

슬래브에 의하여 감소된 활하중 축력을 산정하여야 하는데 이에 대한 정해가 현재 마련되어 있지 않다.

이에 본 연구에서는 원형 구조물과 낮은 아치형 구조물을 대상으로 범용해석 프로그램인 FLAC 2D(version 3.30)를 이용하여 각 구조물에 대한 최소토피고를 산정하여 CHBDC(2001) 규정과 Abdel-Sayed와 Salib(2002)에서 제안된 최소토피고와 비교 평가하였다. 또한 상부토피에 응력이완 슬래브가 설치된 구조물에 대해 수치해석을 수행하여 슬래브의 상부토피 보강효과를 확인하였고, 수치해석을 통하여 얻어진 활하중 축력 값들을 Abdel-Sayed 등(1993)의 등가토피 환산법을 이용한 각 설계기준들의 활하중 축력 값과 비교 평가하여 각 설계기준들의 적용성을 평가하였다.

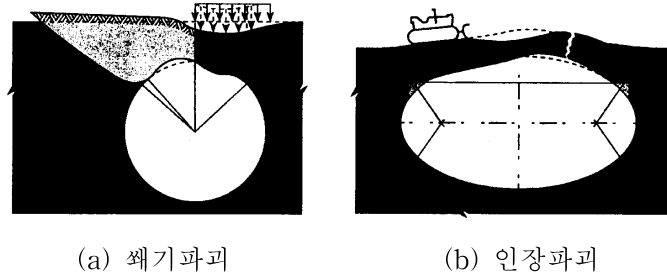


그림 1. 상부토피 지반파괴 유형

2. 수치해석을 통한 최소토피고 평가

CHBDC(2001) 최소토피고 규정의 제정배경인 Hafez와 Abdel-Sayed(1983)의 해석적인 연구결과와 대골형 강판에 대하여 수행된 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 연구결과는 모두 구조물 상부에 OHBDC 차량하중이 작용한다는 가정하여 얻어진 것이다. 현재 국내 도로교시방서(1998)에서는 OHBDC 차량하중과 하중의 크기와 분포가 다른 DB-24 차량하중을 이용하고 있기 때문에 DB-24 차량하중을 해석상에서 이용하였고 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 해석에서처럼 토피파괴에 대한 안전율로서 CHBDC(2001)의 활하중에 대한 하중계수인 1.75를 이용하였다. 일반적으로 지중강판 구조물의 설계는 하중계수(load factors)와 충격계수(DLA)를 고려하여 구조물에 작용하는 하중과 강도를 산정하여 구조적인 안정성을 검토한다. 또한 뒤채움 영역과 구조물 내의 강판파괴에 대해서도 안정성을 검토하여 구조물을 설계한다(OHBDC 1992; AASHTO 2001). 그러나 본 연구에서는 구조물 상부토피 지반에서의 파괴만을 고려하여 지중강판 구조물에 대한 최소토피고를 제안하였으며 제안된 최소토피고에 대해서 지중강판 구조물은 구조적인 안정성을 만족하는 것으로 가정하였다.

