

# 高張力鋼の遅れ破壊現象について

辻 村 昂 \*  
今 村 弘 \*\*

## 1. ま え が き

最近土木、建築、航空機産業等は、ますます高抗張力鋼を要求している。これらは、一般に、特殊な低合金鋼を熱処理して高抗張力を得ているが、特に、抗張力  $140 \text{ Kg/mm}^2$  程度以上のものでは、その表面状況、切欠等の疲労に対する感受性が大きく、静的引張試験における引張強度より、比較的低い応力でも、ある種の雰囲気中で緊張しておく、短時間にして、突然破断する現象が認められている。

これらは、遅れ破壊 (Delayed failure あるいは、静疲労 Static fatigue とも称される) と呼ばれているが、この感受性は、材料の強度、形状、あるいは、緊張時におけるその周囲の雰囲気によって大きく左右され、例えば、空気中強度にくらべ、水道水中、アルコール中などでは、遅れ破壊感受性が高く、また、熱処理により高強度を得た切欠きの多い材料ほど、この傾向は増大する事が報告されている。

したがって、土木、建築業のように、ボルト状の高張力鋼を水分子と接触する雰囲気で使用する場合は、材料の遅れ破壊に関する検討が重要な問題となってくる。

かゝる事点に立ち、筆者らも、抗張力  $140 \text{ Kg/mm}^2$  程度以上の熱処理鋼材で、水中遅れ破壊強度の著しく低下する鋼種のある事を認めたので、報告するものである。

## 2. 遅れ破壊に対する考え方

金属材料、あるいは、非金属材料の遅れ破壊に対する研究は、古くから多くの学者によって研究されてきている。

石英やガラスにも、この現象があり、その原因は、表面あるいは、内部のガス分子によるものである事が、ほぼ確められている。<sup>(1)</sup> 鋼の場合も、同様に、鋼中の水素に起因する、いわゆる、鋼の水素脆性として考えられている。<sup>(2)</sup>

すなわち、鋼を酸洗い、電気メッキ (カドミウム、クロム、亜鉛メッキなど)、陰極脱脂などの電気化学的処理をした場合に<sup>(3)</sup> 鋼中に浸透した、原子状の水素が、Cottrell 雰囲気を形成し、クラックの先端などの、応力集中部に集まると、高圧の分子状水素となって、クラックの発達を促進し、クラックが一定の深さに達したとき、Griffith の亀裂伝播条件が成立して、一瞬にして、破断に至るといわれている。

この、遅れ破壊の起点となる、微小クラックは、通常の非破壊検査では、発見の出来ないもので、現在の技術では、完全に避ける事は出来ないとされており、表面肌荒れの、熱処理鋼棒などでは、特に、

---

\* 神戸製鋼 神戸工場成品加工課長

\*\* 神戸製鋼 神戸工場成品加工課

考慮する必要がある。

### 3. 供 試 材

#### 3.1 供試材の化学成分および機械的性質

土木、建築業に使用される高張力鋼は、一般に、低合金鋼を熱処理して、製作される。したがって、本実験でも、数種の低合金鋼について熱処理し、強度を  $140 \text{ Kg/mm}^2$  程度以上のものにした。

すなわち、実験Ⅰでは、合金元素が多く、抗張力  $170 \text{ Kg/mm}^2$  程度とし、実験Ⅱでは、土木、建築用高張力鋼として使用される数種の低合金鋼について、抗張力  $140 \text{ Kg/mm}^2$  程度の強度となる様にした。

供試材の化学成分および熱処理後の、機械的性質は、Table 1 および Table 2 の通りである。

Table 1 供試材の化学成分 (%)

| sample<br>No. | C    | Si   | Mn   | Ni     | Cr   | Mo    | 備 考         |
|---------------|------|------|------|--------|------|-------|-------------|
| 1             | 0.41 | 1.26 | 0.82 | 0.11   | 1.00 | 0.23  | 実験Ⅰ用供試材     |
| 2             | 0.22 | 0.91 | 1.24 | 0.03   | 1.58 | 0.004 | 実験Ⅱ用<br>供試材 |
| 3             | 0.29 | 0.29 | 1.24 | 0.01   | 1.02 | 0.32  |             |
| 4             | 0.58 | 1.73 | 0.94 | < 0.01 | 0.03 | 0.003 |             |
| 5             | 0.21 | 0.25 | 0.80 | 0.01   | 1.04 | 0.32  |             |
| 6             | 0.56 | 0.32 | 0.78 | 0.05   | 0.57 | 0.007 |             |
| 7             | 0.43 | 0.36 | 0.75 | 1.83   | 0.84 | 0.28  |             |

