

---

高力ボルト用鋼 KF11T の材質について

On the Properties of Steel for Grade KF11T High-Strength Bolts

佐々木 徹(Toru Sasaki) 峰 公雄(Kimio Mine) 倉橋 速生(Hayao Kurahashi)  
浅川 貞雄(Sadao Asakawa)

---

要旨：

F11T 高力ボルト用鋼材として開発した KF11T の材質特性について調査した。KF11T は低炭素 Cr-Ti-B 系のアルミニウムキルド鋼であり、とくにボルト成形時の冷間鍛造性にすぐれた性質を示した。また JIS で規定されている最大径 M24 より大径の M33 ボルトを製造し、各種の試験を行った結果以下の点が明らかになった。(1)KF11T から製造した M33 ボルトは、F11T ボルトのすべての規格値を満足する。(2)F11T の強度レベルは、2 年間の曝露試験で破断を生じていない。(3)F13T の強度レベルでは、曝露試験における破断の可能性は、鋼種、ナット位置、ボルト径の影響を強くうける。

---

Synopsis：

The properties of KF11T steel which was developed for Grade F11T high-strength bolts were studied. This KF11T is low-C Al-killed steel containing Cr, Ti, B and reveals excellent result in cold forging of bolts. The test results of M33 bolts which remarkably exceed the maximum diameter M24 specified by JIS are summarized as follows; (1) The mechanical properties of large diameter M33 bolts produced with KF11T were all satisfactory for Grade F11T high-strength bolts. (2) The delayed fracture test in the air and sea water of F11T M33 bolts has shown that no fracture occurred in two years. (3) In the case of Grade F13T bolts, the probability of fracture in exposure test was strongly affected by chemical composition, nut position and bolt diameter.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

|                   |
|-------------------|
| 本文は次のページから閲覧できます。 |
|-------------------|

# 高力ボルト用鋼 KF11T の材質について

## On the Properties of Steel for Grade KF11T High-Strength Bolts

佐々木 徹\*

Toru Sasaki

峰 公 雄\*

Kimio Mine

倉 橋 速 生\*\*

Hayao Kurahashi

浅 川 貞 夫\*\*\*

Sadao Asakawa

### Synopsis:

The properties of KF11T steel which was developed for Grade F11T high-strength bolts were studied. This KF11T is low-C Al-killed steel containing Cr, Ti, B and reveals excellent result in cold forging of bolts.

The test results of M33 bolts which remarkably exceed the maximum diameter M24 specified by JIS are summarized as follows;

- (1) The mechanical properties of large diameter M33 bolts produced with KF11T were all satisfactory for Grade F11T high-strength bolts.
- (2) The delayed fracture test in the air and sea water of F11T M33 bolts has shown that no fracture occurred in two years.
- (3) In the case of Grade F13T bolts, the probability of fracture in exposure test was strongly affected by chemical composition, nut position and bolt diameter.

## 1. 緒 言

鋼材の接合法としてわが国で高力ボルトが使用されるようになってから約20年になろうとするが、現在では従来のリベット接合法に代って、橋梁や建築物に対して高力ボルトによる摩擦接合法の適用が一般化している。当社における高力ボルト用鋼材の開発は、昭和38年末より着手されたが、当初はヘッダー加工に適したF9T用鋼を実

用化するにとどまっていた。川鉄ハイテンションボルトの本格的な生産が始まったのは、昭和45年8月であるが、JIS規格(JIS B1186-1970)の最高強度レベルF11Tボルトの量産体制が整ったのは、昭和46年5月である。JISに示されているように、ボルトの機械的性質による等級は、F8T、F10T、F11Tとなっており、引張強さの最高は130kg/mm<sup>2</sup>に、ねじの呼び径はM24までに抑えられている。この理由は、周知のように高強度鋼の遅れ破壊発生に対する懸念からの制約であっ

\* 技術研究所水島研究室主任研究員

\*\*\* 水島製鉄所管理部条鋼管理課掛長

\*\* 技術研究所鋼材研究室主任研究員

て、これを打開する努力が各所で続けられている<sup>1)~6)</sup>。F11T用として当社で開発したのは低炭素Cr-Ti-B鋼(社内規格KF11T)である。本報ではKF11Tの基本的な材質特性を述べるとともに、冷間ヘッダー加工性、太径ボルトへの適応性、さらには最近簡便な施行法として脚光を浴びつつあるナット回転法<sup>7)8)</sup>に対する適応性などについて検討した結果を報告する。

## 2. 成分設定

ボルト製造工程の概略は、呼び径より1mm程度径の大きい棒鋼素材を酸洗し、軽度の冷間引抜きで所定の径に調整したのち、頭部の冷間鍛造、ねじ転造を経て熱処理後製品となる。成分設定は、このような製造工程とボルト製品で要求される特性にもとづいて以下に示す要点を勘案して行われた。

- (1) 圧延のままで強度がなるべく低く、ボルト頭部の冷間鍛造に対して十分な加工性を有していること。
- (2) 焼割れ感受性が低く、水焼入れが可能で、そのうえ太径ボルトにも適用しうる焼入性を有していること。
- (3) 熱処理後の機械的性質がすぐれていること。
- (4) 耐遅れ破壊性がすぐれていること。

以上の観点より、KF11Tの成分をTable 1に示すように設定した。従来F11T用として多用されている中炭素Cr鋼(SCr3)あるいは中炭素Cr-Mo鋼(SCM3~4)のC含有量が0.33~0.43%であるのに対し、KF11Tは0.25%以下と低く抑えている。これは鍛造性の向上、焼割れ防止、耐遅れ破壊性の向上などに有利に働く<sup>9)</sup>よう配慮したためである。また変形抵抗が低く、変形能が大きいアルミニウムキルド鋼であるので、圧延のままでボルト頭部の冷間鍛造が行える。さらにCr、BおよびTiの添加によって焼入性と調質後の材質が保証されている。

## 3. KF11Tの材質特性

### 3.1 冷間鍛造性

KF11Tの圧延のままの組織をPhoto. 1に、また引抜きによる材質変化をFig. 1に示す。Photo. 1から、KF11Tはフェライト+パーライト組織になっており、SCM3などで通常みられるペーナイト状組織(冷間鍛造するためには球状化焼なましが必要)と異なり、圧延のままで加工し得る組織になっていることがわかる。またFig. 1によれば、10%程度の引抜き加工後の硬さも、現在のボルトメーカーの各機種でH<sub>B</sub> 98程度以下なら鍛造可能といわれているので、引抜きのままで使用しうる値に収まっている。

