에 따라 고정하중(ΣW)과 부력(B)의 합력의 작용점과 반력분포를 고찰하여 부력모멘트 회전지점의 형성을 규명함으로써 콘크리트 구조물의 부력모멘트에 의한 회전부상 안전율식을 도출하여 부력모멘트에 대한 안정성 검토방법을 제시하고자 한다.

* 중신회원·교신저자·(주)동해종합기술공사 부사장 (Corresponding Author · Donghae Engineering & Consultants Co., Ltd. · shimjngb@naver.com),
개명전 심정보(Before rename: Shim, Jeong Bo)

Received October 27, 2020/ revised November 23, 2020/ accepted January 4, 2021

2. 구조물의 회전지점 형성

2.1 부력이 작용하지 않는 경우

지하수위가 밑면의 너비 $L(m)$ × 길이 $1 m$ 인 직육면체의 수처리 콘크리트구조물의 바닥슬라브 하단 위로 올라오지 않아 부력이 작용하지 않을 때 수처리구조물의 총중량중심이 벽체의 구성이나 수처리 구조물내 수위차등으로 구조물체적중심에서 편심 e_o 만큼 떨어져 작용한다. 수처리구조물에서는 일반적으로 편심 $e_o = \frac{\Sigma W \cdot e_o}{\Sigma W - B} < \frac{L}{6}$ 이므로 반력분포는 Fig. 1과 같고 수처리구조물의 총중량 ΣW 와 평형을 이룬다.

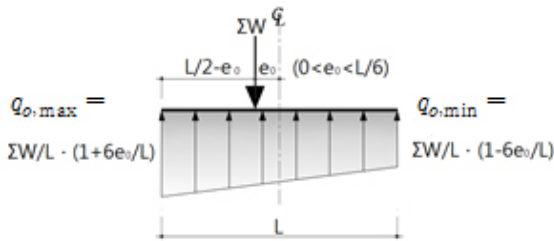


Fig. 1. Reaction Distribution (B=0)

여기서, ΣW : 구조물의 총중량(kN), B: 부력(kN), L: 구조물의 너비(m), $q_{o,min}$: 반력이 사다리꼴 분포일 때 최소 반력분포(kN/m²), $q_{o,max}$: 최대 반력분포(kN/m²), e_o : 구조물의 총중량중심과 부력의 중심 사이의 편심(m)

Fig. 1에서 구조물의 총중량 ΣW 에 의한 반력 분포는 사다리꼴 형상이다.

2.2 부력(B)이 $q_{o,min} \cdot L$ 와 같은 경우 $\left[\frac{B}{L} = q_{o,min} \right]$

구조물의 총중량 ΣW 과 부력 B와의 합력 $\Sigma W - B$ 가 구조물 체적중심에서 $e = \frac{\Sigma W \cdot e_o}{\Sigma W - B} = \frac{L}{6}$ 만큼 떨어져 작용하고 반력분포는 Fig. 2와 같이 작용하여 $\Sigma W - B$ 와 평형을 이룬다.

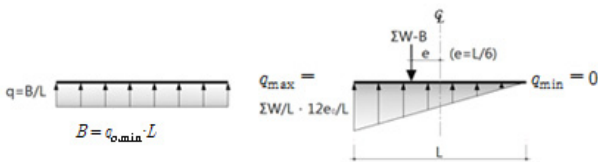


Fig. 2. Reaction Distribution $[B = q_{o,min} \cdot L]$

여기서, q : 밑면의 너비 $L(m)$ × 길이 $1 m$ 인 직육면체 구조물 바닥에 작용하는 평균수압(kN/m²)
 q_{max} : 반력이 삼각형분포일 때 최대 반력분포(kN/m²)
 $e(m)$: 구조물의 무게와 부력의 합력점과 부력의 중심 사이의 편심(m)

Fig. 2에서 구조물의 총중량 ΣW 과 부력 B와의 합력 $\Sigma W - B$ 에 의한 반력 분포는 구조물의 전폭을 밑면으로 하는 삼각형 형상이다.

2.3 부력(B)이 $q_{o,min} \cdot L$ 보다 크고 $q_{o,min} + \frac{1}{3}(q_{o,max} - q_{o,min})$ 보다 작은 경우 $\left[q_{o,min} < \frac{B}{L} < \frac{\Sigma W}{L} \left(1 - \frac{2e_o}{L}\right) \right]$

구조물의 총중량 ΣW 과 부력 B와의 합력 $\Sigma W - B$ 가 구조물 체적중심에서 $e = \frac{\Sigma W \cdot e_o}{\Sigma W - B} = \frac{L}{6}$ 과 $e = \frac{\Sigma W \cdot e_o}{\Sigma W - B} = \frac{L}{2}$ 사이에 작용하고 반력분포는 Fig. 3과 같이 작용하여 $\Sigma W - B$ 와 평형을 이룬다.

