

Application of “Jointed Element Structure Steel Shapes” Having Excellent Fatigue Characteristics



三浦 啓徳
Hironori Miura

水島製鉄所
条鋼圧延部条鋼技術室
主査(課長)



河野 幹夫
Mikio Kouno

水島製鉄所
商品技術部条鋼室長



山口 昭
Akira Yamaguchi

建材技術部技術室
主査(掛長)



清水 満
Mitsuru Shimizu

東日本旅客鉄道(株)
建設工事業部 構造技術
センター 地下・トン
ネル構造グループ
副課長



渡邊 明之
Akiyuki Watanabe

東日本旅客鉄道(株)
建設工事業部 構造技術
センター 地下・トン
ネル構造グループ
副課長



有光 武
Takesi Arimitsu

(株)ジェイテック
技術部
主任

1 はじめに

近年、限られた用地の高度利用や都市基盤整備を目的とし都市交通や上下水道の整備が進められており、それとともに営業中の鉄道下を横断交差する構造物が計画・施工されるケースが増えている。

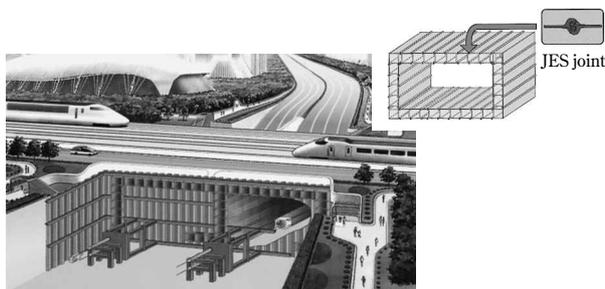


Fig. 1 Outline of construction JES method

要旨

線路下や道路下を横断して道路、河川、人道用地下通路などを構築する施工法として、軌道面、道路面への影響を最小限とし、施工期間が短いことが要求される。そこで、東日本旅客鉄道(株)と鉄建建設(株)の共同開発で「HEP (High-speed Element Pull) & JES (Jointed Element Structure) 工法」が実用化された。川崎製鉄は、本工法の主要部材である「JES 形鋼」について、この工法の専門工事会社である(株)ジェイテックとの協定のもと、列車の繰返し荷重などに対する疲労耐力を有した熱間圧延形鋼として実用化した。JES 形鋼を採用したアンダーパス工事は、東日本旅客鉄道(株)管内において本格的に導入されて以降 8 件の施工が完了し、ボックス構造のトンネルや円形トンネルなどに適用されている。

Synopsis:

Methods for building roads, rivers, footways and so forth, which cross under railways and roads, are required to minimize construction influence stretching to the surfaces of the railways and roads and complete the construction in a short term. “HEP (High-speed Element Pull) & JES (Jointed Element Structure) method” was used practically in the joint development of East Japan Railway Co. and Tekken Co. In the process for the practical application, Kawasaki Steel produced practically hot rolling steel shape which guaranteed fatigue proof stress for repeated load of the train. The steel shape is called “JES steel shape” which is the primary member of this method devised by the joint development of J-Tec Co. Underpass construction which adopts the JES steel shape is introduced on a large scale in the East Japan Railway Co. service area with eight construction works finished, and have been applied to tunnels of box-structure and circular tunnels, and so forth.

線路下を横断交差して構造物を構築する場合、列車走行の安全性を確保することを第一とし、施工期間が短く、経済性の高い構造・施工方法が計画される。

交差構造物の構築方法には、施工条件に合わせた多くの工法があるが、線路下横断延長に制限を受けず、施工期間中に列車運行への影響が少なく、さらに経済的で施工が容易な新しい交差構造物の構築工法として、東日本旅客鉄道(株)と鉄建建設(株)の共同開発によって「JES (Jointed Element Structure) 工法」が開発された。JES 工法では、鋼製エレメントを特殊な継手 (JES 継手) に沿わせてけ

* 平成14年9月24日原稿受付

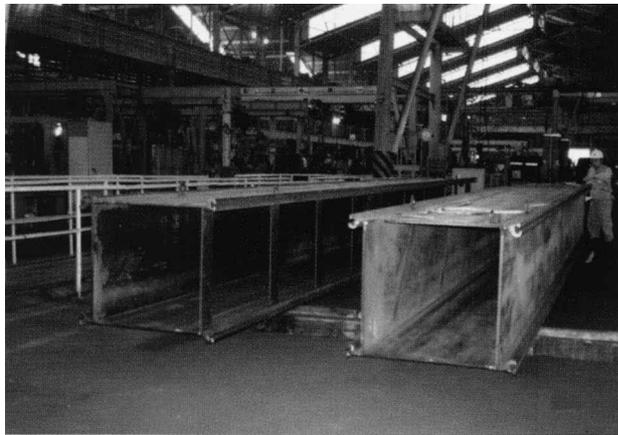


Photo 1 Element

ん引掘進した後、この継手にグラウト充填し、さらにエレメント内にコンクリートを充填することで線路方向と直角方向の部材として構造物を構築する。JES 工法の構造概要を Fig. 1 に、エレメント形状を Photo 1 に示す。

