

편향부를 부착한 Prestressed Steel Girder를 이용한 가교 공법 소개

박 선 규*

1. 기술 개발 배경

기존의 가설 교량공법은 I-Beam과 복공판을 사용하여 지간거리가 짧고 복잡한 형상을 하고 있기 때문에 공사비의 과다 지출, 공사기간의 장기화 등 시공성이 현저히 떨어지는 실정이다. 또한 해체시 대부분의 자재를 고재 처리해야 하는 부담과, 우기 시 유량의 증가로 인해 해체 후 재 설치하는 등의 예산 낭비의 문제점이 있다. 따라서 경제효과를 극대화하고, 가설 교량의 안전성을 최대한 확보하며, 기존 가설교량공법이 가지는 시공성을 더욱 향상시키기 위하여 본 공법을 개발하였다.

2. 기존 가교 공법의 문제점

- 지간이 짧기 때문에 기초 H-PILE이 다량으로 투입된다.
- 용접식 현장시공으로 인하여 시공성이 떨어지고, 공기가 장기화 된다.
- 주형보, 횡빔, 보강재, 브레싱, 복공판 등 복잡한 형상으로 인하여 경제성이 저하된다.
- 해체방법에 있어, 산소를 이용한 해체를 하므로

고재가 다수 발생하게 되며, 이로 인한 경제성 저하와 공사기간의 장기화가 초래된다.

- 사용기간의 한계로 인하여 통수 단면이 좁아 홍수로 인한 유량의 증가시 철거하고 재설치해야 하므로 가설교량의 한계를 가진다.

본 기술의 가설교량과 같이 공장에서 규격화하여 제작, 시공 할 수 있는 교량에 프리스트레스트를 도입 할 경우 장지간 시공이 가능해짐으로써 공기가 절약되고 경제적이며, 시공능력 또한 더욱 향상된다.

Tendon을 이용하여 강교량에 외부 긴장하는 기술은 새로운 교량을 신설할 경우나 기존 교량의 내하력 증진과 보강하는데 쓰일 수 있다. 프리스트레싱의 기술적, 경제적 유용성은 콘크리트에 도입하면서 폭넓게 발전되었으나, 프리스트레스트 강교량은 상대적으로 더딘 발전을 보였다. 인장응력에 취약한 콘크리트 부재 단면과 달리, 강부재 단면은 특별한 응력 분포가 필요하지 않다. 또한 강구조물에서는 강연선이 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서 발생하는 큰 마찰손실을 일으키지 않는다. 그러나 프리스트레스트 콘크리트의 발전은 프리스트

* 정회원 · 성균관대학교 토목공학과 조교수

레스트 강교량에도 유사한 해석 방법을 적용시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다.

프리스트레스를 강구조물에 적용하면 강재의 양을 줄일 수 있어 비용을 절감할 수 있는데, 주로 새들(saddle), 앵커, Tendon의 중량, 운송과 제하 비용, 프리스트레스를 포함한 건설비, 붕괴방지 비용과 같은 요인이 프리스트레스 강구조물의 비용에 영향을 미친다. 강재의 경제성은 구조물에 사용된 강재와 Tendon에 사용된 고강도 강재의 허용응력도 차이만큼 증가한다.

인장된 부재를 얻기 위해 Tendon을 프리스트레스하면 2배 이상의 내력이 상승하지만 실제 프리스트레스시의 좌굴 가능성을 고려하면, 내력의 증가는 70~80%정도 된다.

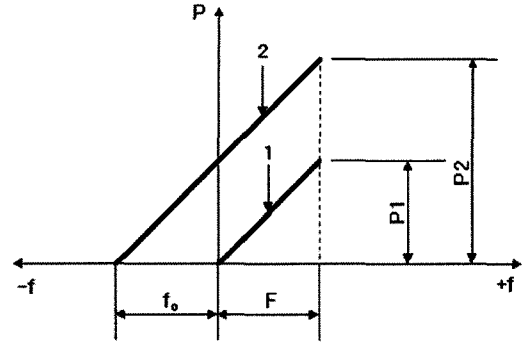
3. 기술개요

3.1 프리스트레스 I-BEAM의 이론적 배경

프리스트레스는 구조물의 강도를 증가시키기 위하여, 계산에 의한 정확한 응력을 부재단면에 도입·분포시키는 것이다. 프리스트레스 콘크리트의 목적은 하중의 작용시 각 단면에 인장응력이 작용하지 않게 하거나 일부 제한된 인장응력이 작용하게 하여 주로 압축응력을 얻는 것이다. 그러나, 하중을 받는 프리스트레스 강구조물의 경우 동일단면 내에 인장력과 압축력이 동시에 존재한다. 결과적으로 강구조물의 유효 단면적이 콘크리트의 유효 단면적 보다 커지기 때문에 강구조물에 프리스트레스를 도입하면 콘크리트의 경우보다 더 경제적이다.

