

신설 파형강판 지중암거의 기존 콘크리트 박스 접합부 해석 Connections of the Corrugated Steel Plate Culvert with the Concrete Box

조성민¹⁾, Sung-Min Cho, 변순주²⁾, Soon-Joo Byun

1) 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, Chief Researcher, HRC, Korea Highway Corporation

2) RPSI 스트럭처 대표이사, President, RPSI Structure

개요(SYNOPSIS) : Zinc galvanized steel plates(sections) of annular corrugations have been used in buried steel culverts. These structures are referred to by a variety of names such as flexible pipes, buried pipes, soil-steel bridges, corrugated steel culverts, and etc. Buried corrugated steel structures show flexible behaviour under the soil load, compared with concrete box structures. Finite element analysis was performed to suggest the reasonable connecting method between the flexible steel culverts and the rigid concrete box. It was predicted that perfectly constrained connections could induce the excessive stress in steel plates. Therefore elastic bearing connections that allow vertical displacement at the connecting point were applied.

1. 서론

1.1. 파형강판 구조물

파형강판 지중 구조물은 아연도금한 강판에 주름(corrugation)을 낸 후 판 전체에 곡률을 주어 휨강성과 내력을 증가시킨 파형강판을 볼트로 연결하는 방법으로 설치되며, 동일한 내력을 발휘하는 다른 재료에 비하여 중량이 가볍고, 취급이 용이하므로 시공이 매우 간편하다는 장점이 있다. 이에 따라 북미 국가에서는 지난 100여년 동안 활발하게 사용되어 보편적인 구조 양식으로 자리잡고 있으며, 설계 및 시공과 관련된 기술적인 부분의 많은 연구 성과를 축적하고 있다(Abdel-Sayed, 1993). 국내에서는 지난 1997년 중앙고속도로의 횡단통로용 암거에 최초 적용된 이래 그 활용 실적이 계속 증가하고 있다(한국도로공사, 1999):

파형의 형태는 각국의 사용 단위에 따라 약간의 차이가 있는데, 북미에서는 골 사이의 거리(pitch)가 6"이고, 그 깊이가 2"인 파형규격($\approx 152.4 \times 50.8\text{mm}$)을 표준으로 사용하고 있다(그림 1). 국내에서는 1998년부터 생산이 개시되면서 이와 비슷한 치수인 $150\text{mm} \times 50\text{mm}$ 를 표준파형으로 선정하여 사용하고 있다. 생산되는 강판의 두께는 2.7~7mm이다.

구조물의 적용 단면은 가장 기본적인 원형 형태를 포함하여 타원, 아치형 등 매우 다양하며, 일반적인 배수 구조물, 통로 구조물, 입체 교차로, 저장고 뿐 아니라 근래에는 소규모의 교량에까지 적용되고 있다(그림 2). 이 구조물은 콘크리트 구조물에 비하여 경량이고, 연성이 우수하며, 공장 제작된 강판을 현장에서 조립하여 설치하므로 기존의 강성 구조물에 비하여 공사 기간을 상당히 단축시킬 수 있고, 경제성도 우수한 것으로 평가되고 있다.