2 JES 継手の必要機能

JES 工法は、JES 継手によるエレメント間の荷重伝達を主構造としており、JES 継手はこの工法専用開発したものである^{1,2)}。JES 継手は、エレメントが有する断面耐力と同等な静的耐力を伝達しなければならないため、エレメント鋼材と同レベルの降伏耐力を有する必要がある。また、鉄道荷重、自動車荷重などの交通荷重を受ける交差構造では、特に土かぶり小さい場合に大きな応力振幅を生じるため、必要な繰返し荷重に対する疲労耐力を有する必要がある。

一方、JES 工法では継手に沿わせてけん引掘進するため、施工可能なレベル以下に継手抵抗を抑える必要がある。

以上の機能を有する継手を開発するにあたり、継手部の構造は、鋼板の両端に継手を有する形鋼 (JES 形鋼) を基本型として検討した。さらに、低コストで大量供給にも対応できるように、熱間圧延による大量生産が可能な形状とした。

3 継手形状の検討

3.1 継手形状の考え方

JES 継手は、静的引張強度と同時に疲労強度を確保しなければならない。一方、掘進抵抗を抑えるために、貫入する継手間に十分な余裕も確保する必要がある。このため、継手形状の設計では、有限要素解析 (FEM) により継手内部に生じる応力集中の度合を評価し、過度の応力集中を生じない継手形状とすることを目標とした。この結果、Fig. 2 に示す原案に対して形状の適正化を行った。

3.2 継手の FEM 解析

継手内部における応力集中の度合を把握するために、FEM による弾性応力解析を実施した。解析プログラムとして MARC (構造解析汎用プログラム) を使用した。

解析結果の一例として、JES 継手 (試作タイプ) と JES 継手 (製品タイプ) について、各々継手内部における主爪・副爪に生じる応力を Fig. 3 に示す。JES 継手 (試作タイプ) については、継手内部の副爪で大きな応力が生じるとともに、主爪・副爪の応力の

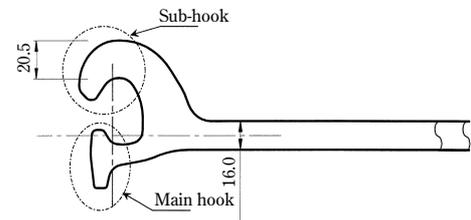


Fig. 2 Original plan of shape of JES joint

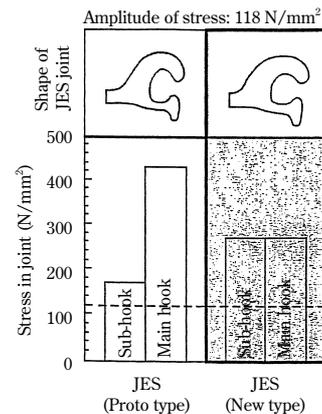


Fig. 3 Stress in joint (FEM analysis)

均衡がとれていないことが分かった。このことから、継手内空部の応力を最小化して主爪・副爪の応力状態を均等にさせるように、副爪を中心に形状の最適化を行い、JES 継手 (製品タイプ) を最終製品形状とした。

4 JES 形鋼の製造法

4.1 JES 形鋼の製造プロセス

JES 継手用形鋼は、大量生産を可能とするため、熱間圧延によって製造する。基本的には Fig. 4 に示す圧延機とともに、専用の孔型ロールを使用した。

鋼片工場の分塊圧延機 (BMミル) で、連続鑄造製矩形素材 (CCブルーーム) から H 形をした粗形鋼片に圧延し、JES 継手用形鋼向け素材とする。この時点で材料表面に疵や欠陥が残存することを防止するため、表面層を溶削処理して次工程の大形工場に送る。

