

JES 공법의 JOINT ELEMENT 이음부에 관한 연구

A Study on the Joint Element Connection of Joint Element Structure Method

엄기영¹, 박명준²

Ki-Young Eum and Myung-Joon Park

Keywords : JES Method, internal stress

Abstract

Recently developed JES(Joint Element Structure) Method was researched as a more safe and economic method than other under pass construction method and was applied to many construction sites. The joint element connection of JES Method is the most important factor for the to behavior of structure. The connection of JES method is filled with the mortar, and the steel and mortar of connections produce the same behavior as one material. The results of experience and numerical analysis are following; The maximum internal stress of connection is decided by the end of connection. also, The connection of joint element structure method have sufficient internal stress against fatigue.

1. 서론

JES공법은 기존 철도 및 고속도로 하부 횡단 공법의 단점인 축직각 방향 인장 하중 전달 메카니즘을 개발하여 엘리먼트간의 연결을 강결시켜 횡단면 연장에 제한을 받지 않고 노반면 보호공 역할 및 본체 구조물의 역할을 복합 수행하는 효율적인 공법이다. 구조적으로 강재 엘리먼트의 플렌지가 인장력을 담당하고 엘리먼트 내부에 타설한 콘크리트가 압축력을 담당하는 단철근직사각형보와 동일한 거동을 하게 된다. JES 공법의 장점인 축직각 방향 강성 증대를 위해서는 인장력을 전달하는 엘리먼트 간의 이음부에 대한 거동 특성의 검토를 필요로 한다. 본 고에서는 JES공법이음의 인장 거동

특성을 유한요소법을 통한 수치해석적 접근을 통하여 검토하고, JR 동일본 철도에서 시행한 기존의 실험 자료와 비교검토를 수행한다.

2. 기본 가정 및 해석 개요

JES 연결부는 소정의 엘리먼트 연결 후 연결부 내부를 무수축 몰탈로 그라우트하고 엘리먼트 내부에 콘크리트를 타설하게 된다. 무수축 몰탈을 타설한 후에는 연결부는 일체로 거동하는 것으로 가정하게 된다. 엘리먼트 삽입 직후에는 JES 연결부의 물리적 재료 특성 및 기하학적 특성에 의해서만 인장 거동을 하게 된다. 본 검토에서는 무수축 몰탈로 충전되지 않은 상태에서의 연결부 두께를 가진 평면변형률 요소의 접촉(Contact) 거동을 하는 유한요소법을 이용하여 인장력에 의한 변형에 따른 특성을 고찰한다.

*1 한국철도기술연구원, 인프라기술개발팀장, 선임연구원

*2 한국철도기술연구원, 연구원

비교항목	공법명	HEP & JES 공법	종래공법
굴진방법		엘리먼트 견인방법	엘리먼트 원압 추진방법
연결방법		연결판에 의한 마찰접합방법	용접에 의한 일체화 접합방법
연결부에서의 작용력		후속 엘리먼트의 ① 주변마찰저항 ② 이음부의 연결저항	선단슈를 포함한 전체의 ① 주변마찰저항 ② 잭선의 연결저항 ③ 선단슈관입저항
연결에 알맞은 위치맞춤		용이하고 단시간에 완료	정도, 시간이 필요
연결작업시간		단시간(볼트접합시간)	장시간(용접시간 : 56 min/m)
관리방법		일정 토크크형 볼트 사용 - 확실하고 간단	용접후 카라 체크, 비파괴심사가 필요
연결작업의 난이도		특수한 기술이 불필요	고도의 기술이 필요

2.1 사용 프로그램

(마찰계수 = 0.1)

연결부에 대한 수치 해석적 방법을 도입하기 위해서는 대변형을 일으키는 탄소성(Elasto-Plastic) 재료 물성치를 모델링할 수 있어야 하며, 연결부의 접촉을 통한 하중전달기구(Surface to Surface Contact)를 모델링할 수 있어야 하고, 대변형에 따른 적합적 요소망 생성(Adaptive Mesh Generation)이 가능해야만 한다. 이러한 여러 조건을 만족하는 SAS IP사의 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS Multiphysics를 이용하였다.(<http://www.ansys.com>)

2.4 유한요소모델

2.2 시험 방법

항복 이후의 거동을 살펴보기 위해서 변위 제어 방법을 사용하였다.

