

回転円板式高速衝撃試験機について

溶接工作部・船体構造部

On the High Speed Rotary Impact Testing Machine

by
Welding and Fabrication Division
and
Ship Structure Division

Abstract

This paper gives a general description of the high speed rotary impact testing machine built at the Ship Research Institute. The high speed tensile characteristics for a round bar specimen and the dynamic fracture toughness for a three point bend specimen are studied by using this machine. The capacity of load is 10 ton and the testing velocity is in the range from 2 to 100 mps.

In this report are described design considerations and general structures of the machine, which include loading equipments, control system, measuring apparatuses, and safety system.

The main features of the machine are the following :

1. The large amount of inertia supplied by the rotor, of which dimensions are the diameter of 2000mm, the thickness of 160mm, and the total weight of 5242kg.
2. Designed specimen size ; 20mm diam. \times 150mm length for tensile specimen and 20 \times 20mm section \times 160mm length for bend specimen.
3. Testing temperature controlled between 100 and -196°C .
4. Testing procedure automatically controlled in sequence, except for the timing test of trigger equipment and an emergency time.
5. Load measured with the load-cell mounted semiconductor strain gages and displacement with electro optical extensometer, which are recorded in digital memory recorder.
6. Rotating parts of the machine located in under-floor pit and covered by thick wall and lid, in order to prevent from scattering of broken specimens and/or equipments.
7. Test carried out by one person, who is protected by the lock system from machine drive when he is in the pit.

目 次

1. 緒 言.....	58
2. 計画の概要.....	58
3. 試験機の概要.....	60
3.1 構成.....	60
3.2 主要機能および総合精度.....	60
4. 負荷装置.....	60

原稿受付 昭和53年3月14日

4.1	設計および製作	60
4.2	負荷装置本体	62
4.3	試験片負荷治具	65
4.4	反力受け装置	65
5.	駆動装置およびその他の装置	68
5.1	駆動装置	68
5.2	制動装置	68
5.3	押上げ装置	69
5.4	冷却装置	69
6.	制御装置	70
7.	計測記録装置	72
7.1	速度計	73
7.2	ロードセル	73
7.3	変位計	73
7.4	温度記録計	74
7.5	記録装置	74
8.	建屋および附属設備	74
8.1	建屋および基礎	74
8.2	換気装置	75
8.3	電源、配管工事および照明	75
9.	性能検査および騒音測定結果	76
10.	結 言	78
	参考文献	78
	附 録	78

1. 緒 言

材料が急速な負荷を短時間に受けると、破壊までの応力-歪関係¹⁾あるいは破壊靱性²⁾は、静的な場合と非常に異ってくる。これは高速機械あるいは動的荷重を受ける構造物の設計には重要な問題である。特に近年、原子力関係の構造用鋼に対して、動的破壊靱性が重視されるようになってきた³⁾。しかし、これまでの研究は試験片の大きさ、および荷重速度にも限度があり、その定量的評価については不十分なのが現状である。

以上の状況に鑑み、種々の形状および寸法の試験片を広範囲の高速荷重下で試験できる装置の製作を計画した。その第一段階として、試験速度が2~100m/sec、荷重容量は10tonの回転円板式高速衝撃試験機が完成したので、その概要について報告する。

2. 計画の概要

本試験機は昭和51年度から5年計画で開始した“原子炉構造用鋼の動的破壊靱性評価に関する研究”を実

施するために製作した。

この研究は“原子炉構造用鋼の選定に関連する破壊靱性評価方法の確立と原子力設備に関する構造等の技術基準の作成に関する基礎資料を得る”ことを目的としている。溶接工作部の溶接力学研究室と船体構造部の材料研究室が担当する。

試験機の製作にあたっては高速衝撃試験研究会を設け、49年度と50年度にわたり試験装置に関する基礎資料の収集調査および試験機仕様書の作成を行った。

これまで高速荷重を得る方法としては、次のものが考えられてきた⁴⁾。比較的遅い速度領域では回転ハンマー（シャルピー衝撃試験機型、最高試験速度*8m/sec）および落錘（15m/sec）が使用されている。中速度領域では回転鎖（40m/sec）あるいは高压ガスや油（60m/sec）が用いられる。高速度領域では回転円板（150m/sec）、大砲型（750m/sec）や爆破等の火薬の利用あるいは Light Gas Gun（10,000m/sec）が使われる。

これらのうちで最も広く使用されているのはシャルピー試験機で、荷重および変位を検出できるように計装化されている。シャルピー試験機は慣性エネルギーが小さい（25kg・m）ので、さらに大きな試験片で試験するために大型化されたもの（1500kg・m）もある⁵⁾。落錘は主として米国で DWTT 試験（Drop Weight Tear Test）あるいは DT（Dynamic Tear）試験として用いられている。シャルピー試験と同じく、本来は脆性-延性の遷移温度を求めるものであるが、各種の計装化が図られている^{6,7)}。この方法についても大型試験片を使用するために、大型落錘試験機がリーハイ大学⁷⁾（1260kg・m）あるいは Naval Research Laboratory（104,000kg・m）⁸⁾に設けられている。

その他の方式を用いる試験機は、1940年代からの応力波の伝播理論についての研究が盛んな頃に製作されたものが多い。高压空気源⁹⁾¹⁰⁾や火薬¹¹⁾¹²⁾を駆動力として用いて試験片を圧縮させる、いわゆるホプキンソンバー試験である。回転円板の慣性力を利用する試験機もこの頃から盛んに使用されたようで、Majoin¹³⁾や Duwez¹⁴⁾の論文で紹介されている。前者は比較的

*注 この種の速度を表すには、試験片の負荷側端の速度（m/sec、回転円板の周速度とほぼ同じと考える）、試験片の歪速度（s⁻¹）および荷重速度（kg/mm²/sec）等が用いられる。ここでは試験片の形状寸法の影響を受けない負荷端における速度を試験速度として表わすことにした。

小容量で約5mm径の試験片を30m/secの速度で引張っている。後者は900kgの重量の回転体を使用し、60m/secの速度をだせる。1959年には東京工業大学に重量約2.3ton、実試験速度80m/secの試験機¹⁵⁾が製作された。これは当所の試験機製作のモデルとなった。

Light Gas Gunは航空宇宙学の分野で使用されているもので、飛行体の構造材料へのいん石の貫通(衝撃速度80km/sec)を対象とした研究に用いられている。“火薬の爆圧でピストンを介してヘリウムや水素のような軽いガスを急激に圧縮、高温高圧とし、それにより粒子を発射するものである¹²⁾”現在種々の改良が加えられ10km/secの超高速で荷重を与えられるようである。

