

장시간 지중강판구조물의 최소토피고 평가 및 토피지반 보강에 대한 수치해석

Evaluation of Minimum Depth Criterion and Reinforcement Effect of the Soil Cover in a Long-span Soil-steel Bridge

이 종 구¹ Lee, Jong-Ku

조 성 민² Cho, Sung-Min

정 현 식³ Jung, Hyun-Sik

김 명 모⁴ Kim, Myoung-Mo

Abstract

Soil-steel bridges are made of flexible corrugated steel plates buried in the well-compacted granular soil. One kind of possible collapses of these structures could be initiated by shear or tension failure in the soil cover subjected to vehicle loads. Current design codes provide the requirements for the minimum depth of the soil cover to avoid problems associated with soil cover failures. However, these requirements were developed for short span (less than 7.7 m) structures which are made of unstiffened plates of standard corrugation (150×50 mm). Numerical analyses were carried out to investigate the behavior of long span soil steel bridges according to thickness of the soil cover. The span of structures were up to 20 m and deep corrugated plates (381×140 mm) were used. The analysis showed that the minimum cover depth of 1.5 m could be sufficient to prevent the soil cover failure in the structures with a span exceeding 10 m. Additional analyses were performed to verify the reinforcement effect of the concrete relieving slab which can be a special feature to reduce the live-load effects. Analyses revealed that the bending moment of the conduit wall with a relieving slab was less than 20% of that without a relieving slab in a case of shallow soil cover conditions.

요 지

주변의 뒷채움 흙과 파형강판 벽체의 상호작용을 통해 외력을 지지하는 지중강판구조물에서는 상부의 차량하중에 의해서 토피 지반에서 전단파괴, 또는 인장파괴가 발생하여 구조물의 파손이나 붕괴를 유발할 수 있다. 현재 적용 중인 설계기준들에서는 이를 방지하기 위하여 상부아치 위로 확보해야 하는 최소한의 토피 두께(토피고)를 규정하고 있으나, 이들은 표준형 파형강판으로 제작한 지간 7.7m 이하의 구조물에 대한 수치해석에 바탕을 두고 있으므로, 지간이 그 이상인 장지간 구조물에는 적용기가 어렵다. 이 연구에서는 원형 및 낮은 아치형 단면의 지중강판구조물에 대하여 강판 부재와 뒷채움 지반을 함께 모사한 수치해석을 실시하여 장지간 구조물에 대한 최소토피고의 크기를 분석하였다. 해석 결과, 현재의 시방기준은 장지간 구조물의 최소토피고를 과다산정하는 경향을 보였으며, 지간이 10m 이상일 경우의 최소토피고는 지간의 크기 및 단면형상에 관계없이 1.5m 정도로 나타났다. 최소토피고를 만족하지 못하는 경우에는 토피 지반에 활하중 분산효과가 뛰어난 콘크리트 보강 슬래브를 적용할 수 있는데, 원형 단면의 장지간 구조물에 대한 수치해석을 통해서 보강 슬래브가 토피 지반 위에 재하되는 활하중에 의한 강판 부재의 축력과 휨모멘트를 크게 감소시키는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 토피두께가 기준에 미달하더라도 적절한 규격의 보강 슬래브를 설치하는 지중강판구조물은 기존의 절차에 따라 축력지배구조로서 설계 및 해석이 가능하다.

Keywords : Live load, Minimum depth of soil cover, Numerical analysis, Relieving slab, Soil-steel bridges

1 정희원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 선임연구원 (Member, Rist Steel Structure Research Lab., ljku@rist.re.kr)

2 정희원, 한국도로공사 도로교통기술원 지반연구그룹 수석연구원 (Member, Highway & Transportation Research Institute)

3 정희원, 한국수자원공사 금강남부권 지역본부 (Member, Korea Water Resources Corporation)

4 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg.)

1. 서론

1990년대 후반부터 국내에 도입된 지중강판구조물(soil-steel bridges)에 대해서는 시공성과 경제성을 높이고 우리의 설계 및 시공 여건에 적합한 기술기준을 정립하기 위해서 지반공학과 강구조공학을 접목하여 활발한 연구가 이루어지고 있다. 구조물의 골격이 되는 파형강판은 파형의 골과 피치가 150×50mm인 표준형 부재를 널리 사용하고 있는데, 우리나라 고속도로에서는 휨강성의 한계에 따라 표준형 강판은 지간이 12m 이하인 구조물에만 적용하도록 하고 있다(한국도로공사, 2001). 지중강판구조물의 대형화 추세에 따라 북미에서는 골과 피치가 381×140mm인 대골형 부재를 개발하여 사용하고 있으며, 우리나라에서도 지난 2001년부터 동일한 규격의 소재를 생산하고 있다. 대골형 파형강판은 리브 보강재를 덧붙이고 그 내부를 콘크리트로 충전하는 합성보강부재(encased concrete rib stiffener)로 적용할 경우 지간이 20m가 넘는 장지간 지중구조물도 시공할 수 있게 되었다(포스코 등, 2002).

지중강판구조물은 강판 벽체 아치의 상부에 작용하는 활하중에 의하여 토피 지반(soil cover)이 파괴되는 것을 방지하기 위하여 상부 아치 위로 일정한 토피고를 확보하여야 한다. 이에 따라 국내외의 각 설계기준들은 별도의 최소토피두께 규정을 제시하고 있는데, 이는 지간(span)이 7.7m 이하인 구조물에 대한 수치해석 결과에 주로 근거한 것으로서, 토피두께가 구조물의 지간에 비례하여 증가한다는 특징을 가지고 있다. 따라서, 장지간 구조물의 경우에는 최소토피두께가 과도하게 산정되어 성토계획고와 부합하지 않을 수 있어 장지간 구조물의 적용에 제약이 될 수 있다. 한편, 최소토피두께를 확보할 수 없는 경우에는 토피 지반 내에 콘크리트 슬래브와 같은 판형 보강체를 설치하여 활하중에 의한 부재 내 응력을 저감시킬 수 있다. 현재는 구조물에 작용하는

활하중 축력을 구하기 위하여 강성 슬래브를 등가의 두께를 지닌 토피로 환산하고 있는데, 이 기법에 대한 해석적인 검증이 필요하다.

이 연구에서는 원형 단면의 구조물과 낮은 아치형 단면의 구조물을 대상으로 지간과 토피두께를 달리해서 수치해석을 실시하여 설계식에 의한 값들과 비교하였으며, 장지간 지중강판구조물에 대한 최소토피고 기준을 제시하였다. 그리고, 토피부에 보강슬래브를 설치한 경우에 대해서 수치해석을 통하여 활하중에 의한 지중응력 저감 효과를 평가하고, 등가토피환산법의 적정성을 검증하였다.

2. 최소토피고의 산정

2.1 최소토피고 기준

지중강판구조물의 상부 토피층이 얇을 경우에는 지면에 작용하는 활하중에 의하여 지반의 쐐기파괴(wedge failure, 전단파괴)와 인장파괴(tension failure)가 발생할 수 있다(그림 1). 그림 1에서와 같이 이들 지반파괴는 활하중이 구조물 축에 대하여 편재하중으로 작용하는 경우에 발생할 가능성이 높으며, 특히 인장파괴는 시공 도중 장비 하중에 의해서도 유발되므로 쐐기파괴에 비해 상대적인 빈도가 크다. 이러한 토피지반의 파괴를 방지하기 위해서는 토피층의 최소필요두께를 정할 필요가 있는데, 그 값을 최소토피고(minimum depth of soil cover)로 정의한다.

Klöppel와 Glock(1970)은 지중구조물 토피층의 쐐기파괴에 대한 해석적 연구를 통해 토피지반의 극한지지력의 크기는 토피의 단위중량과 재하폭, 그리고 파형강판의 두께와 단면 형상에 따라 달라진다고 하였다.