프리스트레스는 강구조물이나 구조부재에 작용 하중에 의한 응력과 반대의 응력을 인위적으로 도입시키는 것이다. 그림 1과 같이 구조물에 작용하는 하중에 의한 응력과 반대방향의 응력을 갖는 f_0 를 도입하면 재료의 탄성일 범위는 증가한다.

프리스트레스를 도입하면, 초기응력 f_0 가 생성되고, 하중 P 가 작용해서 Tendon의 응력은 허용응력 F 에 도달한다. 프리스트레스 Tendon이 지닌 인장력은 프리스트레스를 도입하지 않은 Tendon이 가진 인장력보다 $f_0 \cdot A$ 만큼 더 커진다.



1: without prestressing, 2: with prestressing

그림 1

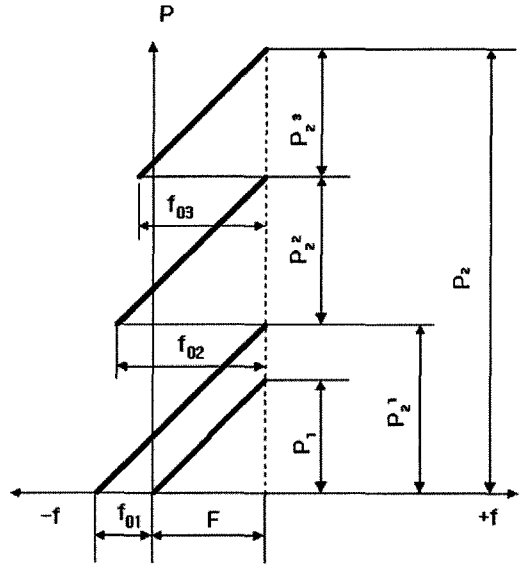


그림 2

또한, 다단계 프리스트레스를 가함으로써, 내력을 점차적으로 증가시킬 수가 있는데, 그림 2와 같이 몇 회의 사이클로 프리스트레스와 구하고자 하는 하중을 얻을 수 있다. 변화하는 작용하중 P_1 하에서, 초기응력 f_0 는 한계값 F 에 도달할 때까지 Tendon에 작용한다. 두 번째 사이클에서 획득된 응력과 작용하중 P_2 를 감소시키는 초기응력 f_0 가 다시 주어진다.

몇 번의 사이클 후에, 하중의 합 P_2 는 프리스트레스를 도입하지 않은 구조물이 받을 수 있는 P_1 보다 몇 배가 더 크게 된다. 일반적으로 구하고자 하는 하중은 3~4번의 사이클로 얻을 수 있다.

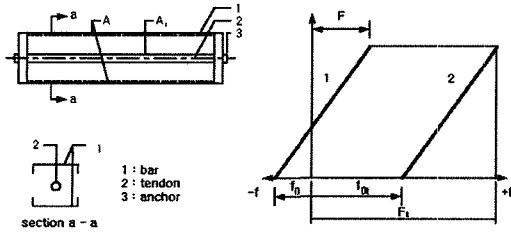


그림 3

케이블이나 Tendon은 강도가 일반 강재와 비교하여 4~6배 더 크기 때문에 이러한 형태의 프리스트레스를 적용함으로써, 고강도 재료를 효과적, 경제적으로 구조물에 사용할 수 있다.

프리스트레스트 강구조물의 거동을 이해하기 위해, 하중 작용상태하에서 각형 단면의 Tendon과 같은 단순 모델을 예로 들었다. 단면적이 A인 Tendon과 단면적이 At인 고강도 Tendon을 그림 3과 같이 프리스트레스를 도입하여 바(bar)에서의 허용응력 F보다 다소 작은 최대 압축응력 f0를 얻는다면, Tendon은 한계 저항력 Ft보다 작은 프리스트레스를 가하기 위한 상태의 인장응력 f0t에 있게 된다. 그 후 외력에 의해 Tendon은 인장되어 강재와 Tendon의 저항력을 완전히 이용할 수 있다. 프리스트레스 f0t를 받은 Tendon에, Tendon의 응력에 해당하는 인장응력도(Ft-f0t)가 추가되거나, (F+f0)과 같게 된다.