最近、構造物が大型化し、厚板が使用される傾向に

あるので、ある程度の大きさの試験片による負荷再現試験は破壊靱性を求めるのに不可欠となってきた。一方前述の如く材料の強度特性は荷重速度の増大による影響を広範囲に受ける。そこで、ある程度まで原厚のまま試験できる荷重容量をもち、通常の鋼が荷重速度の影響を受けない速度まで試験できる装置を試験機製作の基本条件とし、荷重容量100ton、試験速度100m/secを設計条件とした。

前述の種々の方式のうち単一で、この条件を満足できるのは火薬の使用以外にないが、当研究所の立地条件では不可能である。

そこで性能別に3種類の試験機を製作することとし、54年度までに完成することにした。

- 1) 回転円板式高速衝撃試験機：荷重容量10ton、試験速度2m/sec~100m/sec

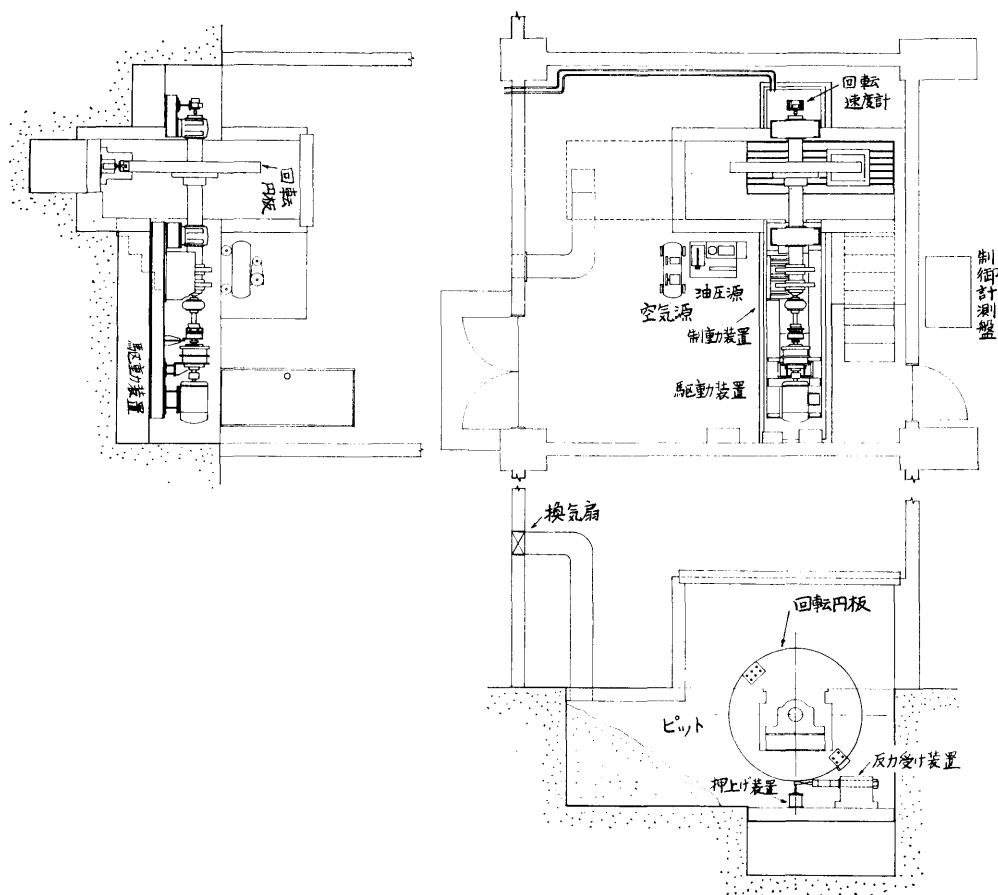


図-1 試験機配置図

2) 油圧駆動, 空気制動式高速試験機: 荷重量20 ton, 最高試験速度 10m/sec

3) 油圧駆動, 慣性重量式高速試験機: 荷重量100ton, 最高試験速度 2 m/sec

高速域での試験機として回転円板式を採用したが, この主な理由は電動機の回転により効率良く大きな慣性が得られ速度の制御が容易なことである。また東京工業大学での経験にもとづいて, 種々の安全対策を具体的に検討することができたためである。なお本試験機は萱場工業株式会社が生産を担当し, 溶接工作部の実験棟に設置された。

3. 試験機の概要

3.1 構成

まず, 試験機の本体, 駆動装置その他を含めた概略を説明する。図-1 に全体の配置を示す。

本試験機は重量のある回転体に所要の回転を与え, その慣性力によって高速の変形速度で試験片に破壊エネルギーを加えることを基本としている。

同試験機は負荷装置本体, 反力受け装置, 駆動装置および制動装置を主な構成とする。それに, 電気制御装置, 各種の計測装置, 試験片冷却装置ならびに, その他付属装置が設けられている。本試験機によって, 高速衝撃引張あるいは高速衝撃曲げ試験を行うことが可能である。すなわち本試験機を用いて, 構造用鋼材等の高速変形状態での強度特性, ならびに切欠試験片による動的破壊靱性を求めることができる。

負荷装置本体は鋼板製の円板が主体をなし, これに軸が通されており, 全体が2箇所の軸受で支持される。この負荷装置本体は駆動装置により回転運動が与えられ, 高速変形状態で試験片を破壊するための回転速度と慣性エネルギーが本体に保持される。本体の停止は制動装置により行われる。

反力受け装置は試験片が破断される際にかかる動的荷重を受ける構造をなしている。試験片の掴み治具やロードセルを含め全体が定盤に固定され, コンクリート基礎に連結される。

電気制御装置は回転開始から停止までを試験機の各動作シーケンスにしたがって自動的に制御するものである。

本試験機では試験片の受ける荷重, 変形または, 伸びは各種の計測器を用いて動的に計測され, 記録される。また, 試験片は冷却装置により, 所定の一定温度に保持され, 試験片の温度が記録される。

試験機の動作段階, および作動状態は操作盤の表示面にランプで示され, 軸受の過熱等の異常時には自動停止装置が働くようになっている。試験機の運転, 試験は1人でも行えるよう設計されているが, 試験機が設置されているピット内で準備作業中に, 誤って試験機が運転されないようインターロック機構が設けられ, 安全上特に配慮がなされている。