Hafez와 Abdel-Sayed(1983)는 지중강판구조물 상부에 트럭하중이 선으로 작용하는 경우에 대해서 유한요소해석을 통해 구조물 토피지반의 인장파괴를 검토하였다. 이들은 구조물 단면 형상과 토피두께에 따라 토피

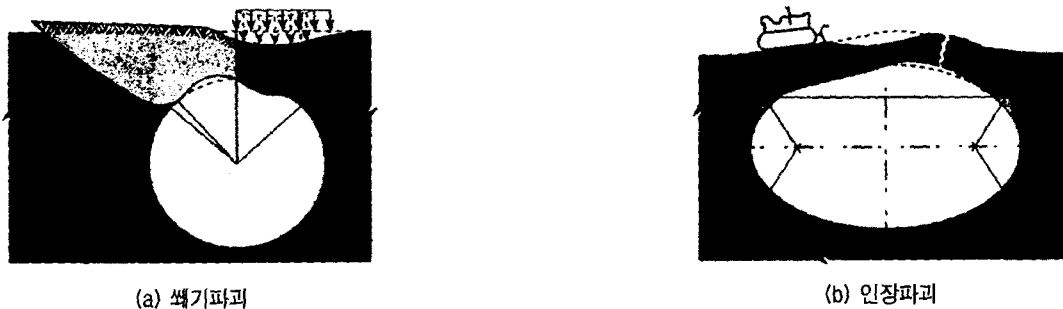


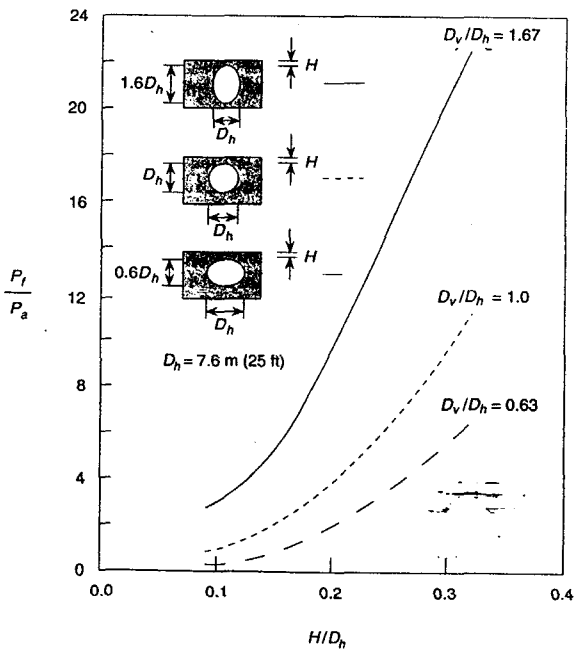
그림 1. 구조물 상부 토피 지반의 파괴 유형 (Abdel-Sayed 등, 1994)

지반의 인장파괴를 유발하는 외력의 크기를 분석하고 그림 2와 같은 결과를 제시하였다. 그림에서 P_f 는 인장 파괴 발생시 선하중의 크기이며, P_a 는 토피 사하중의 크기로서, 토피두께(H)가 커질수록 P_f 가 증가하며, 동일한 토피두께에서는 지간이 커질수록 두 하중의 비(P_f/P_a)가 감소하여 결과적으로 작은 크기의 활하중에도 인장파괴가 발생함을 보여준다. 이들은 당시 캐나다의 온타리오주에서 정한 표준트럭하중을 기준으로 토피지반의 파괴를 방지할 수 있는 토피고의 기준을 제안하였고, 이는 온타리오주 도로교시방서(OHBDC, 1983)의 2판에 적용되었다. OHBDC의 3판(1992)에서는 이를 약간 수정하여 다음 식 (1)과 같이 규정하였으며, 이는 현재의 캐나다도로교시방서(CHBDC, 2000)에 그대로 이어지고 있다. Abdel-Sayed 등(1994)은 기존 연구자들의 해석 결과를 바탕으로 썩기파괴에 대한 토피지반의 안정성을 분석하여 OHBDC(1992)에서 규정한 최소토피고 기준을 만

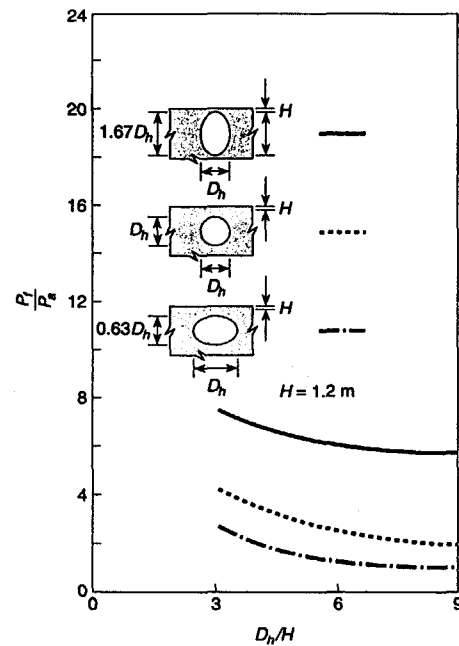
족할 경우에는 썩기파괴가 발생하지 않는다고 검증하였다. CHBDC에서는 지중강판구조물의 지간과 높이에 대한 형상계수(D_h, D_v)를 이용하고 있는데, 식 (1)의 세 가지 중 가장 큰 값을 최소토피고로 규정하고 있다. 여기서, D_h 는 구조물 단면의 수평형상계수로서 보통 강판벽체의 지간(S)과 동일하며, D_v 는 단면의 형태와 강판벽체의 높이(R)에 따라 정해지는 수직형상계수이다(그림 3).

$$\frac{D_h}{6} \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^{0.5}, 0.4 \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^2, 0.6 \text{ m} \quad (1)$$

미국도로교통협회(AASHTO, 1998 & 2002)와 미국철강협회(AISI, 1994)에서도 그간의 실험결과와 경험을 바탕으로 지간의 1/8, 또는 0.3m 중 큰 값을 최소토피고로 정하고 있는데(지간별로 별도 도표를 제시하기도 함), 지간이 12m 이상인 경우는 적용하기 어렵다. 토피 상부에 강성포장을 하는 경우에 대한 비교에서, CHBDC의



(a) 토피두께의 영향



(b) 구조물 지간의 영향

그림 2. 지중강판구조물 토피지반의 인장파괴 요인 분석 (Hafez & Abdel-Sayed, 1983)

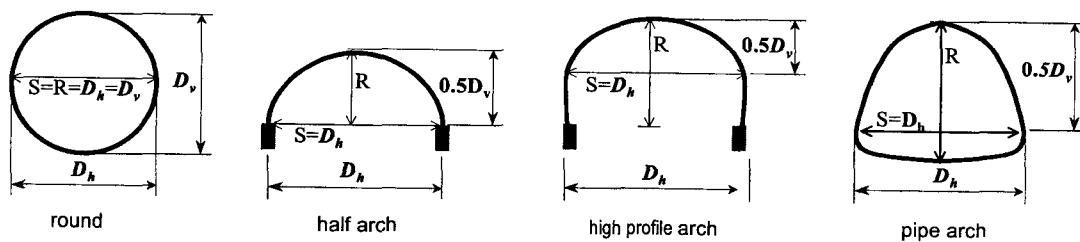


그림 3. 지중강판구조물의 주요 단면 형태별 형상계수(D_h, D_v)의 정의 (CHBDC, 2000)

기준에 따라 산정한 최소토피고가 AASHTO의 LRFD 시방서(1998)나, 표준시방서(2002)의 기준에 따라 구한 값보다 30~70% 정도 큰 것으로 파악되고 있다(서울대학교와 한국도로공사, 2003). 우리나라에서는 한국도로공사(2001)에서 정한 지침에 따라 보다 엄격하고 체계적인 CHBDC의 기준, 즉 식 (1)을 적용하고 있으며, 다만 아스팔트와 같은 연성포장층의 두께는 산정에서 제외한다는 AASHTO의 요건을 함께 고려하고 있다.

