

せん断機におけるせん断荷重の基礎に及ぼす影響

Dynamic Characteristics of Mechanical Shear

安田 哲太郎* 酒井 通光* 中西 恒夫*
Tetsutarō Yasuda Michiteru Sakai Tsuneo Nakanishi

要 旨

鉄鋼設備の近代合理化に伴い、大鋼片を分断する大容量せん断機が出現し、これに伴いせん断抵抗およびせん断特性が問題となっている。本文では、せん断動特性の中で特にせん断荷重によるひずみエネルギーが基礎に及ぼす影響について一考察を行なったものを紹介する。

1. 緒 言

設備の近代大形化に伴い、せん断機に要求される性能の傾向は下記に大体集約される。

(1) 大 容 量 化

大きな断面の鋼材を能率よく切断するために、大容量のせん断機が要求される。

(2) 自 動 化

歩留と能率の向上、および人件費の削減のため、付帯設備を含めた自動化。

(3) 稼働率向上

高速せん断、メンテナンスフリー、および動力の節減から、従来せん断力 2,000 t 以上の熱間せん断機動力源としては高圧流体を使用していたが、これが電動力に取ってかわられつつあり、最近では電動シヤーとして、せん断力 3,000 t 程度のものが製作されている。

多品種のものを取扱う場合、稼働率向上のため刃物交換の迅速化は特に必要であり、肉盛りなどによる刃物寿命の延長と相まって重要である。このため刃物を刃物台と一体のまま交換するカートリッジ式シヤーが開発されつつある。図 1 は、分塊圧延設備用 2,300 t・カートリッジ式シヤーを示したものである。

また切断性能の向上を図るため、拘束せん断、精密せん断などに関して興味深い研究も行なわれている。

せん断機の大容量化および高性能化に伴い発生する諸問題を解析するためには基本的なせん断特性を知ることが必要である。本稿では、せん断特性から来る基礎の振動を取り上げたものである。

鋼片せん断機は、被せん断材の温度により熱間せん断機と冷間せん断機に大別されるが、そのせん断特性にも大きな差が認められる。

2. せん断特性

2.1 せん断荷重

鋼片をせん断する場合、図 2 に示すように、材料を上下より押しつける力、 P_1, P_2 および刃物の側面に側圧、 F_1, F_2 がかかる。これらの力の総合作用のうち、せん断に主役を演ずるせん断荷重 P は、