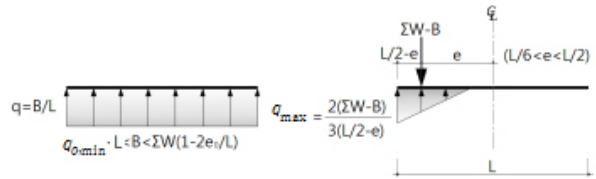


Fig. 3. Reaction Distribution $[q_{o,min} < B < \Sigma W \cdot (1 - \frac{2e_o}{L})]$

여기서 구조물의 총중량 ΣW 과 부력 B와의 합력 $\Sigma W - B$ 에 의한 반력 분포는 밑면이 0보다는 크고 L보다는 작은 삼각형 형상이다.

2.4 부력(B)이 $q_{o,min} + \frac{1}{3}(q_{o,max} - q_{o,min})$ 와 같은 경우 $\left[\frac{B}{L} = \frac{\Sigma W}{L} \left(1 - \frac{2e_o}{L}\right) \right]$

구조물의 총중량 ΣW 과 부력 B와의 합력 $\Sigma W - B$ 가 구조물 체적중심에서 $e = \frac{\Sigma W \cdot e_o}{\Sigma W - B} = \frac{L}{2}$ 만큼 떨어져 작용하고 반력은 Fig. 4와 같이 작용하여 $\Sigma W - B$ 와 평형을 이룬다. 이 때는 부력에 대해서는 안정하고, 구조물 총중량에 의한 저항모멘트와 부력에 의한 부력모멘트가 평형을 이룬 경우이다.

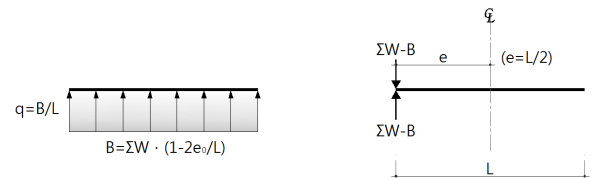


Fig. 4. Reaction Distribution $[B = \Sigma W (1 - \frac{2e_o}{L})]$

여기서 구조물의 총중량 ΣW 과 부력 B와의 합력 $\Sigma W - B$ 에 의한 반력 지점은 구조물의 왼쪽 가장자리 점 $e = \frac{L}{2}$ 이며 집중하중으로 작용한다.

2.5 부력(B)이 ΣW 와 같은 경우

$$\left[\frac{B}{L} = \frac{\Sigma W}{L} = \frac{q_{o,max} + q_{o,min}}{2} \right]$$

구조물의 총중량 ΣW 가 부력 B 보다 미소하게 크다고 가정하면 $\Sigma W - B$ 의 합력이 구조물 체적중심에서 $e = \frac{\Sigma W \cdot e_o}{\Sigma W - B} = \infty$ 만큼 떨어져 아래로 작용하고 ΣW 가 B 보다 미소하게 작다고 가정하면 $B - \Sigma W$ 의 합력이 위로 $e = \frac{\Sigma W \cdot e_o}{\Sigma W - B} = -\infty$ 만큼 떨어져 위로 작용한다(Fig. 5). 부력모멘트에 대해서는 불안정하여 $e = \frac{L}{2}$ 점을 기준으로 구조물이 시계반대방향으로 회전하여 부상하게 되고 부력에 대해서는 평형을 이룬 상태이다.

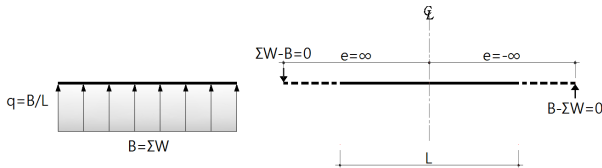


Fig. 5. Reaction Distribution [B = ΣW]

따라서, 부력이 커짐에 따라 반력의 분포를 관찰하면 직육면체 수처리콘크리트 구조물의 부력모멘트의 회전지점은 $e = \frac{L}{2}$ 의 점에 형성되는 것을 알 수 있다. 즉, 옹벽의 경우와 같이, 수처리구조물의 총중량 ΣW 와 부력 B의 합력 $\Sigma W - B$ 가 구조물 안에 작용하는 경우는 부력모멘트에 대해 안전하고, 구조물의 총중량쪽 가장자리에 작용할 때는 평형을 이루고, 가장자리를 넘어서 구조물 밖에 작용할 때는 부력모멘트에 대해서 불안정하여 구조물이 회전 부상하게 된다.