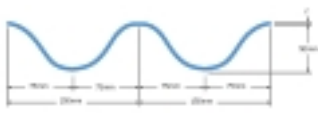
2.1 지중강판 구조물 모델링

각 구조물에 대한 해석에서 강판두께는 CHBDC(2001)의 최소토피고까지 성토되었을 때 구조적인 요구사항을 만족하는 두께로 결정하였고 지간이 10.0m보다 큰 원형 구조물에 대해서는 표준형 강판으로는 설계가 불가능하여 대골형 강판을 이용하였다. 낮은 아치형 구조물의 경우에는 해석 대상 구조물에 대해 모두 대골형 강판을 적용하였다. 해석에 적용한 표준형 강판과 대골형 강판의 구조적인 성질은 표 1과 표 2에 나타내었다. 파형강판은 2절점 빔요소로 모사하였고 선택 뒤채움 지반, 일반 뒤채움 지반, 그리고 기초지반은 모두 Mohr-Coulomb 파괴기준을 따르는 탄소성 모델로 모사하였다. 각 지반의 물성치들은 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 해석에서 이용한 물성치들과 동일한 값을 이용하였는데 이는 표 3에 정리하였다. 표 3에서 뒤채움 지반의 탄성계수는 일반적으로 설계에 이용하는 탄성계수 값보다 상당히 크다. 하지만, Abdel-Sayed와 Salib(2002)는 쌍곡선 모델을 이용한 Hafez와 Abdel-Sayed(1983)의 해석결과를 바탕으로 해석결과를 보정한 후 본격적인 해석을 수행하였기 때문에 적용한 지반 물성치는 최소토피고를 산정하는데 무리가 없을 것으로 판단된다. 해석에 이용한 요소망은 그림 2에 나타내었다. 요소망의 측면경계는 수평방향으로 구조물에서 지간의 2배 이상이 되도록 하였고 하부경계도 구조물에서 수

직방향으로 지간의 2배 이상이 되도록 하였다. 차량하중은 DB-24의 단축하중을 이용하였으며 이를 Kantona 등(1976)의 등가 선하중으로 환산하여 적용하였다.

표 1. 표준형 강판(150×50mm)의 구조적인 성질

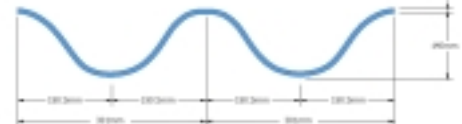
두께 (mm)	단면적 (mm ² /mm)	단면 2차모멘트 (mm ⁴ /mm)	단면계수 (mm ³ /mm)	소성모멘트 (kNm/m)
2.7	3.35	974	36.96	10.90
3.2	3.97	1159	43.57	13.26
4.0	4.97	1459	54.02	16.98
4.5	5.59	1648	60.49	19.41
5.3	6.59	1956	70.75	23.19
6.0	7.46	2230	79.64	26.69
7.0	8.71	2629	92.26	31.17



Note : yield stress, $f_y = 245$ MPa
ultimate stress, $f_u = 400$ MPa

표 2. 대골형 강판(380×140mm)의 구조적인 성질

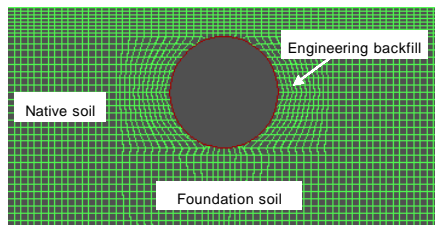
두께 (mm)	단면적 (mm ² /mm)	단면 2차모멘트 (mm ⁴ /mm)	단면계수 (mm ³ /mm)	소성모멘트 (kNm/m)
3.42	4.78	11710.74	152.72	30.31
4.18	5.85	14333.90	186.05	43.20
4.67	6.54	16038.98	207.54	52.73
5.45	7.63	18743.25	241.38	69.79
6.23	8.72	21445.89	274.87	89.20
7.01	9.81	24164.64	308.24	111.03



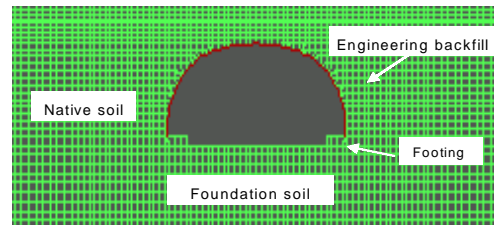
Note : yield stress, $f_y = 300$ MPa

표 3. 해석에 사용된 물성치

Soil element	E (MPa)	γ (t/m ³)	ϕ (°)	C (kPa)	Poisson's ratio(ν)
Engineering backfill	200	2.0	40	50	0.3
Native soil	20	1.8	25	10	0.3
Foundation soil	200	1.8	40	-	0.3
Footing	2.7×10^4	2.4	-	-	0.3



(a)



(b)