本鋼種の冷間鍛造性がきわめて良好であることは、以下に述べる各試験の結果によっても予想される。23mmφ丸棒を1000°~1200°Cで10mmφに鍛造し、860°C×1hrで焼ならししたのち、機械加工によって6mmφ×12mm<sup>l</sup>の圧縮試験片を作成し、縦圧試験を行った結果、割れ発生限界圧縮率は82%以上となった。ボルト成形時の圧縮率は約70%であるので十分余裕がある。さらにこれと同一処理をほどこした引張試験片(6mmφ

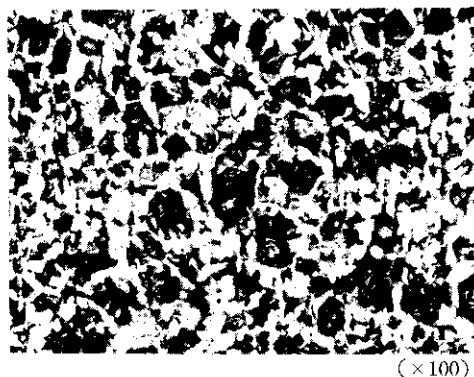


Photo. 1 As-rolled microstructure of KF11T

Table 1 Chemical composition of KF11T

|           |           |           |        |        |           |             |             | (wt %)      |
|-----------|-----------|-----------|--------|--------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| C         | Si        | Mn        | P      | S      | Cr        | B           | Ti          | Al          |
| 0.20~0.25 | 0.15~0.35 | 0.55~0.90 | ≤0.030 | ≤0.030 | 0.85~1.25 | 0.001~0.003 | 0.005~0.040 | 0.010~0.035 |

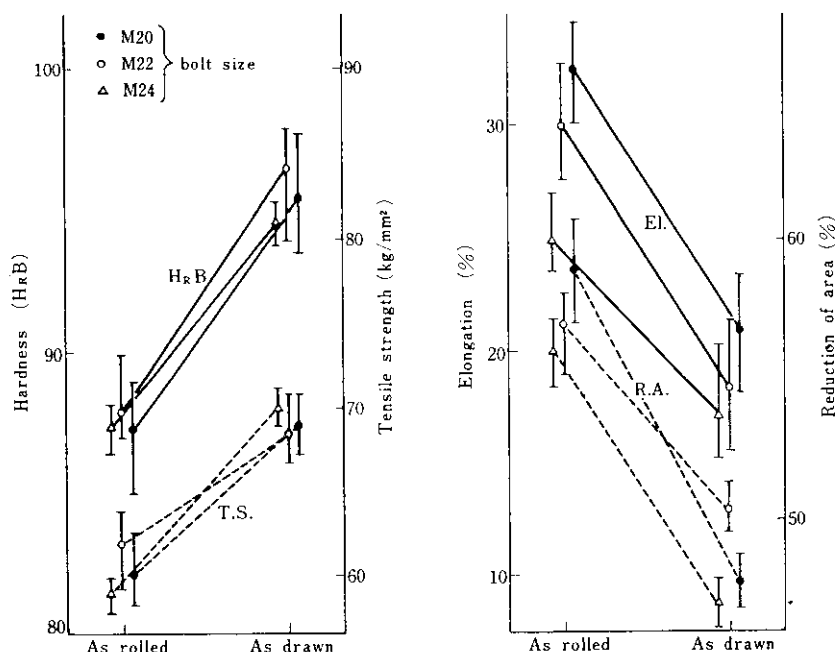


Fig. 1 Change in mechanical properties with light cold drawing of KF11T (reduction ratio; M20 13.5%, M22 12.1%, M24 11.3%)

×平行部 60mm) を 25°C, 150°C, 255°C で引張った。これは頭部が鍛造中に約 300°C に昇熱するといわれているので、固溶 C, N による動的ひずみ時効が、加工性の劣化をもたらす可能性<sup>9)</sup>を調べるために行ったものである。比較のためにシリコンキルド鋼 SAE1024 についても同様な試験を行ったのでこれらの結果を Table 2 に示す。これからわかるように、SAE1024 では、255°C で引

張強さが最大になると同時に、伸びと絞り是最少値を示し、また塑性変形での応力ひずみカーブでセレーションを起こしているので、動的ひずみ時効の徴候が明らかに認められる。これに対し、KF11T では高温になっても、セレーションは生ぜず強度上昇も認められない。この 2 鋼種の固溶 C, N 量を推定するために求めた時効指数 (Aging Index, A. I.) は、SAE1024 の 5.8kg/mm<sup>2</sup> に対し

Table 2 Tensile test results of KF11T and SAE1024 at room and elevated temperatures ( $\dot{\epsilon}=2.78 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ )

| Steel   | A. I. *<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Temperature<br>(°C) | Y. P.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | T. S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | El.<br>(%) | R. A.<br>(%) | Flow stress curve |
|---------|----------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|--------------|-------------------|
| KF11T   | 0.5                              | 25                  | 35.0                           | 56.0                           | 28         | 72           | Smooth            |
|         |                                  | 150                 | 35.0                           | 52.0                           | 24         | 70           | "                 |
|         |                                  | 255                 | 27.5                           | 48.0                           | 22         | 66           | "                 |
| SAE1024 | 5.8                              | 25                  | 37.0                           | 57.0                           | 29         | 74           | "                 |
|         |                                  | 150                 | 35.5                           | 54.5                           | 23         | 66           | "                 |
|         |                                  | 255                 | 34.0                           | 60.0                           | 17         | 56           | Serrated          |

\* A. I. (Aging Index); Increased flow stress after 100°C × 30min aging with the 7.5% pre strained specimen

**Table 3** Numbers of bolts cracked by cold forging of KF11T

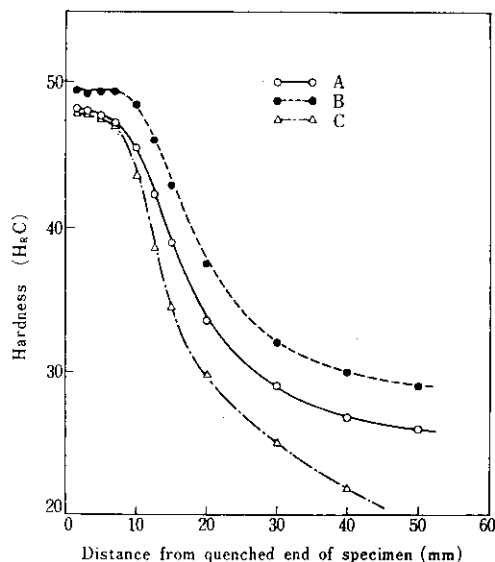
| Period    | Numbers of forged bolts (A) | Numbers of cracked bolts (B) | B/A × 100 (%) |
|-----------|-----------------------------|------------------------------|---------------|
| 1971 Aug. | 114 910                     | 18                           | 0.016         |
| Sep.      | 54 310                      | 33                           | 0.061         |
| Oct.      | 34 260                      | 31                           | 0.090         |
| Nov.      | 68 620                      | 10                           | 0.015         |
| Dec.      | 15 000                      | 0                            | 0             |
| 1972 Jan. | 7 450                       | 0                            | 0             |
| Feb.      | 50 000                      | 33                           | 0.066         |
| Mar.      | 24 090                      | 18                           | 0.075         |
| Apr.      | 138 035                     | 15                           | 0.011         |
| Total     | 506 675                     | 158                          | 0.031         |