$$P = P_1 + \mu_2 F_1 = P_2 + \mu_4 F_2 \dots \dots \dots (1)$$

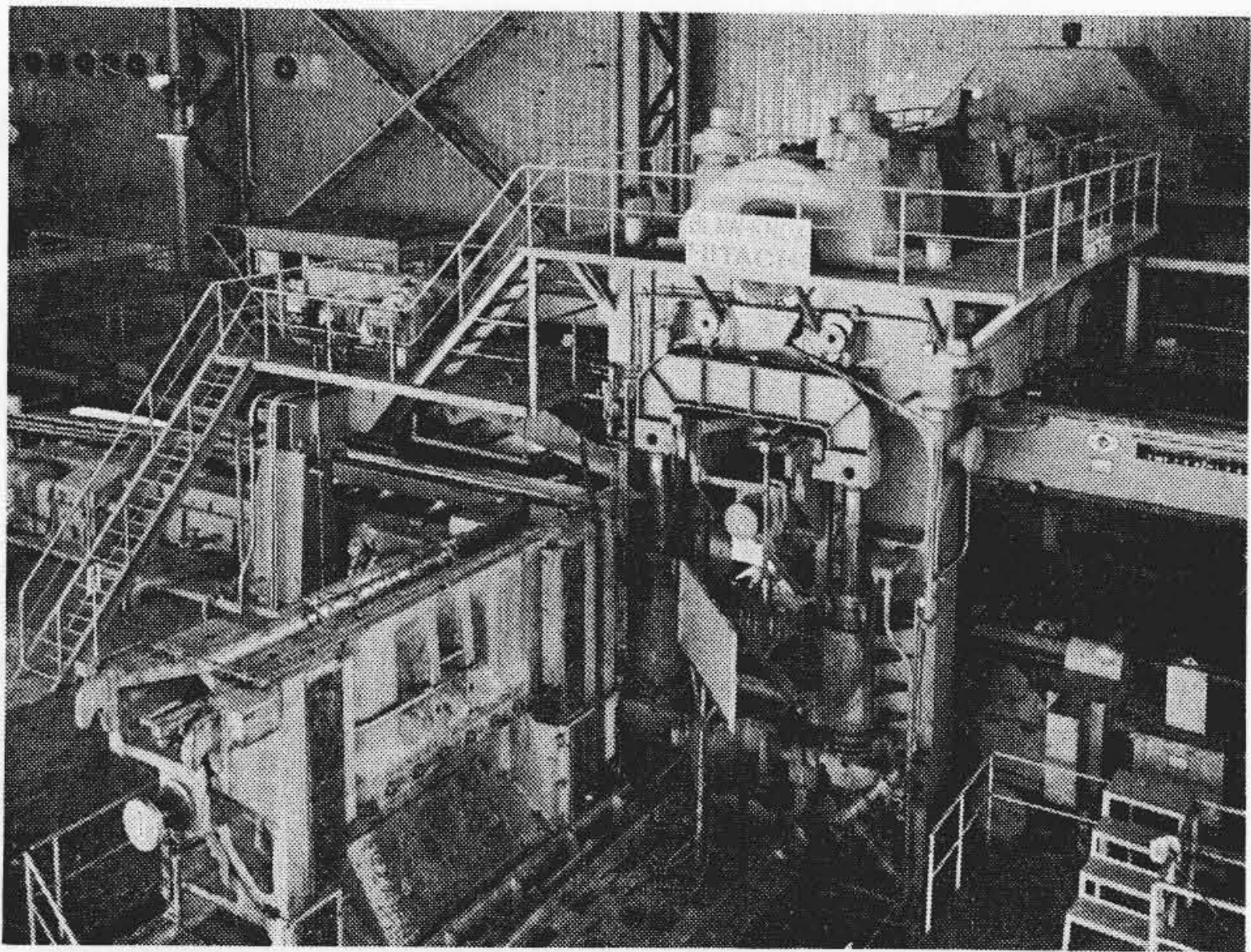


図 1 カートリッジ式シヤー

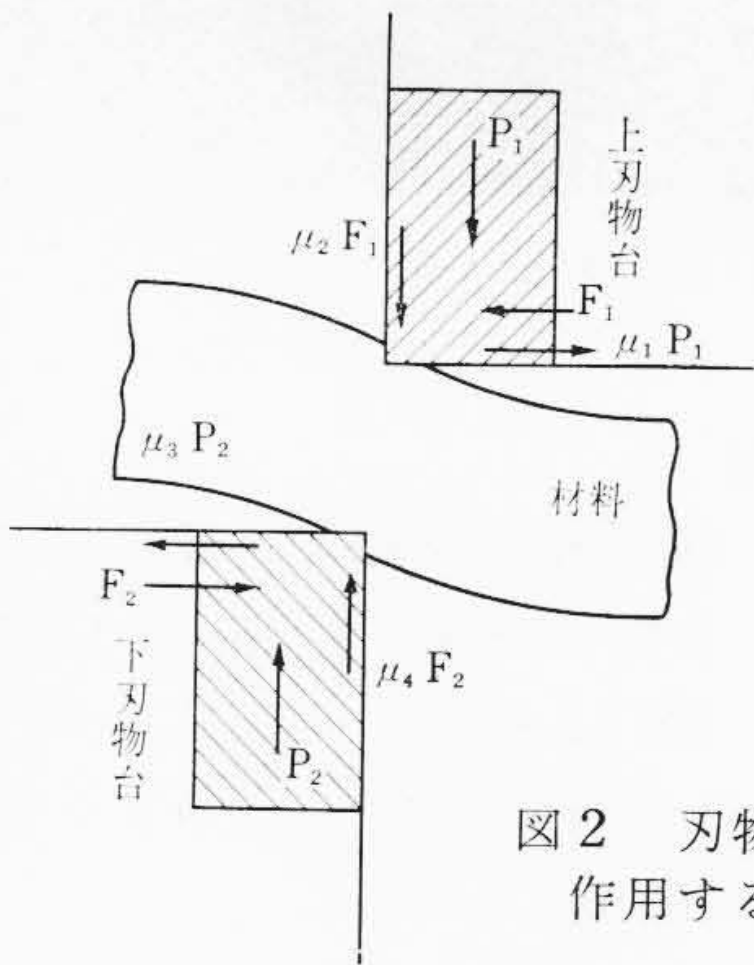


図 2 刃物より被せん断材に作用する力

ここに、 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$: 刃物と材料間の摩擦係数
で与えられ、この P が、せん断機の所要動力を決定する主要因となる。

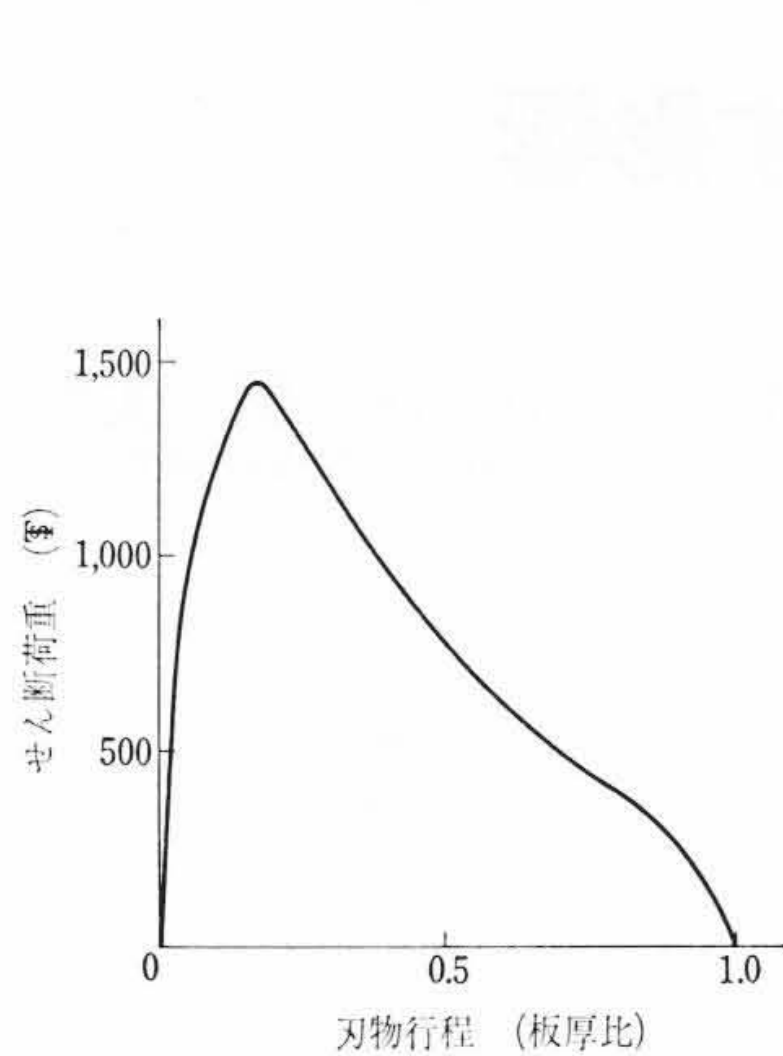
2.2 せん断荷重特性

実際のせん断においては、被せん断材への刃物の浸透に応じ、せん断荷重 P は変化する。熱間および冷間せん断について実測例を示したものが図 3、図 4 である。このときのせん断条件は下記のとおりである。

表 1 大形せん断機 (日立製作所納入実績)

項 #	納入先 (敬称略)	納入年	せん断力	切断材寸法	刃物ストローク	形 式	用 途
1	日本鋼管株式会社	S. 41.	2,000 重	300 mm × 1,950 mm	600 mm	熱間電動ダウンカット	分塊圧延設備
2	川崎製鉄株式会社	S. 41.	2,000 重	350 mm × 1,900 mm	600 mm	熱間電動ダウンカット	分塊圧延設備
3	住友金属工業株式会社	S. 42. 11	1,600 重	150 ㍉ (冷間)	180 mm	冷間電動ダウンカット	鍛造設備
4	日新製鋼株式会社	S. 43. 5	2,000 重	熱間ステンレス 220 × 1,850	600 mm	熱間電動ダウンカット	分塊圧延設備
5	日本鋼管株式会社	S. 44. 2	2,300 重	ビームブランク 650 × 1,300	880 mm	熱間電動ダウンカット (刃物台組替式)	分塊圧延設備
6	富士製鉄株式会社	S. 44. 5	2,600 重	350 × 2,400	500 mm	熱間電動ダウンカット	分塊圧延設備

* 日立製作所日立工場



(その1)