변위 재하 : 0 ~ 15 mm 단조 증가

하중 재하 방법 : 반력을 측정하여 하중 산정

2.3 JES 연결부 특성

강종 : SM400

탄성계수 : $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$

비례한계에서의 응력 : 235.2 N/mm^2

극한상태에서의 응력 : 392.8 N/mm^2

포아송비 : 0.3

사용 요소 : 평면 변형 요소(Plane Strain)

재료의 응력 변형률 특성 : Kinematic Hardening

하중 전달 기구 : Surface to Surface Contact

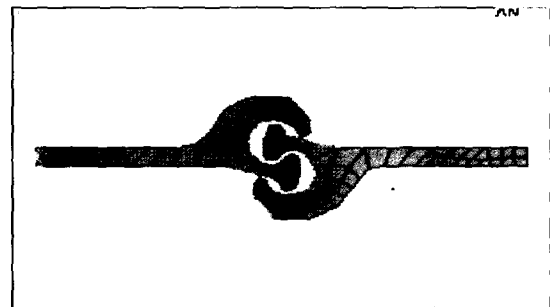


Fig. 1 평면변형을 요소로 모델링된 표준 JES 연결부

JES 연결부는 부식을 고려하지 않은 16 mm 목두께로 가정하였으며 이음부 구조는 표준 연결부 구조를 이용하였다. 연결부는 연결부의 길이에 비하여 종방향의 길이가 상대적으로 길어서 평면 변형률 조건에 적합하다. 좌측 연결부의 단부를 구속하고 우측 연결부에 변위를 가하였다. 두 부재는 초기에 분리되어 있는 구

조로 하여 초기 강제 운동을 모사하였다.

유한요소법을 이용하여 접촉 거동을 해석하기 위해서는 접촉 가능 영역을 정의할 필요가 있다. 연결부의 구조는 두 부재가 서로 맞물려 있으므로 접촉 가능 영역을 확실히 지정할 수 있다. 접촉부의 마찰계수는 0.1로 설정하였다.

엘리먼트 강판과 JES 표준 연결부의 연결은 공장용 접에 의해서 이루어진다. 접촉부의 거동과 연결부의 거동의 관계를 명확히 규명하기 위해서는 해석에 사용된 강재의 대변형 거동을 모델링할 수 있도록 Plastic 모델을 도입하여야 한다.

본 검토에서는 대부분의 금속거동의 표현이 잘 이루어지는 von Mises yield criterion에 따라 Kinematic Hardening 거동을 하는 소성 모델을 사용하였다.

2.5 해석 결과 및 검토

15 mm를 이동시키면서 각 단계에서의 응력 상태 및 변형률에 대해서 검토하였다. Fig. 6에서 3.905 mm의 변위가 발생하였을 때 초기 접촉이 발생하였으며 내측에 휨인장 응력이 발생하기 시작하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 2~5는 일차 접촉 발생 후 지속적인 하중의 증가로 항복구간이 연결부분에 발생하였으며, 이후 회전 변형이 발생하여 2차 접촉이 발생하기 직전과 직후의 von Mises 응력 상태이다.

아래 Fig. 6은 변위 제어에 의한 유한요소 모의실험 결과 발생하는 하중-변위 곡선도이다. 일차 접촉에 의한 변위 거동이 3.905~5.184 mm에 나타나고 있으며 소성 변형에 의하여 2차 접촉이 발생할 수 있게 된다. 무수축 몰탈 그라우팅을 실시하는 경우는 초기 접촉이 되어 있으므로 바로 2차 접촉과 같은 거동을 보이게 된다.

Fig. 6에서 변위 7.3 mm 이상에서는 접촉 전단면에서 소성 변형이 발생하게 된다. 변위가 증가하면 전단면으로 소성 영역이 확대되어 연결 부분에서 Strain Hardening이 발생하면서 변형이 증대된다. 9 mm 이상의 영역에서는 전단면에 걸쳐 소성 영역이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하중 변위 곡선에서 전단면 항복 후에 변위가 증가함에 따라 하중이 줄어든 것은 접촉면이 수평에 가까워져서 접촉면에 발생하는 상호 작용력 중에서 노말 방향 성분이 감소하고 마찰계수