てKF11Tはわずか  $0.5\text{kg/mm}^2$  であり、ほぼ非時効性になっている。したがってKF11Tでは、動的ひずみ時効による加工性の劣化を心配する必要がないことがわかる。

現在KF11Tを用いてM24ボルトまでの冷間鍛造を行っているが、加工後の目視による全数検査での割れ発生率の例は、Table 3に示すようにきわめて低い水準で安定しており、頭部の6角トリミング後でも残存するような有害な割れはほとんど無く、予期したとおりの冷間鍛造性を有している鋼種といえる。

### 3.2 焼入性

KF11Tの材質特性について太径ボルトへの適用を考慮して、34mmφ丸棒で詳細に調査した。供試材はCr含有量の異なる3種であるが、これ

**Fig. 2** Jominy hardenability curve for KF11T steels

らの化学成分をTable 4に示す。後述する各種の試験の比較用に、SCM22とSCM3を用いているがその成分も同時に示す。素材を $1000^{\circ}\text{C}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ で30mmφに鍛伸後120mmに切断し、 $900^{\circ}\text{C}\times 1\text{hr}$ の焼ならしをしたものより試験片を切り出して、ジョミニー焼入試験を行った結果をFig. 2に示す。このジョミニー曲線を基に、径の異なるKF11TのU曲線を急冷度 $H=1$ と仮定して求め<sup>10)</sup>、この鋼種がどの程度の太径ボルトにまで使用しうるかを推定した。焼入れたままで $H_{RC}$ が45以上あれば、焼もどし後の靱性が良好であるといわれる<sup>11)</sup>ので、中心の硬さが $H_{RC}$ 45以上になる最大径を計算すると、40~60mmとなった。したがって、これら34mmφ丸棒はM33太径ボルト素材として十分使用可能なことがわかる。

**Table 4** Chemical composition of 34mmφ bar specimens

|       |   | (wt %) |      |      |       |       |      |      |      |       |       |        |
|-------|---|--------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|--------|
| Steel |   | C      | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Cr   | Mo   | Ti    | Al    | B      |
| KF11T | A | 0.25   | 0.28 | 0.74 | 0.019 | 0.007 | 0.01 | 1.22 | —    | 0.017 | 0.013 | 0.0026 |
|       | B | 0.24   | 0.28 | 0.84 | 0.013 | 0.009 | 0.01 | 1.09 | —    | 0.016 | 0.017 | 0.0020 |
|       | C | 0.25   | 0.25 | 0.78 | 0.011 | 0.006 | 0.01 | 0.92 | —    | 0.017 | 0.032 | 0.0021 |
| SCM22 |   | 0.23   | 0.24 | 0.74 | 0.016 | 0.008 | 0.02 | 1.22 | 0.26 | —     |       | —      |
| SCM3  |   | 0.35   | 0.29 | 0.79 | 0.012 | 0.018 | 0.11 | 0.15 | 0.17 |       |       |        |

つぎに34mmφ丸棒のままでの焼入試験(860°Cから水焼入れ)の結果をFig. 3, 4に示す。Fig. 3はCr=1.09%のKF11T (B鋼)の断面硬さ分布を、焼入れのままと各焼もどし温度でプロット

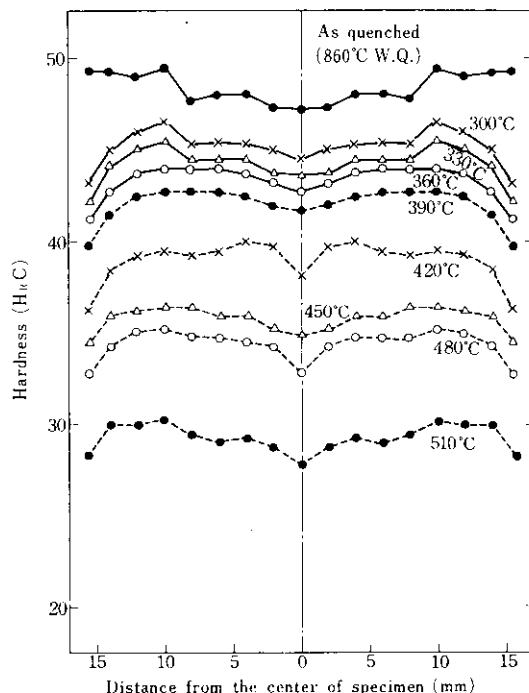


Fig. 3 Distribution of 34mmφ bar (KF11T B) cross section hardness after tempering for 1hr at various temperatures

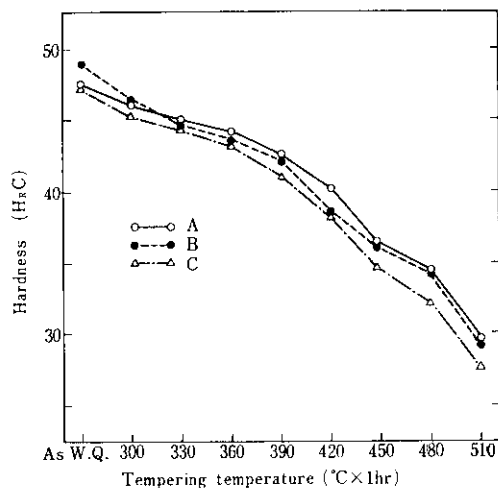


Fig. 4 Change in average hardness of KF11T 34mmφ bars cross section with tempering temperature (860°C W.Q.)