図3 熱間せん断荷重特性

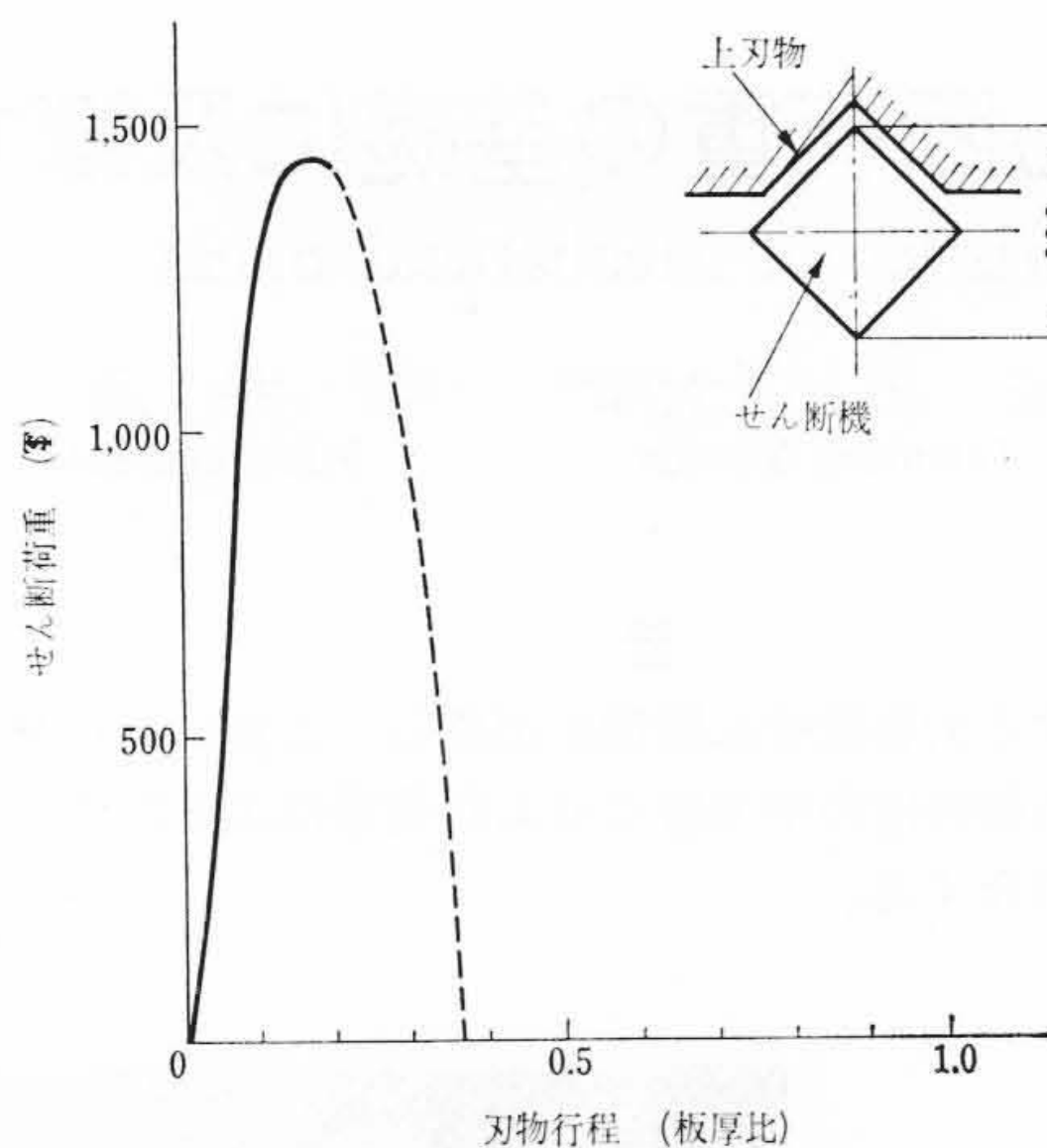


図4 冷間せん断荷重特性

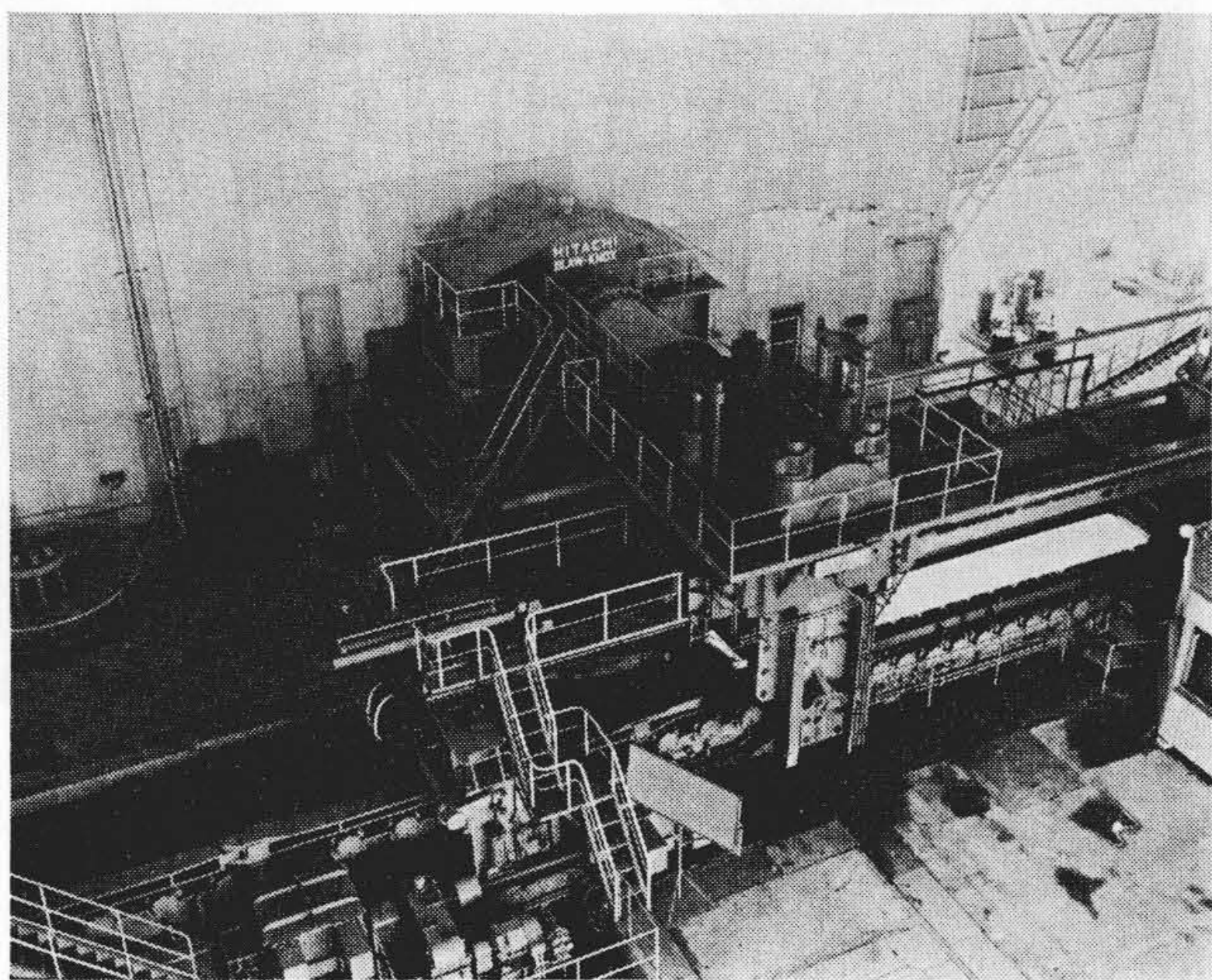


図5 2,000 t スラブシーヤ

(i) 熱間せん断

- せん断材寸法: 297 mm 厚×1,660 mm 幅
 せん断材温度: 表面 1,025°C, 断面中央 1,165°C
 せん断材材質: SM 41 A
 せん断機形式: 2,000 t 電動ダウンカットシーヤ (図5)
 クランク半径: 300 mm
 クランク回転数: 12 rpm