여기서 E와 Et는 각각 바(bar)와 Tendon의 탄성계수를 나타낸다.

Tendon은 인장변형을 받고, 응력은 (F+f0)에 대응한다. 사용하중에서 Tendon은 (F+f0)의 응력을 받을 수 있으며 와이어는 (Ft-f0t)의 응력을 받게 된다. 평형조건을 만족하는 단면적을 선택함으로써 한계응력은 Tendon과 와이어에서 동시에 얻어진다. 이 경우, 합성 부재가 갖는 전체 저항력은 다음과 같다.

$$P=AF+At \quad Ft=AF(1+\alpha \cdot \beta) \quad (1a)$$

여기서, $\alpha = \frac{A_t}{A}$, $\beta = \frac{F_t}{F}$ 이다.

괄호 안의 수치는 고강도 재료를 이용한 프리스트레스 시, Tendon의 내력의 증가를 의미한다. 하중을 받는 Tendon의 전체 변형은 다음 식과 같다.

$$\Delta_1 = \frac{(f_0 + F)l}{E} = \frac{(F_t + f_{0t})l_t}{E_t} \quad (1b)$$

3.2 외부 프리스트레싱 강재보(ATOM)의 범위

본 기사에서 소개하는 기술의 내용은 일반 구조용 강재 H-BEAM에 편향부(Deviator)를 설치하고, 고강도 강봉 및 강연선(이하 텐던)으로 외부 프리스트레싱을 도입하여 인장력을 향상시키고, 플랜지의 항복을 지연시키며 장지간을 가능케한 강재보에 대해서 이다.

본 기술은 일반 구조용 H-BEAM에 수직 및 수평 보강재와 H-BEAM 하부 중앙에 편향부(Deviator)를 부착하고 양끝단에 정착구를 설치하여 고강도 강봉(강연선)을 사용하여 프리스트레싱 시킴으로써 텐던(Tendon)의 인장력과 상판의 압축력에 의한 모멘트 커플을 발생시키고, 고강도 텐던(Tendon)으로 저장도 강재를 대체하여 강재 무게를 경감시키며, 텐던의 프리스트레싱은 부정적여력(Redundancy)을 향상시킴을 이용하여, 안전성 및 사용성을 확보한 강재보로, 장지간의 가설교량을 설계 및 제작, 시공할 수 있는 기술 이다.

3.3 외부 프리스트레싱 강재보(ATOM)의 특징

3.3.1 역학적 특징

- (1) 고장력 텐던(Tendon)에서의 인장력과 상부 H-Beam에서의 압축력으로 모멘트 커플
- (2) 프리스트레싱은 플랜지의 항복을 지연
- (3) 고강도 텐던으로 저장도 강재를 대체
- (4) 텐던의 프리스트레싱은 부정적 여력을 향상

3.3.2 편향부(Deviator) 효과의 특징

$$e = e_0 - \Delta, \quad d_{ps} = d_{ps0} - \Delta$$

e_0, d_{ps0} = Initial eccentricity depth of external ps tendon

Δ = Deflection

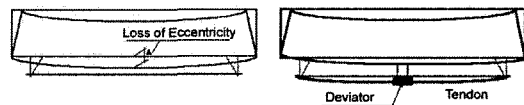


그림 4

3.3.3 실험 DATA 비교

편향부 유무에 따른 H-Beam의 응력 비교를 통해, 편향부(Deviator) 효과를 그림 5와 같이 압축측 및 인장측 응력을 실험에 의해 비교하였다.

그림 6, 그림 7은 일반 구조용 강재와 편향부 유무에 따른 변형을 비교이다.