大形工場のブレークダウン圧延機 (BDミル) では主に副爪の厚

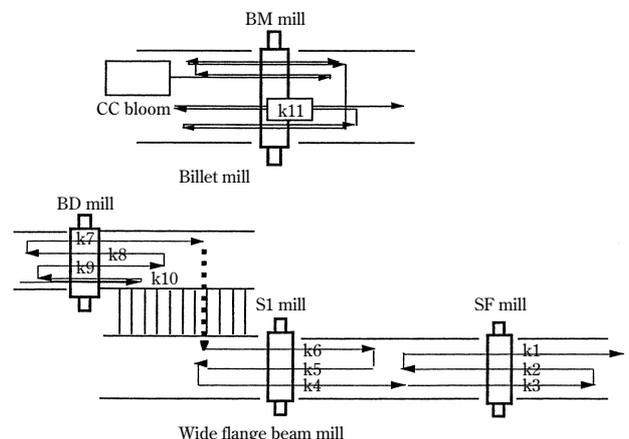


Fig. 4 Mill layout on producing JES shapes

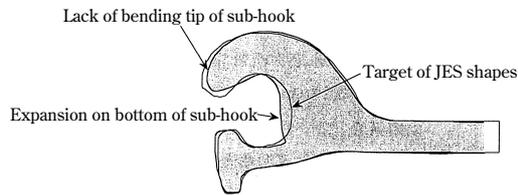


Fig. 5 Bad shape by excessive friction on bending hook

さを圧下し、細長く上下が非対称の形鋼に成形した。続いて中間圧延機 (S1ミル) では形鋼の各部分の寸法形状を整える成形圧延を主体に行い、仕上圧延機 (SFミル) は主として副爪を曲げることによる継手の熱間曲げ成形圧延を実施した。

4.2 厚肉継手の安定曲げ成形

熱間圧延による副爪成形 (爪曲げ) の場合、ロールで副爪を曲げ成形する作用としては、ロールに旋削した孔型の形状に沿うようにして、回転にともなう上下方向のロール隙変化で材料 (副爪部) に変形力を生じさせ、ロールと材料との滑りで副爪 (曲り爪) を成形した。

JES 継手用形鋼の副爪厚は目標とする継手強度を得るため、最終的に 21.0mm まで厚みを増加させた。熱間圧延の変形特性では、副爪の厚みが厚くなるにしたがって、爪の曲げ抵抗が増加し、副爪先端がロールに強く密着するので相対滑りが悪くなる。この結果、反力で副爪の付根部分が膨らんで継手内空形状が狭まった。Fig. 5 にその一例を示すように、目標の形状とかけ離れており、必要以上に製品の単位重量が大きくなった。しかもけん引後の継手部にグラウトを充填する作業が困難になる。また、副爪奥底部の曲率半径が小さくなり、応力集中による疲労強度の低下が生じた。

副爪の形状不良を改善するための継手成形のポイントは、圧延材とロールとの間に生じる摩擦係数を最小化して滑り性を向上することである。摩擦係数の低減に対して有効な潤滑油を検討した結果、Table 1 の性能評価試験に示すように、合成油 : S が最も適し、従来の鉱物油に対して、摩擦係数を 1/4~1/5 に低下させることが可能である。合成油 : S は鉱物油に対して耐圧を向上して油切れを防止するとともに、無機化合物の軟らかい膜を形成・せん断することで摩擦係数が低下した。

従来の鉱物油を適用した場合、副爪厚が 16mm 以内の薄いものは熱間曲げ成形が可能であった。一方、20mm を超す厚みでは爪の曲げ抵抗の増加による金属接合 (焼付き) が生じ、副爪付根の厚肉部分に反力が作用して Fig. 5 の膨らみ変形が発生していたが、合成油 : S の適用によって、目標の継手形状を達成することができた。

4.3 継手の開口部幅安定化

継手の性能に影響する最も重要な指標は継手の開口部幅で、狭過ぎると嵌合の余裕がなくなり、逆に広過ぎると継手が離脱しやすく、継手強度が低下する。

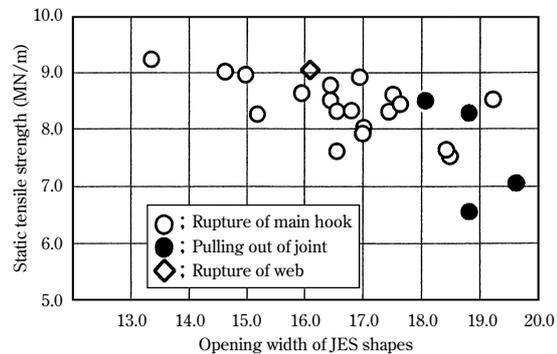


Fig. 6 Relation between opening width and joint strength on JES shapes (No grout, 490 N/mm² steel)

Fig. 6 に JES 継手用形鋼の開口部幅と継手強度の関係を静的引張試験結果で示す。開口部幅 18.5mm 以下は玉幅破損で引張り強度は安定するが、開口部幅 18.5mm 超えでは継手の抜け外れが増加し、引張強度の低下が著しく、そのバラツキも大きくなる。

JES 継手用形鋼の開口部幅は、継手強度保証の観点より最大値を 18.5mm に、継手余裕からは最小値を 14.5mm に規定し、この範囲内に製造バラツキを小さく抑える必要がある。