그리고 부력 B가 $[q_{o,min} + \frac{1}{3} \cdot (q_{o,max} - q_{o,min})] \cdot L < B < \frac{q_{o,max} + q_{o,min}}{2} \cdot L$ 일때, 부력 안전률(FS_{BUOYANCY})은 1 이상이나 부력모멘트 안전률(FS_{BUOYANCY MOMENT})은 1보다 작다. 그러므로 구조물이 부력에 안정하여도 부력모멘트에 대해서 불안정할 수 있으므로 부력모멘트에 대한 검토가 반드시 요청된다.

3. 부력모멘트의 안전율

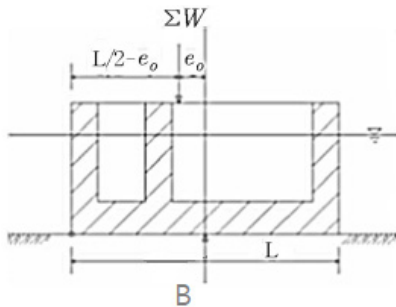


Fig. 6. Buoyancy Moment Safety Factor

구조물의 총중량 ΣW 와 부력 B와의 합력 $\Sigma W - B$ 에 의한 반력 분포를 고찰함으로써 부력모멘트의 회전지점은 부력의 중심에서 구조물 총중량 작용점쪽의 가장자리 $e = \frac{L}{2}$ 의 점에 형성되는 것을 알 수 있다. 따라서 부력모멘트에 의한 회전부상 안전율식은 다음과 같이 도출할 수 있다(Fig. 6).

$$FS_{BUOYANCY \text{ MOMENT}} = \frac{\Sigma W(\frac{L}{2} - e_o)}{B \cdot \frac{L}{2}} \quad (1)$$

여기서, B : 부력(kN)

ΣW : 구조물의 총중량(kN)

L : 구조물의 너비(m)

e_o : 부력 B의 중심과 구조물 무게중심 ΣW 사이의 편심(m)

부력모멘트에 대한 안전율식을 다시 기술하면 다음과 같다.

$$FS_{BUOYANCY \text{ MOMENT}} = \frac{\Sigma W}{B} (1 - \frac{e_o}{L/2}) \quad (2)$$

$0 \leq e_o < \frac{L}{2}$ 그리고 $\frac{L}{2} > 0$ 이므로 $0 < (1 - \frac{e_o}{L/2}) \leq 1$

$FS_{BUOYANCY} = \frac{\Sigma W}{B}$ 이므로

$FS_{BUOYANCY \text{ MOMENT}} \leq FS_{BUOYANCY}$

그러므로 구조물이 부력모멘트에 대하여 안전하다면 부력에 대하여는 항상 안전하다.

즉, 부력에 대해 안전하여도 부력모멘트에 대해 불안정할 수 있으므로 부력모멘트에 대한 안정검토가 반드시 시행되어야 한다.

4. 평면상 부력모멘트의 작용 과정

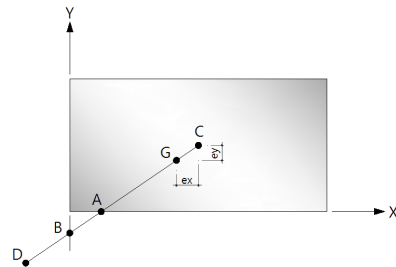


Fig. 7. Action Point of Resultant Force of the Total Weight of the Structure and Buoyancy

C점은 구조물의 체적 중심이고 G점은 구조물의 무게중심이다. 부력(B)이 점점 커짐에 따라 구조물의 총중량(ΣW)와 부력(B)의 합력($\Sigma W - B$)의 작용점은 G점에서 A점으로 A점에서 B점으로

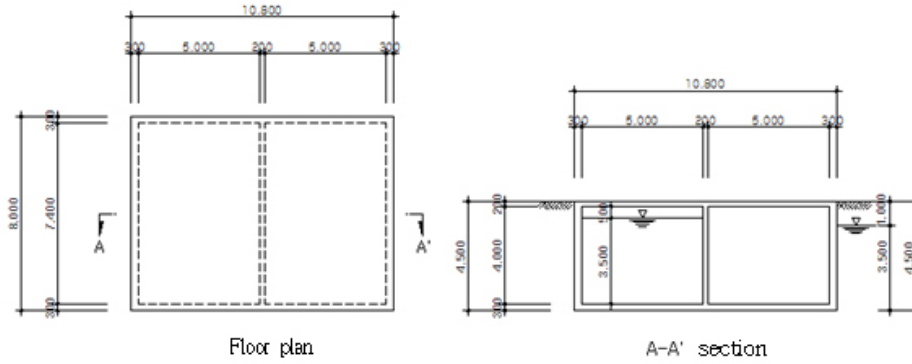


Fig. 8. SBR Reactor

B점에서 D점으로 이동하게 된다(Fig. 7).