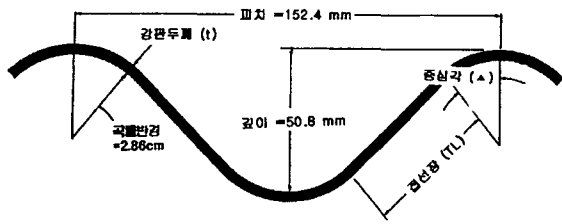


그림 1. 파형의 규격

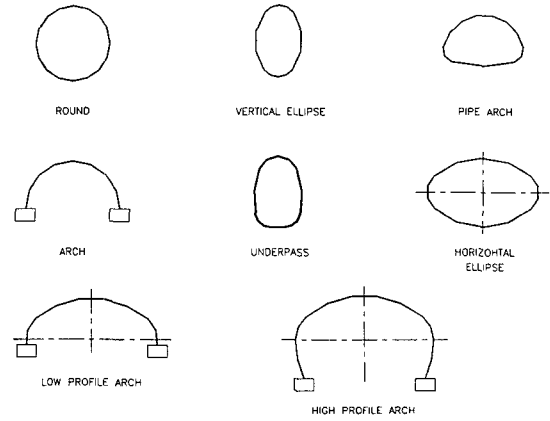


그림 2. 파형강판 구조물 형식

이러한 파형강판은 두께에 따라 그 강성이 파형 중심에 대한 단면계수가 동일한 두께를 가지는 일반 강판의 10~30배에 이르며, 용접을 하지 않고 이 박판을 보강하여 사용하는 형식이라 할 수 있다. 파형강판 지중구조물은 콘크리트 박스와 같은 종래의 강성 구조물에서는 단지 하중으로만 고려되던 뒷채움 지반을 합성작용으로 외부하중을 함께 지지하는 방식으로 활용한다. 이에 따라 강성 구조물에 비해 매우 얇은 두께로서 하중에 견딜 수 있게 되며, 구조 치체가 연성으로서 지반의 부등침하에 대해 유연하게 대처할 수 있어 연약지반에도 효과적으로 사용할 수 있다.

이러한 파형강판 구조물은 일반적으로 도로나 철도를 횡단하는 지하통로 및 용/배수용 암거로 주로 사용되나, 수로, 토류벽, 골재 사일로(silo), 수조, 호안용 셀, 집수정 등 다양한 분야에 걸쳐 그 용도에 따라 이용되고 있다.

1.2. 연구 배경 및 적용 현장의 개요

파형강판 구조물을 시공하는 사례가 늘어나면서 경우에 따라 기존의 콘크리트 구조물과 연결하여 연속 시공해야 할 필요가 제기되고 있다. 이 경우 강성 거동을 보이는 콘크리트 구조물과 연성 거동을 보이는 강판 구조물이 서로 맞닿는 부분에서 많은 문제가 발생할 수 있다. 이 글에서는 고속도로 확장 과 함께 도로 하부를 횡단하는 지중 통로용 암거를 반원 아치 형태의 파형강판 구조물로 신규 시공하면서 기존 도로 하부의 콘크리트 박스 날개벽과 연결되는 접합부 처리 사례를 대상으로 구조 해석 결과와 이에 따른 접합부 시공 방법을 소개한다.

연구 대상 구조물은 경부고속도로 확장 구간에 위치하고 있으며, 원 설계에서는 확장되는 도로 위치에 강재 가교를 설치하도록 되어 있었으나, 이를 파형강판 지중암거로 변경하여 기존 고속도로 하부의 콘크리트 박스 암거에 접합시키는 형식이다. 파형강판 구조물 상단으로부터 도로계획고까지 성토높이는 약 9m로서 이러한 현장 조건을 만족하기 위하여 파형강판 암거의 형식은 콘크리트 기초를 갖는 직경 5.0m의 반원아치형으로 결정하였다. 신설 구조물과 기존 구조물을 접합하는 경우에, 기존 암거의 날개벽이 평행식인 경우에는 신설 구조물을 기존 구조물의 접합부에 바로 연결할 수 있으며, 날개벽이 돌출식일 경우에는 법면 보호를 위한 흙막이 가시설 설치 후 기존 날개벽을 철거하고 접합하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나, 본 현장의 경우에는 공기단축, 가시설 공사비 절감 및 기존 통로의 원활한 소통을 위해 기존 암거의 돌출식 날개벽을 철거하지 않고 파형강판 구조물을 기존 날개벽에 접합되는 모양 그대로 입체적으로 절단하여 접합 시공토록 하는 방안을 강구하였다. 이러한 현장 여건에 따라 파형강판 구조물의 접합부에는 그림 3에서와 같이 3차원적인 비대칭 자유단이 발생되었으며, 이에 따라 전체 혹은 국부적인 구조물의 거동 및 응력분포 등에 대한 분석이 요구되어 접합부를 포함한 파형강판 전체에 대한 구조해석을 수행하였다.