Table 2 供試材の機械的性質

| sample<br>No. |   | 降 伏 点<br>$\sigma_y \text{ Kg/mm}^2$ | 抗 張 力<br>$\sigma_B \text{ Kg/mm}^2$ | 切欠強さ<br>$\sigma_N \text{ Kg/mm}^2$ | 伸 び<br>$\epsilon \%$ | 絞 り<br>$\psi \%$ | 熱処理炉  |
|---------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------|-------|
| 1             | A | 144.3                               | 172.5                               | —                                  | 9.6                  | 35.4             | 直 火 炉 |
|               | B | 129.5                               | 159.5                               | —                                  | 10.6                 | 38.2             |       |
|               | C | 143.8                               | 170.2                               | —                                  | 9.8                  | 34.9             | 塩 浴 炉 |
| 2             |   | 123                                 | 143                                 | 220                                | 15                   | 53               | 電 気 炉 |
| 3             | A | 127                                 | 149                                 | 210                                | 16                   | 60               |       |
|               | B | 131                                 | 161                                 | 220                                | 15                   | 57               |       |
| 4             |   | 122                                 | 137                                 | 182                                | 14                   | 37               |       |
| 5             |   | 119                                 | 140                                 | 206                                | 16                   | 60               |       |
| 6             |   | 148                                 | 162                                 | 169                                | 12                   | 39               |       |
| 7             |   | 145                                 | 146                                 | 199                                | 12                   | 43               |       |

### 3.2 供試材の寸法および形状

Fig 1 に、実験Ⅰおよび実験Ⅱに使用した、試験片の寸法、形状を示す。

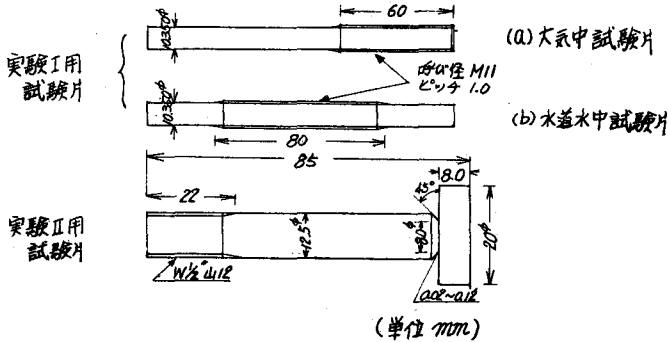


Fig 1 遅れ破壊試験片

実験Ⅰに使用した試験片は、大気中試験片については鋼棒の片端に、水道水中、セメント中のものは中央部に転造ネジ切りして供試材とした。

また、実験Ⅱに使用した試験片は、頭下に、さらに鋭い切欠きを加えているため、この部分の応力集中係数は、かなり severe なものとなっている（10以上と推定される）。

### 4. 試験方法

実験Ⅰについては、Fig 2 の様な装置により、大気中、水道水中、およびセメントモルタル中（セメント1：砂2：水0.5）の雰囲気中、各種応力で緊張して、負荷応力と破断するまでの時間との関係を求めた。

また、実験Ⅱについては、Fig 3 のような装置で、大気中および水道水中で、同様の試験を行った。試験時間については、P C 鋼棒や高張力ボルトなどの破断事故は、締結後1週間以内の比較的短時間に生ずる場合が多く、したがって、本実験でも、100時間程度を限度とした。

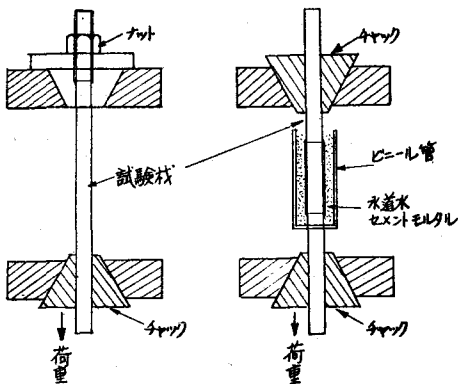


Fig 2 遅れ破壊試験取付状態（実験Ⅰ）

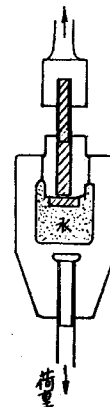


Fig 3 遅れ破壊試験取付状況（実験Ⅱ）

5. 遅れ破壊試験結果

5.1 ネジ部遅れ破壊試験結果 (実験Ⅰ)