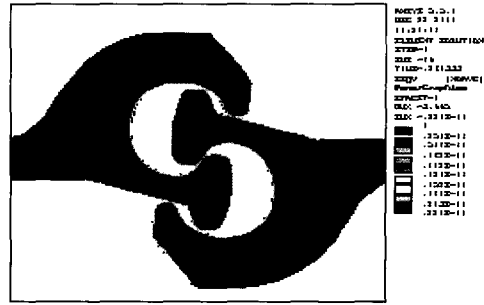


Fig. 2 초기접촉 직전의 von Mises 응력상태

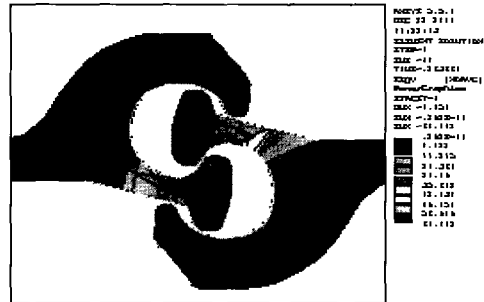


Fig. 3 초기접촉 직후의 von Mises 응력상태

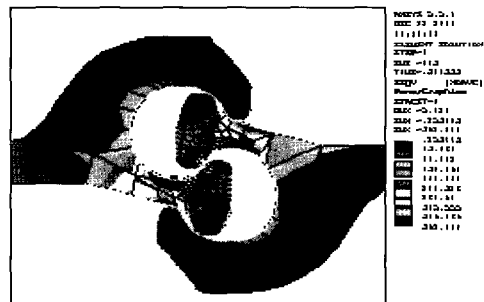


Fig. 4 이차접촉 직전의 von Mises 응력상태

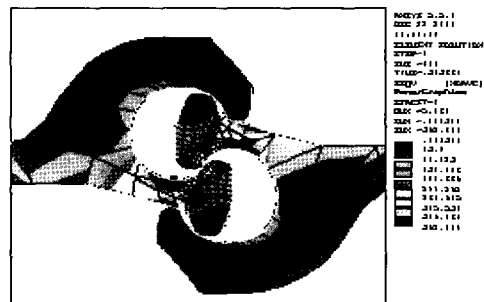


Fig. 5 이차접촉 직후의 von Mises 응력상태

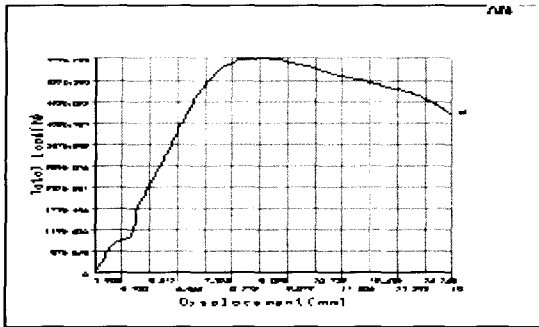


Fig. 6 P-δ curve

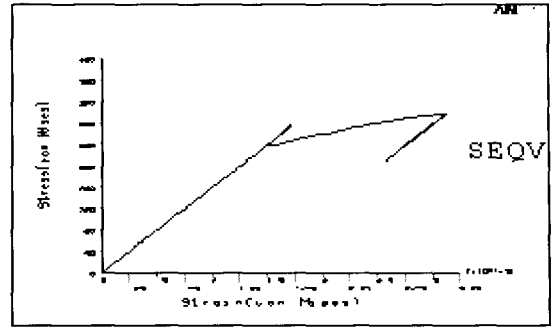


Fig. 8 용접연결부에서의 응력-변형률 곡선

가 작은 접선방향 성분이 증가하여 발생하는 것으로 재료의 물성치 특성이 아니라 소성 변형에 의한 기하학적 특성에 의해서 발생하는 것으로 JES 부재는 허용응력 설계법을 따르므로 비례한계 내에서의 거동이 중요하다.

하나의 JES 연결부(13mm 폭 강재, 허용응력 1,400 kgf/cm²) 에서 종방향 단위 길이당(1 mm) 받을 수 있는 하중은

$$P_a = 1,400 \times 1.3 \times 0.1 = 182 \text{ kgf} \approx 1,800 \text{ N}$$

유한요소 해석 결과 5,000×1.3/1.6 ≈ 4,000 N 정도의 인장하중에 대해서 탄성적 거동을 하므로 JES 부재를 설계할 때 허용응력법을 사용하는 것은 이음부에 대해서는 충분한 안전율을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9의 주응력 벡터도를 보면 주인장응력은 내측에서 주압축응력은 외측부 및 내측 고리부에 집중되고 있음을 확인할 수 있다. 최종 변형상태에서의 von Mises 응력 상태에서 보이듯이 소성 변형은 JES 연결

부에 집중되고 있으므로 연결목보다는 연결이음부가 응력이 집중되므로 연결부가 충분한 안전율을 가지고 있을 때에는 연결목 부분은 구조적으로 문제가 없을 것으로 판단된다.