3.2 主要機能および総合精度

本試験機の主要機能を示すと以下の通りである。

- (1) 試験速度設定範囲 2 m/sec~100m/sec
 - (2) 最大試験片寸法
 - (a) 引張試験片 20mmφ×150mm(L)
 - (b) 曲げ試験片 20mm(W)×20mm(t)×160mm(L)
 - (3) 最大荷重量 10ton
 - (4) 最大変位 10mm
 - (5) 試験温度範囲 100℃~-196℃
 - (6) 負荷速度装置本体の慣性力
 - (a) 構成 回転円板, 軸, ディスク板
 - (b) 重量 5242kg
 - (c) 慣性エネルギー 速度2 m/sec で 373kg・m
速度100m/sec で 932ton・m
 - (7) 起動能力 停止から 100m/sec まで20分以内
 - (8) 制動能力 100m/sec から停止まで20分以内
 - (9) 速度低下率
 - (a) 速度5 m/sec, 負荷10ton, 吸収エネルギー 250kg・m において 10%以内
 - (b) 速度100m/sec, 負荷10ton, 吸収エネルギー 250kg・m において 2%以内
- 本試験機の総合精度は次のとおりである。
- (1) 周速度 制御盤の指示値の1%以内
 - (2) 荷重 (ロードセルの検定値)
 - (a) 静的 (温度一定) 1%以内
 - (b) 動的繰返し 3%以内
 - (3) 温度 指示値 2%以内

4. 負荷装置

4.1 設計および製作

本試験機は長年月にわたり使用され, 重量の重い回転体が最高毎分約1,000回の回転速度で運転されること, また試験は瞬時に終了するが, 前後30分程度回転が継続することからバランスの取れた安定性のよい構造とすることが設計上考慮された。このため負荷装置

本体は2箇所支持することとし、本体の回転軸と駆動装置の回転軸とは一直線上にあるようにした。また、本体を支持する片側の軸受けを含め、駆動側各機器の支持台は共通の基礎定盤上に据付けられた。

本試験機は種々の速度で衝撃試験を行うため、負荷装置本体で試験片に荷重を与える部分の部材は衝撃荷重の繰返しを受けることになる。直接衝撃荷重を与える所は面圧による圧縮荷重を受けることになるが、部材の局部的な所では曲げ、剪断、引張等の衝撃荷重がかかる。また、構造的な不連続部では特に応力集中について考慮しなければならない。

このような観点から各部材の材質、硬度、強度ならびに許容応力について種々検討して選定を行うと同時に、構造的な不連続部は可能なかぎり応力集中係数を低く押えるよう設計上考慮した。

負荷装置本体の一部および反力受け装置の一部の治具等の機械部品は消耗品的に扱わざるを得ないが、これらについては極力小型にすると共に取扱上交換等が容易に行えるように注意を払った。

さらに試験片および各種治具の取扱いや調整が容易に行えること、各装置機器の点検保守がし易いことなどを考慮して、試験機全体の配置を決定した。

高速衝撃試験では治具の一部を含め破壊した試験片が大きな運動エネルギーを有して飛翔する。このため

試験機は半地下式のピット内に設置し、実験室とは別に試験機全体を鉄筋コンクリート壁で覆うようにした。飛翔した試験片はピット内に築いた緩衝材としての砂の防護堤により受け止めるようにした。

(1) 慣性体の重量および慣性モーメント

負荷装置本体を分けると図-2に示すように円板およびフランジ、回転軸ならびに制動用ディスク板となる。各重量は

円板およびフランジ (W_1)	4186kg
回転軸 (W_2)	722kg
ディスク板 (W_3)	334kg

であり、総重量 W は 5242kg である。

慣性モーメントをそれぞれ I_1 、 I_2 および I_3 とすると

$$I_1 = 205.73 \text{ kg/m}^2 \text{sec}^2$$

$$I_2 = 0.30 \text{ "}$$

$$I_3 = 1.41 \text{ "}$$

であり、慣性体の総慣性モーメント I は 207.44kg/m²sec² である。慣性体の回転半径 k は

$$k = \sqrt{\frac{I}{W}} = 0.623 \text{ m}$$

となる。ただしこれらでキー溝や、ボルト頭等の小さな突起物等は無視しているが、以下の計算には有効数値以下の微量である。

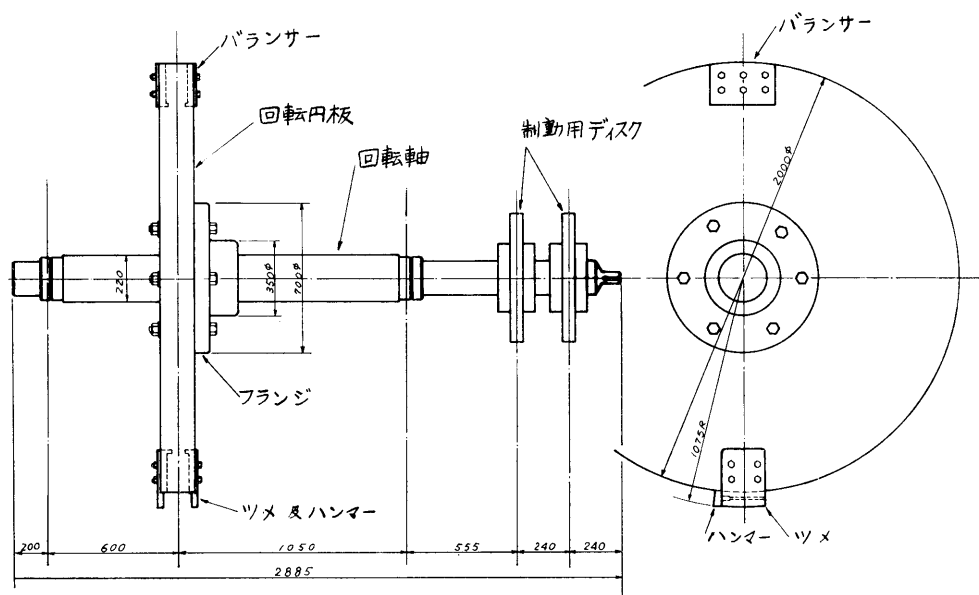


図-2 負荷装置本体

(2) 慣性体の運動エネルギー

回転慣性体の運動エネルギー T は回転軸まわりの回転運動のみを考えれば

$$T = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{Wk^2}{2g} \omega^2$$

で与えられる。ただし ω は回転角速度 (rad/sec) である。回転角速度と試験機の衝撃速度 (周速度) v との関係から、 R を回転軸中心から打衝中心までの距離とすると ($R=1.055\text{m}$)

$$T = \frac{Wk^2}{2g} \left(\frac{v}{R} \right)^2 = 93.19 \cdot v^2$$

慣性体の運動エネルギーは

速度 2 m/sec のとき 373kg・m

速度 100m/sec のとき 932ton・m

となる。

衝撃引張試験を行うとき、試験片の破壊エネルギー以外に、試験片の重量分およびその他の治具の運動エネルギーが消費される。

衝撃引張試験前後の回転速度の変化と慣性体の運動量の変化量の関係は

$$\begin{aligned} (K_E + K_B + K_T) &= \frac{I}{2} (\omega_1^2 - \omega_2^2) \\ &= \frac{I}{2R} (v_1^2 - v_2^2) \end{aligned}$$