Fig 4は、実験Ⅰ用試験片 (sample No. 1. A, B, C) について、前述のような試験を行った結果である。

9 - 4

| 化学成分<br>%             | C                             | Si                            | Mn                  | Ni              | Cr                          | Mo    |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|-------|
|                       | 0.41                          | 1.26                          | 0.82                | 0.11            | 1.00                        | 0.23  |
| 機<br>械<br>的<br>性<br>質 | 降 伏 点<br>$\sigma_y$ $Kg/mm^2$ | 抗 張 力<br>$\sigma_B$ $Kg/mm^2$ | 伸 び<br>$\epsilon$ % | 絞 り<br>$\psi$ % | ネ ジ 部<br>抗 張 力<br>$Kg/mm^2$ |       |
|                       | A                             | 144.3                         | 172.5               | 9.6             | 34.4                        | 160.8 |
|                       | B                             | 129.5                         | 159.5               | 10.6            | 38.2                        | 145.3 |
|                       | C                             | 143.8                         | 170.2               | 9.8             | 34.9                        | 159.2 |

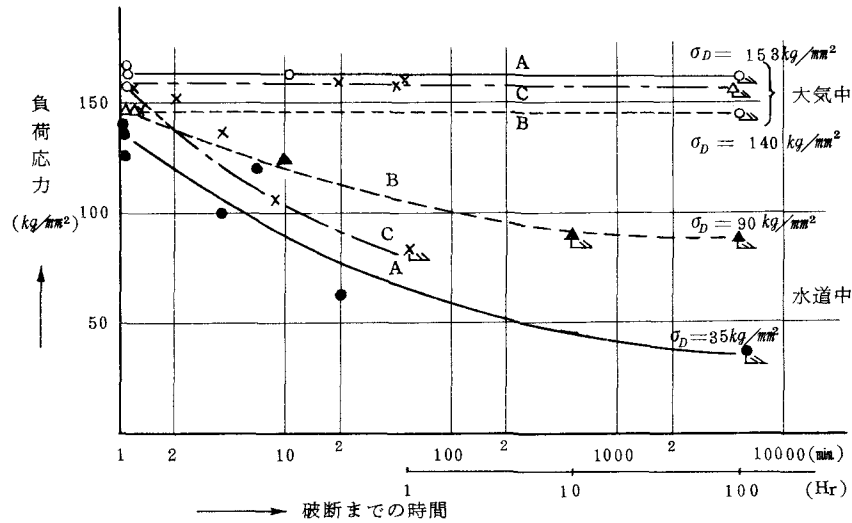


Fig 4 抗張力の違いによる遅れ破壊強度の比較

図にみるように、いずれも、水道水中では、大気中における破断強度より、きわめて低い応力でも、短時間にして破断する事がわかる。

また、試験片 Aの方が、試験片 Bよりも大気中強度は高いにもかかわらず、水道水中では、逆に、試験片 Bよりも低い負荷応力でも、短時間にして破断していることは注意を要する。

試験片 Cは、鉛浴炉で処理し、試験片の表面が酸化するのを防ぎ、その後ホーニング処理\*を施して表面のクラックを取り除こうとしたものであるが、Fig 4の結果にみるように、この処理を施さない試験片 Aよりも、いくぶん改善されるが、水道水中では、やはり大気中強度にくらべて、強度低下を見る。

なお、一般の繰返し応力のかかる、動的疲労試験では、一定応力以下の負荷では破断しないという、いわゆる、疲労限が存在するが、それと同様なものが、遅れ破壊試験にも存在する。

\*ホーニング処理とは、微細な粒子を高速で、金属の表面に当て、表面のクラックなどを、除去する処理である。

これを、遅れ破壊強度（あるいは、静疲労限）と呼んでいるが、この大きいほど、耐遅れ破壊性の優れた材料といえる。

ここでは、100時間遅れ破壊強度を $\sigma_D$ で表わしているが、Fig 4にみるように、大気中では、 $\sigma_D$ はほとんど $\sigma_B$ に等しいが、水道水中では、きわめて低い値となる。