(ii) 冷間せん断

- せん断材寸法: 160 mm 角
 せん断材温度: 100~200°C
 せん断材材質: S 55 C
 せん断機形式: 1,600 t 電動ダウンカットシーヤ (図6)
 クランク半径: 90 mm
 クランク回転数: 12 rpm

図3と図4を比較して大きな差異は、熱間せん断においては、せん断荷重、刃物浸透度が材料高さいっぱいまで持続するのに比し、冷間せん断の場合には、せん断荷重が、材料高さの20~30%の所より急激に減少し0となる。せん断現象を段階的に説明すれば、

- (1) 第一次せん断 (単純せん断期) (図7)
- (2) 第二次せん断 (薄層せん断期) (図8)
- (3) 破断

となる。破断現象は主として冷間せん断に顕著に見られる現象であるが、一部熱間せん断においても高炭素鋼ビレット材について同様な傾向が認められ、せん断曲線は、図3と図4のほぼ中間の形状を

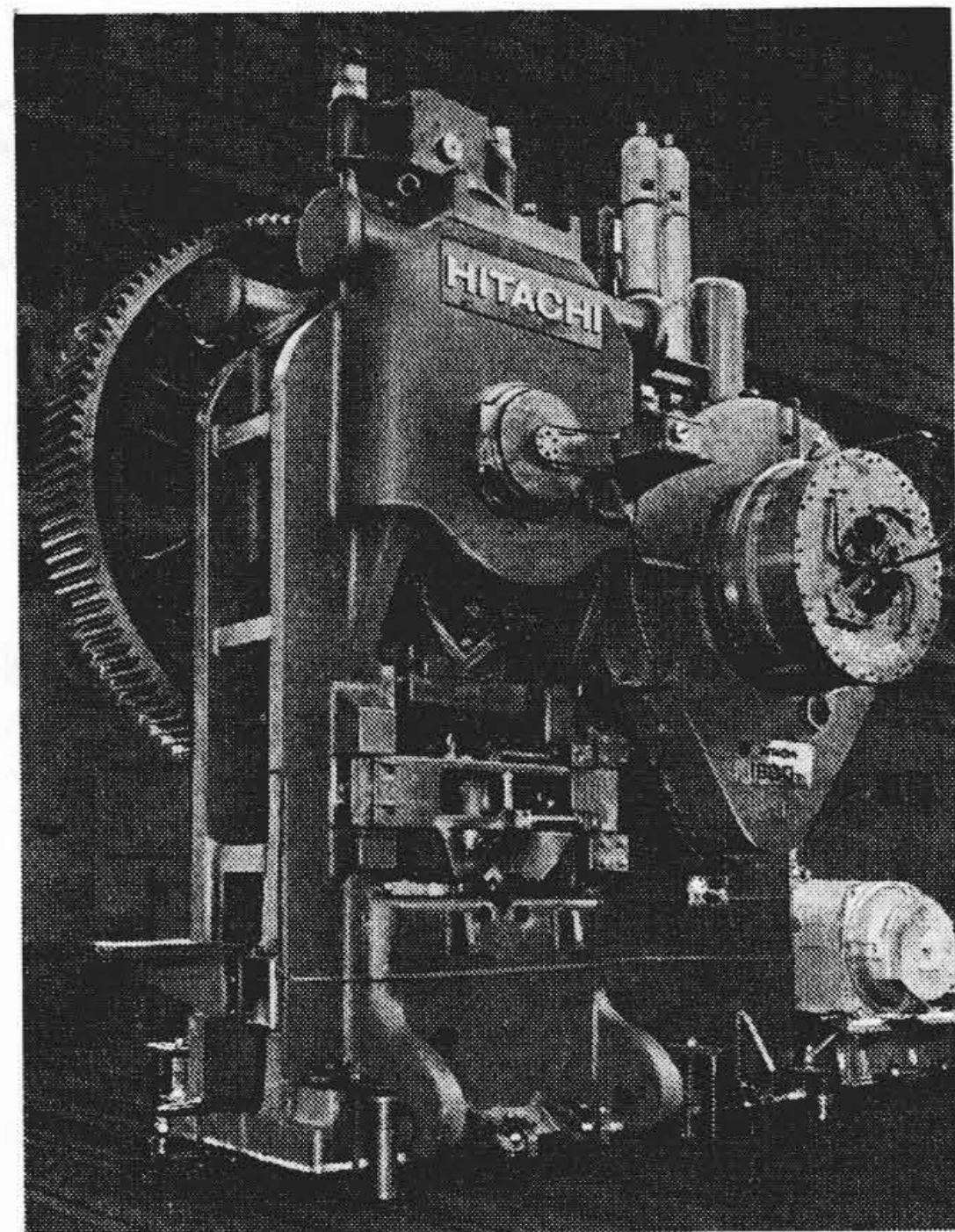
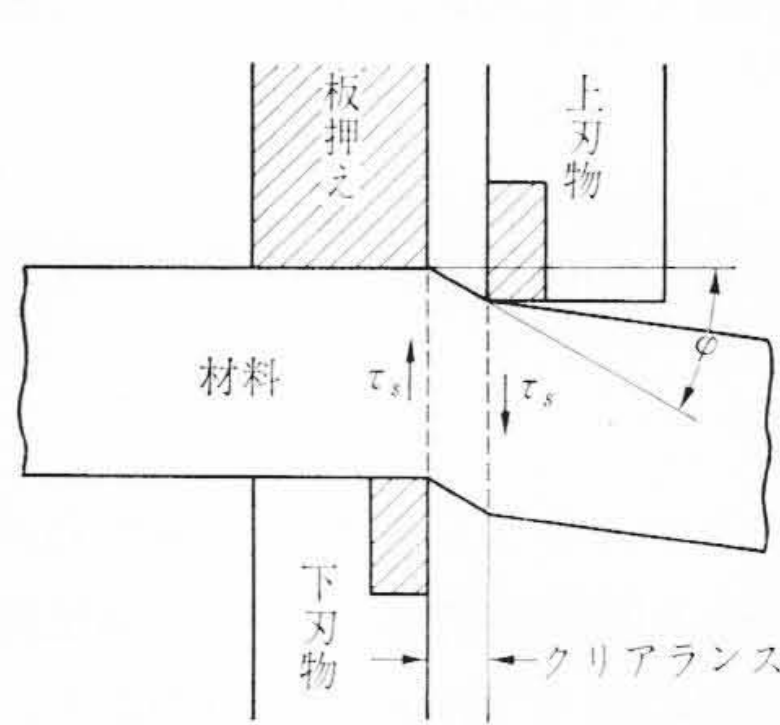
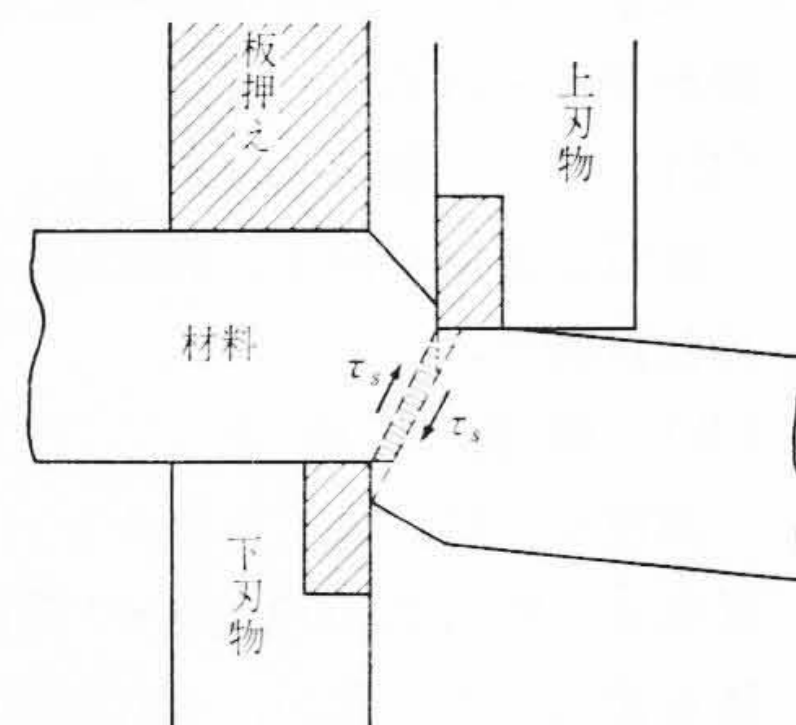