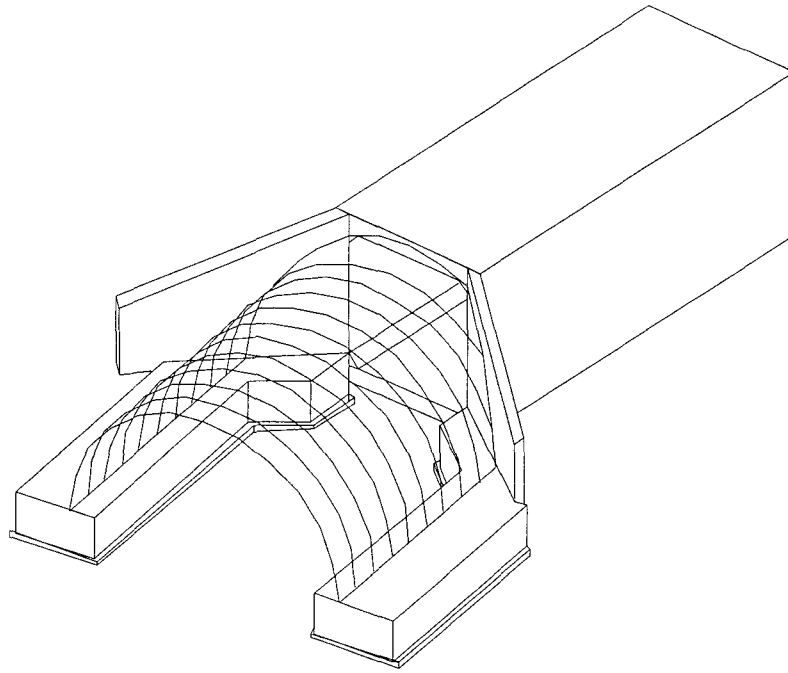


그림 3. 일체 현황도

2. 해석 방법

2.1. 해석 개요

파형강판 구조물은 구조물에 작용하는 외부하중과 구조물 주위에 잘 다져진 지반의 상호작용에 의해 지지되는 연성구조물이다. 파형강판 구조물의 단면형상이 일정하게 유지되고 외부의 하중 조건 및 주변 지반의 다짐 효과가 설계 조건을 충족하는 경우 파형강판은 2차원 평면상태에서 압축링 이론(ring compression theory)에 의해 그 거동 및 부재에 작용하는 압축력을 쉽게 파악할 수 있다. 그러나 본 대상 구조물의 경우 기존 암거의 돌출된 날개벽의 접합부 형상에 의해 평면, 측면 등 3차원적 비대칭 자유단이 발생되어 파형강판의 거동이 원활하게 발생하는 규칙적인 '반원아치 구간'과 그렇지 못한 '변단면 아치구간(콘크리트 박스 접합부 인접 구간)'이 강판의 연속성으로 일체 거동을 하게되므로 2차원 해석만으로는 실제 구조물의 거동을 정확하게 파악하기가 어려울 것으로 판단되어 파형강판 구조물의 실제 단면형상을 3차원 모델로 구성하여 범용 프로그램은 'ALGOR'을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

2.2. 해석 방법

구조해석시 파형강판 구조물은 3-절점, 혹은 4-절점으로 구성되는 3차원 플레이트/셸 요소로 구성하였으며, 구조물의 지지 조건은 경계요소를 사용하여 지반의 지지 상태를 묘사하였다.

그리고, 콘크리트 박스와의 접합부 처리 방법에 따른 구조적 거동의 차이를 분석하기 위하여 변단면 아치 구간의 지지 조건을 ① 변위 및 회전을 모두 구속(case 1), ② 변위 및 회전을 허용(case 2)한 경우로 구분하여 각각의 경우에 대해 해석을 수행하였다.

구조물의 해석은 암거 상부의 다짐 성토가 완료된 후 구조물 상부에 작용하는 연직 하중과 구조물의 측면에 작용하는 토압이 동시에 작용하는 경우에 대해서 수행하였으며, 이 외의 지반 조건은 모델링하지 않았다.

3. 구조 해석

3.1. 해석 모델

파형강판 암거의 해석을 위해 작성된 유한요소망은 그림 3과 같다.