次に、試験片Aについて、セメントモルタル中（セメント1：砂2：水0.5）で同様の試験を行ったもの、および試験片Aのネジ部にグリースを塗布後、水道水中で同様の試験を行った結果をFig 5に示す。

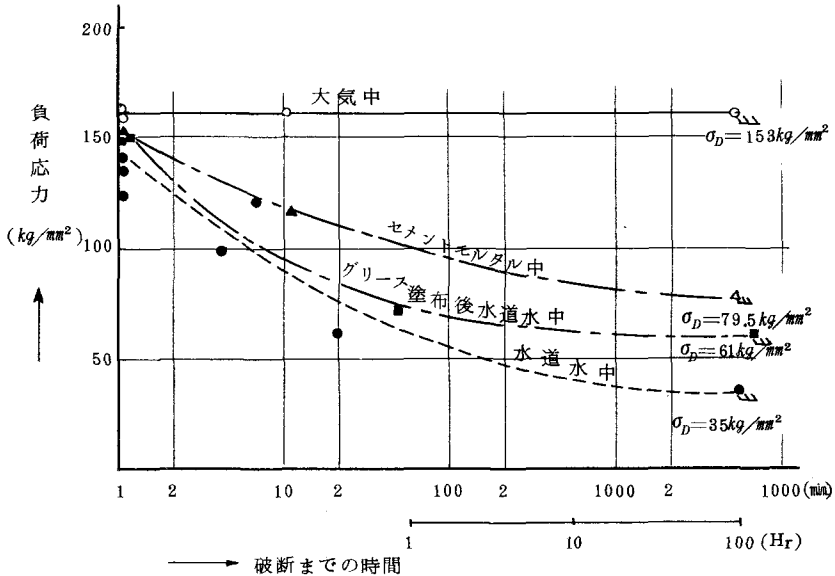


Fig 5 各種雰囲気での遅れ破壊試験結果

本供試材は、特に、遅れ破壊感受性の高い材料であるが、Fig 5の結果にみる様に、PC鋼棒などの、施工時の条件を考慮した、セメントモルタル中でも、遅れ破壊強度は低下し、ネジ部にグリースを塗布したものでも、水中遅れ破壊強度を顕著に低下することが判明した。

## 5.2 頭下に、切欠を持つ試験片の遅れ破壊試験（実験Ⅱ）

Fig 6～Fig 11 は、前述 Fig 3のような装置で、大気中、あるいは、水道水中で行った、遅れ破壊の試験結果である。

いずれの鋼種でも、大気中強度に対して、水道水中では、かなりの遅れ破壊強度の低下がみられる。

また、実験Ⅰの場合と同様に、sample No. 3は、遅れ破壊感受性の大きい材料で、この実験でも、抗張力の高い方が、水道水中では、遅れ破壊強度は低下した (Fig 7 参照)

|           |                      |                      |                      |                   |               |       |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|---------------|-------|
| sample 番号 | 2                    |                      |                      |                   |               |       |
| ノッチ尖端R平均値 | 0.09 mm              |                      |                      |                   |               |       |
| 化学成分      | C                    | Si                   | Mn                   | Ni                | Cr            | Mo    |
| %         | 0.22                 | 0.91                 | 1.24                 | 0.03              | 1.58          | 0.007 |
| 機械的性質     | 降伏点<br>$\sigma_y$    | 抗張力<br>$\sigma_B$    | 切欠強さ<br>$\sigma_N$   | 伸 び<br>$\epsilon$ | 絞 り<br>$\psi$ |       |
|           | 123 $\text{kg/mm}^2$ | 143 $\text{kg/mm}^2$ | 220 $\text{kg/mm}^2$ | 15 %              | 53 %          |       |