一方、JES 継手の厚い副爪を曲げて目標とする開口部幅の範囲に納めるための製造上の要点は、

- (1) 爪曲げ前の副爪高さの均一化 (ロール形状の設計適正化による孔型の材料充填度向上)
- (2) 爪曲げ時の材料温度均一化 (熱間変形抵抗差の最小化)
- (3) 爪曲げ時の材料とロール間の摩擦係数最小化 (熱間圧延用潤滑油の適用)
- (4) 爪曲げ時の副爪断面積減少の抑止 (ウェブ厚みは減厚せず延伸させない爪曲げ成形の実施)

などの対応を図ることである。これらの実施によって 15.5~17.5mm (16.5 ± 1.0mm) の狭い範囲の開口部幅で製造できるようになった。

4.4 継手表面の凹凸最小化

JES 形鋼の副爪内面の奥底部に相当する部分の凹凸を最小にすることが、継手強度を低下させない、あるいは継手強度のバラツキ小さくするために重要な管理項目である。製造プロセスごとの対応を Table 2 に示す。

JES 形鋼の副爪内面の奥底部に相当する各孔型での位置を Fig. 7 に矢印で示す。鋼片工場では CC ブルームから H 形粗形鋼片に圧延した段階が k.11 の形状であり、製鋼から鋳造にいたる過程での鋳片表面直下のピンホール状の欠陥、鋼片工場での分塊圧延時に生じるラップ状の疵やかき疵が存在する可能性が考えられる。まずこの段階で表面の溶削を行い、欠陥を除去した素材として次工程の大形工場に送る。大形工場の圧延、特にブレークダウンロールは、孔型を

Table 1 Property of lubrication oil (210 lb loading test)

Name of lubrication oil	Temperature (°C)	Coefficient of friction	Remark
Dry	563 ~ 713	0.76 ~ 0.81	Temperature increase due to friction
Mineral oil: K	473 ~ 537	0.62 ~ 0.78	
Mineral oil: R	470 ~ 560	0.60 ~ 0.84	
Mineral oil: E	482 ~ 648	0.23 ~ 0.79	Broad distribution of coefficient of friction
Mineral oil: S	438 ~ 486	0.15 ~ 0.21	Narrow distribution of coefficient of friction

Note: Temperature and coefficient of friction are measured at 210 lb loading

Table 2 Technology of smoothing joint surface on manufacturing process

Factory	Manufacturing process	Technology of smoothing joint surface
Billet mill	Rolling continuous casting bloom into beam blank	Removing surface defect of beam blank
Wide flange beam mill	Forming sub-hook on breakdown rolling	Minimizing roughness of roll surface, coefficient of friction between roll and material by synthetic oil including composition against high pressure
	Forming sub-hook on middle roughing rolling	—
	Forming sub-hook by bending on finishing rolling	Minimizing coefficient of friction between roll and material by synthetic oil including composition against high pressure

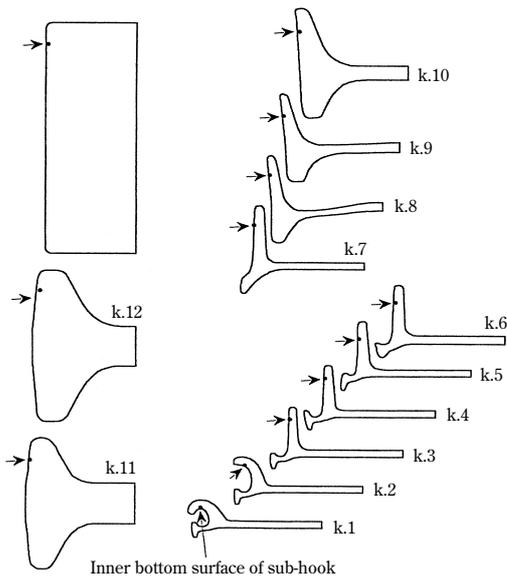


Fig. 7 Inner bottom surface of sub-hook on JES shapes

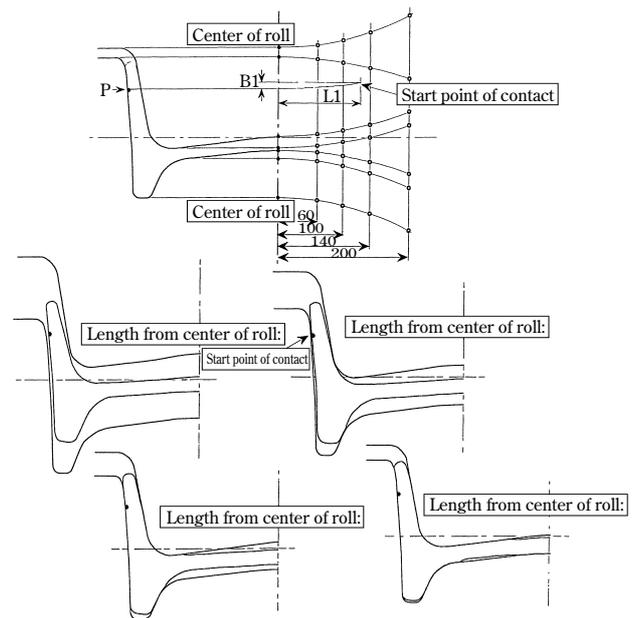


Fig. 8 Difference of speed between roll and material in roughing rolling

形成するロールの外周と内径部とで径差が大きく、圧延材に対しロール表面部分では速度差によるスリップを生じる。その場合にロール表面が荒れていたり、圧延材とロールの間で焼付きを生じたりすると表面疵となって、継手強度を低下させる原因になる。