그 결과는 그림 8과 표 1에서 수치적으로 비교해

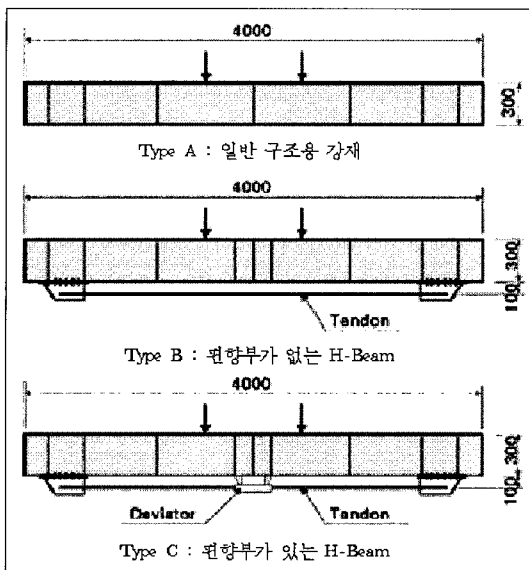


그림 5 편향부 유무에 따른 실험 모델

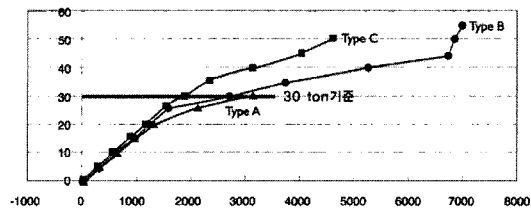


그림 6 압축측 변형률

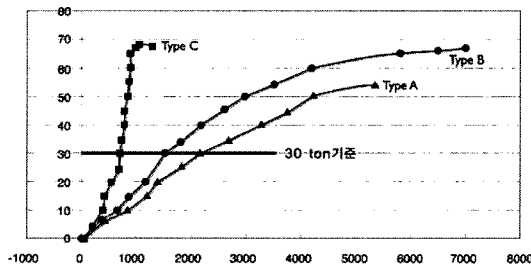


그림 7 인장측 변형률

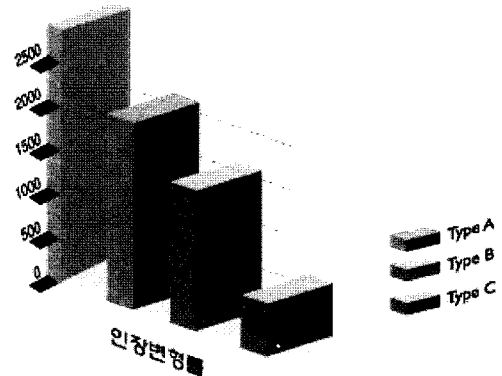
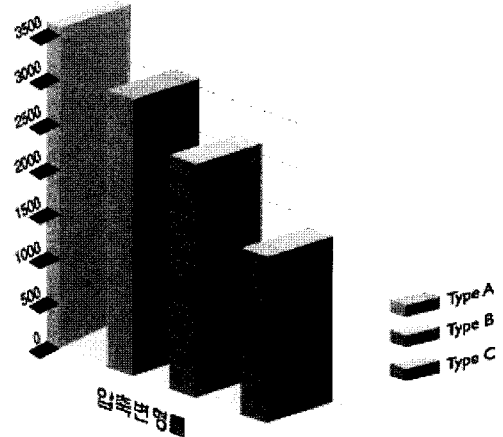


그림 8

표 1

30tonf 기준 data 비교				
	압축변형률		인장변형률	
TypeA	3116.4	100.0%	2098.8	100.0%
TypeB	2683.8	86.1%	1576.2	75.1%
TypeC	1823.2	58.5%	636.0	30.3%

보았다. 그 결과 일반 구조용 강재보다는 편향부를 설치하여 실험한 H-Beam의 내하력이 약 50% 이상 증가됨을 알 수 있고, 편향부가 없는 H-Beam 보다는 20~30%정도의 내하력 증가 효과가 있음을 알 수 있다.

4. 현장 실험 결과 및 분석

4.1 개요

본 연구에서 제안된 외부 긴장된 I-Beam의 현장 적용을 위해 라멘 형태의 실 구조물을 제작 시공한 결과를 실험 분석 하였다.

현장재하시험은 대상 구조물의 실제 거동을 파악하여 안전성 및 내하력을 평가하기 위한 것이고, 본 구조물의 설계에 대한 이론적 타당성을 검증하여 외부 후 긴장된 라멘교의 거동특성을 파악해 보았다.