ここで

K_E = 標準試験片 (鋼材) の運動エネルギー

K_B = 治具の運動エネルギー

K_T = 試験片の破壊エネルギー

ω_1, ω_2 = 試験前後の回転角速度

v_1, v_2 = " の周速度

となる。試験片の破壊エネルギーを 250kg・m 一定として、各試験速度における試験後の速度変化を見ると図-3となる。また速度変化から標準試験片 (鋼) の重量分の運動エネルギーを除いた吸収エネルギーを求めると図-4の関係が得られる。

同図でパラメータ v_0 は試験速度であり、 Δv は速度変化量である。速度変化から試験片の破壊エネルギーを得るには試験機的能力から当然制約を受けるが、速度変化量が10%以下、破壊エネルギーで最大600kg・m程度の一点鎖線以内と考えられる。

(3) 慣性体の固有振動数

回転軸の1次の危険速度は系の横振動の固有円振動数に等しい。レーリーの方法によれば近似的に固有振

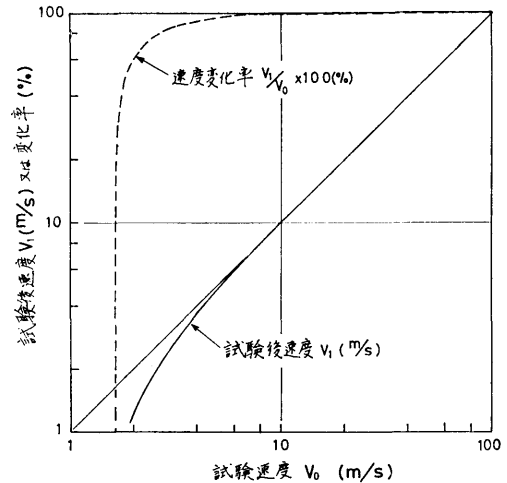


図-3 破壊エネルギーを一定とした時の速度変化

動数 p は軸上の n 個の荷重に対して

$$p^2 = g \sum_{i=1}^n W_i \delta_i / \sum_{i=1}^n W_i \delta_i^2$$

ここで

$W_i (i=1, \dots, n)$ = 荷重

$\delta_i (i=1, \dots, n)$ = 荷重点におけるたわみであ
たえられる。

回転円板、回転軸およびディスク板の全体について算出して求めると

$$p = 237. \text{ rad/sec}$$

となる

一方試験機の最大回転角速度 ω_{max} は 94.8 rad/sec であり、上記の p より十分低い値となっている。

この他に軸受部において潤滑不足が起り、固体摩擦によって旋回運動する危険性を考慮する必要があり、軸受部の異状過熱を検知することにしてはいる。

4.2 負荷装置本体

試験片に高速荷重を加える装置は図-2に示すように、円板を主とする軸および制動ディスクを含めた回転慣性体である。本体は電動機によりトルクコンバータを介して、漸進的に加速回転され、所定の回転速度に達すると駆動伝達機構から切り離される。ついで回転円板のハンマーで荷重を試験片に与えたあと制動装置が働き停止する。

回転円板は負荷装置本体の主要部をなすもので所要の運動エネルギーの大部分を保持する。その直径は、2000mm、厚さ160mmで重量は3941kgである。SS

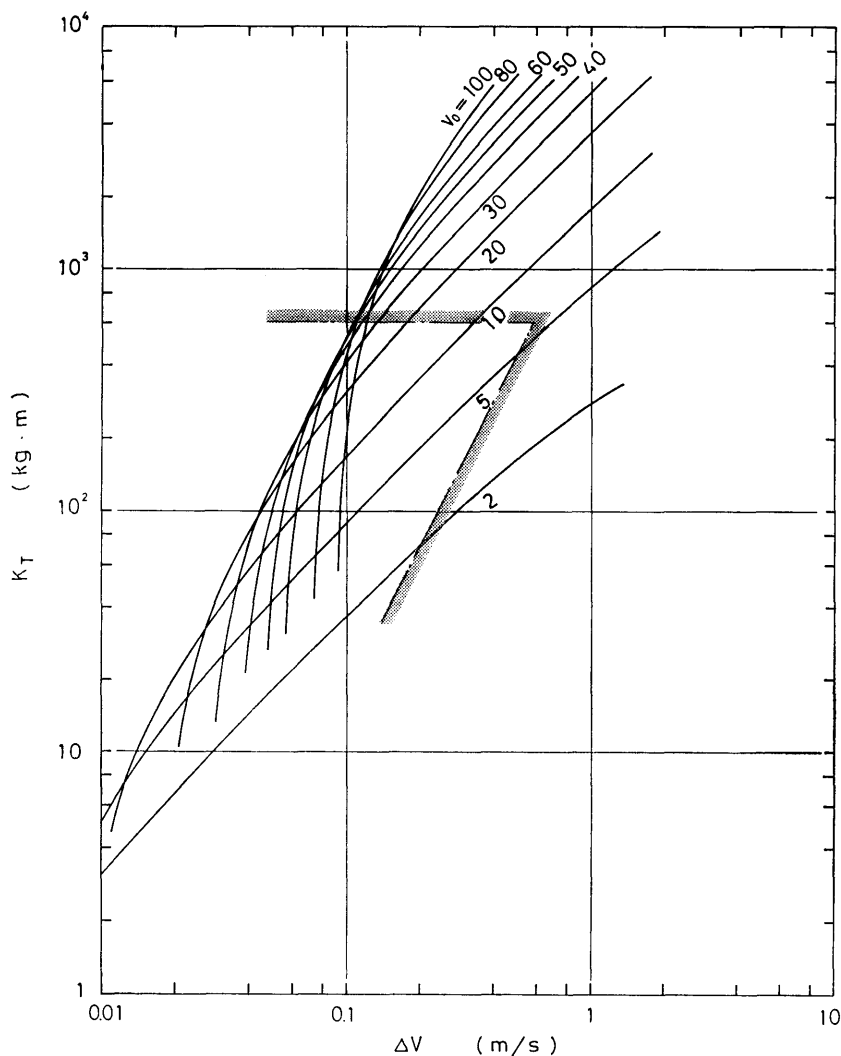


図-4 標準試験片による速度変化量と破壊エネルギーの関係

41の圧延材から切削加工で製作した。

周速度 100m/sec で試験片に 10ton の負荷がかかり、吸収エネルギー250kg・mの場合、円板の速度低下率を2%以内におさめるよう寸法、重量が選ばれた。

円板には図-2に示すように1対の爪およびハンマーが、その反対側には1対のバランサーがボルトでとりつけられ釣合が保たれている。ハンマーの打撃中心は回転半径1055mmで、その間隔は120mmである。打撃位置は軸を通る垂直線上の円板直下で、打撃方向は水平となるようハンマーの打撃面が作られている。