ブレークダウン圧延における副爪の厚みを減厚する孔型圧延を検討したのが、Fig. 8 に示す k.9 が k.8 に変化する場合で、下ロールと圧延材との接触状態が目すべき点である。

Fig. 8 は被圧延材が上下のロールによって、ロール隙の変化とともに副爪の厚さが圧下される状況を幾何学的に表したもので、副爪内面の奥底部に相当するポイント：P はロール中心より L1 のところから接触が始まり、ほぼロール中心まで接触状態となる。進行方向にはロールの周速と圧延材進行速度とのずれ分、また上下方向には Fig. 8 に示す B1 の位置ずれがあり、表面が滑り状態になる。その結果生じるロール表面の荒れは、圧延材表面にロール疵として凹凸を転写する。このロール疵防止対策として合成油をロール表面に噴射し、潤滑効果を発揮させて焼付きの防止とロール摩耗の減少を図り、表面に凹凸の少ない製品が得られた。

5 JES 継手静的強度の評価

5.1 試験概要

本工法ではエレメントを地中に挿入する際に、エレメント相互の継手に適当な余裕が必要であり、エレメントの連結・挿入後ではこの余裕部をグラウトで充填することにより、構造物の変形を抑えて

いる。実施にに合わせて継手余裕部にグラウトを充填した JES 継手の引張強度を評価するために、静的引張試験を行った。

5.2 試験内容

5.2.1 試験方法

静的引張試験は、Fig. 9 に示すように、幅 $b = 70 \text{ mm}$ の JES 継手 2 体を噛み合わせ、その両端部に引張力を作用させる方法とした。また、荷重は破壊まで単調に載荷した。なお試験は 2000 kN 引張試験機を用いて行った。

5.2.2 試験体条件、数量

試験体の条件は次のとおりとし、その形状寸法は Fig. 10 のとお

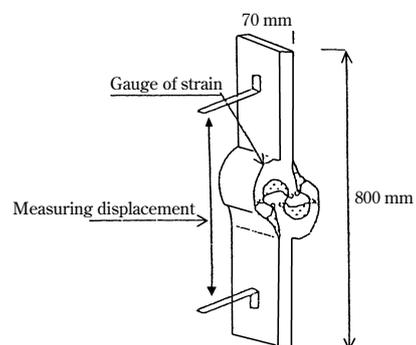


Fig. 9 Outline of tensile test

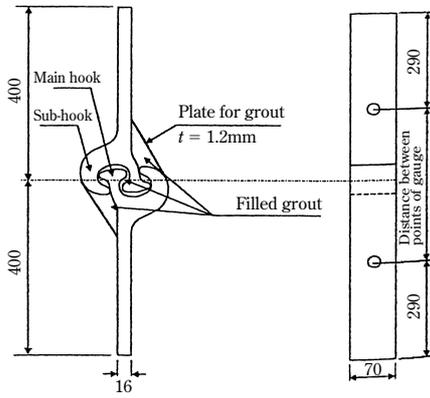


Fig. 10 Form of specimen of tensile test on JES joint

りである。

(1) 嵌合条件

標準嵌合状態 (中立嵌合状態)

(2) JES 継手の材質

SM400A-M (JIS G 3106 「SM400A」 同等の川崎製鉄専用規格)

(3) 継手余裕部のグラウト

フィルコン R・セメントタイプ (住友大阪セメント (株))

W/C = 50%, $\sigma_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$

(4) 試験体数量

8 体 (グラウトなし 2 体, グラウトあり 6 体)

5.2.3 計測内容

荷重, 目地間隔変位量

5.3 試験結果

試験結果一覧を, Table 3 に示す。また荷重 P と目地間隔変位量 δ との関係を Fig. 11, 12 に示す。これらの結果から, 次のことが

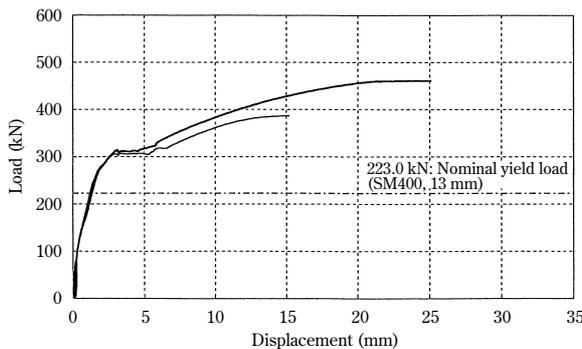


Fig. 11 Result of tensile test on JES joint (No grout)