したものであり、Fig. 4は3種のKF11T (A, B, C)について断面硬さの平均値を、焼もどし温度に対してプロットしたものである。Fig. 3から外周部は焼もどし時の脱炭によって若干硬さは減じているものの、硬さ分布はほぼ一様になっていることがわかる。Fig. 4からF11T・M33ボルト素材として使用する場合は焼もどし温度は、 $H_{RC}$  35以上41以下(引張強さで110~130 kg/mm<sup>2</sup>)とすると、A鋼では410~470°C、B鋼では400~470°C、C鋼では390~450°Cであることがわかる。

### 3.3 引張試験

Table 4の3種のKF11T 34mmφ丸棒を860°C

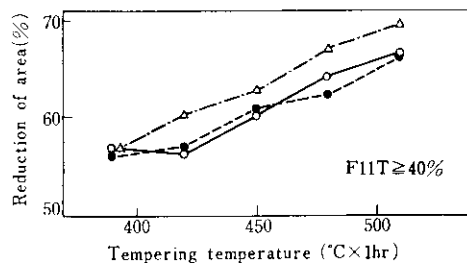
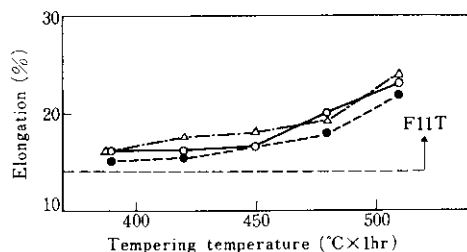
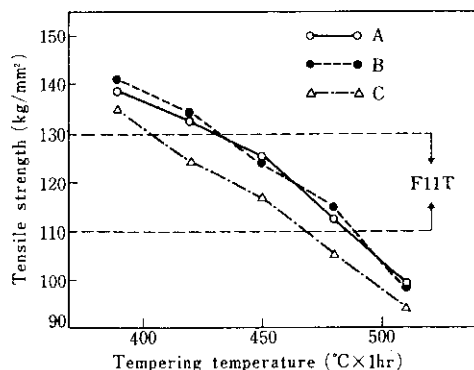


Fig. 5 Change in tensile properties of KF11T 34mmφ bars with tempering temperature (860°C W.Q.)

から水焼入れし、これを 360°C から 510°C までの 30°C 間隔に 1hr 保持する焼もどし処理を行ったのち引張試験に供した。試験片は、断面中心部から JIS 4 号引張試験片 (径 14mm $\phi$ , 標点間距離 50mm) を切出して製作した。焼もどし温度による試験値の変化を Fig. 5 に示す。F11T の規格中央値である引張強さ 120kg/mm<sup>2</sup> になる焼もどし温度は、A, B 鋼で 460°C, C 鋼で 440°C であり、その時の伸び、絞り は規格値を十分満足している。

### 3.4 衝撃試験

引張試験と同一熱処理をほどこした 34mm $\phi$  丸棒の断面中心から試験片を採取して行った 2mm V ノッチシャルビー衝撃試験の結果を Fig. 6 に

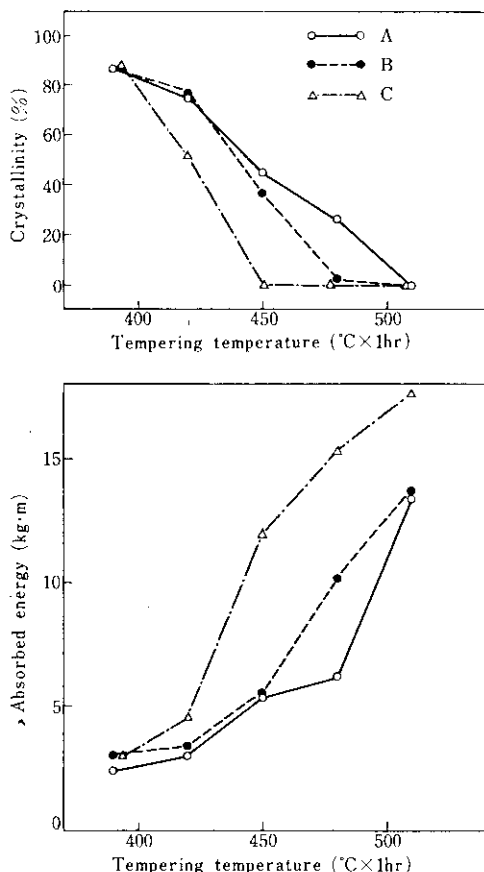


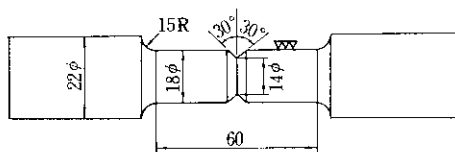
Fig. 6 Change in impact test values at 0°C of KF11T 34mm $\phi$  bars with tempering temperature (860°C W.Q.)

示す。なお試験温度は 0°C である。JIS B1186-1970 では、衝撃試験値に関する規定はないが、南港連絡橋で使用されたボルトの仕様<sup>12)</sup>では、F11T の場合、JIS 4 号試験片で、0°C の吸収エネルギーが 4.8kg·m 以上とされている。上述の引張強さが 120kg/mm<sup>2</sup> になる焼もどし温度での吸収エネルギーは、A, B 鋼で 6~7kg·m, C 鋼で 10kg·m 程度となっており、KF11T の靱性は良好である。

### 3.5 切欠引張試験

切欠強度比 (切欠引張強さ/引張強さ) の大きい材料ほどボルト使用上の強度が高く<sup>13)</sup>、遅れ破壊に対する感受性は低くなるといわれている<sup>14)</sup>。

そこで引張試験と同一熱処理、同一部位から Fig. 7 に示すような試験片を切り出して、切欠引張試験を行った。供試材は Table 5 に示した KF11T 3 鋼種に、比較材として SCM22 と SCM3 の計 5 鋼種である。SCM22 の焼入れは、KF11T と同じ水焼入れ、SCM3 の焼入れは油焼入れである。切欠引張強さおよび切欠強度比の焼もどし温



Radius of notch root : 0.25mm  
Stress concentration factor :  $K_t=5$   
Gauge length : 50mm

Fig. 7 Notch tensile test piece

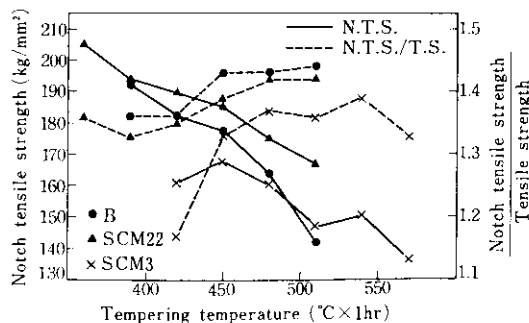


Fig. 8 Change in notch tensile test values of KF11T, SCM22 and SCM3 34mm $\phi$  bars with tempering temperature (860°C W.Q.)