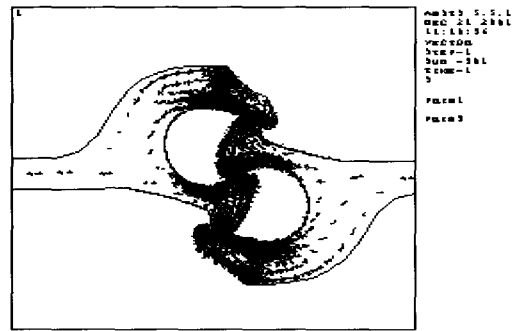


Fig. 9 최종변형상태에서의 주응력 벡터도

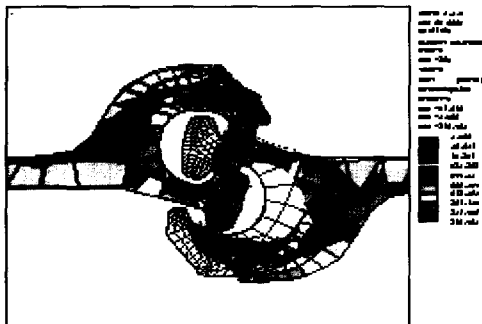


Fig. 7 최종변형 상태에서의 von Mises 응력상태

2.6 결과 분석

JES 연결 부재의 인장 시험을 유한요소 모의 실험을 통해서 행한 결과 인장에 대한 검토는 엘리먼트 강재에서의 인장응력 검토 보다는 JES 연결 부재의 확고한 연결에 중점을 두어야 함을 알 수 있다. 허용응력법에 따른 설계 결과에 의하면 연결 부재 1 m당 약 180 tonf (13 mm) 정도를 받도록 하고 있지만 해석 결과 400 tonf (13mm) 정도의 인장력을 받을 수 있음을 확인할 수 있었고, 응력-변형률 곡선으로부터 JES 연결 부재가 항복시에도 엘리먼트 연결부는 항복하지 않음도 알 수 있다. 본 검토는 유한요소를 통한

모의 실험을 통해서 이루어져 있으며 무수축 몰탈의 그라우트를 고려하지 않았으므로 실제 거동과는 차이가 있을 수 있는데 다음 Fig.는 일본에서 수행된 실제 시험 결과에 의한 하중-변위 곡선도이다. 실험에서는 13 mm×70 mm 시편을 사용하여 실험을 수행한 것으로 유한요소해석 결과를 13 mm 강재로 환산하면, 5,800 N/16mm×13 mm×70 mm = 330 kN 정도에서 항복을 하고 있으며, 실제 실험치와 항복 이전의 거동이 유사함을 알 수 있어 허용응력법을 이용한 설계법이 충분한 안전율을 가지고 있음을 실험 및 수치해석으로 확인할 수 있다.

3. 요소시험

3.1 이음부의 정적인장시험

이음부 여유부에 그라우트를 충전한 JES이음부의 인장강도를 명확히 하는 것을 목적으로 정적인장시험을 실시하였다.

3.1.1 시험 개요

이음부 여유부에 그라우트를 충전한 JES이음부의 인장강도를 명확하게 하는 것을 목적으로 하였다.

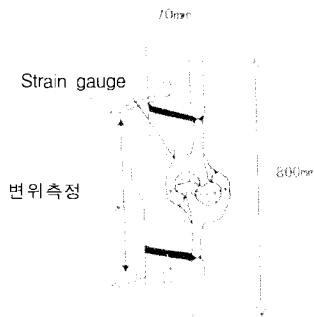


Fig. 12 인장시험 개요

3.1.2 시험내용

① 시험방법

정적인장시험은 Fig. 12에 나타난 것처럼 폭 b=70

mm의 JES이음 2체를 설치, 그 양단부에 인장력을 작용시키는 방법으로 실시하였으며, 하중은 파괴시까지 단순재하 하였다. 시험은 2,000 kN 인장시험기를 이용하여 실시하였다.

② 시험체 조건, 수량

시험체 조건은 다음과 같이 하고 그 형상치수는 Fig. 13과 같다.