그런데, CHBDC의 이 기준은 Hafez와 Abdel-Sayed (1983)이 수행한 지간 7.7m 이하의 표준형 파형강판 구조물에 대한 해석을 바탕으로 도출된 것으로서, 지간이 10m 이상인 경우나, 콘크리트 채움 리브와 같은 합성보강부재를 사용한 경우에는 매우 보수적인 결과를 낳게 된다. 이에 따라 최근에 Abdel-Sayed와 Salib(2002)는 원형단면의 경우 15.24m, 아치형 단면의 경우 21.3m까지 지간을 늘리고, 또한 대골형 파형강판 및 합성보강부재를 사용한 경우도 포함해서 광범위한 수치해석을 실시하였다. 이들 연구에 따르면, 지간이 10m 이상인 구조물에서는 CHBDC 기준에 따른 최소토피고는 매우 과도한 것으로 나타났다.

2.2 토피지반의 보강 슬래브 적용

보강슬래브(relieving slab)는 응력이완슬래브라고도 부르며, 그림 4와 같이 토피 지반 내에 설치하는 강성 구조체로서 활하중을 분산시켜 지중응력을 줄이는 역할을 하여 결과적으로 토피지반을 보강하는 기능을 한다. 따라서 지중강판구조물이 최소토피고 규정을 만족하지 못하여 구조물 상단에 과도한 활하중 압력이 작용할 것으로 예상되는 경우에 유용하게 적용할 수 있다.

Abdel-Sayed 등(1994)은 콘크리트 보강슬래브를 설치하여 활하중 압력을 저감시키는 경우를 가상의 토피고가 증가하여 구조물 상단에 전달되는 응력이 감소하는 경우로 등가화시켜, 식 (2)와 같은 슬래브 두께에 대한 등가환산 토피두께(t_{equiv})를 제안하였다.

$$t_{equiv} = n^{1/3} \times t_c \quad (2)$$

여기서, t_c : 콘크리트 슬래브의 설계 두께

n : 슬래브와 토피지반의 탄성계수 비(= $E_{concrete} / E_{soil}$)

따라서, 두께가 t_c 인 콘크리트 보강슬래브를 적용할 경우 최종적인 토피고, H_{equiv} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. H 는 슬래브 두께를 제외한 토피의 실제 두께이다.

$$H_{equiv} = H - t_c + t_{equiv} \quad (3)$$

따라서, 보강슬래브에 의한 활하중 축력 감소효과는 구조물 상부의 지표에 작용하는 차량하중이 환산토피두께인 H_{equiv} 를 통하여 분포한다고 가정하여 정량화할 수 있다.

3. 수치해석을 통한 장지간 구조물의 최소토피고 평가

CHBDC의 최소토피고 기준의 근거인 Hafez와 Abdel-Sayed(1983)의 해석적인 연구결과와 최근에 대골형 강판을 포함하여 수행된 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 연구결과는 모두 구조물의 상부에 CHBDC 표준트럭(CL-625)을 재하하여 얻어진 것이다. 그러나 국내 도로교시방서(1998)에서는 CHBDC 트럭과 하중의 크기와 분포가 다

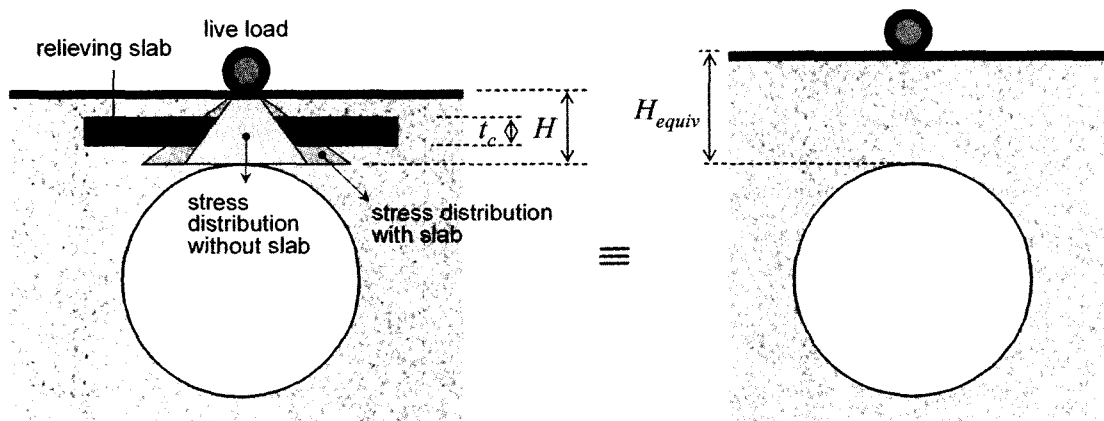


그림 4. 토피지반의 보강슬래브 설치 모식도 및 등가 토피고 환산

른 DB-24 하중을 전제하고 있으므로, 상기 연구결과들을 국내에서 그대로 적용하기는 어렵다. 이에 따라 상재하중의 기준을 DB-24 트럭으로 하고, 지중구조물과 뒷채움지반의 상호작용을 효과적으로 모사할 수 있도록 지반을 연속체로 간주하는 FLAC(v3.3)을 이용하여 유한차분해석을 수행하였다. 그리고, 토피지반의 파괴에 대한 안전율은 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 해석시와 동일하게 CHBDC의 활하중 계수인 1.75를 사용하였다.

3.1 모델링

지중강판구조물에는 여러 가지 단면형상이 있고 식 (1)의 최소토피고 기준을 통하여 알 수 있듯이 단면형상을 대표하는 값 중 지간에 대한 형상계수인 D_h 와 D_v 의 비는 최소토피고에 영향을 미칠 수 있다. 장지간 구조물의 단면은 모두 D_h/D_v 가 1.0~2.0의 범위에 있기 때문에 해석대상 구조물을 원형구조물($D_h/D_v=1.0$)과 낮은아치형 구조물($D_h/D_v=1.2\sim 2.0$)로 선정하였으며, 각 단면의 구조물에 대하여 지간과 토피고를 달리하였다. 파형강판 벽체는 2절점 선형 요소로 모사하였으며, 벽체 주변의 뒷채움부(벽체와 접한 구조적 뒷채움부와 그 배면의 일반 뒷채움부로 나눔)와 하부의 기초지반은 모두 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 따르는 탄소성 모델을 적용하였다. 벽체와 뒷채움부 사이에는 인터페이스 요소를 사용할 수 있지만 Duncan(1979)에 의하면 벽체와 뒷채움부 사이의 상대변위는 일반적으로 매우 작으며 Kantona(1982)에 의하면 인터페이스에서의 상대변위는 시공 중 거동에만 영향을 줄 수 있으므로 활하중 거동 분석을 위한 본 연구에서는 해석의 편의상 고려하지 않았다. 해석에 이용한 요소망은 그림 5와 같은데 요소망의 측면경계는 벽체 측면에서 수평방향으로 지간의 2배 이상, 하부경계는 구조물 하단에서 수직방향으로 지간

의 2배 이상이 되도록 하였다.