그림 2. 해석에 이용한 요소망: (a) 원형 구조물, (b) 낮은 아치형 구조물

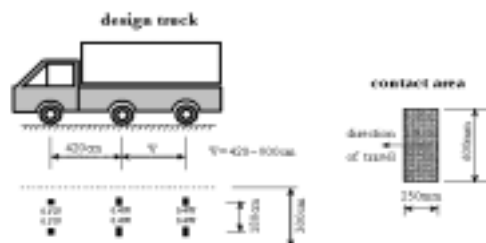


그림 3. DB-24 차량하중의 축방향 분포

2.2 최소토피고 평가

시간에 따른 지중 강판구조물의 최소토피고를 평가하기 위하여 원형 구조물의 경우 4.0~17.0m, 낮은 아치형 구조물의 경우 10.0~20.0m 지간을 가지는 구조물들을 대상으로 각각의 구조물들에 대해서 재하 차량하중을 구조물의 축 중심으로부터 일정한 간격으로 이동시키면서 상부토피에서의 파괴를 관찰하였다. 이때 상부토피에서의 파괴기준은 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 수치해석과 동일하게 상부토피의 한 요소에서 발생한 전단파괴나 인장파괴로 가정하였다.

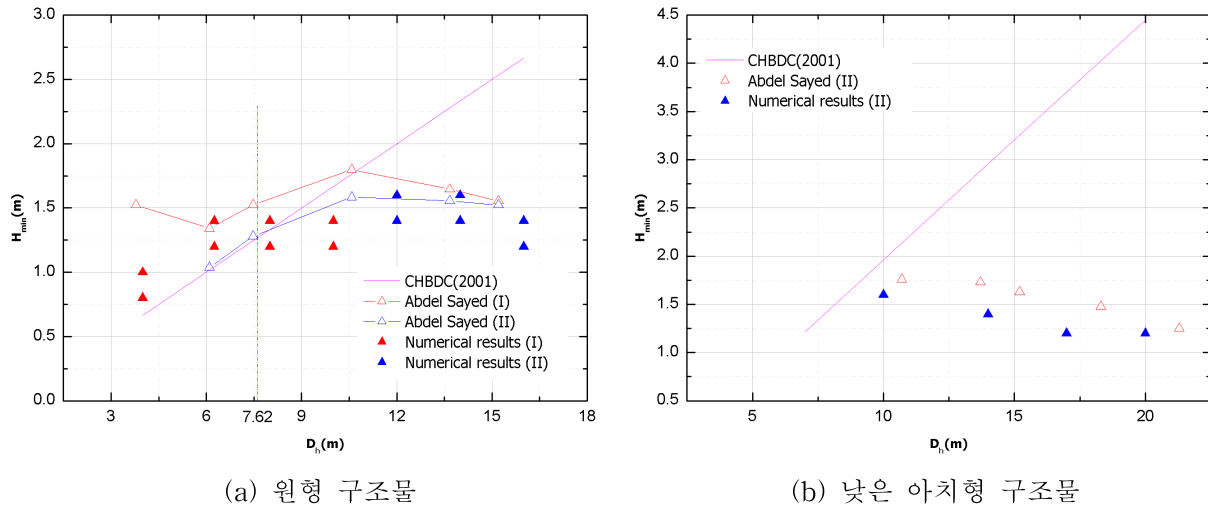


그림 4. 최소토피고 비교(I : 150×50mm corrugation, II : 380×140mm corrugation, 여기서, D_h : 구조물의 지간/ H_{min} : 최소토피고)

그림 4는 원형 구조물과 낮은 아치형 구조물에 대해 수치해석을 이용하여 산정한 최소토피고와 CHBDC(2001)의 최소토피고, 그리고 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 해석결과를 비교하고 있다.