度による変化を Fig. 8 に示す。切欠引張強さは、温度が高くなるにつれて減少し、切欠強度比はわずかに上昇する。この図では、KF11T を B 鋼で代表させ、SCM22 と SCM3 の 3 鋼種についてプロットした。各鋼種の同一強度における切欠引張強さは、Fig. 9 に示すように C 含有量の低い KF11T や SCM22 では、ほぼ同じ値であるのに対し、C 含有量の高い SCM3 のみ引張強さの大きいところで切欠強度が低下するという現象が

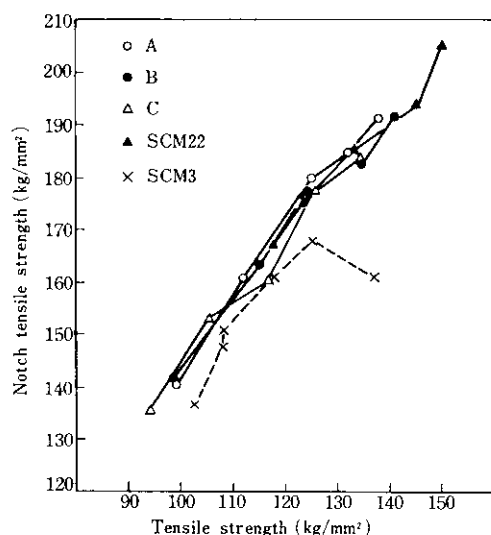


Fig. 9 Notch tensile strength vs. tensile strength for KF11T, SCM22 and SCM3

みられる。したがって SCM3 では、焼もどし温度が低い場合、ボルトとして使用するの是不利である。

### 3.6 同一強度での KF11T と SCM22, SCM3 の比較

今まで述べてきたように、KF11T は 34mmφ 丸棒で調査した結果、F11T・M33までの太径ボルトの素材として十分使用しうることが明らかである。KF11T の M33 実体ボルトで、曝露試験を含む各種試験を行ったが、この際前述の SCM22, SCM3 から製造した同サイズのボルトについても試験を行ったので、Table 5 には各鋼種を引張強さ 120kg/mm<sup>2</sup> の同一水準に焼もどした時の引張、衝撃、切欠引張試験の値を参考のためにまとめて示す。この表から靱性・延性は、KF11T に比べて SCM22 がすぐれ、SCM3 は劣ることがわかる。SCM22 がすぐれているのは、焼もどし温度が高いためであると考えられる。

### 3.7 リラクセーション試験

ひずみ一定の条件下で負荷された応力が、時間とともに減少する現象をストレスリラクセーション（応力緩和）と呼ぶが、応力低下量は一般に温度あるいは負荷応力が高いほど大きい<sup>15)</sup>。摩擦接合用高力ボルトは、初期導入軸力が高いので、室温においてもリラクセーションによる締付力の低

Table 5 Comparison of mechanical properties of each steel tempered to 120kg/mm<sup>2</sup> tensile strength

| Steel        |   | Quenching<br>condition | Tempering<br>condition | Tensile test                  |            |             | Impact<br>test *                       | Notch tensile test              |             |
|--------------|---|------------------------|------------------------|-------------------------------|------------|-------------|----------------------------------------|---------------------------------|-------------|
|              |   |                        |                        | T.S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | El.<br>(%) | R.A.<br>(%) | Absorbed<br>energy at<br>0°C<br>(kg·m) | N.T.S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | N.T.S./T.S. |
| KF11T        | A | 860°C→W.Q.             | 460°C×1hr              | 120                           | 18         | 61          | 5.6                                    | 172                             | 1.44        |
|              | B | 〃                      | 〃                      | 120                           | 17         | 61          | 6.0                                    | 172                             | 1.43        |
|              | C | 〃                      | 430°C×1hr              | 120                           | 17.5       | 61          | 7.0                                    | 170                             | 1.43        |
| SCM22        |   | 〃                      | 510°C×1hr              | 120                           | 20         | 63          | 12.5                                   | 170                             | 1.41        |
| SCM3         |   | 855°C→O.Q.             | 470°C×1hr              | 120                           | 16         | 51          | 1.8                                    | 163                             | 1.36        |
| F11T (Spec.) |   |                        |                        | 110~130                       | ≥14        | ≥40         | —                                      | —                               | —           |

\* Test pieces : JIS No.4



下が懸念され、ボルト素材としてはリラクセーション値の小さいことが要求される。さらに最近になって施工管理の簡便さからナット回転法による締付けが注目されている<sup>2)</sup>が、この方法では、導入軸力が降伏点を越えるため、リラクセーションによる締付け力の低下がより重要な問題となる。以下に Table 4 の5鋼種について前川試験機製作所製のLP型20tリラクセーション試験機を用いて行った試験結果を述べる。試験片は、34mmφ丸棒を16mmφに熱間鍛造し、焼ならし、焼入れ、所定強度に焼もどしたあと8mmφに機械加工した(標点間距離100mm)。初期導入応力は、弾性域に対応して0.2%耐力の85%を、塑性域に対応して伸び2%を生ずる応力をとった。試験温度は、 $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ である。リラクセーション特性を示すパラメーターとして、JIS G3109に定められているリラクセーション値を次式によって計算した。

リラクセーション値

$$= \{(\sigma_0 - \sigma_{23}) / \sigma_0\} \times 100 (\%)$$

ここで  $\sigma_0$  : 初期導入応力

$\sigma_{23}$  : 23hr 後の応力

各鋼種の焼もどし後の強度とリラクセーション値との関係はFig. 10 のようになる。初期応力が大きい塑性域の場合、リラクセーション値は鋼種や引張強さによってほとんど変化せず、7~8%と一定である。弾性域の場合、3種類のKF11Tは、引張強さに対して同じような変化を示し、120kg/mm<sup>2</sup>の強度で3~4%の値となっている。SCM22とSCM3のリラクセーション値も強度によって変化するが、塑性域の場合、KF11Tにくらべて総体的にSCM22は小さく、SCM3は大きい傾向を示す。ただし120kg/mm<sup>2</sup>前後では、KF11Tとはほぼ同じ値となっている。

### 3・8 促進遅れ破壊試験

ボルトの耐遅れ破壊性については、直接実体ボルトの曝露試験によって試験する以外に調べる方法がないが、これにはきわめて長い時間を要するので、促進試験によってその日安を得ようとした。用いた試料は、Table 4の各鋼種の34mmφ丸棒を15mmφに鍛造し、900°C焼ならし、850°C

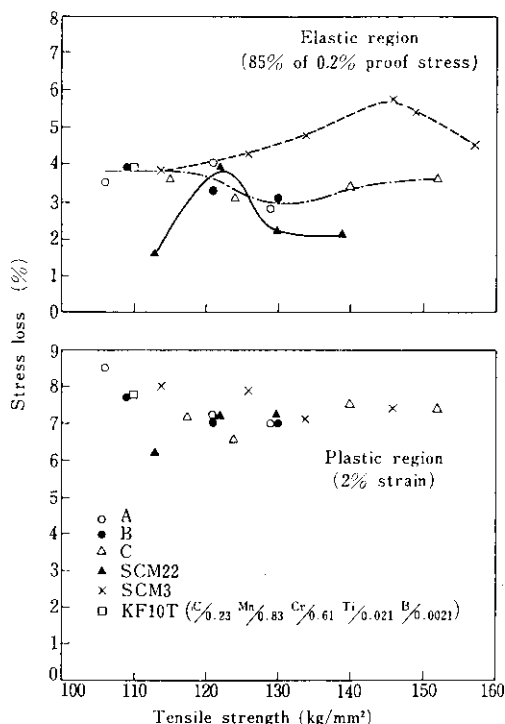


Fig. 10 Relation between tensile strength and stress loss in different initial stresses