図6 1,600 t・コールド・ビレットシーヤ



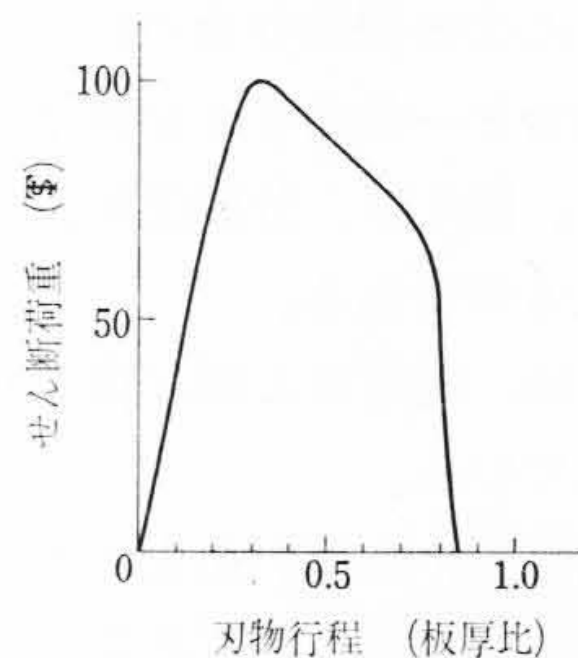
(単純せん断期)

図7 第1次せん断



(薄層せん断期)

図8 第2次せん断



(その2)

図9 熱間せん断荷重特性

示している(図9)。したがって、熱間せん断におけるせん断特性曲線は、温度条件によるだけでなく、その材質、せん断速度などにより、概略、図3、図9の二つの形に分類される。

図3と図9を比較すると、最大せん断荷重点は、図3の形式を取るものでは、材料厚みの20~30%刃物が浸透した所に生じ、図9の形式を取るものについては、30~50%刃物が進行した点で発生している。また図9では、材料厚みの約80%刃物が進行した所でせん断荷重が急激に減少し0となり、図3のように刃物ストロークいっぱいせん断荷重が持続するのと異なっている。熱間材のせん断模型実験として鉛材が一般に使用されるが、鉛材のせん断特性は図9の形状にほぼ一致している。

上記は、普通鋼材に関してであるが、特殊鋼材に関してほぼ同様の傾向が見られることが、ドイツの MAX VATER の興味ある報告⁽¹⁾で明らかにされている。

以上述べたせん断特性において、せん断荷重が急激に減少するものでは、基礎に振動を与える要因となる。

2.3 基礎荷重

稼働中の冷間せん断機について、基礎振動の加速度を実測した。

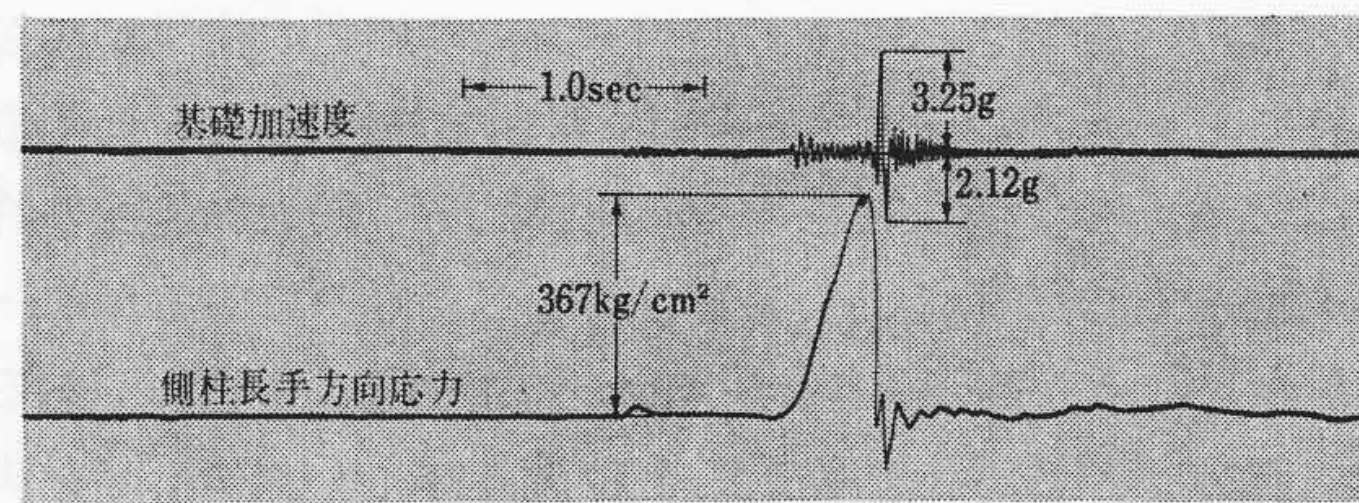


図10 現地測定基礎振動オシログラム

図10はそのオシロを示したものである。オシロは切断過程におけるせん断荷重と、せん断機基礎付近に取りつけた加速度計による振動加速度を記録したものであり、オシロより明かなように、基礎振動は、せん断荷重が消滅したときに急激に発生しており、せん断荷重の急激な減少により、せん断機内部にたくわえられたフレーム、クランクおよび駆動系のひずみエネルギーが一度に放出されることにより、基礎に振動が生ずるものと推定される。