4.2 실험계획

4.2.1 실험 교량 제원

이 ATOM 가설교량은 라멘형식으로 주형의 허용 응력은 $f_{sa}=1,400\text{kgf/cm}^2$ 이고, 허용 전단응력은 $\tau = 800\text{kgf/cm}^2$ 이다. Tendon은 36mm Dywidag Bar을 사용하였고 허용응력은 $f_{sa}=6,200\text{kgf/cm}^2$ 이다.

가설교량의 실제 모델은 그림 9와 같이 주형 700×300빔에 하부 플랜지에서 40cm되는 편심에 고강도 Tendon으로 외부 후긴장한 형태이고, 상부는 복공판으로 덮여져있다. 이 구조물은 허용응력법에 의해 1등급 교량(DB-24하중)으로 설계되었다.

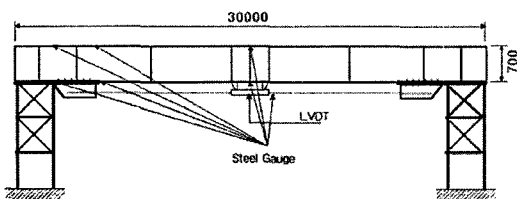


그림 9

4.2.2 실험용 차량 제원 및 재하위치

그림 10에서 보는 것과 같이 실험용 차량은 15tonf 덤프트럭을 이용하였다.

하중 재하 위치는 그림 11와 같으며, 편심 재하 및 교량폭 중심에 재하하여 데이터를 얻어 분석하였다. 그리고 Gauge 위치는 그림 9에서 보는 바와 같이 주형 상부, 하부 플랜지 및 Tendon에 배치하였고, 최대 부재력 발생 부위에 Steel Gauge를 부

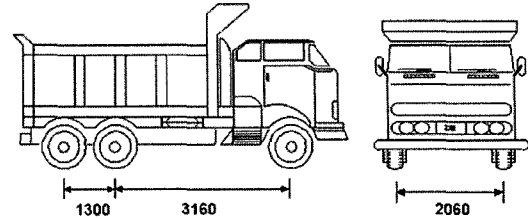


그림 10

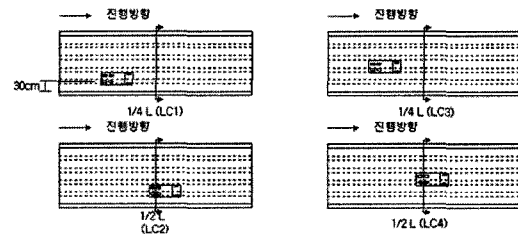


그림 11

착하였다. 수직 변위 측정기(LVDT)는 경간 1/2 지점에 설치하여 수직 변위를 측정하였다.

4.3 해석 및 분석

해석은 범용 유한요소 해석 프로그램에 의해 수행되었고, 실구조물설계시에는 운하중(Sap Bridge)을 재하하여 해석하였다. 여기서는 15tonf 덤프트럭을 정적 재하하여 데이터를 비교 분석하여 내하력을 평가하였다.

4.3.1 해석

부재력 및 처짐은 각 하중 재하 위치에 따라 똑같은 조건으로 하중 재하하여 얻어진 값을 사용하였다. I-Beam과 교각 및 횡방향 보강재는 프레임 요소를 사용하였고, Tendon은 직선 트러스 요소로 모델링하여 해석하였다.

4.3.2 분석

단계별 하중에 대한 구조해석은 재하 하중에 의한 구조해석값과 현장측정값과의 비교 분석하여 응답비를 구하였다. 이때 실측응력은 측정된 변형률에 Steel의 탄성계수값을 곱하여 얻어진 값이다. 결과는 표 2, 표 3과 같다.

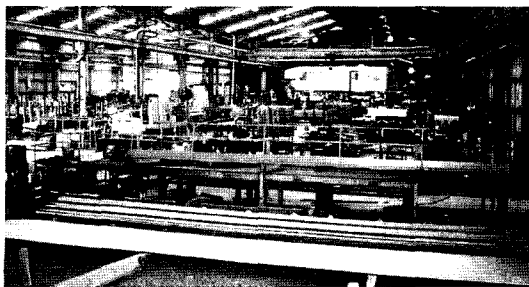
표 2 처짐비교

	LC2		LC4	
	해석결과	실험결과	해석결과	실험결과
1번 주형	-2.366	-2.535	-2.157	-1.605
2번 주형	-2.156	-2.595	-2.157	-2.411