焼入れ(SCM3のみ油冷、他は水冷)のあと、焼もどし温度を変えて、強度を110kg/mm<sup>2</sup>~160kg/mm<sup>2</sup>に調整したものである。これをFig. 11に示すような試験片に加工したあと、0.1N HCl中で、負荷応力を切欠引張強さ $\sigma_N$ の0.2~0.9の範囲で試験した。

一般に負荷応力と破断時間の間には、鋼種と強度レベルによって遅れ破壊曲線が求まる。この曲線では、引張強さの大きいものほど同一負荷応力での破断時間は短くなり、遅れ破壊感受性に強度の影響が大きく表われる。0.1N HCl中の試験

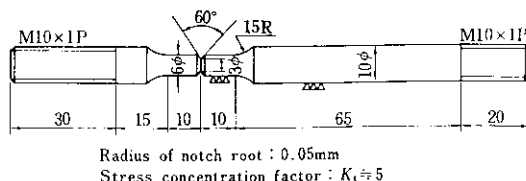


Fig. 11 Delayed fracture test piece

では、水素による割れが支配的とされている<sup>16)</sup>が、長時間後に破断した試片は、腐食によって直径が細くなり、かつ切欠先端も鈍化しているため、水素による破断かどうか疑問である。そこで試片のマクロ的な腐食がほとんど起こらない 10hr での破断強度 ( $\sigma_{D10}$ ) が大きいほど耐遅れ破壊性がすぐれていると考え、 $\sigma_{D10}/\sigma_N$  と引張強さの関係を求めた。これを Fig. 12 に示す。この図から、

(1) 引張強さが 115kg/mm<sup>2</sup> 以下では遅れ破壊を起こさない、(2) KF11T は 3 鋼種とも強度が上がっても耐遅れ破壊性の劣化は少ない、(3) SCM22 は強度 125kg/mm<sup>2</sup> 以下ではすぐれているが、134kg/mm<sup>2</sup> 以上で急激に耐遅れ破壊性が悪くなる、(4) SCM3 は 130kg/mm<sup>2</sup> で KF11T より悪く、強度上昇に伴う劣化も大きい、などの点がわかる。

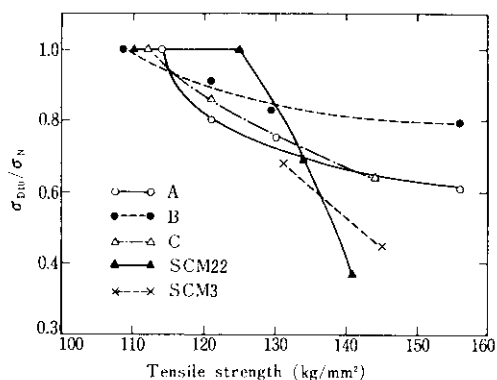


Fig. 12 Effect of tensile strength on the ratio  $\sigma_{D10}/\sigma_N$  ( $\sigma_{D10}$ : delayed fracture strength for 10hr in 0.1N HCl solution,  $\sigma_N$ : notch tensile strength of a delayed fracture test piece)

#### 4. M33太径実体ボルトの試験結果

3章で述べた各試験の結果、Table 4 のKF11T はいずれも太径ボルト素材として使用可能とわかったので、SCM22、SCM3 とともに M33 実体ボルトを製造し、曝露試験による遅れ破壊試験を行うことにした。現状ではM24超の太径ボルトは、冷間鍛造が不能なので、熱間鍛造によって頭部成形を行った。ボルト製造工程の概略を Fig. 13 に

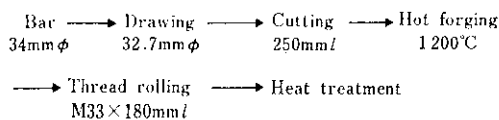


Fig. 13 Production process of M33 bolt

Table 6 Tempering temperature of bolts for exposure test

| Steel | Quenching condition | Tempering temperature (°C) |                            |
|-------|---------------------|----------------------------|----------------------------|
|       |                     | T.S. 140kg/mm <sup>2</sup> | T.S. 120kg/mm <sup>2</sup> |
| KF11T | A 860°C→W.Q.        | 380                        | 460                        |
|       | B "                 | 365                        | 445                        |
|       | C "                 | 330                        | 425                        |
| SCM22 | "                   | 410                        | 500                        |
| SCM3  | 855°C→O.Q.          | 420                        | 480                        |

示す。ボルトの首下長さは、曝露試験の継手板の板厚も勘案して180mm とした。ボルトの引張強さは、F11T が 120kg/mm<sup>2</sup>、F13T が 140 kg/mm<sup>2</sup> になるように焼もどし温度を調節した。各鋼種の熱処理条件を Table 6 に示す。

#### 4.1 ボルトの機械的性質

各鋼種より製造したボルトの、Table 6 の熱処理条件による機械的性質をTable 7 に示す。この表からわかるように、引張強さ 120kg/mm<sup>2</sup> のものは、いずれの鋼種も F11T の規格を満足しているが、140kg/mm<sup>2</sup> のものでは、くさび試験で不合