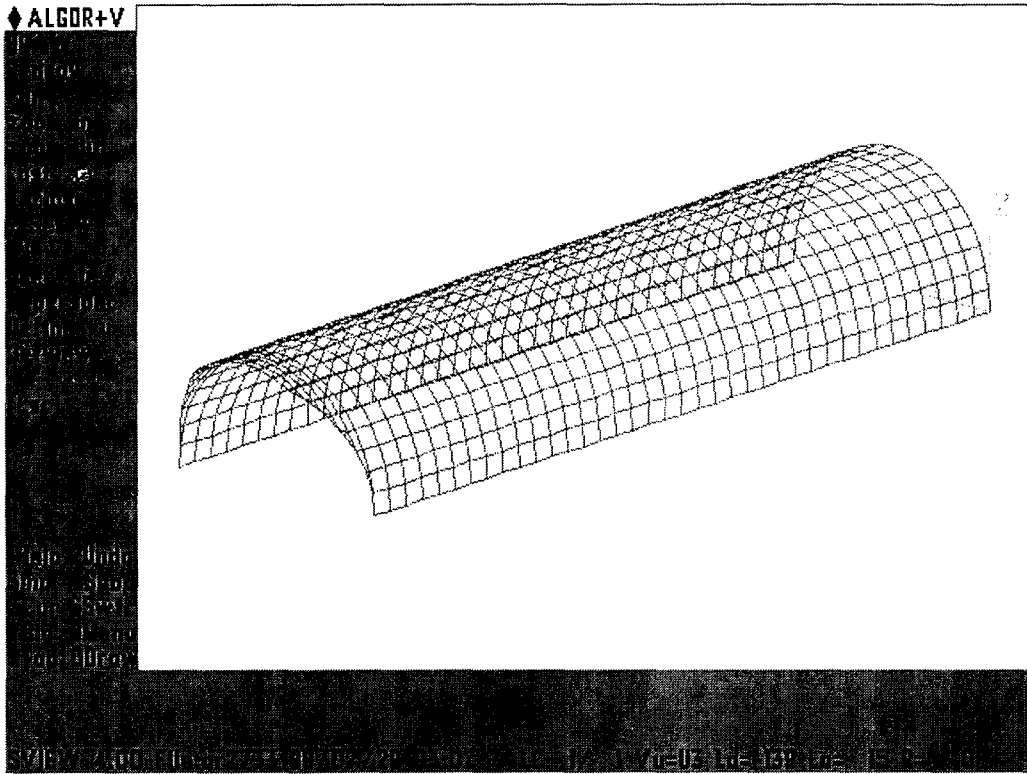


그림 4. 3차원 해석을 위해 형성한 파형강판 구조물의 유한요소망

3.2. 파형강판의 적용 단면 제원과 하중 조건

본 현장에 적용된 파형강판의 단위 길이(1cm)당 단면 제원은 다음과 같다.

- 구조형식 : 반원아치(직경 5.0m)
- 두께(t) : 4.5 mm (/cm)
- 단면적(A) : 0.5588 cm² (/cm)
- 단면계수(z) : 0.6049 cm³ (/cm)
- 단면2차모멘트(I) : 1.6484 cm⁴ (/cm)

구조해석에 적용한 탄성계수(E_s)는 2.1×10^7 t/m²이며, 플레이트/셸 요소의 두께는 제시된 파형강판의 단면2차모멘트로부터 원래의 단면2차모멘트를 확보할 수 있는 요소의 두께를 구하여 적용하였다(원단면의 경우 $I=(bt^3)/12 \rightarrow t=(12I/b)^{1/3}$).

구조물에 작용하는 하중은 연직하중과 수평토압으로 조합되는데, 구조물 상부의 연직 하중으로는 파형강판 구조물의 자중(self-seight)과 정해진 토피고에 대한 구조물 위의 상재토 하중을 고려하였으며, 구조물 측면의 토압은 구조물의 변위(팽창, 압축) 상태에 따라 구간별로 토압계수를 달리하여 계산하였다.

4. 해석 결과

해석 결과 나타난 주응력 분포는 그림 5~8과 같으며, 이를 표 1에 정리하였다. 표 1과 그림 6에서 알 수 있듯이 '변단면 아치 구간'의 변위를 구속할 경우(case 1)에는 원활한 아치 작용을 기대하기 어려운 변단면 구간에서 콘크리트 박스 접속부의 구속 효과로 인한 응력집중으로 최소주응력 값이 허용응력(1400kg/cm²) 이상으로 매우 커져 이 부분의 강판에 무리가 발생할 가능성이 클 것으로 판단하였다. 이에 비해 변위를 구속하지 않은 경우(case 2)에는 '변단면 아치 구간'의 자유단에 가해진 하중이 '반원 아치 구간'으로 고르게 전파되어 강판에 강판에 작용하는 최대, 최소 주응력이 허용응력을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

한편, 변위를 허용한 case 2의 경우 '반원 아치 구간'과 '변단면 아치 구간'에서 발생한 수직변위가 약 2cm 정도로 나타났으나, 대부분의 경우 이러한 현상은 측면 및 상부 다짐 완료 후 구조물이 변형된 상태에서 안정화되므로 실제 문제는 없는 것으로 볼 수 있다.