試験片を冷却するための円筒冷却槽の直径が90mmφである。小型3点曲げ試験に用いられるスパン間隔は120mmが比較的多い。これらの理由でハンマーの間隔を120mmにした(写真-1)。

本体には直径2000mm長さ2900mmの軸が貫通し、重い円板を両端支持する形で2箇所のプランマブロック軸受で支える(写真-2)。

最高回転数は周速度 100m/sec 時で 905.2 r.p.m.である。円板はバランサーにより静的釣合が保たれているが、これと軸を含めて明石の釣合試験機FH-724

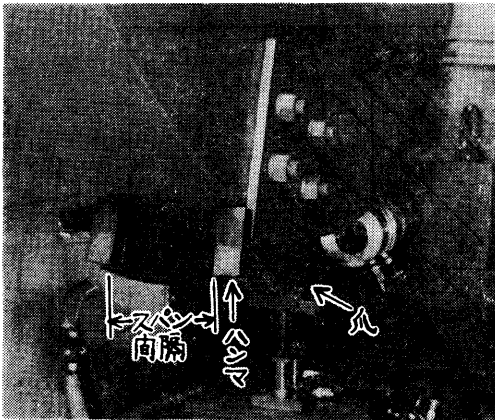


写真-1

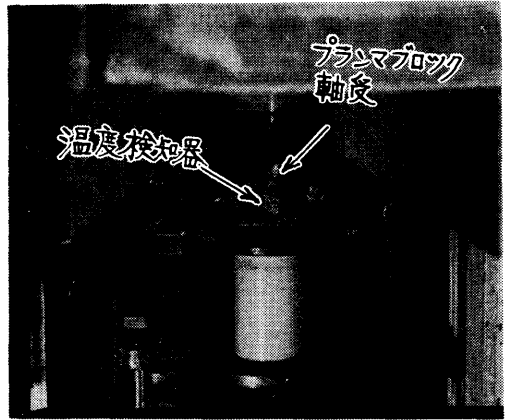


写真-2

Sで、動的釣合がとられた。動バランスは円板に加工をほどこして、不釣合重量が円周上で160g以内におさめられ、片手でも簡単に回転させることができる。

4.3 試験片負荷治具

前項に記した負荷装置本体に蓄えられた慣性エネルギーは試験片負荷治具を介して、試験片に加えらる。負荷治具には引張試験用と曲げ試験用の2つがあ

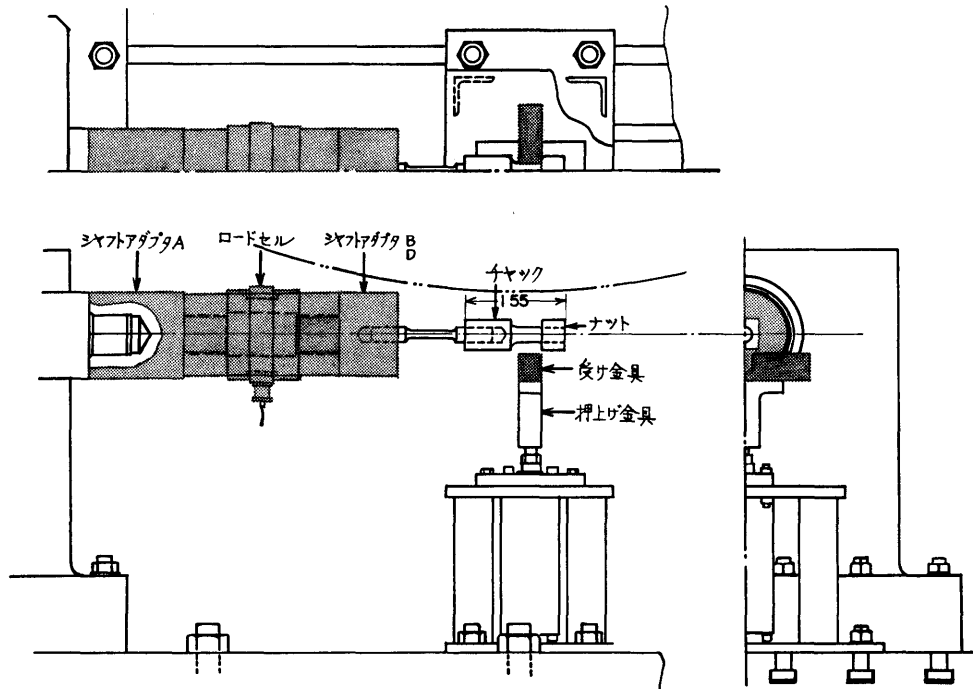


図-5 引張試験用負荷治具

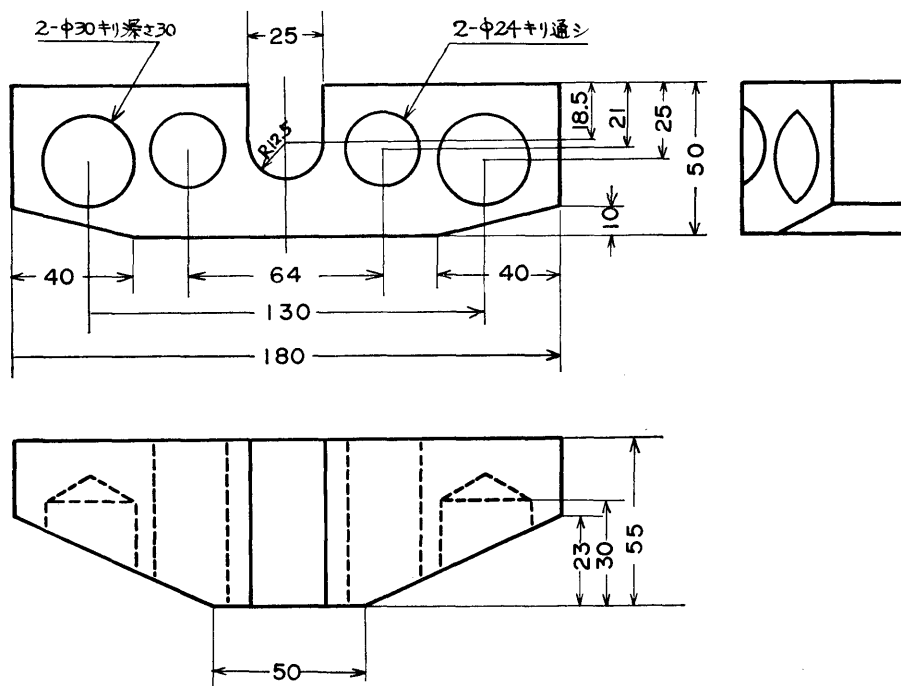


図-6 引張試験用受け金具

る。

引張試験の場合は図-5に示すように、シャフトアダプタ（常温用B、冷却用D）に試験片を固着し、試験片の負荷側に引張試験用負荷治具を取り付ける。これはチャック、ナットおよび受け金具より成っている。試験時には受け金具が押し上げ装置により押し上げられ、回転円板のハンマーとチャックに取付けられたナットの間に挟まり試験片に引張荷重が作用する。ナット、チャックおよび受け金具には負荷時に衝撃力が働くので、ナットおよびチャックの材料にはSCM-4を用い、焼入れの熱処理を行い、衝撃による変形および摩擦を少なくしている。受け金具は負荷装置本体の慣性エネルギーを低下させないためにも、また押し上げ装置の打上げ容量の面からも、小型軽量であることが望ましい。しかし、完成試験時に衝撃力によって、変形あるいは破損が生じたため、いくつかの形状寸法でテストを行い、図-6に示すものが採用された。使用材料はS45Cで、熱処理は行っておらず、40m/secの速度で5回程度の引張試験に耐えることが確認されている。

曲げ試験の場合は図-7に示すようにシャフトアダプ

タ（C）に曲げ試験用負荷治具が取り付けられ、試験片は治具の窓に置かれる。試験時には試験片が押し上げられて回転円板のハンマーと負荷治具の刃により、3点曲げによる荷重が負荷される。刃の材料にはSCM-4を用い、焼入れ熱処理を行って衝撃による刃の摩耗を少なくしている。

4.4 反力受け装置

試験片の固定側は円板のハンマーを介して加えられた衝撃荷重を支える反力受けである。加えられる慣性力が大きいので、反力受け装置も試験片の破断時に生じる最大荷重に比較して、充分に対抗し得る慣性を持たせる必要がある。本装置に含まれるものは、図-8に示すように、シャフトアダプタ、ロードセル、アジャスタスクリュー、反力盤、定盤および基礎である。

引張試験用2種類（B・D）、曲げ試験用1種（C）のシャフトアダプタにロードセルが、その他端にシャフトアダプタ（A）を介してアジャスタスクリューがそれぞれネジで固着され、反力棒を形成する。反力棒は反力盤にナットで、反力盤は定盤にボルトで固定されている。ロードセル等を含めた反力棒の全長は約1mで、大部分の外径は110mmであり、最小断面の直径