그림 4(a)의 원형 구조물에 대한 해석결과 표준형 강판과 대골형 강판을 이용한 9.0m 이상의 장지간 구조물들에 대해 본 해석으로부터 산정한 최소토피고는 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 해석 결과와 마찬가지로 CHBDC(2001)의 최소토피고 보다 작게 평가되었고 지간이 증가하여도 일정한 값을 보이거나 약간 감소하는 경향을 보였다. 이러한 해석적인 결과로부터 CHBDC(2001)의 최소토피고는 장지간 구조물들에 대해서는 지나치게 보수적인 결과를 보인다는 것을 확인할 수 있으며 지간 10.0m 이상의 구조물에 대한 최소토피고는 지간의 크기에 관계없이 1.5m 정도임을 알 수 있다. 또한, 지간 10.0m 이상인 구조물들에 대해 본 해석에서 얻어진 최소토피고와 Abdel-Sayed와 Salib(2002)가 제시한 최소토피고가 잘 일치하는 것을 알 수 있는데 이는 대골형 강판 구조물의 최소토피고는 차량하중의 종류에 민감하지 않다는 것을 의미한다. 그리고 그림 4(a)에서 같은 지간의 구조물에 대해 최소토피고가 범위를 보이는 것은 강판 두께에 따른 최소토피고의 변화를 나타내는 것으로서 강판 두께가 증가함에 따라 최소토피고가 감소하였는데 이는 강판의 강성이 증가하였기 때문이다.

그림 4(b)는 낮은 아치형 구조물에 대한 최소토피고 해석결과를 나타내고 있다. 낮은 아치형 구조물에 대한 해석결과도 원형 구조물에서의 결과와 마찬가지로 10.0m 이후의 대골형 강판을 이용한 장지간 구조물에 대해서 최소토피고가 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 결과로부터 CHBDC(2002)의 최소토피고 규정이 10.0m 이후의 장지간 구조물에 대해서 매우 보수적이라는 것을 다시 한번 확인할 수 있었다. 또한, 지간 10.0m 이상의 장지간 구조물에 대한 최소토피고는 지간의 크기에 관계없이 대략 1.6m 이하임을 알 수 있다. 그리고 낮은 아치형 구조물의 경우, 원형 구조물과는 달리 최소토피고에 대한 강판 두께의 영향이 없는 것으로 나타났다.

3. 응력이완슬래브의 보강효과

3.1 수치해석을 통한 활하중 거동분석

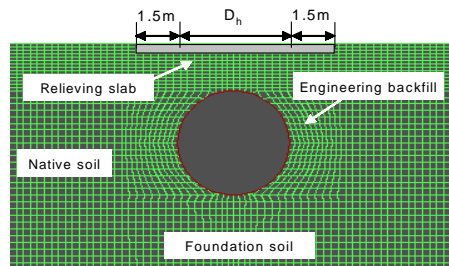
3.1.1 지중강판 구조물 모델링

응력이완 슬래브가 설치된 구조물에 대해 수치해석을 수행하여 응력이완슬래브(relieving slab)에 의한 구조물 상부토피의 보강효과를 검증하였다.

해석에 이용된 구조물은 지간 12.0m인 원형 구조물로서(두께 3.42mm의 대골형 강판 사용) 대상 구조물에 대한 제원과 해석 모델은 그림 5와 표 4에 나타내었다. 슬래브의 종방향 길이는 Duncan 등(1984)의 연구결과와 AASHTO LRFD code(1998)을 참조하여 구조물 양 측면에서 1.5m까지로 결정하였고 슬래브 두께는 0.2m로 결정하였다. 본 해석에서 응력이완슬래브의 경우 탄성모델을 이용하여 모사하였고, 뒤채움 지반과 기초 지반에 대해서는 앞선 해석에서와 같은 모델을 이용하였다. 각 모델에 대한 물성치는 표 4에 정리되어있다. 해석에 이용한 차량하중은 DB-24 차량하중의 뒤축하중으로서 이는 등가 선하중으로 치환하여 구조물의 상부토피 중심에 재하하였다. DB-24 차량하중의 뒤축하중은 그림 3에 보인 바와 같이 4.2m 이상 이격된 두 개의 축하중으로 구성되어 있는데 대부분의 경우 하나의 축하중만을 고려하여 해석한다. 그러나 지간 12.0m인 원형 구조물에서는 두 축하중의 이격거리가 구조물 지간의 1/2 보다 작을 수 있어 구조물의 거동에 영향을 미칠 수 있다고 판단하여 그림 7에서처럼 뒤축하중이 하나인 경우(단축하중)와 두개인 경우(이축하중)에 대하여 해석을 수행하여 비교한 후 활하중 거동을 평가하였다.