このことは、熱間せん断機においても材料温度の低いものを切断した場合に、基礎振動が増加することにより知られている。

3. せん断機基礎振動の解析

3.1 計算式

せん断時、弾性体にたくわえられるひずみエネルギーにより引き起こされる振動を、次に述べる簡略なモデルに置きかえた。

せん断機にて材料切断時にかかるせん断荷重は、せん断機内部に駆動系を持つ場合には、せん断機内部にて力の平衡が成立し、基礎には振動以外の力は伝わらず、基礎は原則としてひずみエネルギーを吸収しない。したがってひずみエネルギーはせん断機内部の駆動系、およびシャーフフレームに吸収され、特にこのうちでもせん断機側柱の伸びとして吸収される割合が大半を占めるので、ここではせん断機の垂直方向の運動のみを考える。図11に示すせん断機を、図12に示す簡単な振動系と置き換える。ここにおいて

- m_1 : シャーフフレーム上部の質量
- m_2 : シャーフフレーム下部の質量
- m_3 : 基礎(コンクリートなど)の質量
- k_1, c_1 : シャーフフレーム上部と下部を連結する側柱のバネ定数および減衰係数
- k_2, c_2 : 基礎のバネ定数および減衰係数
- k_3, c_3 : 地盤のバネ定数および減衰係数

基礎の振動は図12のような機構で考察すれば当然 m_1, m_2, m_3 の連成運動として考えねばならないが、図10のオシロより判断すれば、フレームの变形が消滅した後に、大きな基礎振動が起こることより、最初 m_1, m_2 の連成振動および、 m_2 の振動 $x_2(t)$ を求め、次にこの振動 $x_2(t)$ によって生ずる力 $P(t)$ が基礎 m_3 に作用し、その結果基礎 m_3 が振動するものとする。仮定として

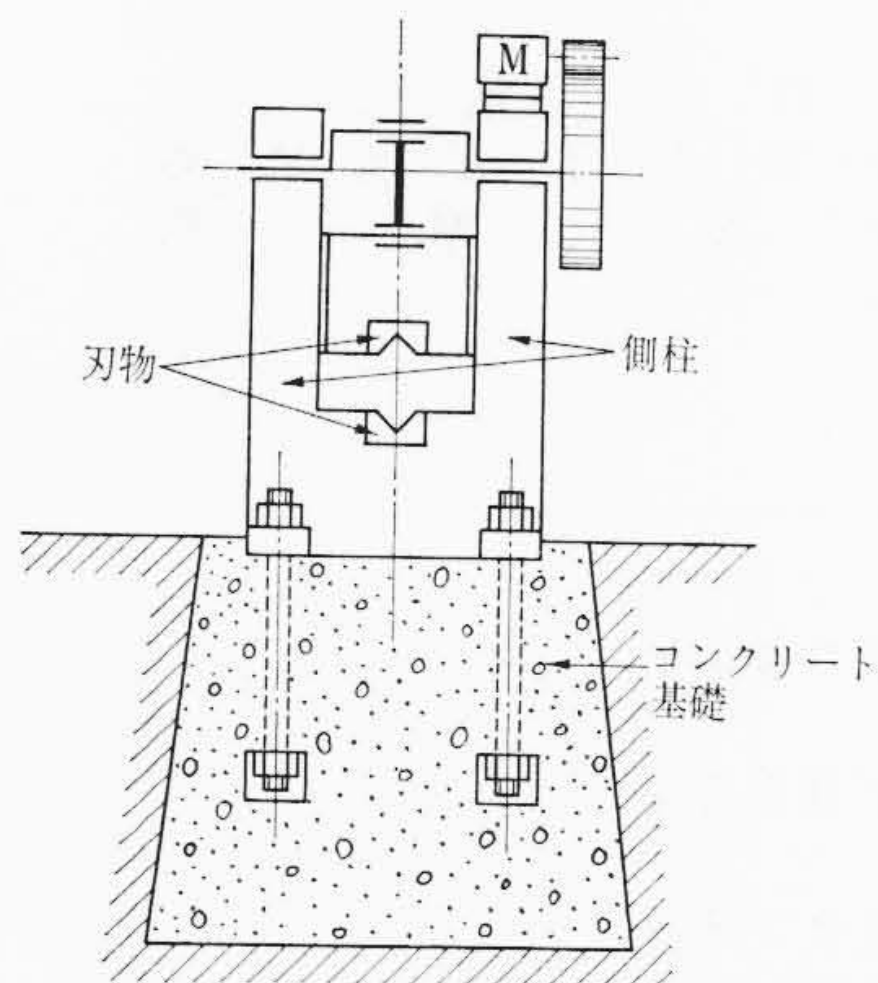


図11 冷間せん断機の基礎

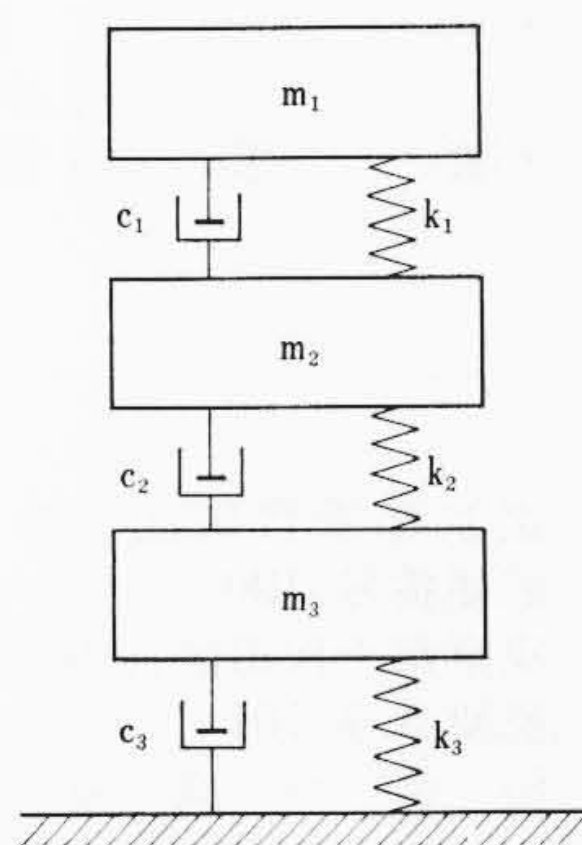


図12 等価バネ-質量系(1)

(i) m_1, m_2 は上下にのみ振動し左右前後の動揺は省略し得るものとする。 $x_1(t), x_2(t)$ は材料切断開始を基準として、 t 時間後の m_1, m_2 変位を表わす。