지중강판구조물에서 파형강판의 두께는 하중의 크기와 뒷채움 조건, 토피고, 단면의 기하학적 형상에 따라 결정되는 값이므로, 지간과 토피고에 따라 적절한 강판 두께를 사용하였으며, 지간이 10m를 초과하는 경우는 대

표 1. 표준형파형강판(150×50mm)의 단면특성값

두께 (mm)	단면적 (mm ² /mm)	단면 2차모멘트 (mm ⁴ /mm)	단면계수 (mm ³ /mm)	소성모멘트강도 (kNm/m)
2.70	3.35	974	36.96	10.90
3.20	3.97	1159	43.57	13.26
4.00	4.97	1459	54.02	16.98
4.50	5.59	1648	60.49	19.41
5.30	6.59	1956	70.75	23.19
6.00	7.46	2230	79.64	26.69
7.00	8.71	2629	92.26	31.17

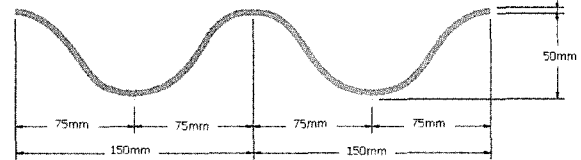
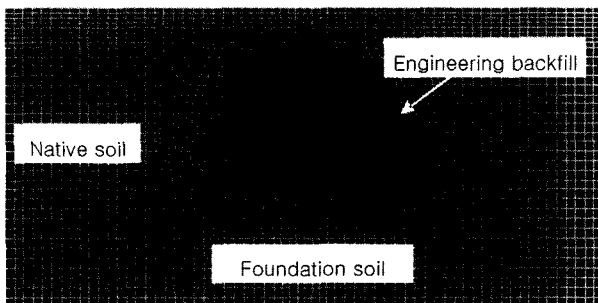
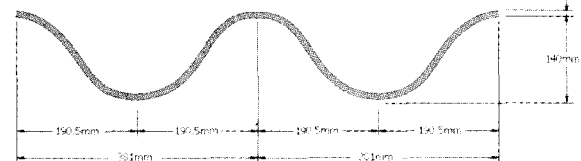
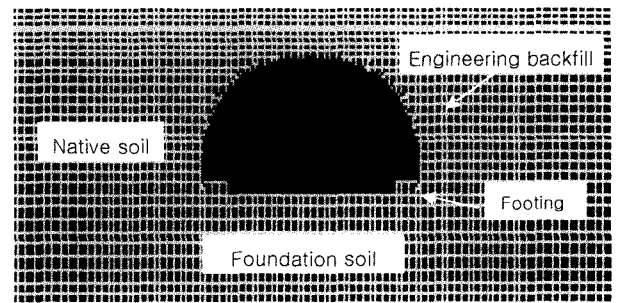


표 2. 대골형파형강판(381×140mm)의 단면특성값

두께 (mm)	단면적 (mm ² /mm)	단면 2차모멘트 (mm ⁴ /mm)	단면계수 (mm ³ /mm)	소성모멘트강도 (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



(a) 원형 단면 구조물



(b) 낮은 아치형 단면 구조물

그림 5. 해석에 이용한 이차원 요소망

골형 강판을 적용하였다. 파형강판의 두께별 단면특성 값을 표 1과 2에 나타내었다. 강판의 항복응력(f_y)은 표 준형의 경우 245MPa, 대골형의 경우 300MPa이다.

구조물의 기초지반과 뒷채움층에 대해서는 해석결과 비교를 위하여 Abdel-Sayed와 Salib(2002)가 적용한 물 성치들을 준용하였다(표 3). 표 3에서 구조적 뒷채움부 는 도로의 보조기층용 선택재료에 해당하는 조립골재 를 충분히 다져서 시공하는 영역이므로 일반적인 흙채 움부에 비하여 비교적 큰 탄성계수를 사용하였다. 확대 기초는 아치형 단면의 구조물에 적용하는 것으로서, 철 근콘크리트로 구성된다.

해석은 그림 6과 같이 구조물의 뒷채움 시공과정을 단 계적으로 모사한 다음, 최종 토피고 상태에서 활하중을 재하하는 방식으로 수행하였다. 구조물의 측면을 뒷채 움할 때에는 다짐에 의하여 잔류 수평토압이 발생하며 이는 구조물의 시공 중 거동에 영향을 줄 수 있다. 수치 해석적으로 다짐효과를 고려하기 위하여 근사적인 방 법에서 엄밀한 방법까지 여러 가지 방법들이 제안되어 있지만 본 연구의 목적은 활하중에 의한 토피지반의 거

동분석이고 이는 다짐에 의한 영향을 크게 받지 않으므 로 다짐효과는 고려하지 않았다. 토피지반 상단에 작용 하는 활하중은 그림 7과 같은 DB-24 트럭의 단축하중 을 이용하였으며, 이를 2차원 등가선하중으로 환산하여 적용하였다. 3차원적인 특성을 갖는 차량하중은 지중으 로 구조물 종방향 뿐만 아니라 길이방향으로도 분산된 다. 그러나, 2차원 평면변형을 해석에서는 구조물 길이 방향의 활하중 분산효과를 고려하지 못하기 때문에 차 량하중을 등가의 선하중으로 치환하여 적용한다. 지중 강판구조물의 해석을 위한 등가의 선하중은 Kantona 등 (1976)에 의하여 제안되었는데 그 값은 그림 8에 보인 바와 같이 점하중이 작용할 때 구조물 최상단부의 수직 응력인 $\sigma_{v1,max}$ 이 선하중이 작용할 때의 수직응력인 $\sigma_{v2,max}$ 과 같다는 가정하에 산정된다.

각 해석에서는 원형 단면은 지간을 4~17m, 낮은아 치형 단면은 지간을 10~20m로 일정한 간격을 두고 변 화시키고, 각 지간마다 토피고를 달리한 상태에서 그림 7의 DB-24 축하중을 구조물의 중심축으로부터 일정한 거리만큼 이동시키면서 토피지반의 파괴 여부를 관찰

표 3. 해석에 사용한 지반 및 기초의 역학적 특성값

구분	탄성계수 E (MPa)	단위중량 r (t/m ³)	내부마찰각 ϕ (°)	점착력 c (kPa)	포와송비 (ν)
구조적 뒷채움부	200	2.0	40	50	0.3
일반 뒷채움부	20	1.8	25	10	0.3
기초 지반	200	1.8	40	-	0.3
확대기초	2.7×10^4	2.4	-	-	0.3

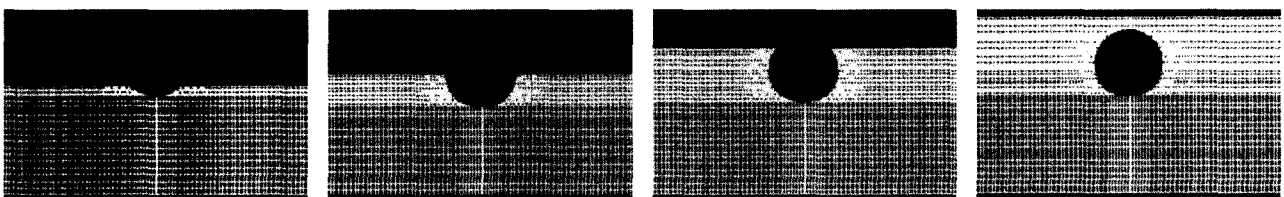


그림 6. 뒷채움 시공과정의 모사(원형구조물)

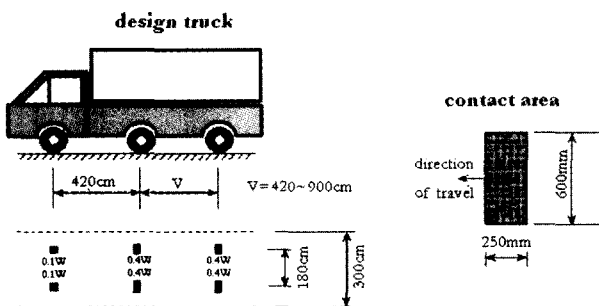


그림 7. DB-24 하중의 축방향 분포

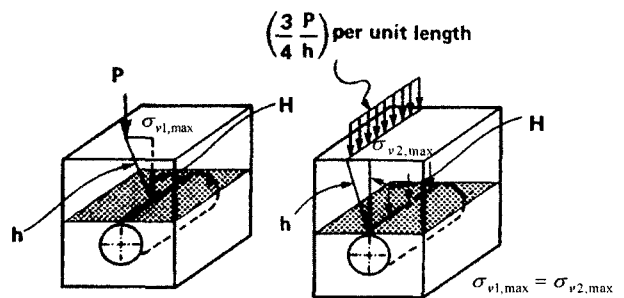


그림 8. 등가 선하중의 산정 (Kantona 등, 1976)