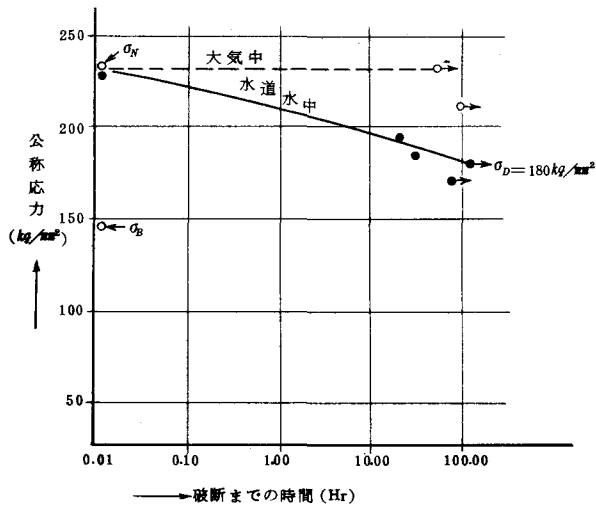


Fig 6

|           |      |                      |                      |                      |                   |               |
|-----------|------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|---------------|
| sample 番号 | 3    |                      |                      |                      |                   |               |
| ノッチ尖端R平均値 | A    | 0.08 mm              | B                    | 0.04 mm              |                   |               |
| 化学成分      | C    | Si                   | Mn                   | Ni                   | Cr                | Mo            |
| %         | 0.29 | 0.29                 | 1.24                 | 0.01                 | 1.02              | 0.32          |
| 機械的性質     |      | 降伏点<br>$\sigma_y$    | 抗張力<br>$\sigma_B$    | 切欠強さ<br>$\sigma_N$   | 伸 び<br>$\epsilon$ | 絞 り<br>$\psi$ |
|           | A    | 127 $\text{kg/mm}^2$ | 149 $\text{kg/mm}^2$ | 210 $\text{kg/mm}^2$ | 16 %              | 60 %          |
|           | B    | 131 "                | 161 "                | 220 "                | 15 "              | 57 "          |

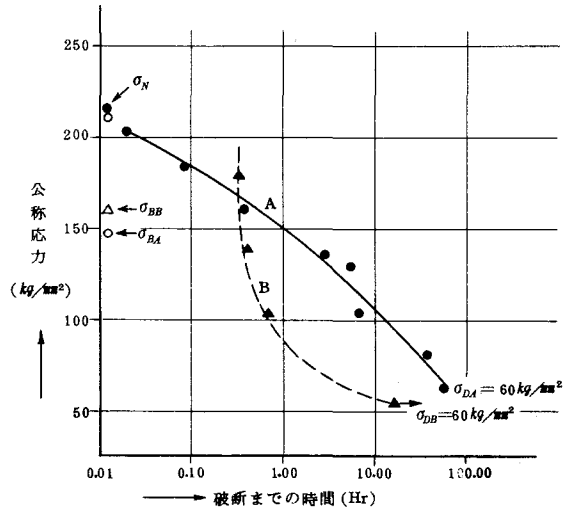


Fig 7

|           |                        |                        |                        |                  |              |       |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|--------------|-------|
| sample No | 4                      |                        |                        |                  |              |       |
| ノッチ尖端R平均値 | 0.12 mm                |                        |                        |                  |              |       |
| 化学成分<br>% | C                      | Si                     | Mn                     | Ni               | Cr           | Mo    |
|           | 0.58                   | 1.73                   | 0.94                   | < 0.01           | 0.03         | 0.003 |
| 機械的性質     | 降伏点<br>$\sigma_y$      | 抗張力<br>$\sigma_B$      | 切欠強さ<br>$\sigma_N$     | 伸び<br>$\epsilon$ | 絞り<br>$\psi$ |       |
|           | 122 kg/mm <sup>2</sup> | 137 kg/mm <sup>2</sup> | 182 kg/mm <sup>2</sup> | 14 %             | 37 %         |       |