표 4. 해석에 이용한 물성치

Soil elements	E (MPa)	γ (t/m^3)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	Poisson's ratio(ν)
Engineering backfill	24	2.1	25°	0	0.3
Native soil	20	1.8	35°	15	0.3
Foundation soil	50	1.8	35°	15	0.3
Relieving slab	2.7×10^4	2.4	-	-	0.3



(a) 원형 구조물

그림 5. 해석에 이용한 요소망

3.1.2 해석결과분석

그림 6은 응력이완 슬래브가 설치되지 있지 않은 지간 12.0m인 원형 구조물에 대해서 DB-24 차량하중을 단축하중으로 가정하여 해석한 경우와 이축하중으로 가정하여 해석한 경우의 최대 활하중 축력과 모멘트값을 비교하고 있다. 그림 6에서 단축하중인 경우에는 그림 7(a)와 같이 축하중이 구조물 중심에 작용하는 경우에 대하여 해석을 수행하였고 이축하중인 경우에는 그림 7(b)와 같이 두 축하중 중 하나

가 구조물 중심에 작용하는 경우(비대칭)와 그림 7(c)와 같이 두 축하중의 중심이 구조물 중심과 일치하는 경우(대칭)로 나누어 해석을 수행하였다. 그림 6(a)와 (b)를 통하여 단축하중이 구조물 중심에 작용하는 경우와 이축하중의 축하중 중 하나가 구조물 중심에 작용하는 경우는 거의 유사한 활하중 축력과 모멘트값을 보임을 알 수 있는데 이는 최대 활하중 축력과 모멘트는 축하중과 가장 가까운 지점인 최상단 부에서 발생하였기 때문이다. 그리고 이축하중이 구조물 중심을 기준으로 대칭적으로 작용한 경우에는 활하중 축력과 모멘트가 오히려 단축하중이 구조물 중심에 작용한 경우보다 작은 것으로 나타났는데 이는 하중의 작용지점이 구조물과 멀어졌기 때문이다. 이와 같이 DB-24 차량하중의 경우에는 두 뒤축하중의 이격거리가 커서 단축하중으로 가정한 경우와 이축하중으로 가정한 경우의 활하중 축력과 모멘트 차이는 거의 없는 것으로 나타났기 때문에 이후의 해석에서는 단축하중으로 가정하여 해석하였다.

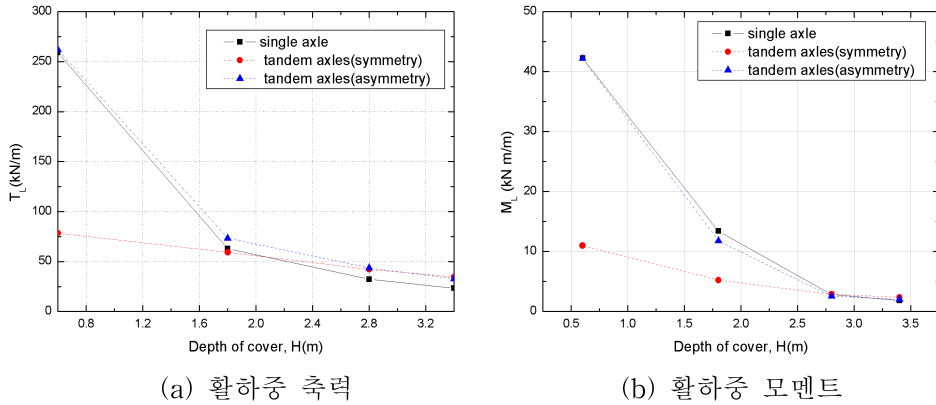


그림 6. 단축하중과 이축하중인 경우 활하중 축력과 모멘트 비교(지간 12.0m 원형 구조물)