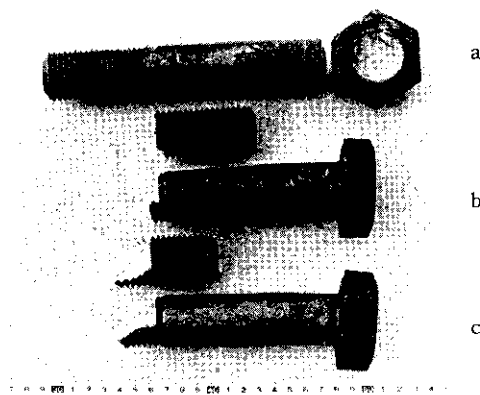


Photo. 2 Fracture mode in wedge test

**Table 7** Mechanical properties of M33 bolts (average of three measurements)

| Steel |   | Strength<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Tensile test (JIS No. 4)                |                               |            |             | Impact test at 0°C<br>(JIS No. 4) |                           | Wedge test              |                    | Hard-<br>ness<br>of head<br>side<br>(HRC) |
|-------|---|-----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------------------------|
|       |   |                                   | 0.2%<br>offset<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | T.S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | El.<br>(%) | R.A.<br>(%) | Absorbed<br>energy<br>(kg·m)      | Crystal-<br>linity<br>(%) | Fracture<br>load<br>(t) | Fracture<br>mode * |                                           |
| KF11T | A | 120                               | 113.3                                   | 118.8                         | 17.7       | 60.1        | 5.6                               | 45                        | 86.7                    | c,c,c              | 35.1                                      |
|       |   | 140                               | 126.5                                   | 139.1                         | 16.0       | 57.4        | 2.5                               | 90                        | 98.7                    | b,b,b              | 40.4                                      |
|       | B | 120                               | 112.1                                   | 120.4                         | 19.0       | 60.9        | 5.4                               | 50                        | 85.5                    | c,c,c              | 35.7                                      |
|       |   | 140                               | 124.8                                   | 139.4                         | 16.0       | 55.6        | 2.8                               | 80                        | 100.0                   | b,b,b              | 39.9                                      |
|       | C | 120                               | 112.6                                   | 120.9                         | 18.0       | 61.8        | 5.1                               | 47                        | 83.8                    | c,c,c              | 35.3                                      |
|       |   | 140                               | 123.6                                   | 141.1                         | 16.0       | 55.3        | 3.0                               | 80                        | 98.5                    | c,b,b              | 40.7                                      |
| SCM22 |   | 120                               | 114.4                                   | 119.0                         | 19.7       | 62.1        | 12.4                              | 0                         | 83.5                    | c,c,c              | 34.4                                      |
|       |   | 140                               | 126.4                                   | 139.5                         | 16.7       | 57.0        | 2.6                               | 80                        | 92.6                    | c,b,b              | 39.0                                      |
| SCM3  |   | 120                               | 105.9                                   | 116.7                         | 14.0       | 50.0        | 3.1                               | 47                        | 90.0                    | c,b,b              | 39.6                                      |
|       |   | 140                               | 115.0                                   | 133.1                         | 14.0       | 48.1        | 2.4                               | 70                        | 80.8                    | a,a,a              | 43.0                                      |

\* See Photo. 2

とされる頭とびがSCM3に生じている。**Table 7**のくさび試験による破断形式は、**Photo. 2**に示すような首破断、水平破断、斜破断の3種のものがみられた。

#### 4.2 締付試験

曝露試験を行う場合、締付ボルトの軸力を調整

しなければならないが、このためにトルク法を想定したトルクと軸力の関係およびナット回転法を想定したナット回転角と軸力の関係を各鋼種、各強度レベルのボルトについて求めた。摩擦接合用高力ボルトの導入軸力の基準は、日本道路協会の

**Table 8** Tightening condition and bolt tension in exposure test

| Steel |   | Tensile strength<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Low bolt tension |                       | High bolt tension      |                       |
|-------|---|-------------------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
|       |   |                                           | Torque<br>(kg·m) | Bolt tension<br>( t ) | Nut rotation<br>(deg.) | Bolt tension<br>( t ) |
| KF11T | A | 140                                       | 248              | 60                    | 240                    | 88                    |
|       |   | 120                                       | 226              | 〃                     | 〃                      | 77                    |
|       | B | 140                                       | 236              | 〃                     | 〃                      | 88                    |
|       |   | 120                                       | 240              | 〃                     | 〃                      | 78                    |
|       | C | 140                                       | 236              | 〃                     | 〃                      | 88                    |
|       |   | 120                                       | 256              | 〃                     | 〃                      | 78                    |
| SCM22 |   | 140                                       | 244              | 〃                     | 〃                      | 88                    |
|       |   | 120                                       | 250              | 〃                     | 〃                      | 77                    |
| SCM3  |   | 140                                       | 246              | 〃                     | 〃                      | 89                    |
|       |   | 120                                       | 258              | 〃                     | 〃                      | 84                    |

鋼道路橋示方書に基づく場合

設計ボルト軸力  $N_0 = 0.75 \times \sigma_y \times A_0$

標準ボルト軸力  $N = 1.1 \times N_0$

ここで、 $\sigma_y$  : 規格最小降伏点

$A_0$  : ねじ部有効断面積

で計算され、これによって F11T, M33 ボルトの  $N_0$ ,  $N$  を求めると  $N_0 = 49.4 \text{ t}$ ,  $N = 54.4 \text{ t}$  となる。曝露試験のボルトの軸力は、条件をより厳しくするために、トルク法による低軸力締付けでも軸力を 60 t 目標とし、ナット回転法による高軸力締付けでは、スナグタイト (snug tight; 仮締め, トルク 25kg・m, 軸力 6.5 t) 後 240° のナット回転角度で調整した。このような基準によって継手材に締付けた各ボルトの導入軸力は、Table 8 のようになっている。

### 4.3 曝露試験

#### 4.3.1 試験方法

Table 7 の F11T, F13T クラス M33 ボルトについて Table 9 に示す条件で曝露試験を実施

Table 9 Exposure test condition for delayed fracture of bolts

| Environment | Bolt tension | Nut position |
|-------------|--------------|--------------|
| Air         | High         | Ground side  |
| "           | "            | Sky side     |
| "           | Low          | Ground side  |
| "           | "            | Sky side     |
| Sea water   | High         | —            |
| Sea water   | Low          | —            |

中である。1 条件の使用ボルト本数は各 10 本であり、これらを 1 本の継手に締付けた。継手材としては、SM50B 厚さ 60mm × 幅 120mm × 長さ 1200mm を 2 枚重ねて使用し、載地の際の天側に幅 5mm × 深さ 3mm のみぞをもうけた。KF11T については、ボルト径の遅れ破壊におよぼす影響をみるために、A 鋼と同一チャージより製造した M24, 首下長さ 135mm のボルトについても、Table 9 と同一条件で曝露試験を行った。

#### 4.3.2 試験結果

曝露開始は、大気中が昭和 47 年 11 月～昭和 48 年 4 月、海水中が昭和 48 年 4 月であり、現在 (昭和 50 年 3 月) までに約 2 年が経過している。この間のボルト破断発生状況をまとめると Table 10 のようになる。この表から以下のことがわかる。

- (1) F11T の強度で破断を生じているのは、SCM 3 のみである。
- (2) F13T の強度では、いずれの鋼種も破断し

Table 10 Bolt numbers of delayed fracture during 2 year exposure test using 10 bolts under each test condition shown in Table 9 (as of March 15, 1975)

| Steel          | Environment | Tensile strength<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | 140 |    | 120 |   |
|----------------|-------------|-------------------------------------------|-----|----|-----|---|
|                |             |                                           | L   | H  | L   | H |
|                |             |                                           |     |    |     |   |
| KF11T<br>(M33) | A           | Air S                                     | 0   | 1  | 0   | 0 |
|                |             | Air G                                     | 6   | 6  | 0   | 0 |
|                |             | Sea water                                 | 0   | 1  | 0   | 0 |
|                | B           | Air S                                     | 3   | 6  | 0   | 0 |
|                |             | Air G                                     | 10  | 9  | 0   | 0 |
|                |             | Sea water                                 | 4   | 2  | 0   | 0 |
|                | C           | Air S                                     | 7   | 0  | 0   | 0 |
|                |             | Air G                                     | 9   | 9  | 0   | 0 |
|                |             | Sea water                                 | 0   | 1  | 0   | 0 |
| SCM 22 (M33)   |             | Air S                                     | 0   | 0  | 0   | 0 |
|                |             | Air G                                     | 0   | 3  | 0   | 0 |
|                |             | Sea water                                 | 0   | 0  | 0   | 0 |
| SCM 3 (M33)    |             | Air S                                     | 10  | 9  | 0   | 0 |
|                |             | Air G                                     | 7   | 10 | 0   | 4 |
|                |             | Sea water                                 | 8   | —  | 0   | 2 |
| KF11T (M24)    |             | Air S                                     | 0   | 1  | 0   | 0 |
|                |             | Air G                                     | 0   | 2  | 0   | 0 |
|                |             | Sea water                                 | 0   | 0  | 0   | 0 |