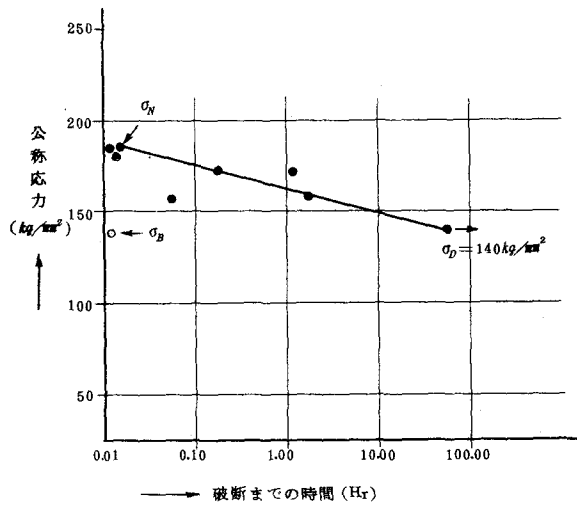


Fig 8

|           |                        |                        |                        |                  |              |      |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|--------------|------|
| sample No | 5                      |                        |                        |                  |              |      |
| ノッチ尖端R平均値 | 0.075 mm               |                        |                        |                  |              |      |
| 化学成分<br>% | C                      | Si                     | Mn                     | Ni               | Cr           | Mo   |
|           | 0.21                   | 0.25                   | 0.80                   | 0.01             | 1.04         | 0.32 |
| 機械的性質     | 降伏点<br>$\sigma_y$      | 抗張力<br>$\sigma_B$      | 切欠強さ<br>$\sigma_N$     | 伸び<br>$\epsilon$ | 絞り<br>$\psi$ |      |
|           | 119 kg/mm <sup>2</sup> | 140 kg/mm <sup>2</sup> | 206 kg/mm <sup>2</sup> | 16 %             | 60 %         |      |

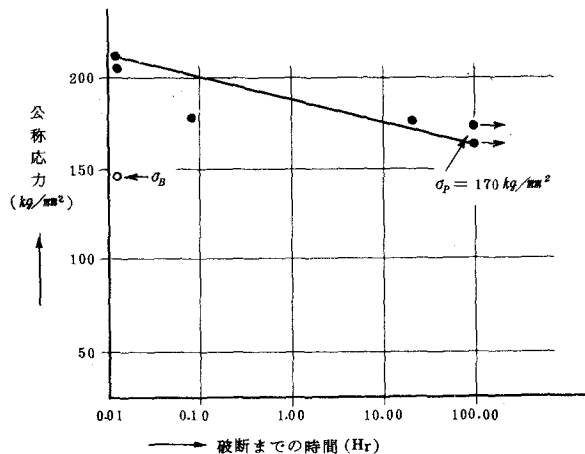


Fig 9

|            |                        |                        |                        |                   |               |       |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|---------------|-------|
| sample No. | 6                      |                        |                        |                   |               |       |
| ノッチ尖端R平均値  | 0.08 mm                |                        |                        |                   |               |       |
| 化 学 成 分    | C                      | Si                     | Mn                     | Ni                | Cr            | Mo    |
| %          | 0.56                   | 0.32                   | 0.78                   | 0.05              | 0.57          | 0.007 |
| 機 械 的 性 質  | 降 伏 点<br>$\sigma_y$    | 抗 張 力<br>$\sigma_B$    | 切 欠 強 さ<br>$\sigma_N$  | 伸 び<br>$\epsilon$ | 絞 り<br>$\psi$ |       |
|            | 148 kg/mm <sup>2</sup> | 162 kg/mm <sup>2</sup> | 169 kg/mm <sup>2</sup> | 12 %              | 39 %          |       |

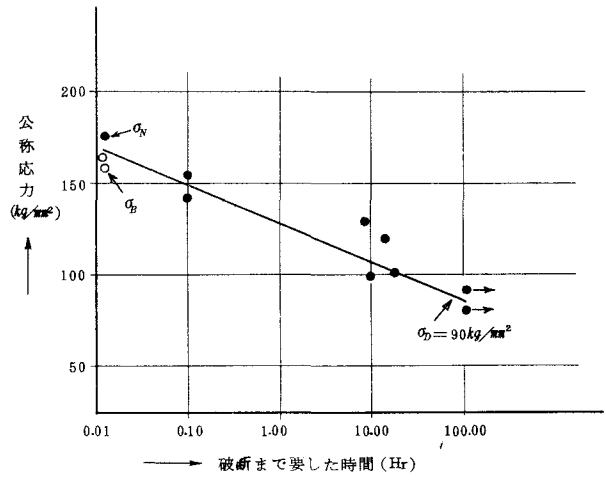


Fig 10

|            |                        |                        |                        |                   |               |      |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|---------------|------|
| sample No. | 7                      |                        |                        |                   |               |      |
| ノッチ尖端R平均値  | 0.45 mm                |                        |                        |                   |               |      |
| 化 学 成 分    | C                      | Si                     | Mn                     | Ni                | Cr            | Mo   |
| %          | 0.43                   | 0.36                   | 0.75                   | 1.83              | 0.84          | 0.28 |
| 機 械 的 性 質  | 降 伏 点<br>$\sigma_y$    | 抗 張 力<br>$\sigma_B$    | 切 欠 強 さ<br>$\sigma_N$  | 伸 び<br>$\epsilon$ | 絞 り<br>$\psi$ |      |
|            | 145 kg/mm <sup>2</sup> | 146 kg/mm <sup>2</sup> | 199 kg/mm <sup>2</sup> | 12 %              | 43 %          |      |