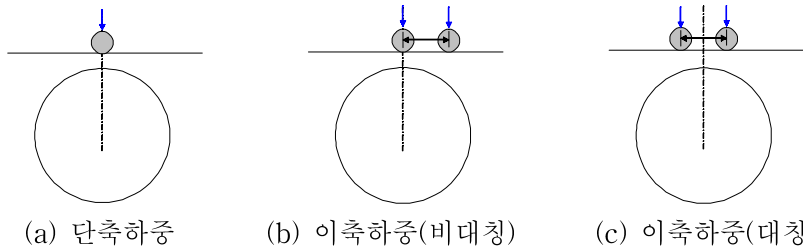


그림 7. DB-24 차량하중을 단축하중과 이축하중으로 모사하였을 경우 하중재하 위치

그림 8은 지간 12.0m인 원형구조물에서 토피고를 0.6m에서 3.4m까지 변화시켰을 때 활하중 축력 및 모멘트, 그리고 단면변형의 변화를 나타내고 있다. 그림 8(a)에서 응력이완 슬래브가 설치된 경우의 활하중 축력은 설치되지 않았을 때의 64%에 머물러 토피부를 응력이완 슬래브로 보강한 경우에 활하중 축력감소 효과가 있다는 것을 확인하였다. 그림 8(b)에 보인 활하중 모멘트도 역시 응력이완 슬래브가 설치된 경우 최대 81%까지 감소하여 응력이완 슬래브는 활하중 축력보다는 활하중 모멘트의 감소에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 그림 8(c)는 활하중에 의한 구조물 최상부에서의 수직변형을 나타내고 있으며 응력이완 슬래브가 설치된 경우 변형량은 최대 72%까지 감소함을 알 수 있었다. 일반적으로 지중강판 구조물을 설계할 때에는 최소토피고를 만족한다는 가정하에 모멘트는 무시하고 축력에 의해서만 설계한다. 부득이하게 최소토피고를 만족하지 못한 조건에서 구조물을 설계할 때에는 강판부재내에 과도한 활하중 모멘트가 발생할 수 있기 때문에 반드시 강판의 휨강성을 고려하여 설계하여야 한다. 이러한 경우에 대한 보강방안으로서 응력이완 슬래브를 설치하는데 앞에서 보인 바와 같이 응력이완 슬래브는 활하중 축력 보다는 활하중 모멘트를 감소시키는데 탁월한 효과가 있다. 따라서 응력이완 슬래브가 설치된 경우에는 최소토피고를 만족하지 못하더라도 일반적인 설계에서와 동일하게 모멘트를 무시하고 축력에 의하여 설계하면 될 것으로 판단된다.