S : Nut position is sky side

G : Nut position is ground side

L : Low bolt tension

H : High bolt tension

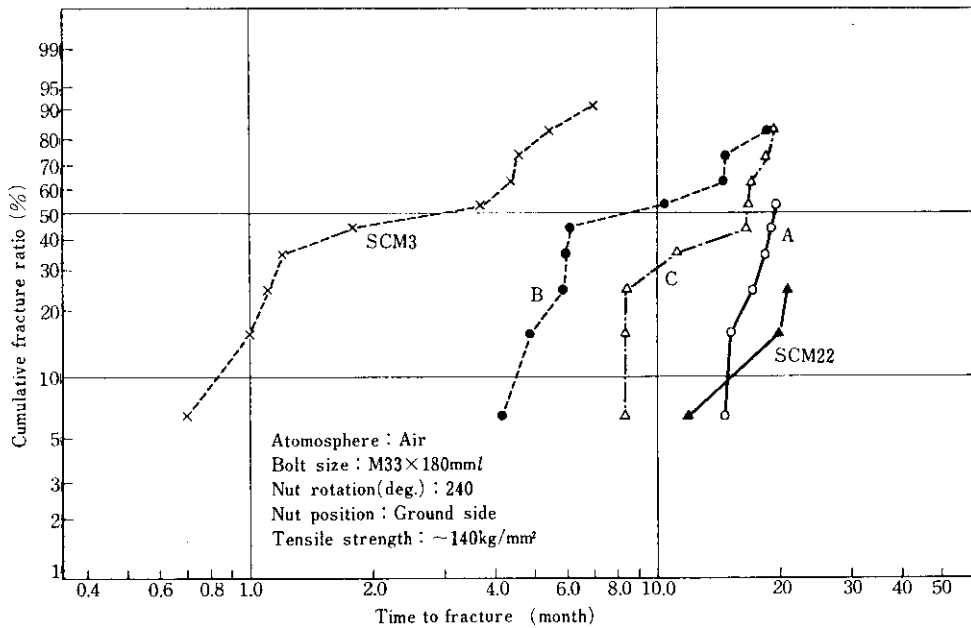


Fig. 14 Weibull probability diagram for delayed fracture test of bolts (as of March 15, 1975)

ているが、SCM 3 が最も悪く、ついでKF11Tで、SCM22 が最良である。

- (3) 同一鋼種でもボルト径が小さいほうが遅れ破壊しにくい。
- (4) 大気中の曝露では、ナットを地面に向けておいたほうが破断が起こりやすい。
- (5) 海水中での破断発生は大気中より少ない。
- (6) ボルト軸力が高いほうがやや破断数が多いようであるが明瞭な傾向は認め難い。

Fig. 14 は、引張強さ  $140\text{kg/mm}^2$  の各鋼種のM33ボルトをナット回転法によって締付け、ナットを地面側に向けて大気曝露したときの破断状況を Weibull 確率紙にプロットしたものである。この図では、曲線が右側にくるほど遅れ破壊しにくいことを表すが、ここでも SCM 3 の不利と SCM22 の優位が明らかに認められる。

## 5. 結 言

摩擦接合用 F11T 高力ボルト用鋼材として開発した KF11T について、冷間鍛造性、焼入れ・焼もどしによる機械的性質の変化のほか M33 実ボルトの試作を行い、この鋼種の太径ボルトへの適応性

について調査した。さらに KF11T と SCM22, SCM 3 の 3 鋼種より強度  $120\text{kg/mm}^2$  と  $140\text{kg/mm}^2$  の M33 ボルトを製造し、ナット回転法による高軸力締付けを含む大気および海水中の曝露試験の経過についても述べた。これらの試験結果をまとめると以下ようになる。

- (1) KF11T は冷間鍛造性にすぐれ、ボルト製造工程での割れ発生率がきわめて低い。
- (2) KF11T は JIS で規定されている最大径 M24 ボルトより太径の F11T・M33 ボルト用素材としても十分使用可能である。
- (3) 強度  $120\text{kg/mm}^2$  の M33 ボルトでは、SCM 3 のみが遅れ破壊しており、KF11T と SCM22 には破断がみられない。
- (4) 強度  $140\text{kg/mm}^2$  の M33 ボルトでは、いずれの鋼種でも遅れ破壊を生じているが、SCM 3 が最も多く SCM22 は最も少ない。
- (5) 強度の高い場合、同一鋼種でもボルト径が小さいと遅れ破壊しにくくなる。
- (6) 大気曝露では、ボルトの載地条件の影響が明らかにみられる。しかし海水中のほうが大気中より破断数が多いということはない。

## 参 考 文 献

- 1) JSSC, 6 (1970) 52, 4
- 2) JSSC, 7 (1971) 72, 55
- 3) JSSC, 9 (1973) 87, 40
- 4) JSSC, 10 (1974) 105, 34
- 5) 木村ほか：製鉄研究, (1972) 274, 14
- 6) 西岡ほか：住友金属, 25 (1973) 4, 146
- 7) 田島ほか：JSSC, 9 (1973) 89, 17
- 8) 菊川ほか：川崎製鉄技報, 7 (1975) 1, 116
- 9) 三好ほか：塑性と加工, 12 (1971) 122, 167
- 10) 大和久：焼入性, (1960), 88 [日刊工業新聞社]
- 11) 佐藤：鋼の熱処理 (鉄鋼協会編), (1969), 62, [丸善]
- 12) 阪神高速道路公団南港連絡橋技術委員会第11回上部工材料及び製作分科会資料 No. 11-5, (1972)
- 13) F. L. Gill: Metal Prog., 73 (1965) 12, 58
- 14) 山本, 藤田：神戸製鋼技報, 18 (1968) 3, 1
- 15) 平：金属材料の高温強度, (1968), 97, [養賢堂]
- 16) 山本：鉄と鋼, 55 (1969) 4, 80