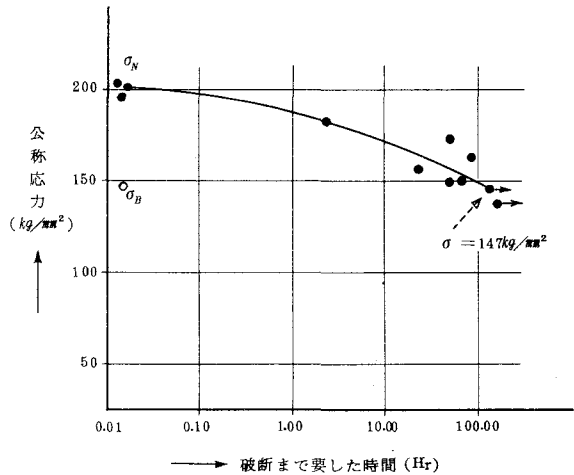


Fig 11

## 6. 考 察

実験Ⅰで使用した材料については、特に遅れ破壊感受性の高い鋼種で、実用はされていないが、実験Ⅱで使用した鋼種は、実用されているもので、遅れ破壊感受性の大きい鋼種もあり、注意を要する。

尚、次表 Table 3 は、実験Ⅱで行った遅れ破壊試験の結果をまとめたものである。

Table 3 遅れ破壊試験結果まとめ

| sample<br>№ | 抗 張 力<br>$\sigma_B$<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | 切欠強さ<br>$\sigma_N$<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | 遅れ破壊<br>強度 $\sigma_D$<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_N/\sigma_B$ | $\sigma_D/\sigma_B$ |
|-------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 2           | 143                                          | 220                                         | 180                                            | 1.54                | 1.26                |
| 3           | A                                            | 149                                         | 210                                            | 1.41                | 0.40                |
|             | B                                            | 161                                         | 220                                            | 1.37                | 0.37                |
| 4           | 137                                          | 182                                         | 140                                            | 1.33                | 1.02                |
| 5           | 140                                          | 206                                         | 170                                            | 1.48                | 1.22                |
| 6           | 162                                          | 169                                         | 90                                             | 1.04                | 0.56                |
| 7           | 146                                          | 199                                         | 147                                            | 1.36                | 1.00                |

Table 3 で  $\sigma_N/\sigma_B$  は、いわゆる、切欠強度比と称せられ、一般にこの値が1より大きいことが、高張力鋼の一つの条件とされている。しかしながら、sample №3 の例にみるように、 $\sigma_N/\sigma_B$  の値が大きくても、遅れ破壊強度は、きわめて低下する事があるから、これだけで鋼材を選定するのは危険である。

$\sigma_D/\sigma_B$  は、鋼材の抗張力に対する100時間遅れ破壊強度の比で、この値が大きいほど、耐遅れ破壊性の優れた材料で、土木、建築業に使用される高張力鋼としては望ましい材料といえる。

## 7. 結 言

遅れ破壊についての試験方法は、まだ確立されておらず、今回の試験のみで、全てを保障する事は出来ないが、土木、建築業に使用される高張力鋼は、今回の試験と類似した条件下で使用されるので、使用に際しては、十分の検討が必要である。

## 8. 文 献

- (1) 日本金属学会：転位論の金属学への応用 (1957) P173-176
- (2) A.R.Troiano：“Embrittlement by Hydrogen and Other Interstitials,” Metal progress, (Feb.1960) P112.
- (3) 浅山行昭他，“強ジン鋼の水素脆性の研究” 新三菱重工技報 Vol 6. №1. P43.
- (4) 山本、藤田、：“遅れ破壊試験法と2.3の結果,” 鉄と鋼 Vol51 №11 (1965) P2098