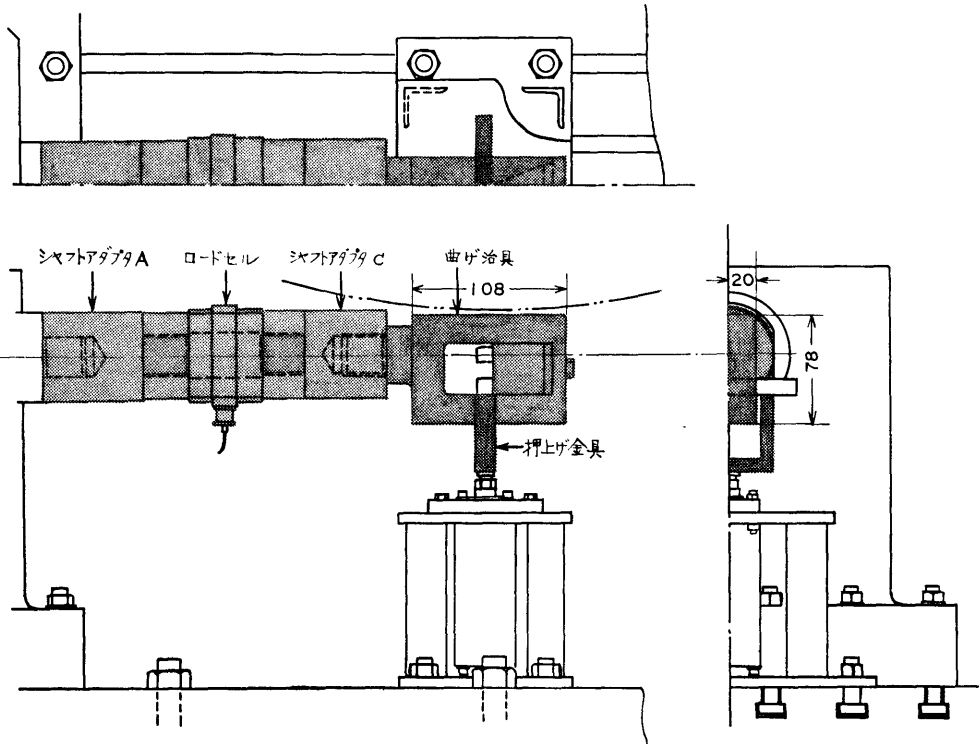


図-7 曲げ試験用負荷治具

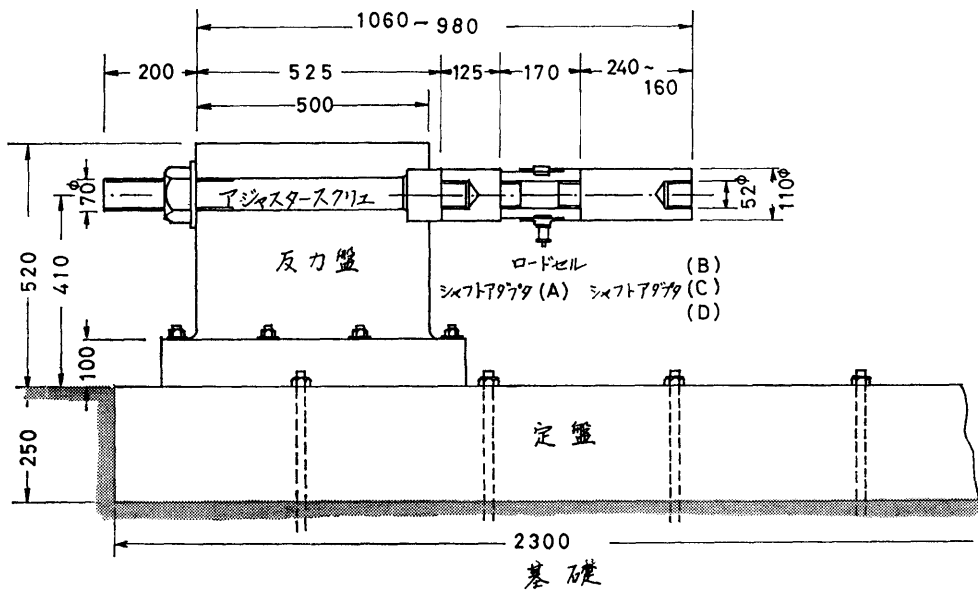


図-8 反力受け装置

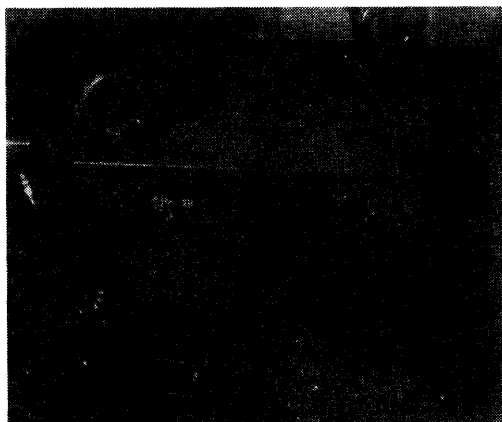


写真-3

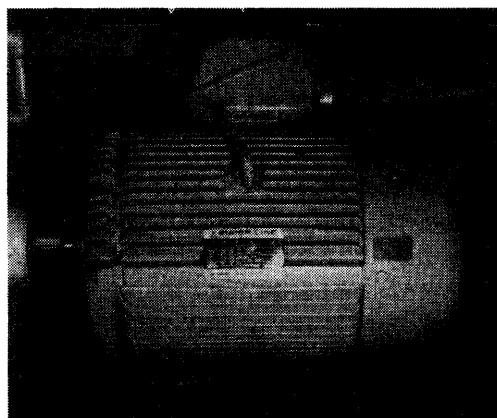


写真-4

は70mmである。これは標準引張試験片の平行部の直径10mmに対し、約50倍以上の断面積を持つ。

反力盤の大きさは400mm×450mm×500mmで、重量は945kgであり、これを後述する定盤に12本のボルトで強固に締付ける(写真-3)。

定盤の大きさは2300mm×800mm×250mmで重量は約1.5tonである。定盤にはT溝が設けられており、反力盤の固定ならびに、移動が容易に行えるようになっている。またこのT溝を利用して、押上げ装置も定盤に固定されている。

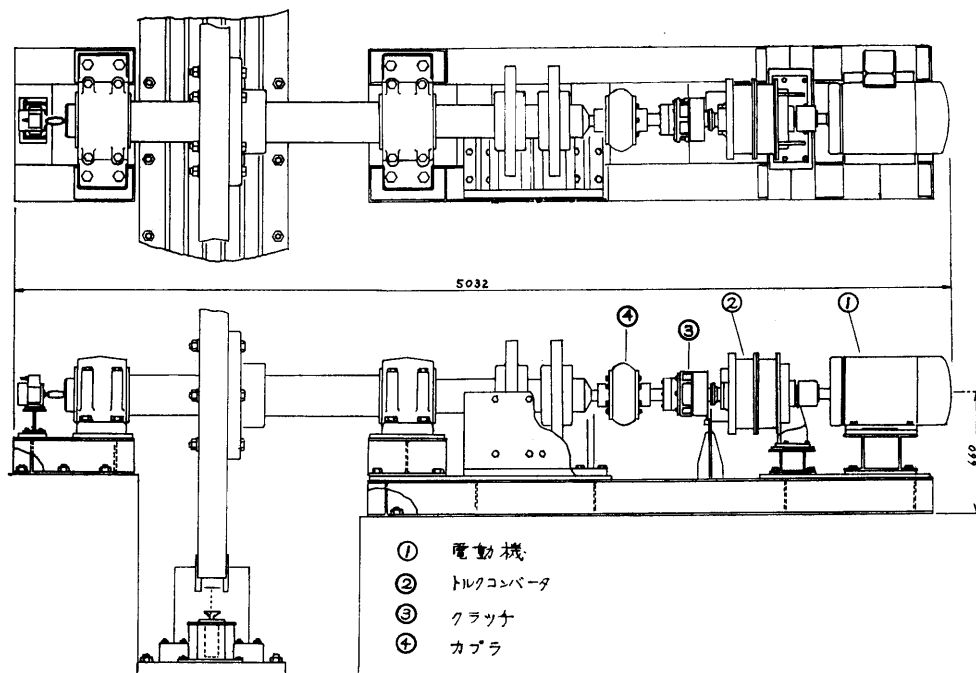


図-9 駆動装置

定盤はさらにコンクリート基礎にアンカーボルトにより、据付けられている。

5. 駆動装置およびその他の装置

5.1 駆動装置