표 1. 유한요소해석 결과

구분	case 1 (변단면 아치부 변위를 구속)		case 2 (변단면 아치부 변위를 허용)	
	최대주응력 σ_{max}	최소주응력 σ_{min}	최대주응력 σ_{max}	최소주응력 σ_{min}
최대주응력 σ_{max}	1218.1 kg/cm ²	O.K.	1338.5 kg/cm ²	O.K.
최소주응력 σ_{min}	-3579.2 kg/cm ²	N.G.	-1202.5 kg/cm ²	O.K.

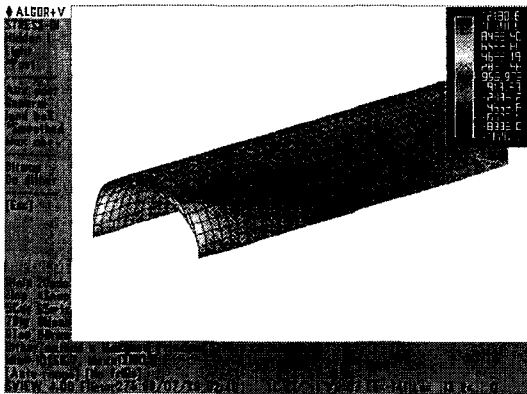


그림 5. case 1의 최대주응력 분포

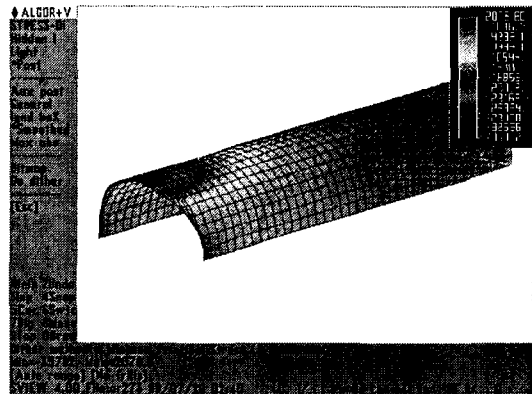


그림 6. case 1의 최소주응력 분포

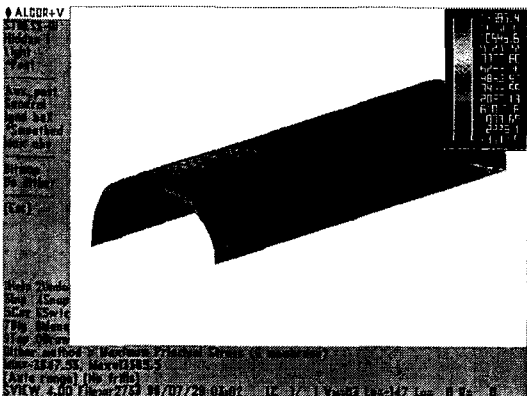


그림 7. case 2의 최대주응력 분포

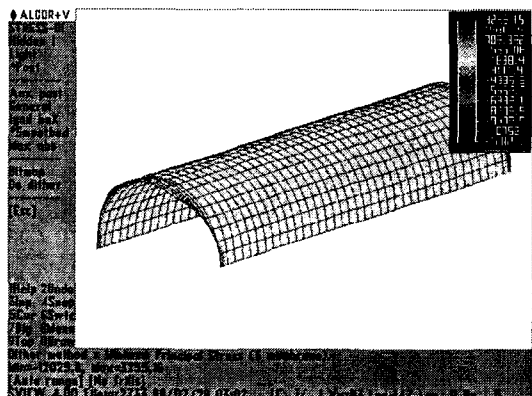


그림 8. case 2의 최소주응력 분포

5. 접합부 처리 방법 제시

앞의 해석 결과에 따라 신설되는 파형강판 구조물과 기존 콘크리트 박스의 접합부는 어느 정도의 변위를 허용할 수 있는 구조를 가져야 할 것으로 판단되었다. 즉, 파형강판 구조물의 '변단면 아치 구간'의 경계 조건을 구속할 경우 구조물의 응력 분산이 불리해지므로, 기존 박스 암거의 날개벽에 접합되는 파형강판 구조물의 접합 형식은 완전고정의 지지 형식을 배제하고, 시공 완료시까지 자유단 지지 형태를 유지하도록 하였으며, 시공 도중 및 시공 후 작업장비와 과재하중 등에 의해 발생할 수 있는 추가적인 부등변위를 최소화하기 위하여 기존 날개벽에 보강 설치된 강보강재와 파형강판 사이에 탄성지지 (elastic bearing) 효과를 갖는 고무완충재를 설치하였다. 접합부의 실제 설계 단면은 그림 9와 같다.