표 3 응력비교 및 응답비(시간 1/2 지점)

	응력	LC2		응답비 (5)	LC4		응답비 (5)
		해석	실험		해석	실험	
1번 주형	f top	589.6	407.3	0.7	484.0	274.1	0.6
	f bottom	-453.7	-362.6	0.8	-390.5	-317.8	0.8
2번 주형	f top	479.1	452.0	0.9	479.1	452.0	0.9
	f bottom	-390.7	-384.9	1.0	-390.7	-387.3	1.0

하중 경우별 처짐이나 응력의 실측치를 계산치와 비교한 응답비를 가지고 프리스트레스트 I-Beam의 안전성을 평가하였다. 응답비가 1보다 작다는 것은 실제 구조물이 가지고 있는 내하력이 계산된 내하력 보다 커서 구조물이 안전하다는 것을 의미하는데, 본 연구에서 수행한 프리스트레스트 I-Beam의 처짐에 대한 응답비는 0.7~1.071 정도로 그 값들이 일정한 분포로 나타났고, 응력의 경우는 0.6~1.0 사이로 일정한 분포를 보여 주고 있다. 현장 재하시험 결과는 하중-처짐 응답비가 0.88로 나타났고, 변형률도 평균 0.8로 나타나 프리스트레스트 I-Beam은 구조적으로 안전성을 확보함을 알 수 있다. 따라서, 시험대상인 남양주 프리스트레스트 I-Beam은 소요의 안전성을 확보하고 있어 실 구조물로 사용이 가능하다고 판단된다.



제작과정(공장 제작)

5. 결 론

본 연구개발에서는 보강공법의 하나인 후긴장 공법을 I-Beam에 적용에 있어서, 여러 가지 조건의 실험체를 제작하여 정적 재하 실험을 실시하여 프리스트레스트 I-Beam의 거동과 보강효과를 분석하였다. 프리스트레스트 I-Beam의 실험체는 파괴까지 실험하였고, 긴장력과 적용된 하중 하에서 처짐, 변형률의 증가를 측정하였다. 하중 재하부터 선형 탄성 영역 값은 이론해와 비교하였다. 유연도 법에 의해 제시된 이론해는 실험 결과와 선형 탄성영역 부분까지 거의 일치한 결과를 보여주고 있다.


본 ATOM공법 개발의 연구내에서 도출된 결론은 다음과 같다.

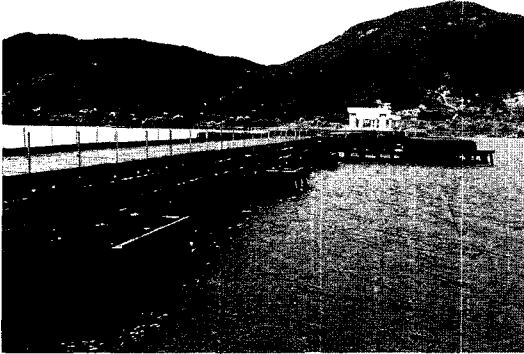
- (1) I-Beam에 프리스트레싱을 도입함으로써 항복 하중과 극한 하중을 현저하게 증가시켰다.
- (2) 본 실험에 대한 분석 결과 도입 긴장력의 증가에 따른 주형 하부 플랜지의 초기 압축 변형율에 상승에 의하여 상당한 보강 효과가 분석되었으며, 최대 처짐부에 설치된 편향부(Deviator)는 사용하중에서 편향부가 없는 실험체보다 30~40%의 내하력 증가효과를 보였다.
- (3) 정적 재하 실험에 있어서 동일 하중의 발생 변형율은 도입 압축 변형율이 높을수록 낮아지는 것으로 분석되어 긴장력 증가에 따른 보강 효과의 상승이 나타났다.
- (4) ATOM공법으로 실제 가설된 프리스트레스트 I-Beam의 안전성 평가결과 프리스트레스트 Steel I-Beam의 처짐에 대한 응답비는 0.7~1.071 정도로 그 값들이 일정한 분포로 나타났



우회용 가교

고, 응력의 경우는 0.6~1.0 사이로 일정한 분포를 보여 주고 있다. 그러므로, 현장재하 시험

결과 구조물은 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타나고 있다. 



공사용 가교



긴급복구용 가교