明らかになった。

- (1) グラウトなしの場合, 初期の微小変形領域ではほぼ弾性的な挙動を示す。その後, 荷重が 300 kN 程度に達すると, 主爪端部の T 字部分が概略 Y 字型に変形するとともに, 主爪の回転をとめないながら継手の抜け出しが生じて変位量が急増し, さらに荷重が上昇するにともない, 主爪の外側が破断し, 最大耐力にいたっている。
- (2) 一方, グラウトありの場合も, 当初はほぼ弾性的な挙動をとるが, 荷重が 300 kN 近傍に達すると, グラウトが徐々に破壊されることにより, 変位量が急増している。その後, 主爪の回転をとめないながら, 継手の抜け出しが生じ, 最大耐力にいたっている。このように, グラウトなしの場合のような, 主爪の T 字部分が概略 Y 字型に変形が生じたり, 主爪が破断することなく, グラウトの効果により破壊形態は異なるものになっている。
- (3) グラウトあり・なしのいずれの場合も, 弾性的な挙動をしている範囲は JES 形鋼のウェブ直線部分 (SM400, 板厚 13 mm) の公称降伏荷重 ($223.0 \text{ kN} = 245 \text{ N/mm}^2 \times 70 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$) よりも大きい。
- (4) $P-\delta$ 関係の初期勾配に着目すると, グラウトなしの場合は荷重が 100 kN 程度まで, グラウトありの場合は 160 kN 程度までがほぼ弾性領域となっている。したがって, JES 形鋼の弾性範囲は, 鋼材厚さ 13 mm に換算した応力として, それぞれ $110 \text{ N/mm}^2, 176 \text{ N/mm}^2$ 程度と考えられる。

5.4 まとめ

JES 継手の静的引張 (グラウトあり) から, 次の関係が認められた。

- (1) 継手の最大耐力は, JES 継手の離脱によって決定され, その値はウェブ直線部 (板厚 13 mm) の公称降伏荷重 (233.0 kN)

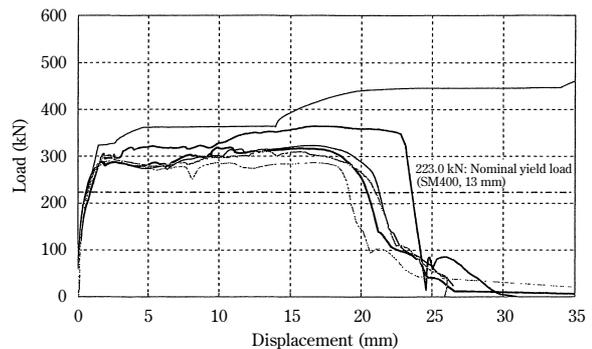


Fig. 12 Result of tensile test on JES joint (Filled grout)

Table 3 Results of JES joint tensile tests

No.	Material	Grout		Maximum load		Pattern of destruction
		Inclusive/None	Tensile strength (N/mm ²)	Real load (kN)	Load per 1 m length (MN)	
1	SM400A-M	None	—	478.3	6.83	Rupture of main hook
2				480.1	6.86	Rupture of main hook
3		Filled	48.7	319.0	4.56	Rupture out of hook
4				323.0	4.61	Rupture out of hook
5				364.1	5.20	Rupture out of hook
6				491.9	7.03	Rupture out of hook
7				309.4	4.42	Rupture out of hook
8				290.5	4.15	Rupture out of hook

Note: load per 1 m length = measured load \times 1 000 mm/70 mm

より大きい。

- (2) JES 継手の弾性範囲は、176 N/mm² (板厚 13 mm 換算) 程度である。

6 JES 継手疲労強度の評価

6.1 試験概要

引張試験と同様に、実施工に合わせて継手余裕部にグラウトを充填した JES 継手の疲労強度を評価するために、疲労試験を行った。

6.2 試験内容

6.2.1 試験方法

疲労試験は、Fig. 13 に示すように、幅 $b = 70$ mm の JES 継手 2 体噛み合わせ、その両端部に繰り返し引張力を与えることにより、継手部に一定振幅応力を作用させる方法とした。また、荷重波形は sin 波、荷重加振振動数 8 Hz の片振試験とし、応力振幅を変化させて疲労破壊を確認することで、S-N 曲線を求めた。なお試験は高速疲労試験機を用いて行った。