- a) 연결조건 : 표준연결상태
- b) JES 이음부 재질 : SM400A-M JIS
G3106 SM400A₁
- c) 이음부 여유부의 그라우트 :
필콘R·시멘트 타입
W/C = 50%, $\sigma_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$
- d) 시험체수량 : 8개

(그라우트 충전없는 2개, 그라우트 충전있는 6개)

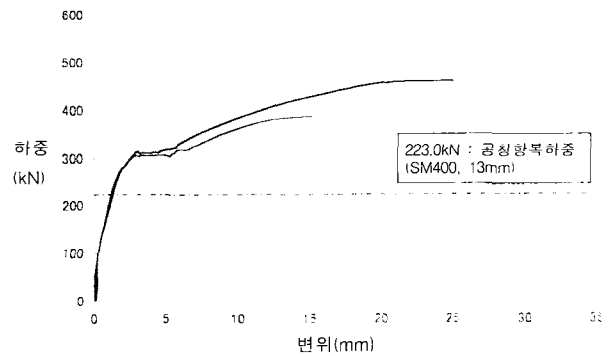


Fig. 10 무수축 몰탈을 사용하지 않았을 경우 (13mm)

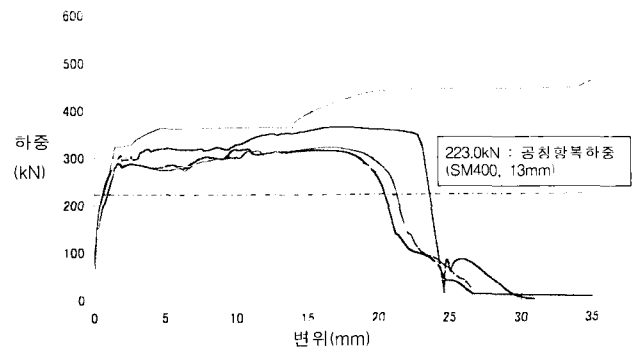


Fig. 11 무수축 몰탈로 그라우팅 했을 경우 (13mm)

③ 계측내용

하중, 지반간격 변위량

3.1.3 시험 결과

시험결과를 Table 1에 나타낸다. 또, 하중 P 지반간격 변위량 δ 와의 관계는 Fig. 14~15와 같다. 이들 결과에서 아래 사항에 대해서 확인하였다.

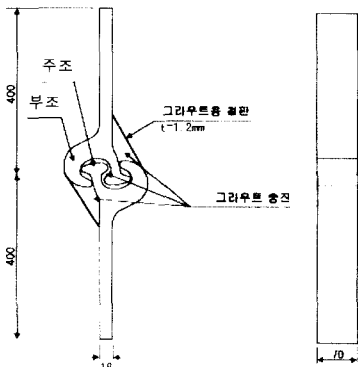


Fig. 13 JES 인장시험체 형상

① 그라우트 충진이 없는 경우, 항복하중인 300 kN 정도까지는 거의 탄성적인 거동을 나타낸다. 그 후, 이음부의 인발에 따라, 변위량이 급증하지만 바깥측의 파단에 의해 최대내력에 이르게 된다. 이음부의 파단상황을 Fig. 16에 나타낸다.

② 한편 그라우트 충진이 있는 경우도 항복하중 300

kN 근방까지는 거의 탄성적인 거동을 가지지만 그 후 그라우트가 서서히 파괴됨으로서 변위량이 급증한다. 최대내력은 이음부의 인발에 의해 결정된다. 이음부 파단형상을 Fig. 17에 나타낸다.

③ 그라우트 충진이 있고 없는 경우 모두 최대내력은 폭 13mm의 강관(SM400)의 공칭항복하중(223.0kN = 245 N/mm² × 70 mm × 13 mm)보다 크다.

④ 하중-변위관계의 초기경사를 보면 그라우트가 없는 경우는 하중이 100 kN 정도, 그라우트가 있는 경우는 160 kN 정도까지가 거의 탄성영역으로 되어 있다. 따라서 JES 이음부의 탄성범위는 강재 폭 13 mm

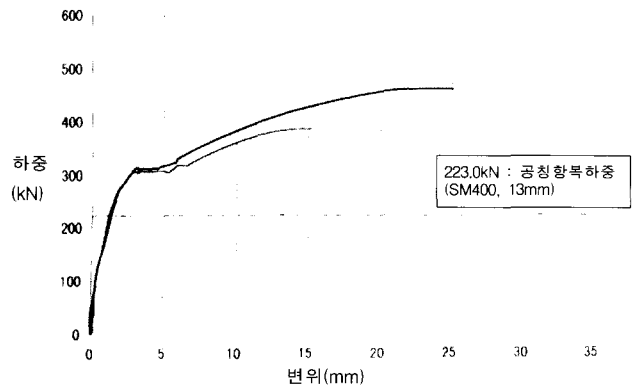


Fig. 14 JES 이음부의 인장시험결과 (그라우트 충전 없을 경우)