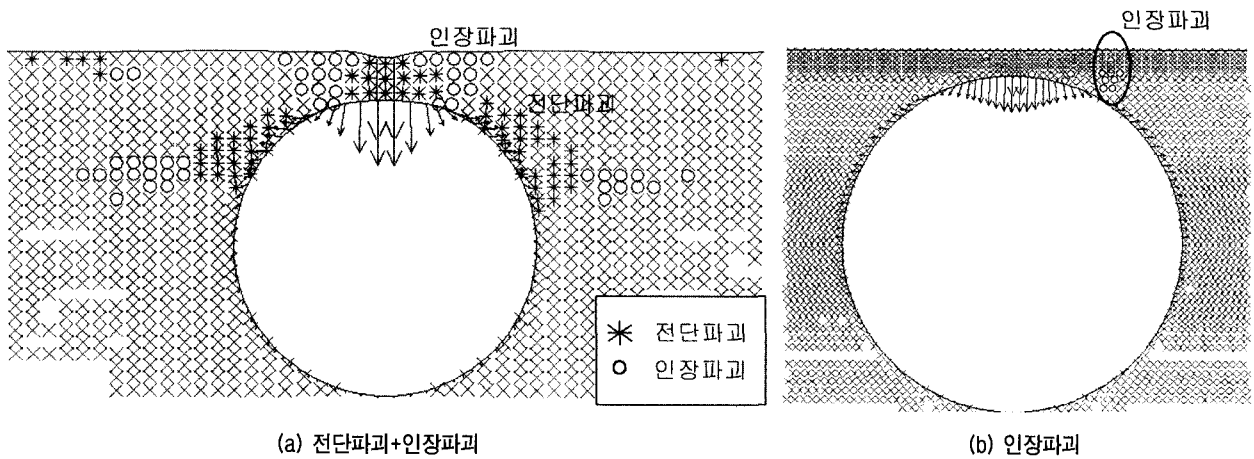
하였다. 토피지반의 한 요소에서 전단파괴, 또는 인장파괴가 발생할 경우에 이를 토피지반의 파괴로 간주하였다.

3.2 해석 결과

그림 9는 원형단면 구조물에 대한 해석 결과로서, 토피지반에서 전단파괴와 인장파괴가 발생한 전형적인 경우를 보여준다.

그림 10은 수치해석 결과를 바탕으로 토피부에서 지반 파괴를 유발하지 않는 최소토피고를 산정하여, CHBDC (2000) 기준 및 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 연구결과와 비교한 것이다. 그림 10(a)는 원형 단면 구조물에 대한 것으로서, 지간이 10m까지는 표준형 강판을 적용하였으며, 10m 이상은 대골형 강판을 사용하였다. Abdel-Sayed와 Salib(2002)는 전체 지간 분포에 대하여 각각 표준형과 대골형을 사용한 경우에 대하여 토피고를 평

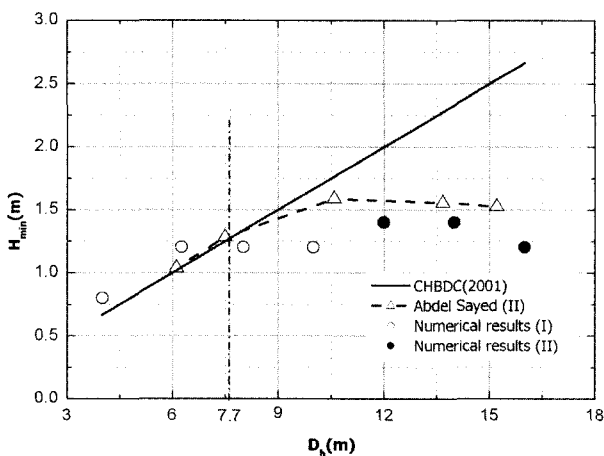
가하였다. 그림에서 CHBDC 기준은 지간의 커짐에 따라 최소토피고가 선형적으로 증가하는 경향을 나타내나, 수치해석 결과에서는 지간이 7.7m까지는 CHBDC 기준과 유사하게 지간에 따라 증가하는 경향을 보이다가 지간이 10m 이상이 되면 최소토피고가 일정해지거나 오히려 감소하는 형태를 보이고 있다. 이러한 특징은 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 연구에서도 관찰된 바 있다. 결과적으로 CHBDC에 따른 최소토피고는 장지간 구조물에서는 매우 보수적인 값이 될 수 있으며, 지간이 10m 이상인 구조물의 최소토피고는 지간의 크기에 관계없이 1.5m 정도임을 알 수 있다. 이번 수치해석으로 산정한 지간별 최소토피고의 값이 Abdel-Sayed와 Salib(2002)이 제시한 값보다 작게 나타난 이유는 해석에 사용한 활하중의 크기와 관련이 있는데, CHBDC의 기준 트럭 하중은 우리나라의 DB-24 하중에 비하여 매우 크다. 다만, 지간이 10m 이상이고, 대골형 강판을 사용한



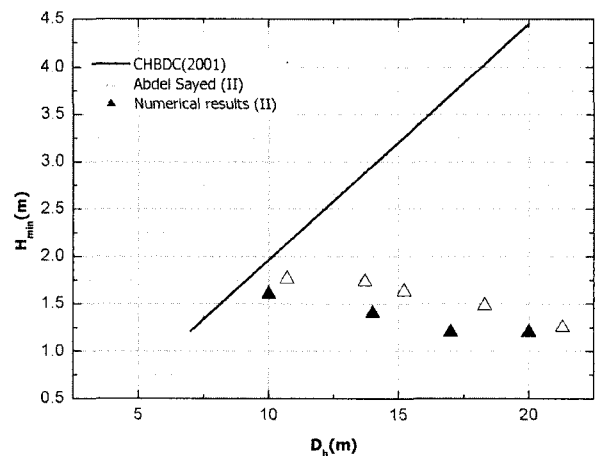
(a) 전단파괴+인장파괴

(b) 인장파괴

그림 9. 토피 지반에서 파괴가 발생한 경우(원형 단면에 대한 수치해석 결과)



(a) 원형 구조물



(b) 낮은 아치형 구조물

그림 10. 최소토피고, H_{min} 비교(I : 표준형강판/150×50mm, II : 대골형강판/381×140mm)

경우는 두 연구결과가 유사하게 나타났는데, 이는 장지간 구조물의 최소토피고는 차량하중의 종류(크기)에 민감하지 않다는 것을 의미하기도 한다. 그림 10(b)는 낮은 아치형 단면의 구조물에 대한 최소토피고 산정 결과로서, 원형 단면 구조물의 결과와 마찬가지로 지간이 10m 이상이고 대골형 강판을 이용한 경우에는 지간이 커지더라도 최소토피고가 일정하거나 감소하는 경향을 보였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 CHBDC의 최소토피고 기준이 장지간 구조물에 대해서는 매우 보수적이라는 것을 다시 입증하는 것이다. 낮은 아치형 단면에서도 지간이 10m 이상인 구조물의 최소토피고는 지간의 크기에 관계없이 1.5m 정도로 나타났다. 이러한 결과는 Rib 보강재나 합성보강재를 설치하지 않은 구조물에서 얻어진 것이므로 Rib 보강재를 설치할 경우에는 구조물의 강성이 증가되어 그림 10보다 작은 최소토피고를 얻을 수 있을 것이다.