6.2.2 試験体条件、数量

試験体の条件は次のとおりとし、その形状寸法を Fig. 13 に示す。

- (1) 嵌合条件
標準嵌合状態
- (2) JES 継手の材質
SM400A-M (JIS G 3106 「SM400A」 同等の川崎製鉄専用規格)
- (3) 継手余裕部のグラウト
フィルコン R・セメントタイプ (住友大阪セメント(株))
W/C = 50% , $\sigma_{ck} = 30$ N/mm²

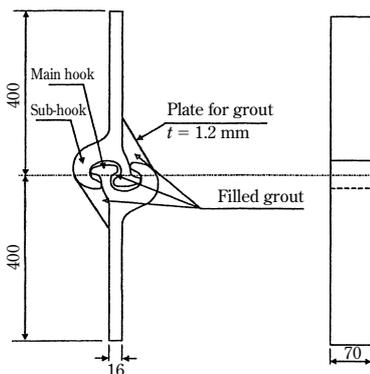


Fig. 13 Form of specimen of fatigue test on JES joint

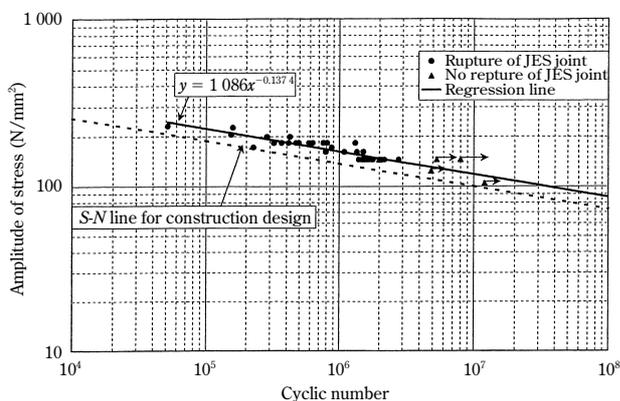


Fig. 14 Regression line on fatigue performance of JES joint

- (4) 試験体数量 48 体

6.2.3 計測内容

荷重変位振幅

6.3 試験結果

試験結果から求められた応力振幅 $\Delta\sigma$ と繰り返し回数 N との関係は、Fig. 14 に示す。応力の振幅値 $\Delta\sigma$ は、引張力の振幅を設計で使用する 13 mm の板厚で除した換算応力振幅を用いている。また図中の回帰線は、破断したケースのみを対象として回帰したものである。

ここで疲労試験による破壊形態は、

- (1) 副爪の内側に疲労き裂が入るケース (40%)
- (2) 主爪に疲労き裂が入るケース (25%)
- (3) 主爪と副爪の両方に疲労き裂が入るケース (13%)

の 3 つであり、いずれのケースも見受けられる。JES 継手の形状は、副爪および主爪への応力集中がほぼ同等となるよう解析的に設定しており、このため破断位置は上記の 3 ケースにばらついていると考

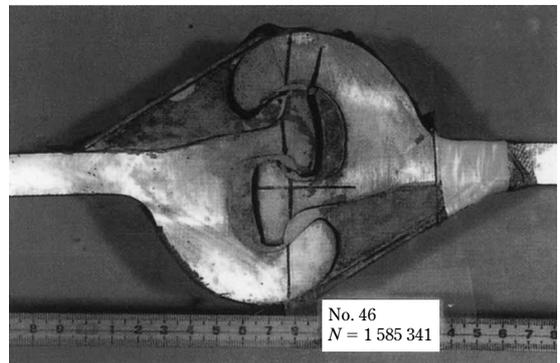


Photo 2 Rupture of fatigue (sub-hook)

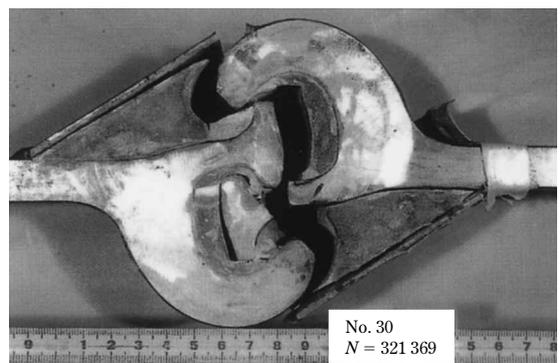


Photo 3 Rupture of fatigue (Main hook)

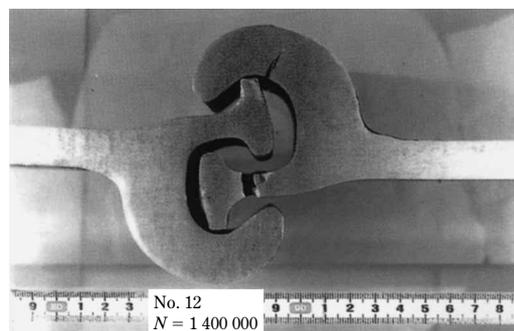


Photo 4 Rupture of fatigue (Main, sub-hook)