(ii) c_1, c_2 は簡単化するために無視する。

図13の運動方程式は

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_2) = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 - k_1(x_1 - x_2) = 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

この系の固有振動数は

$$\omega_1^2, \omega_2^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{k_1}{m_1} + \frac{k_1 + k_2}{m_2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{k_1}{m_1} + \frac{k_1 + k_2}{m_2} \right)^2 - \frac{4k_1 k_2}{m_1 m_2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

最大せん断荷重 $P_{\max}$ が働いたとき、フレーム側柱の伸びを δ とすれば、

$$\delta = \frac{P_{\max}}{k_1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

初期条件として

$$x_1(0) = -\delta, \quad x_2(0) = 0$$

とすれば m_1, m_2 の変位は次式で与えられる。

$$\begin{cases} x_1(t) = -\frac{\delta(m_1 \omega_2^2 + k_1)}{m_1(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \cos \omega_1 t + \frac{\delta(-m_1 \omega_1^2 + k_1)}{m_1(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \cos \omega_2 t \\ x_2(t) = -\frac{\delta(-m_1 \omega_1^2 + k_1)k_1}{m_1(-m_2 \omega_2^2 + k_1 + k_2)(\omega_1^2 - \omega_2^2)} (\cos \omega_1 t - \cos \omega_2 t) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

図14に示すように、 m_3 の加速度 α は $x_2(t)$ によって生ずる力 $F(t)$ が m_3 に作用して生ずるとすれば

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{P(t)}{m_3} = \frac{k_2 \cdot x_2(t)}{m_3} \\ &= \frac{-P_{\max}(-m_1 \omega_1^2 + k_1)k_2(\cos \omega_1 t - \cos \omega_2 t)}{m_1 m_3(-m_2 \omega_2^2 + k_1 + k_2)(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

で与えられる。一般にシャーフフレーム上部と下部の質量はほぼ等しいと見なせる場合が一般的で、式を簡単にするため $m_1 = m_2 = m$ とする。また、基礎のバネ定数 k_2 はシャーフフレームのバネ定数 k_1 の1/10以下であることが实际的であるから $k_2 \ll k_1$ として式(6)を簡単にすると、

$$\alpha = \frac{P_{\max} k_2}{2m_3 k_1} \left(\cos \sqrt{\frac{2k_1}{m}} t - \cos \sqrt{\frac{k_2}{2m}} t \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

(7)式において周期 $2\pi\sqrt{\frac{m}{2k_1}}$ と $2\pi\sqrt{\frac{2m}{k_2}}$ は、 $k_1 \approx 10k_2$ と仮定すれば、前者は後者の約6倍の周期となり、(7)式の $|\alpha|$ は、 $t = 5\pi\sqrt{\frac{m}{2k_1}}$ 以後に最大値を取るようになるが実際には減衰を加味して考えれば、 $t = \pi\sqrt{\frac{m}{2k_1}}$ 時の $|\alpha|$ の最初の極大値を最大値と見なし得る。

この時間 $t = \pi\sqrt{\frac{m}{2k_1}}$ はシャーフフレームの固有振動の周期 $2\pi\sqrt{\frac{m}{k_1}}$ と比べて約1/3に相当する。したがって

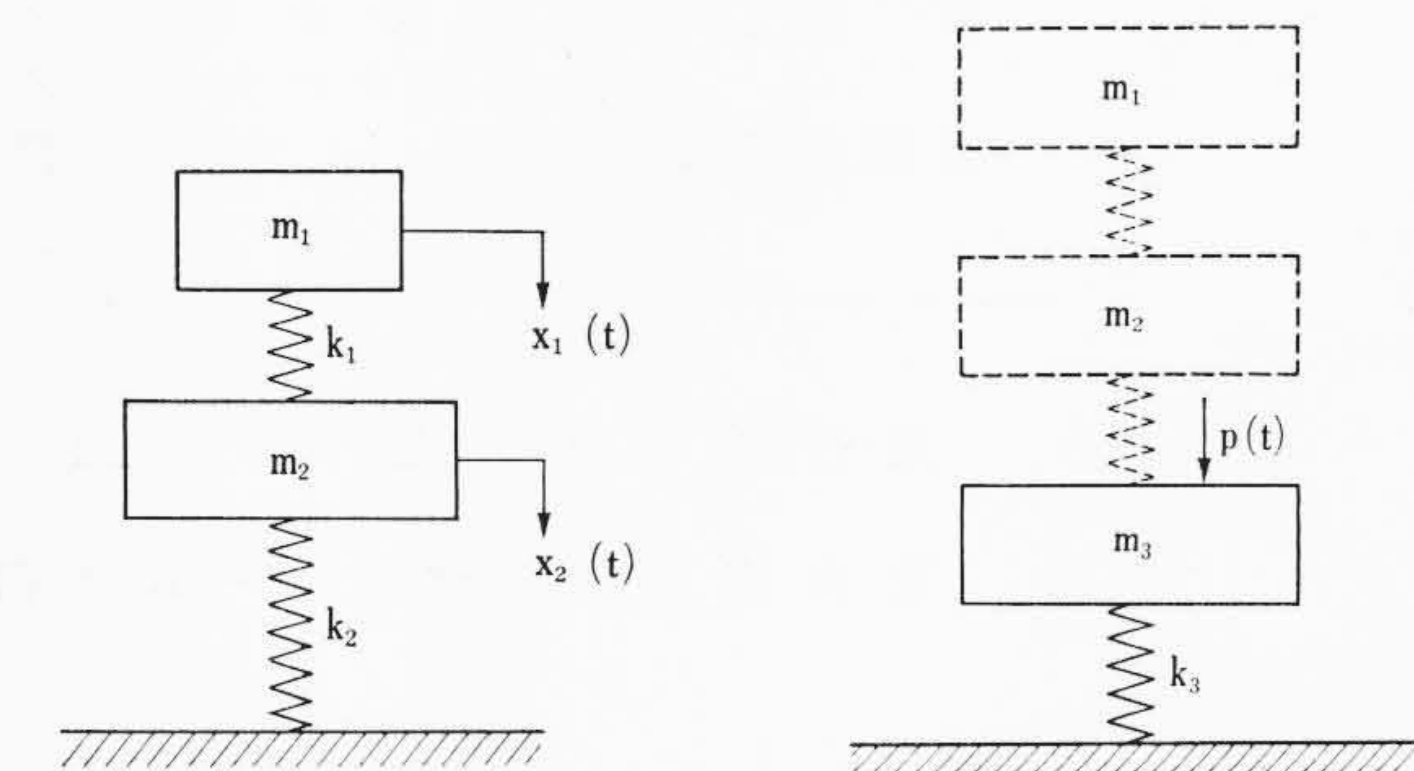


図13 等価バネ-質量系(2)

図14 等価バネ-質量系(3)