4. 토피 지반의 보강 슬래브 적용 효과

4.1 활하중 거동 분석

4.1.1 보강 슬래브의 모델링

토피 지반에 보강 슬래브(응력이완 슬래브, relieving slab)를 설치한 지중강판구조물에 대한 수치해석을 수행하여 보강 슬래브에 의한 활하중 감소 효과를 분석하였다. 이를 위해 지간이 12m인 원형 단면 구조물(두께 3.42mm의 대골형 강판 사용)을 가정하였으며, 해석에 이용한 요소망은 그림 11과 같다.

콘크리트 슬래브의 종방향 길이는 Duncan 등(1984)의 연구결과와 AASHTO의 LRFD 시방서(1998)를 참조하여 구조물 양 측면에서 1.5m까지로 정하였으며, 그

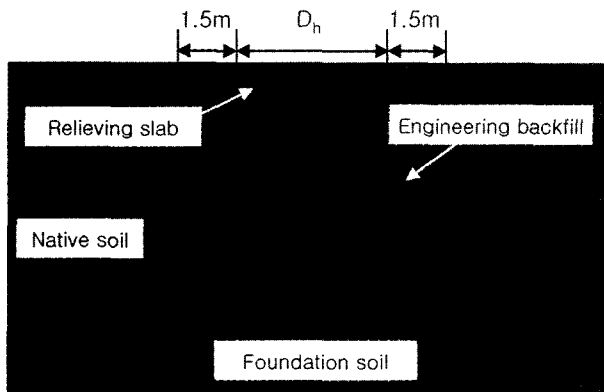


그림 11. 보강슬래브 해석에 이용한 요소망

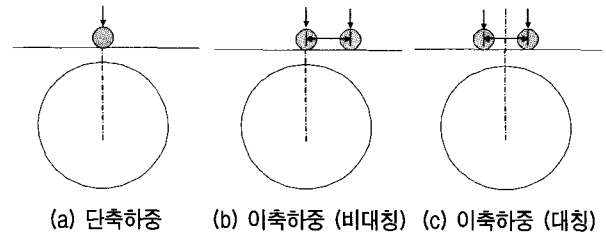


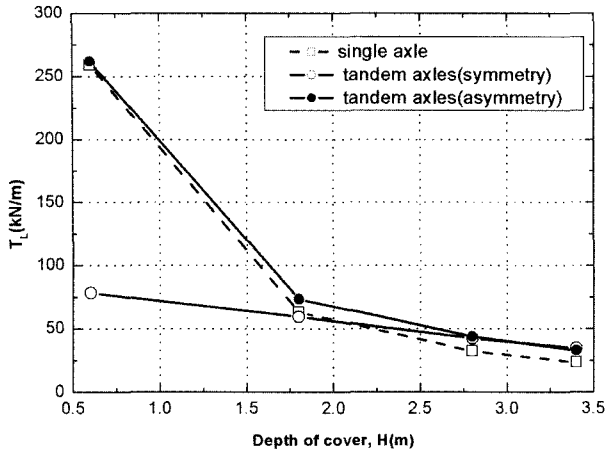
그림 12. 구조물에 작용하는 DB-24 하중을 단축하중과 이축하중으로 모사하는 경우의 재하 위치

두께는 0.2m로 하였다. 뒷채움층 및 기초 지반에 대해서는 앞의 해석과 탄소성 모델을 적용하고, 콘크리트 보강 슬래브는 탄성모델을 이용하여 모사하였다. 콘크리트 슬래브의 물성치는 표 3에서 확대기초의 값과 같다.

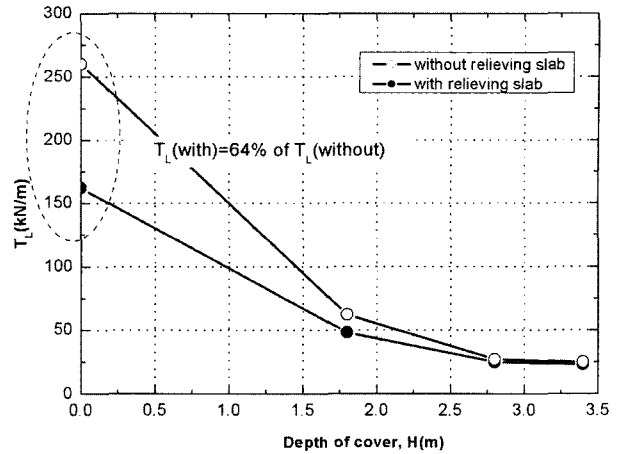
해석에 이용한 활하중은 DB-24 트럭의 뒤축하중으로서, 이를 등가의 선하중으로 치환하여 구조물의 상부토피 중심에 재하하였다. DB-24 트럭의 뒤축하중은 그림 7과 같이 4.2m 이상 이격된 두 개의 축하중으로 구성되는데, 일반적으로 하나의 축하중만을 고려하게 된다. 그러나 지간이 12m인 구조물에서는 트럭의 두 축간 거리가 구조물 지간의 1/2보다 짧을 수 있으므로, 두 축하중이 동시에 구조물의 거동에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 올바른 하중조건을 판단하기 위하여 그림 12와 같이 하나의 축하중(단축)만 작용하는 경우와 두 개의 축하중(이축)이 모두 작용하는 경우에 대하여 구조물에 미치는 영향을 먼저 분석하였다. 단축하중은 구조물의 중심부에 재하하였으며, 이축하중은 하나의 축이 구조물 중심부에 작용하는 경우(비대칭)와 두 축의 중심이 구조물의 중심과 일치하는 경우(대칭)로 다시 구분하였다. 이 때 보강 슬래브는 고려하지 않았다.

4.1.2 활하중 조건 분석

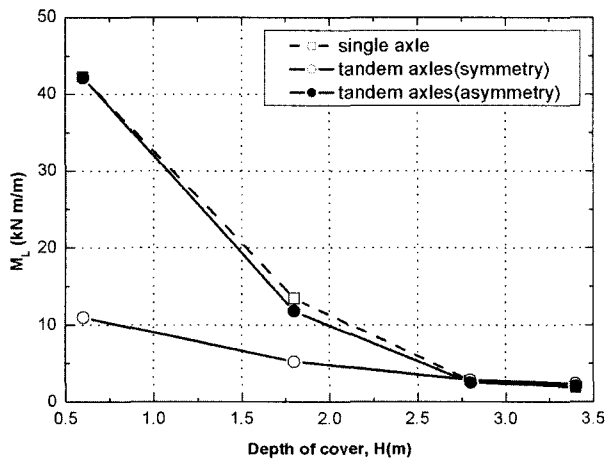
보강 슬래브를 설치하지 않은 지간 12m의 원형 구조물에 대해서 그림 12와 같이 DB-24 하중을 각각 단축하중과 이축하중으로 구분하여 재하한 경우 활하중에 의한 구조물의 최대 축력과 최대 모멘트를 그림 13에 나타내었다. 그림 13에서 단축하중을 재하한 경우는 점선으로 표시하였고 이축하중을 재하한 경우는 실선으로 표시하였다. 그림 13(a)과 그림 13(b)을 통하여 단축재하와 비대칭 이축재하시의 구조물 부재 축력과 모멘트가 유사한 값을 보임을 알 수 있는데, 이는 활하중에 의한 부재의 최대 축력과 모멘트가 축하중의 재하 위치와 가장 가까운 지점인 구조물 벽체의 천단부(crown)에서 발생하였기 때문이다. 그리고 대칭 이축재하시에는 부