えられるが、これらの間に有意な差はなく、破断位置の差異による疲労性能への影響はほとんどない。各破断状況を Photo 2~4 に示す。

一方、充填したグラウトの状態は、破断したケースについては、繰り返し回数の増加にともない、圧縮力を受けるグラウト部が局部的に粉砕し、継手部の目開きにより鋼材での疲労破断を生じている。なお、破断しなかったケースについては、いずれの荷重振幅においても、初期の形状を保持していた。

6.4 まとめ

鉄道構造物の設計では、一般に耐用年数 100 年を想定しており、それに相当する疲労耐力を必要とする。すなわち、構造物形状に応じた列車荷重相当の等価繰り返し回数および疲労強度を $S-N$ 線図から求めて疲労耐力を設定している。JES 継手の疲労耐力は、継手疲労試験を行って $S-N$ 線図を求めており、設計疲労耐力を確認することができた。

7 おわりに

JES 工法は、線路下横断延長に制限を受けず、施工期間中に列車運行への影響が少なく、さらに経済的で施工が容易な新しい交差構造物の構築工法である。施工実績として 2002 年 9 月現在、8 件が施工完了し、24 件が施工中である。その一例を Photo 5, 6 に示す。JES 工法は、線路方向の直角方向部材として構造物に適用するため、JES 継手には静的耐力、疲労耐力、施工性を両立する継手形状が必要とする。これに対して、JES 継手に必要な機能を有する継手形状を効率的に開発することができた。

- (1) 有限要素解析 (FEM) により継手内空部に生じる応力集中の度合を評価し、過度の応力集中を生じない継手形状とすることを目標にして解析した結果、継手内空部の応力を最小化し、主爪・副爪の応力状態をバランスさせるように形状の最適化を行い、JES 継手（製品タイプ）を最終製品形状とした。
- (2) 継手形状を設計通りに製造するに当たり、熱間圧延による副爪成形（爪曲げ）を安定化するために、潤滑油の適用による圧延ロールと材料間の摩擦係数の低減を図った。また各圧延ロール形状の設計適正化、爪曲げ時の材料温度均一化を合わせて実施した。
- (3) JES 継手の強度を低下させない、あるいは継手強度のバラツキ小さくするために、JES 形鋼の副爪内面の奥底部に相当する部分の凹凸を最小にする手段として、粗形鋼片表層部の溶削による表面欠陥の除去、潤滑油の適用による圧延ロール表面の摩耗低減を図った。
- (4) 実施工に合わせて継手余裕部にグラウトを充填した JES 継手の引張強度を評価するために静的引張試験を行い、弾性的挙



Photo 5 Underpass construction working

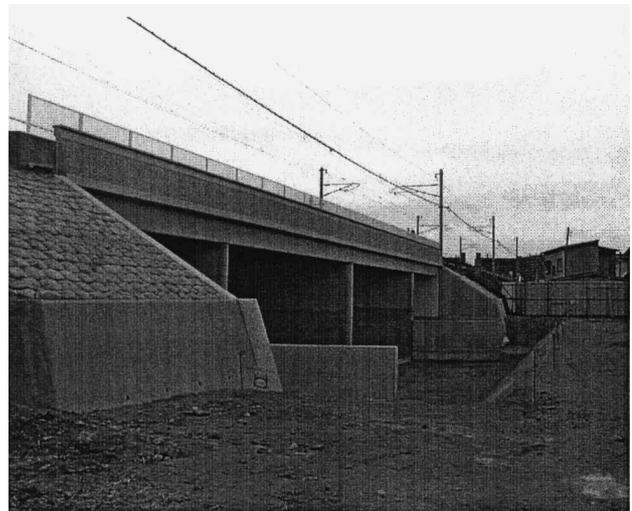


Photo 6 Underpass construction finished

動の範囲は JES 継手の離脱によって決定され、その値はウェブ直線部（板厚 13 mm）の公称降伏荷重（233.0 kN）より大きい。

- (5) 同じく継手余裕部にグラウトを充填した JES 継手の疲労強度を評価するために疲労試験を行い、 $S-N$ 線図を求めた。鉄道構造物設計では、構造物形状に応じた列車荷重相当の等価繰り返し回数および疲労強度を $S-N$ 線図から求めて疲労耐力を設定している。本継手の疲労耐力は試験により、設計疲労耐力を確認することができた。

参考文献

- 1) 森山智明, 木戸素子, 松田芳範, 茂木 聡, 森山泰明:「鋼製エレメントを用いた新しい線路下横断構造物の構築法の開発」, (1998), 11
- 2) 富田修司, 渡邊明之:「低コストで線路下を立体交差構造物で結ぶ

JES 工法による線路下横断構造物の構築」, 土木施行, 41(2000)4, 89-93