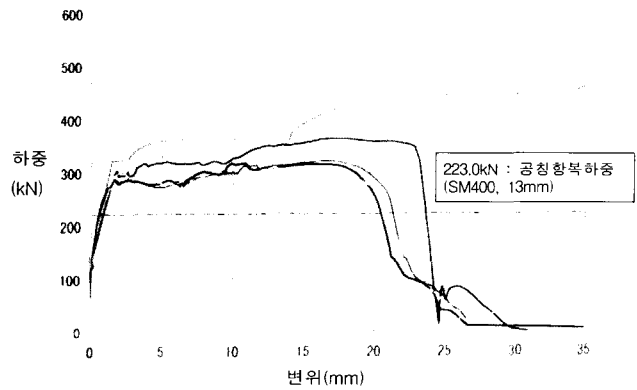


Fig. 15 JES 이음부의 인장시험결과 (그라우트 충전 있을 경우)

Table 1 JES 이음의 인장시험결과 일람

No	재질	그라우트		최대하중		파괴 형태	
		유무	강도 (N/mm ²)	실하중 (kN)	1m 환산 (MN)		
1	SM400	없음	-	478.3	6.83		
2				480.1	6.86		
3		있음	48.7	319.0	4.56		
4				323.0	4.61		
5				43.7	364.1	5.20	
6				45.8	491.9	7.03	
7				48.8	309.4	4.42	
8					290.5	4.15	

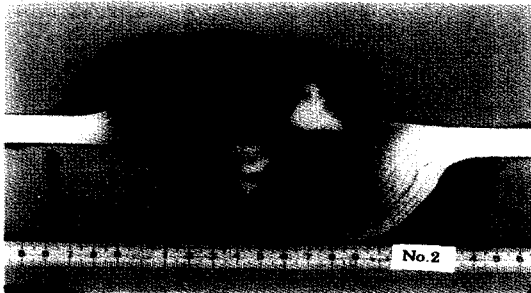
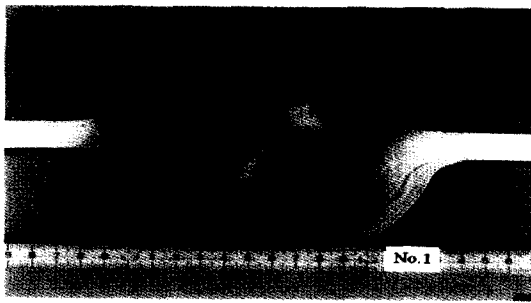


Fig. 16 파단상황 (그라우트충진이 없는 경우)

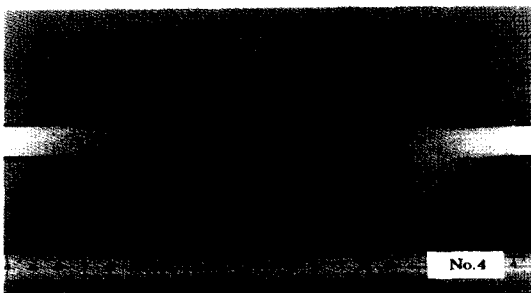
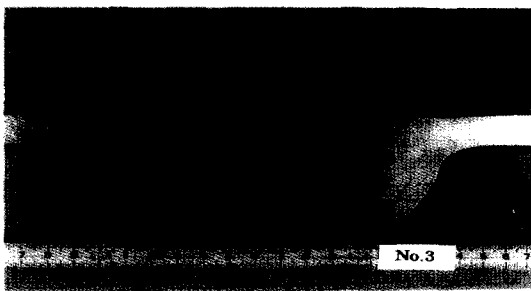


Fig. 17 파단상황 (그라우트충진이 있는 경우)

로 환산한 응력도로서 각각 110 N/mm², 176 N/mm² 정도까지로 생각한다.

3.2 이음부의 인장피로시험

이음여유부에 그라우트를 충전한 JES이음의 인장피로강도를 명확하게 하는 것을 목적으로 피로시험을 실시하였다.