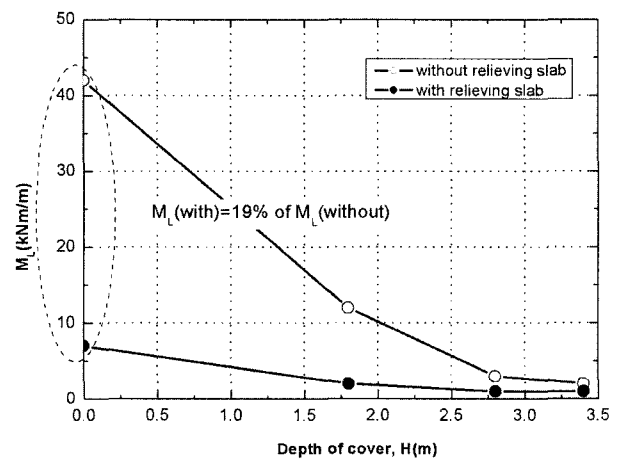
(a) 활하중 축력



(a) 최대 활하중 축력



(b) 활하중 모멘트



(b) 최대 활하중 모멘트

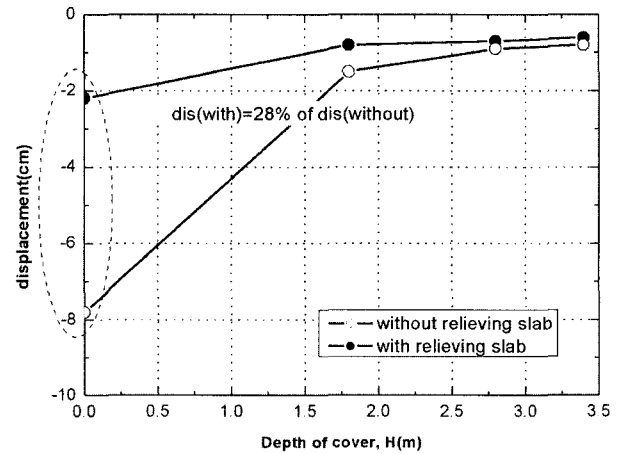
그림 13. 단축하중과 이축하중인 경우 활하중 축력과 모멘트 비교(원형 단면 : 지간 12m)

재의 최대 축력과 모멘트가 단축재하시보다 오히려 작게 나타났는데, 이는 두 축하중이 각각 작용하는 위치가 구조물의 천단부로부터 멀어졌기 때문이다. 결과적으로, 지간이 커서 DB-24 트럭의 두 뒷축 하중이 모두 영향을 미치는 경우라도 활하중에 의한 구조물의 부재력은 이축재하시와 단축재하시의 차이가 거의 없으므로, 보강 슬래브 효과 분석시에는 해석의 편의를 위하여 단축재하 조건을 적용하였다.

4.2 보강 슬래브 적용에 따른 다른 거동 분석

4.2.1 활하중에 대한 구조물의 거동

보강 슬래브를 적용한 경우에는 식 (1)에 나타난 CHBDC 최소토피고 기준의 최소값인 토피고 0.6m인 경우에도 토피지반에서 파괴가 관찰되지 않았으므로 구조물의 하중지지 거동을 바탕으로 보강 슬래브의 보강효과를



(c) 구조물 천단부의 수직변형량

그림 14. 보강 슬래브 유무에 따른 토피고별 부재력과 내공수직변위 비교

평가하였다. 그림 14는 지간이 12m인 원형단면 구조물에서 토피고를 0.6m에서 3.4m까지 변화시키고, 각각 보강슬래브를 설치한 경우와 배제한 경우에 대하여 활하중을 작용시켰을 때 구조물 부재에 걸리는 활하중 축력

과 휨모멘트, 그리고 구조물 최상단인 천단부의 단면변형(수직변형량)의 변화를 나타내고 있다.

그림 14(a)에서 토피고가 낮을수록 보강 슬래브 설치에 따른 활하중 축력의 저감 효과가 탁월한 것을 알 수 있는데, DB-24 단축하중에 대하여 부재에 작용하는 축력이 최대 36% 정도까지 감소하였다. 그림 14(b)에 나타난 활하중에 의한 휨모멘트 역시 보강 슬래브를 설치한 경우에 그 값이 설치 전에 비하여 최대 81%까지 감소하였다. 이를 통해서 보강 슬래브는 활하중에 의한 축력에 비하여 휨모멘트를 절감시키는 효과가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 지중강판구조물과 같은 연성구조물은 압축링 이론(ring compression theory)에 따른 하중 지지원리상 기본적으로 축력지배구조가 되나, 실제로는 다소간의 휨모멘트 발생이 불가피하므로, 시공 중 예상되는 모멘트 발생을 최소화하는 것이 매우 중요하며, 이러한 차원에서 보강 슬래브의 효과는 공학적으로 그 의미가 크다고 할 수 있다. 한편, 이 두 그래프에서 알 수 있듯이 토피가 두꺼워질수록 활하중이 토피 지반 내에서 분산되는 폭이 커지므로 보강 슬래브의 효과는 반감되며, 토피고가 일정한 값에 이르게 되면 보강 슬래브의 적용이 무의미해지게 된다.

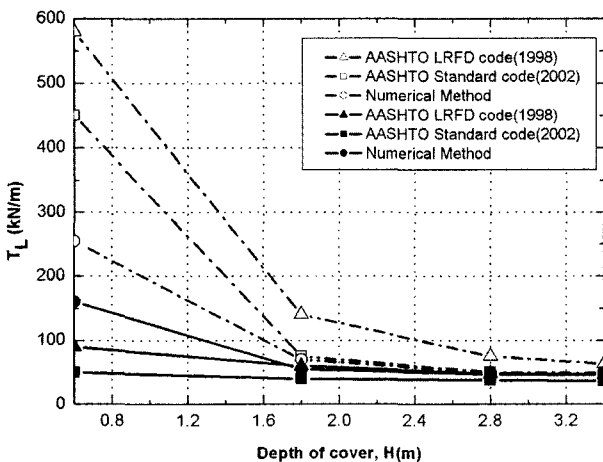
그림 14(c)는 활하중 작용시 강판구조물 최상단부 부재의 수직변형량을 나타내고 있는데, 보강 슬래브를 설치한 경우에 변형량은 최대 72%까지 감소하였다. 보강 슬래브는 상부 활하중을 적절하게 분산시켜 지중구조물 부재에 유발되는 축력과 모멘트를 감소시키는 물론, 구조물의 변위도 저감시킨다는 것을 알 수 있다. 연성거동을 나타내는 지중강판구조물은 부재력 조건을 만족

해야 하는 것 외에도 시공 중의 변형량이 일정한 기준값을 초과하지 않도록 해야 하므로, 수직변위 저감 효과는 시공관리에 기여하는 역할이 크다.

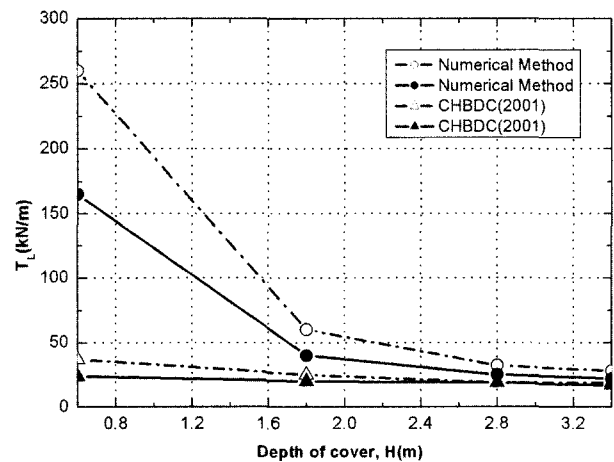
4.2.2 등가토피 환산법의 검증

앞서 언급한 바와 같이 지중강판구조물의 토피 지반에 보강 슬래브를 적용한 경우의 설계시에는 Abdel-Sayed 등(1993)이 제안한 등가토피환산법을 이용하여 보강 슬래브가 포함된 토피부를 등가의 순수토피층으로 환산하여 그 두께를 가정해서 사용하고 있다(그림 4). 이러한 방법을 검증하기 위하여 토피부에 보강 슬래브를 설치한 원형단면 구조물(지간 12m)을 대상으로 토피고를 0.6m에서 3.4m까지 변화시키면서 구한 강판 벽체의 축력과 등가환산법에 따라 산정한 토피고를 기준으로 미국도로교통협회(AASHTO)의 LRFD시방서(1998) 및 표준시방서(2002), 그리고 캐나다도로교시방서(CHBDC, 2000)에 따라 산정한 축력을 비교하였다.