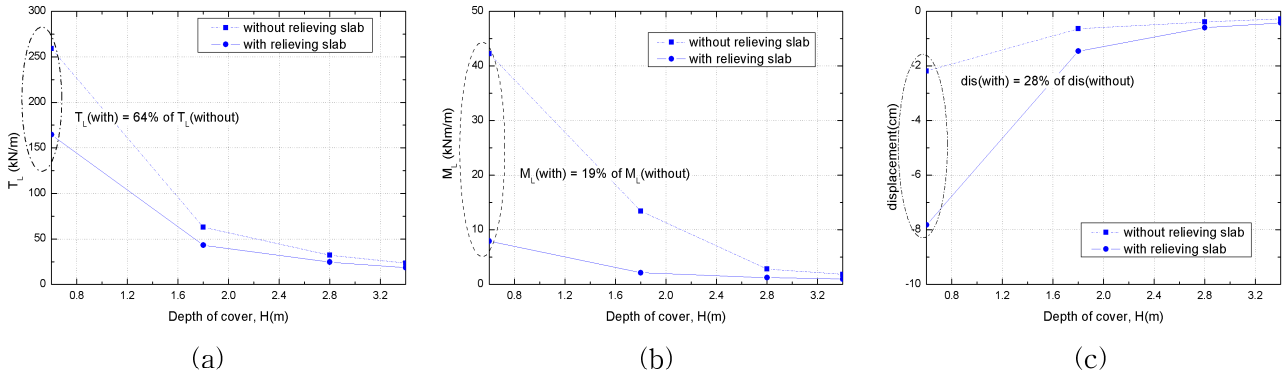


그림 8. 토피고 변화에 따른 단면력과 단면변형(지간 12.0m 원형 구조물)
 (a) 최대 활하중 축력, (b) 최대 활하중 모멘트, (c) 최상단부에서의 활하중에 의한 단면변형

3.2 응력이완슬래브에 의한 활하중 축력 감소효과 평가

Abdel-Sayed 등(1993)은 응력이완 슬래브가 설치된 경우에 강판부재내의 활하중 축력을 산정하기 위해서 콘크리트 슬래브를 등가의 강성을 가지는 토피고로 환산한 다음 이를 각 설계기준에 규정된 활하중 축력 산정식에 대입하여 활하중 축력을 산정하는 등가토피 환산법을 제안한 바 있다. 등가토피 치환법을 이용하여 각 설계기준에 따라 산정한 활하중 축력값들의 적용성을 평가하기 위하여 이들을 수치해석을 통하여 얻어진 축력값들과 비교해 보았다. 검토한 설계기준은 AASHTO LRFD code(1998), AASHTO Standard code(2002), 그리고 CHBDC(2001)이다.

그림 9는 지간 12.0m인 원형구조물에서 토피고를 0.6m에서 3.4m까지 변화시켰을 때 각 설계기준에 따라 산정한 활하중 축력들과 수치해석을 통하여 얻어진 축력들을 비교하고 있다. 각 그림에서 점선은 응력이완 슬래브가 설치되지 않은 경우를 나타내며 실선은 슬래브가 설치된 경우를 나타낸다. 그림 9(a)에서 응력이완 슬래브가 설치되지 않은 경우 AASHTO LRFD code(1998)에 의한 축력은 최종토피고까지 해석결과를 2.15~2.25배로 과대평가하는 것으로 나타났고, AASHTO Standard code(2002)에서는 1.04~1.74배로 과대평가하고 있다. 하지만, 응력이완슬래브가 설치된 경우는 두 설계기준 모두 해석결과 의 13~55%수준에 머물러 수치해석결과들을 과소평가함을 알 수 있다. 그림 9(b)에서의 CHBDC(2001)에서는 응력이완슬래브가 설치된 경우 최대 해석 축력의 15%, 설치되지 않은 경우도 역시 최대 해석 축력의 13%에 머물러서 두 경우 모두 해석값을 크게 과소평가함을 알 수 있다.

따라서 등가토피 환산법을 이용하여 산정한 활하중 축력은 수치해석을 통하여 얻어진 활하중 축력보다 작기 때문에 향후 이에 대한 개선이 필요하다고 할 수 있다.

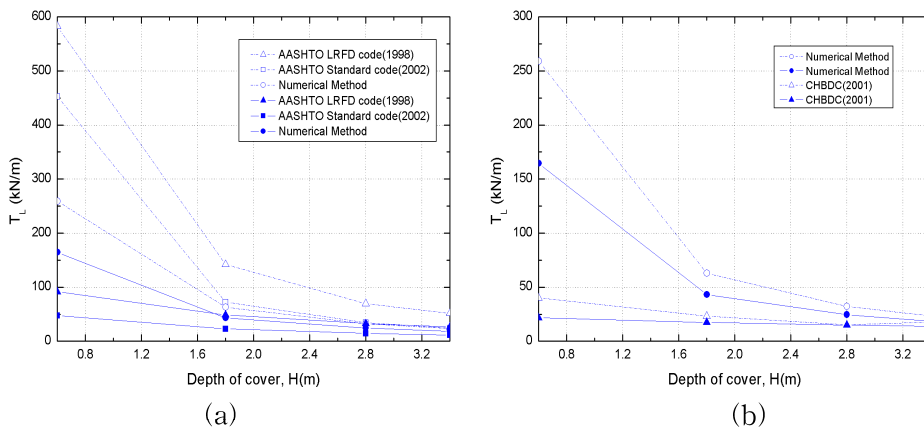


그림 9. 설계기준과 수치해석결과 비교(지간 12.0m 원형 구조물): (a) AASHTO LRFD code(1998), AASHTO Standard code(2002)와 수치해석결과 비교, (b) CHBDC(2001)와 수치해석결과 비교