3.2.1 시험개요

이음여유부에 그라우트를 충전한 JES 이음부의 인장피로강도를 명확하게 하는 것을 목적으로 실시하였다.

3.2.2 시험내용

① 시험방법

피로시험은 Fig. 18에 나타난 것처럼 폭 $b=70$ mm의 JES이음부 2체를 설치, 그 양단부에 반복인장력을 가함으로서 이음부에 일정 진폭응력을 작용시키는 방법을 실시하였다.

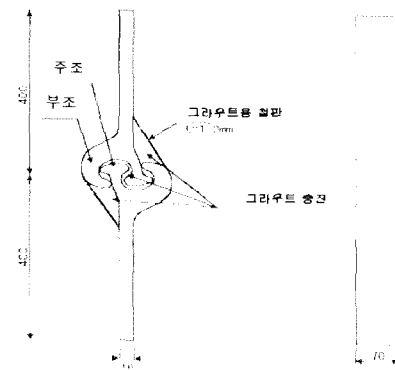


Fig. 18 JES 이음부 피로시험체 형상

하중파형은 sin파로 하중가진 진동수는 8Hz의 편진시험으로 하고, 응력 진폭을 변화시켜 피로파괴를 확인하여 이것에 의해 S-N 곡선을 구하였다.

시험은 고속피로시험기를 이용하였다.

② 시험체 조건, 수량

시험체조건과 그 형상치수는 Fig. 18과 같다.

- a) 연결조건 : 표준연결상태
- b) JES 이음부 재질 : SM400A-M
JIS G3106 「SM400A」
- c) 이음여유부의 그라우트 :
필콘R·시멘트 타입
 $W/C = 50\%$, $\sigma_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$
- d) 시험체 수량 : 48개

③ 측정내용

하중진폭, 변위진폭

3.2.3 시험결과

시험결과에서 구해진 응력진폭 $\Delta\sigma$ 와 반복회수 N과
의 관계는 Fig. 19와 같다. 응력의 진폭값 $\Delta\sigma$ 는 인장
력 진폭을 설계하여 사용하는 13 mm 판두께에서 제
한 환산응력진폭을 이용하고 있다. 또, Fig.중의 회귀
선은 파단한 케이스만을 대상으로 회귀시킨 것이다.

여기에서, 피로시험에 의한 파괴형태는

- ① 부조의 내측에 피로파장이 들어있는 케이스 (40%)
- ② 주조에 피로파장이 들어 있는 케이스(25%)
- ③ 주조와 부조의 양방에 피로파장이 들어있는 케
이스(13%)

3가지로, 모든 케이스를 적용. JES이음 형상은 부조
및 주조로의 응력집중이 거의 동등하게 되도록 해석
적으로 설정하고, 이를 위해 파단위치는 상기 3케이
스 모두 불규칙적으로 분포되어 있는 것을 고려하지
만 이들 간에는 특별한 차가 없고, 파단위치의 오차

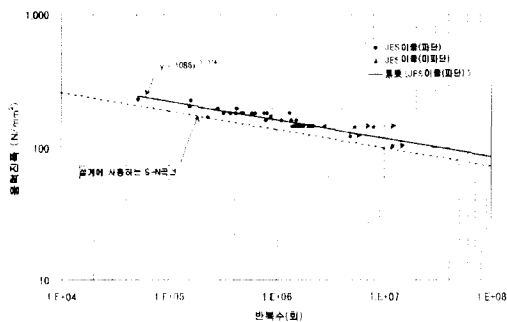


Fig. 19 JES 이음부 피로성능 회절직선

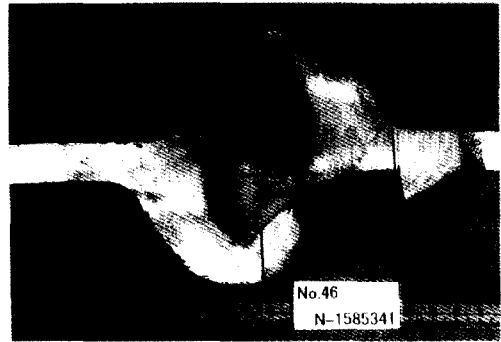


Fig. 20 피로파단상황 (부조)