G점과 A점 사이는 부력과 부력모멘트에 대해 안정하고 A점은 부력모멘트가 평형을 이룬 점이다. A점과 B점 사이는 부력모멘트에 불안정하여 x축을 회전축으로 구조물이 부상하는 구간이고 B점은 y축중심으로 부력모멘트가 안정을 이룬 점이다. B점과 D점 사이는 x축 및 y축 모두 부력모멘트에 대하여 불안정하여 x축 및 y축을 회전축으로 구조물이 부상하는 구간이다. D=∞일 때 구조물총중량과 부력이 평형을 이룬다. 따라서 부력모멘트에 대한 안정성 검토는 x축, y축 두 회전 축방향으로 해야 한다.

5. 사례

간략화한 SBR 반응조(Fig. 8)에서 2지중 1지를 비우는 조건으로 지하수위가 F.G.L -1 m일 때 마찰력을 무시한 안전율을 적용하여 부력안정성을 검토하면 $FS_{BUOYANCY} = 1.2 \geq 1.2$ 로 안정하다. 그러나 부력모멘트에 대한 안정을 검토하면 $FS_{BUOYANCY \ MOMENT} = 0.99 < 1.2$ 로 불안정하다. 따라서 부력에 대해 안정하여도 부력모멘트에 대해 불안정할 수 있으므로 부력모멘트에 대해 검토해야 하고 불안정할 시 부력앵카등의 대책을 세워야 한다.

6. 결론

부력의 중심에서 구조물의 총중량의 중심방향의 가장자리에 부력모멘트에 의한 회전지점이 형성되므로, 부력모멘트에 대한 회전부상 안전율(Fs)은 아래와 같이 구하여 구조물의 부력모멘트에 대한 안정성 검토를 실시할 수 있다.

$$FS_{BUOYANCY \ MOMENT} = \frac{\Sigma W \left(\frac{L}{2} - e_o \right)}{B \cdot \frac{L}{2}} \quad (3)$$

위 식으로 부력모멘트의 안정성 검토하는 데 있어서 기본적인 사항을 기술하면 다음과 같다.

- (1) 직육면체 수처리콘크리트 구조물의 부력모멘트 회전지점은 $e = \frac{L}{2}$ 의 점에 형성된다.
- (2) 구조물의 총중량과 부력의 합력이 구조물내에 작용하는 경우 부력모멘트 안전율 $FS_{BUOYANCY \ MOMENT} \geq 1.0$ 이다.
- (3) 부력모멘트는 구조물이 직육면체인 경우, 불리한 두 직교방향으로 검토해야 한다.
- (4) $[q_{o,min} + \frac{1}{3} \cdot (q_{o,max} - q_{o,min})] \cdot L < B < \Sigma W$ 일때 부력에 안정하여도, 부력모멘트에는 불안정하여 구조물이 회전 부상하게 되므로 부력모멘트에 대한 검토가 필요하다.
- (5) 편심 e_o 가 클수록 부력모멘트에 대한 구조물의 안정은 더욱 불리하게 된다.
- (6) 구조물 총중량과 부력의 중심간의 편심 e_o 가 0이 아닌 경우는 부력모멘트에 대한 안정성이 부력에 대한 안정성보다 항상 불리하다($FS_{BUOYANCY \ BUOYANCY} < FS_{BUOYANCY}$). 그러므로 부력모멘트만 검토해도 된다.
- (7) 구조물 총중량의 편심 $e_o = 0$ 인 경우 부력안전율($FS_{BUOYANCY}$)과 부력모멘트의 안전율($FS_{BUOYANCY \ MOMENT}$)은 같다. 따라서 부력만 검토해도 된다.

감사의글

이 기술노트를 쓰게 하신 하나님께 감사와 영광을 돌립니다.

References

ACI Committee 350 (2008). *Design considerations for environmental engineering concrete structures (ACI 350.4R-04)*, American Concrete Institute, PART 4, pp. 5-8.
 Korea Concrete Institute (KCI) (2007). *Water treatment structural concrete design code & commentary*, pp. 51-52 (in Korean).