負荷装置本体は電動機によりトルクコンバータを通じて加速回転される。回転体が所定の試験速度に達するとクラッチにより電動機から切り離される。駆動装置の各機器の配置を図-9に示す。

電動機（写真-5）は3相、200Vで定格出力30kW、回転数1460r.p.m.の誘導電動機（4P全閉外扇形）で、スター・デルタ方式で起動する。これは少ない電流で、電動機に無理な負荷をかけることなく重い回転体を駆動させるためである。

トルクコンバータ（新潟コンバータKK, 8FN-1250-10, 写真-5）はオイルポンプ付の流体継手で、圧縮油により電動機の回転トルクを漸進的かつ円滑に伝達する。最大トルク50kg・m、平均トルク34kg・mの性能を有する。外付きの油タンクにはオイルクーラおよび接点付温度計が組込まれている。

クラッチ（小倉クラッチ, MDC-80, 写真-5）は乾式多板の電磁クラッチで、静摩擦トルク、112kg・m、動摩擦トルク80kg・mの性能をもつ。

駆動装置の軸と負荷装置本体の回転軸はゴム製のカブラ（ブリヂストンCA-340M）で連結されている。全長5mに及ぶ長い軸系の微小な偏心を逃がすと同時に、両者の振動衝撃を互いに消す役割を果たしている。

5.2 制動装置

試験片を破断した後、回転体の回転を強制的に停止

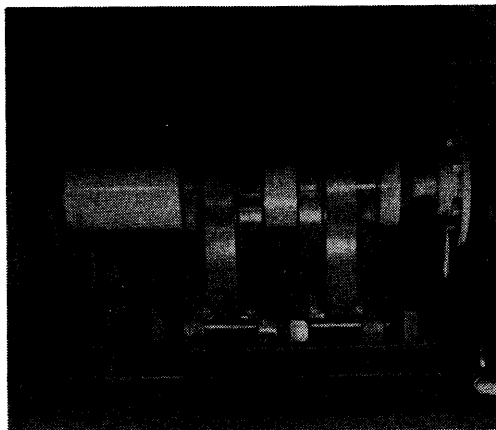


写真-6 (A)