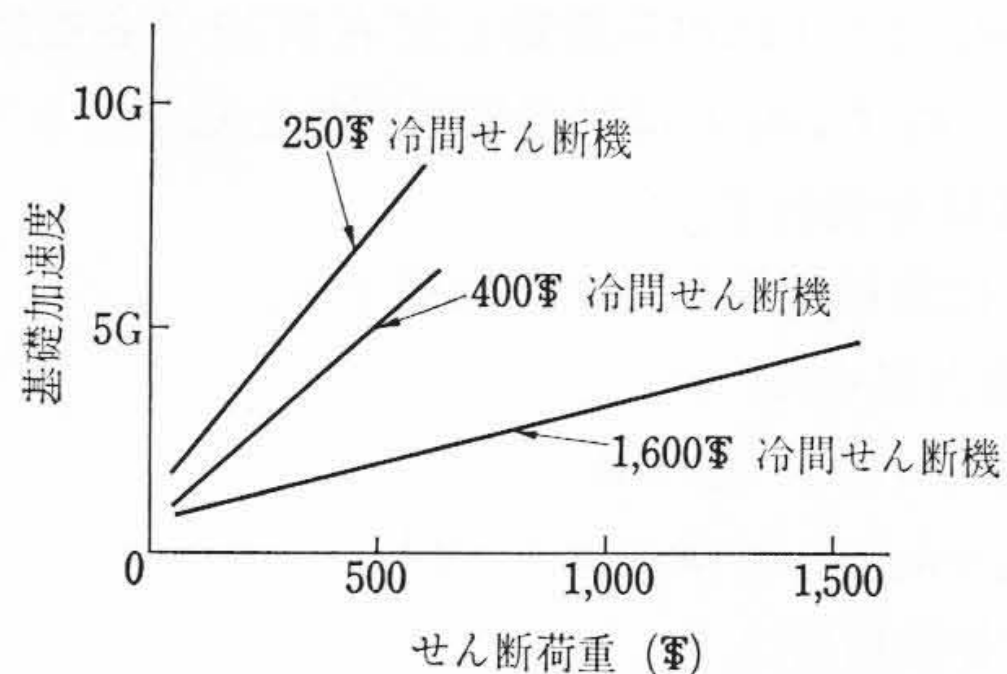


図15 基礎加速度の測定値

$$\alpha_{\max} = -\eta \frac{P_{\max} k_2}{m_3 k_1} \dots\dots\dots (8)$$

(8)式の η は、減衰係数 c_1, c_2, c_3 を考慮した補正係数に相当する。
 (7)式は、 $m_1=m_2=m$ と仮定して省略したため、 m_1, m_2 の α に対する影響がない式となっているが、(3)、(6)式に関して m_2 のみ大きくすれば $|\alpha|$ は減少するから、シャーフレームの重量を大きくすれば基礎振動減少に効果あることを示す。ただし基礎振動減少に対しては、 k_1, k_2 の効果のほうが直接的であり有効である。

3.2 実測結果との比較

図15は、実際の冷間せん断機について、基礎の加速度を測定し、これをせん断荷重と対比したものである。

実測より

(i) せん断荷重の増加に応じて、基礎加速度は直線的に増加している。このことは、(6)式について、 m_1, m_2, k_1, k_2 が一定の場合は、加速度 α は最大せん断荷重 $P_{\max}$ の値により直線的に増加する点に関しては、傾向が同じである。

ただし、基礎加速度とせん断荷重の関係を示す直線が、原点を通る直線とならないことは、せん断機のしゅう動部、および回転部のすき間などの影響で、せん断荷重の小さいせん断時に加速度が相対的に大きくなっているものと考えられる。

(ii) せん断機の剛性を増加させれば、基礎加速度は減少する。図15中、250t冷間せん断機のフレーム側柱のバネ定数、 k_1 を大きくした400t冷間せん断機では、同一条件下の基礎加速度の減少が認められる。このことは、(8)式において k_1 を増加させることにより、 α が減少する傾向と一致している。

(iii) 基礎振動の最大加速度はオシロより、切断完了よりシャーフレームの固有振動数の約1/3サイクル後に生じていることが認められ、これは(6)式と傾向が一致している。

(iv) (8)式に関しては、限られたデータについての確認にとど

まっており、今後さらに多くのデータについての検討が必要である。特にシャーフレームと基礎間に緩衝体を設け k_2 を低く取ることによる α への影響を確認する必要がある。最大加速度の許容値は基礎強度との関係により決定されるべきものであるが、一般に5G以上となると基礎破損のほか事故を起こす恐れがあると言われ、せん断機設計上基礎振動との関連において k_1, k_2 を決定する必要がある。

4. 結 言

せん断機の基礎振動に関して実測結果より

(1) 基礎振動の大部分は、せん断完了後に発生し、せん断機内部に弾性ひずみとして吸収されたひずみエネルギーの放出によるシャーフレームの自由振動により引き起こされる振動である。

(2) せん断機の場合、その剛性の決定は基礎振動との関連において設計されねばならない。せん断機のバネ定数を増やすことが基礎振動減少に有効である以上、上フレームと下フレームとに分割し、ボルトで連結したフレーム構造を採用する場合はボルトでフレームにプリストレスをかけることによりバネ定数を高めることが有効であると考えられる。シャーフレームと基礎との間に緩衝バネを入れることは基礎設計において考慮せねばならない。

またせん断機のしゅう動部のすき間が衝撃的力に影響することを考慮すれば、せん断機刃物バランス力などは、基礎振動との関連において決定されねばならない。

(3) せん断荷重の増加に対し、基礎加速度の値が直線的に増加する傾向があり、この点を利用すれば、基礎加速度を測定することにより容易にせん断荷重が求められ、せん断荷重計として基礎加速度を測定し概略せん断荷重を求めることもできる。

本稿は限られたデータに基づいて、概略傾向を述べたもので、今後さらに測定を続行し詳細な検討が必要である。

最後に本稿の測定に際しかずかずの便宜を与えられた住友金属工業株式会社製鋼所、同小倉製鉄所、ならびに日本鋼管株式会社福山製鉄所の各位に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) VON MAX VATER: STAHL UND EISEN (MÄRZ-1967)
- (2) 前田 禎三： 機械の研究 (せん断理論)
- (3) 沢瀉作雄： 機械基礎の設計と据付
- (4) A. I. Teselikhov, T. Pokamhble Cmahl
- (5) 工藤英明： 塑性と加工 (棒材のせん断加工に関する実験的研究第2報)

第31巻

目次

第10号

・特集：音楽のたのしみ

・解説/青空を阪神・播磨に
萩 昌弘：音楽のたのしみ
ステレオのたのしみ
菅野 沖彦：ステレオ入門

・グラフ/音楽の創作

・ルポ/才能教育と子どもたち
日本の川：多摩川
・随想/串田 孫一

発行所 日立評論社

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
郵便番号 100

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号 101
振替口座 東京20018番