그림 15는 수치해석으로 구한 축력과 기존 설계기준에 따라 해석적으로 구한 축력을 나타낸 것으로서, 각 토피고별로 보강 슬래브를 적용한 경우와 배제한 경우를 함께 비교하였다. 해석적으로 구한 값의 경우 보강 슬래브를 적용한 때에는 등가환산 토피고를 사용한 것이다. 그림에서 실선이며 검정색으로 표시한 것은 보강 슬래브를 적용한 경우의 결과이며, 점선이며 흰색으로 표시한 것은 보강 슬래브를 설치하지 않는 경우에 대한 해석 결과이다. 수치해석 결과와 AASHTO 기준의 해석 결과를 비교한 그림 15(a)에서, 보강 슬래브를 적용하지 않았을 때에는 토피고별로 LRFD 시방서(1998)의 경우



(a) AASHTO 기준(1998, 2002)과 비교



(b) CHBDC 기준(2000)과 비교

그림 15. 토피 조건별 부재 축력에 대한 설계기준과 수치해석 결과의 비교

는 수치해석시에 비하여 축력값을 2.2~2.3배, 표준시방서(2002)는 1.0~1.7배로 평가하였다. 반면에, 보강 슬래브를 적용한 경우에는 두가지 설계기준에 의한 해석값이 모두 수치해석으로 산정한 축력의 13~55% 수준에 머물렀다. CHBDC(2000)에 따른 해석결과와 비교한 그림 15(b)에서는 보강 슬래브가 설치되지 않은 경우에 시방기준에 따른 해석값이 수치해석으로 구한 축력의 13%, 보강 슬래브를 적용한 경우는 15% 수준으로 과소하게 나타났다.

따라서, 보강 슬래브를 적용한 경우의 등가토피환산법에 따라 산정한 부재 축력은 보강 슬래브 요소를 고려하여 수치해석으로 산정한 값보다 작게 나타나, 이에 대한 추가 분석 및 검토가 필요하다고 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 지간이 10m 이상인 원형 단면과 낮은 아치형 단면의 지중강판구조물을 대상으로 구조물과 지반을 함께 모델링한 수치해석을 수행하여 우리나라의 활하중 기준인 DB-24 트럭 재하 조건에서 구조물 상부 토피 지반의 전단파괴 및 인장파괴를 방지할 수 있는 최소토피고 범위를 산정하였고, 이를 현재 설계에 적용 중인 미국과 캐나다의 시방기준에 의한 값과 비교하였다. 또한 토피 지반 내의 활하중 분산을 목적으로 설치하는 보강 슬래브의 효과를 평가하기 위하여 수치해석을 통해 구조물의 부재력과 변위를 분석하고 각 설계기준에 따른 해석적 결과와 비교하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 현재 널리 적용하고 있는 CHBDC(2000)의 기준을 적용할 경우, 지간이 10m 이상인 장지간 지중강판 구조물의 최소토피고는 매우 보수적으로 산정된다. CHBDC 기준에 따른 해석적 결과에서는 지간과 최소토피고가 선형적인 비례관계를 보였으나, 수치해석 결과에서는 지간이 10m 이상일 경우는 Abdel-Sayed와 Salib(2002)의 연구에서도 관찰된 바와 같이 최소토피고가 일정해지거나 감소하는 형태를 나타내었다. 또한 장지간이 10m 이상일 경우의 최소토피고는 지간의 크기와 단면 형상에 관계없이 1.5m 정도로 산정되었으며, 대골형 파형강판을 사용한 경우는 최소토피고가 활하중의 크기에 둔감한 것으로 나타났다.

(2) 토피 지반에 보강 슬래브를 설치한 구조물에서는 슬래브가 없는 경우에 비하여 활하중에 의한 부재의 축력은 최대 약 36%, 활하중 모멘트는 최대 약 81%가 감소하였다. 또한 강판 천단부의 수직침하량은 최대 74%까지 감소한 것으로 나타났다. 따라서, 최소토피고가 기준에 미치지 못하는 경우라도 보강 슬래브의 적용을 통하여 최소토피고가 만족되는 일반적인 경우와 동일하게 축력지배구조로서 지중강판구조물을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 보강 슬래브를 적용한 경우 기존의 등가토피환산법을 적용한 해석적 방법으로 산정한 부재의 축력이 수치해석을 통해 산정한 값의 13~55% 정도로 나타났다. 슬래브를 구조 요소로 모사한 수치해석 결과를 기준으로 볼 때에 이는 설계시 불안측 요인이 되나, 슬래브의 폭과 단면 특성, 토피 지반의 재료 특성 등이 해석 결과에 영향을 줄 수 있으므로 이에 대해서는 추가적인 심화 연구가 필요하다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (1998), 도로교표준시방서.
2. 서울대학교, 한국도로공사 (2003), 지중강판구조물 토피지반 해석에 대한 연구.
3. 이종구 (2004), 지중강판 구조물 설계기준의 적용성 평가, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
4. 포스코, 포항산업과학연구원, 평산SI(주) (2002), 장스팬 파형강판 구조물 설계 및 시공.
5. 한국도로공사 (2001), 지중강판 구조물 설계 및 시공지침.
6. AASHTO (1998), LRFD Bridge Design Specifications, 2nd Ed, SI Units.
7. AASHTO (2002), Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Ed., SI Units.
8. AISI (1994), Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products.
9. CSPI & AISI (2002), Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products, Canadian Ed.
10. Abdel-Sayed, G., Bakht, B., and Jaeger, L.G. (1994), *Soil-Steel Bridges: Design and Construction*, McGraw-Hill.
11. Abdel-Sayed, G., Bakht, B., and Selig, E. (1992), "Soil-Steel Structures Design by the 3rd Edition of OHBDC", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.19, No.4, pp.545-550.
12. Abdel-Sayed, G., and Girges, Y. (1992), "Stability of Soil-Steel Bridges", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.19, No.3, pp.463-468.
13. Abdel-Sayed, G. and Salib, S. R. (2002), "Minimum Depth of Soil Cover above Soil-Steel Bridges", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128, No.8, pp. 672-681.
14. Canadian Standards Association (2000), CAN/CSA-S6-00: Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC), Rexdale, Ontario.

15. 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.
16. Hafez, H. H., and Abdel-Sayed, G. (1983), "Soil Failure in Shallow Covers above Flexible Conduit", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.10, No.4, pp.654-661.
17. Kantona, M. G., Smith, J. M., Odello, R. S., and Allgood, J. R., (1976), "CANDE - A Modern Approach for the Structural Design and Analysis of Buried Culverts", Report No.FHWA-RD-77-5, U.S. Naval Civil Engineering Lab.
18. Kantona (1982), "Effects of Frictional Slippage of Soil-Structure Interfaces of Buried Culverts", TRB, Transportation Research Record 878, pp.8-10.
19. Klöppel, K., and Glock, D. (1970), "Theoretische und Experimentelle Untersuchungen zu den Traglastproblemen biegeeweicher in die Erde Eingebetten Rohre", Publication No.10, Institut für Statik and Stahlbau, Germany.
20. Ministry of Transportation of Ontario (1983), "Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC)", 2nd Ed., Downsview, Ontario, Canada.
21. Ministry of Transportation of Ontario (1992), "Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC)", 3rd Ed., Downsview, Ontario, Canada.

(접수일자 2004. 5. 31, 심사완료일 2004. 7. 5)

Abbreviation

- AASHTO : American Association of State Highway and Transportation Officials
- AISI : American Iron and Steel Institute
- CSPI : Corrugated Steel Pipe Institute
- TRB : Transportation Research Board