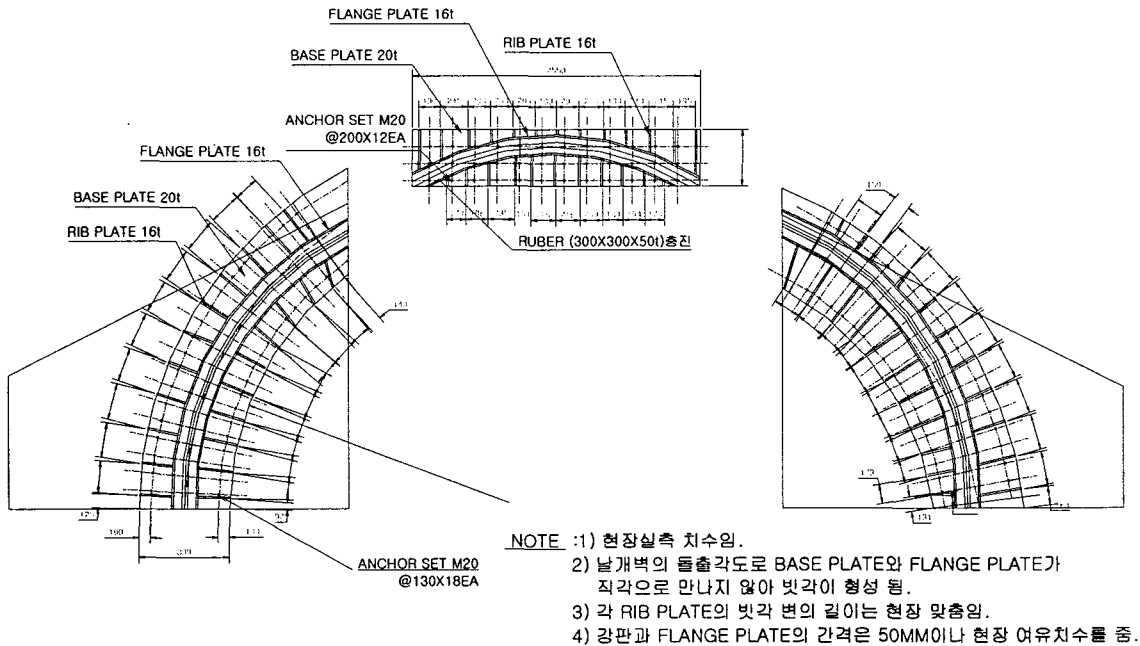


그림 9. 접합부 처리 설계 단면도(평산공영, 1999)

6. 결론

고속도로 하부를 횡단하는 지중 통로용 암거를 반원 아치 형태의 파형강판 구조물로 신규 시공하면서 기존의 콘크리트 박스 날개벽과 연결되는 접합부에 대한 3차원 유한요소해석 결과와 처리 방안을 제시하였다. 해석 결과, 강판 단면의 안정을 유지하기 위해서는 접합부의 변위를 어느 정도 허용해야 할 것으로 나타났으며, 이에 따라 파형강판 변단면 아치부와 콘크리트 암거 날개벽의 접속부는 두 구조물을 완전하게 고정하여 결합시키지 않고 접합부 파형강판의 수직변위를 허용하는 방식으로 처리하였다.

참고문헌

1. Abdel-Sayed, George., Bakht, Baidar., and Jaeger, Leslie(1993), *Soil-Steel Bridges : Design & Constructions*, McGraw Hill
2. 평산공영주식회사(1999), 파형강판 지중암거 구조물 시험시공 결과보고서
3. 한국도로공사(1999), 경부고속도로(구미-동대구간) 8차로 확장공사 파형강판 가시설 구조물 적용성 검토 기술자문 보고서