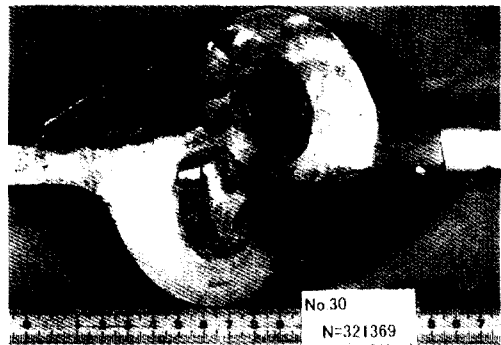


Fig. 21 피로파단상황 (주조)

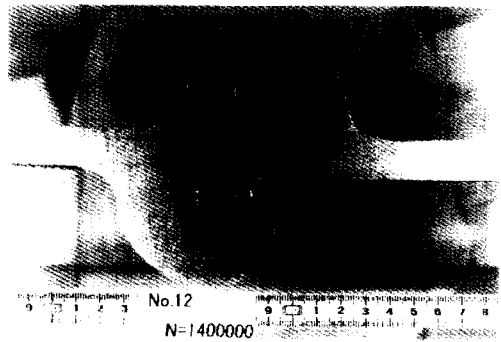


Fig. 22 피로파단상황(부조·주조)

에 의한 피로성능으로의 영향은 거의 없다. 각 파단
상황을 Fig. 20 ~ 22에 나타낸다.

한편, 충전한 그라우트 상태는 파단한 경우에 대해
서는 반복회수 증가에 따라 압축력을 받는 그라우트
부가 국부적으로 분쇄하여 이음부의 연결에 의해 강
재에서의 피로파단을 발생시키고 있다. 또한 파단하
지 않은 경우에 대해서는 어느 하중진폭에 대해서도

초기의 형상을 유지하고 있었다.

철도구조물의 설계에서는 일반적으로 내용년수 100년으로 산정하여 거기에 상당하는 피로내력을 검토하고 있다. 즉, 구조물 형상에 알맞은 열차하중상당 등가 반복횟수 및 피로강도를 S-N 선도에서 구하여 피로내력을 설정하고 있다. JES 이음부의 피로내력도 이음피로시험을 실시하여 안전측으로 설계하여 사용하는 S-N 선도를 구하고 있기 때문에 피로내력을 충분히 가지고 있는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 JES공법에서 중요한 역할을 담당하는 이음부 구조해석을 통하여 JR동일본에서 시행한 시험과의 비교를 분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

- 1) 유한요소해석 결과 인장에 대한 검토는 엘리먼트 강재에서의 인장응력 검토보다는 JES 연결부재의 확고한 연결에 중점을 두어야 함을 알 수 있다. 허용응력법에 따른 설계시 연결 부재 1m당 약 180 tonf의 힘을 받도록 하고 있지만 해석 결과 400 tonf 정도의 인장력을 받을 수 있음을 확인할 수 있었다. 외국에서의 실험결과와 본 연구의 해석결과를 비교해보면 항복 이전의 거동 및 항복하중은 유사한 값을 보이지만 항복 이후의 거동은 실험과 해석결과가 다르다

는 것을 알 수 있는데, 이는 비선형 거동의 불확실성에 기인한 것이다. 따라서, 이음부의 내하력 및 안전성에 대한 검토와 굴착 견인된 엘리먼트 내부의 콘크리트 품질관리에 철저하여야 한다.

- 2) 이음의 최대내력은 JES 이음의 이탈에 의해 결정되며, 그 값은 설계에서 고려하는 폭 13 mm의 강판(SM400)의 공칭항복하중 223.0 kN보다 크다. 또한, JES이음의 탄성범위는 176 N/mm²으로 나타났다.
- 3) JES 이음부는 이음피로시험을 실시하여 피로내력을 산정하므로 충분한 피로내력을 갖는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. (株)總合土木研究所, “基礎工”, Vol.22, No.4, 1994.4
2. シェイアール東日本コンサルタンツ株式會社, “無徐行(徐行速度向上)のための構造物の設計・施工の手引”, 1998.4
3. 社団法人 日本鐵道施設協會, “線路下横斷工設計施工の手引き”, 1984. 8
4. 東日本旅客鐵道株式會社, 鐵建 建設株式會社, “先端 建設技術, 技術審査証明 報告書 HEP& JES工法”, (財)先端 建設技術センター, 2000. 11
5. 동일본여객철도주, “철도지하 횡단공계획의 지침”, 일본 철도시설협회, 2000.4
6. 일본 철도지하 횡단공법 연재강좌 소위원회, “철도지하 횡단공(1)~(최종회)”, 터널과 지하, 2000.10~2001.8