4. 결론

본 연구는 원형 구조물과 낮은 아치형 구조물을 대상으로 수치해석을 수행하여 상부토피에서의 파괴를 방지할 수 있는 최소토포고를 산정하였고 이를 CHBDC(2001) 규정과 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 해석 결과와 비교 평가 하였다. 또한 응력이완슬래브가 설치된 구조물에 대해 수치해석을 수행하여 슬래브에 의한 상부토피 보강효과를 확인하였으며, 설계기준들에 의한 활하중 축력과 비교하여 설계기준들의 적용성을 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 원형 구조물과 낮은 아치형 구조물에 대한 수치해석 결과 상부토피에서의 파괴를 방지하기 위한 최소토포고는 구조물의 지간이 증가함에 따라 일정한 값을 보이거나 약간 감소하는 경향을 보였다. 지간 10.0~17.0m의 원형 구조물에 대한 최소토포고는 대략 1.5m 내외였으며, 지간 10.0~20.0m의 낮은 아치형 구조물에 대해서는 대략 1.6m 이하임을 알 수 있었다. 이에 반해 같은 지간의 구조물에 대해 CHBDC(2001) 규정의 최소토포고는 원형 구조물의 경우 1.7~2.8m, 낮은 아치형 구조물의 경우 2.0~4.8m의 값을 제시하고 있다. 이와 같은 결과로부터 기존에 제시된 최소토포고 규정인 CHBDC(2001)는 대골형 강판을 이용한 장지간 구조물에 대해서는 매우 크게 과대평가한다는 것을 알 수 있었다.

둘째, 응력이완 슬래브가 설치된 구조물에서 슬래브에 의한 상부토피 보강효과는 활하중 축력의 경우 36%의 감소효과, 활하중 모멘트의 경우 최대 81%의 감소효과를 보여 활하중 축력보다 모멘트의 감소효과가 탁월함을 알 수 있었다. 또한 최상단부에서의 수직변형은 최대 72%까지 감소하였다.

셋째, 응력이완 슬래브가 설치된 경우 AASHTO LRFD code(1998)와 AASHTO Standard code(2002)를 통해 산정된 활하중 축력은 모두 해석결과의 13~55%수준에 머물렀고, CHBDC(2001) 기준도 최대 15%에 머물러 현재 사용되고 있는 설계기준들은 응력이완슬래브에 의한 활하중 축력을 과소평가하고 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- Canadian Standards Association(2001), CAN/CSA-S6-00: Canadian Highway Bridge Design Code(CHBDC), Rexdale, Ontario
- George Abdel-Sayed and Sameh R. Salib.(2002), "Minimum Depth of Soil Cover above Soil-Steel Bridges", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 8, pp. 672-681
- Hafez, H. H. and Abdel-Sayed, G.(1983), "Soil Failure in Shallow Covers above Flexible Conduit", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 10(4), pp.654-661.
- AASHTO(1998), LRFD Bridge Design Specifications, 2nd Ed., SI Units, Sect.10(Foundations), Sect.12(Buried Structures and Tunnel Liners)
- Abdel-Sayed, G. and Bakht, B.(1982), "Analysis of Live-Load Effect of Soil-Steel Structures", *Transportation Research Record 878*, pp.49-55.
- Bakht, B.(1981), "Soil-Steel Structure Responses to Live Loads", *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 107, No. 3, pp. 779-798.
- Duncan, J. M.(1979), "Behavior and Design of Long-Span Metal Culverts", *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 105, No. 3, pp. 399-417.