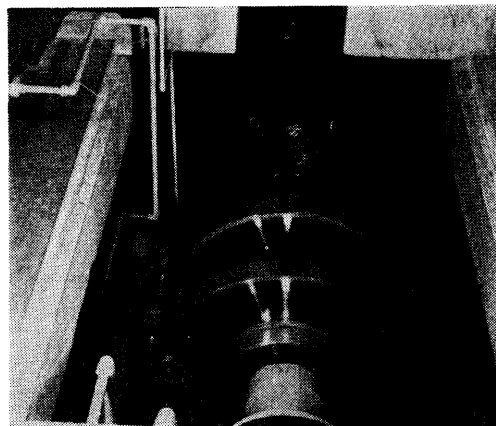


写真-6 (B)

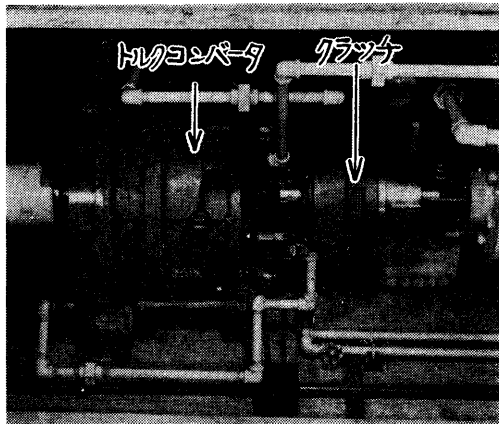


写真-5

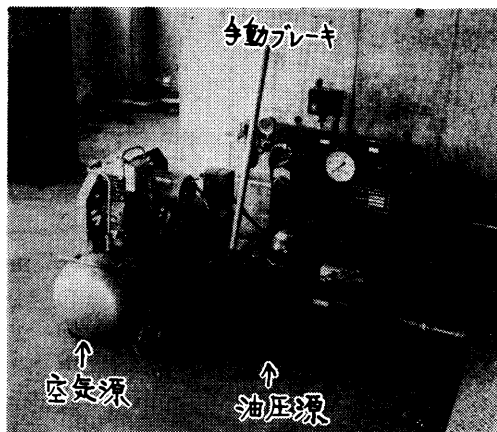


写真-7

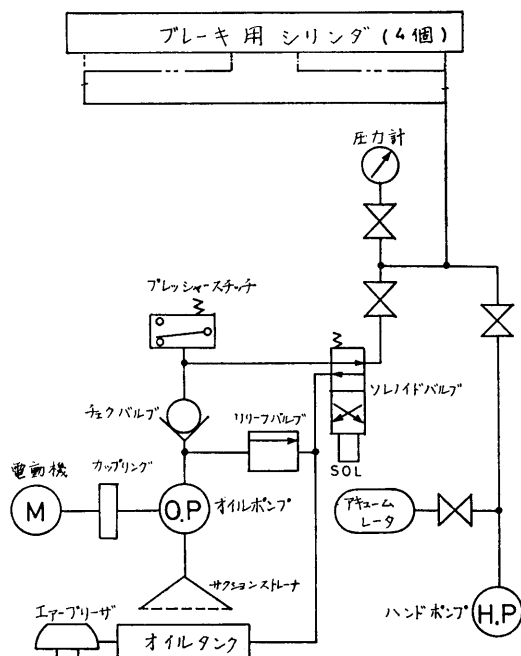


図-10 制動装置の油圧系統図

させるために制動装置を必要とする。制動の方式はいわゆるディスクブレーキで、小型でしかも制動能力を増すために直径 600mm のディスクが 2 枚負荷装置本体の回転軸に取りつけられている (図-2, 写真-6)。これは制動面を分散することにより発熱を小さくし、放熱効果を良くして温度の上昇をおさえたことによる。またこれにより耐久性も倍近くになった。

作動は油圧を用い、その最大制動トルクは $30\text{kg}\cdot\text{m}$ である。萱場工業は新幹線車輛のブレーキを製作しており、多くの経験を有す。油圧源 (写真-7) にも車輛用のものを用いた。油圧回路を図-10 に示す。電動ポンプと手動ポンプの 2 系統を有し、停電に対処している。またリリーフ弁の操作で制動力を調整できる。急速な停止はディスクおよびパッドの消耗が激しくなるが、本試験機での最高速度からの停止時間は 20 分以内とした。

5.3 押上げ装置

押上げ装置は試験時に引張試験用受け金具あるいは曲げ試験片を押上げるために用いる。装置は写真-8 に示すシリンダブロックと空気源としてのエアコンプレッサ (写真-7) からなる。シリンダのピストンは試験前には圧縮空気により押下げられている。試験時に圧

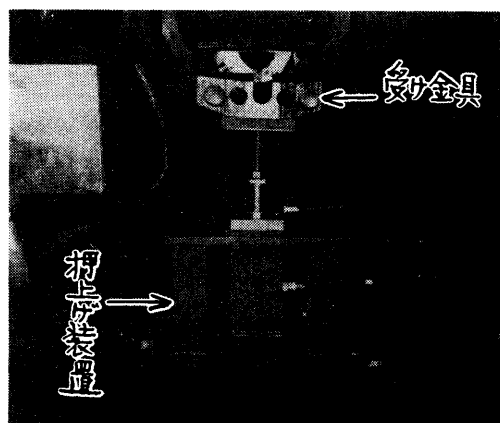


写真-8

力が開放されるとバネの力で押上る。その有効ストロークは 40mm で押上げに必要な時間は 98msec である。押上げは本試験機の使用速度範囲で、試験速度に完全に同期する。このタイミング設定は回転速度計で行う。

5.4 冷却装置

試験片の冷却は試験片に取り付けた冷却槽に液体窒素を噴出あるいは流入して行う。引張試験の場合は図

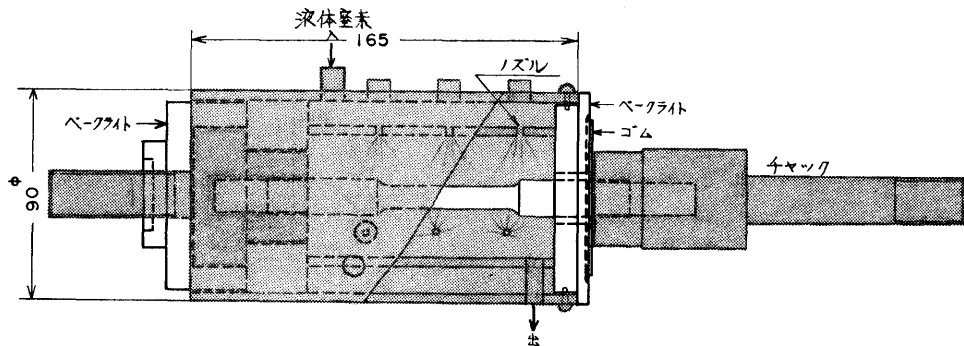


図-11 引張試験用冷却槽

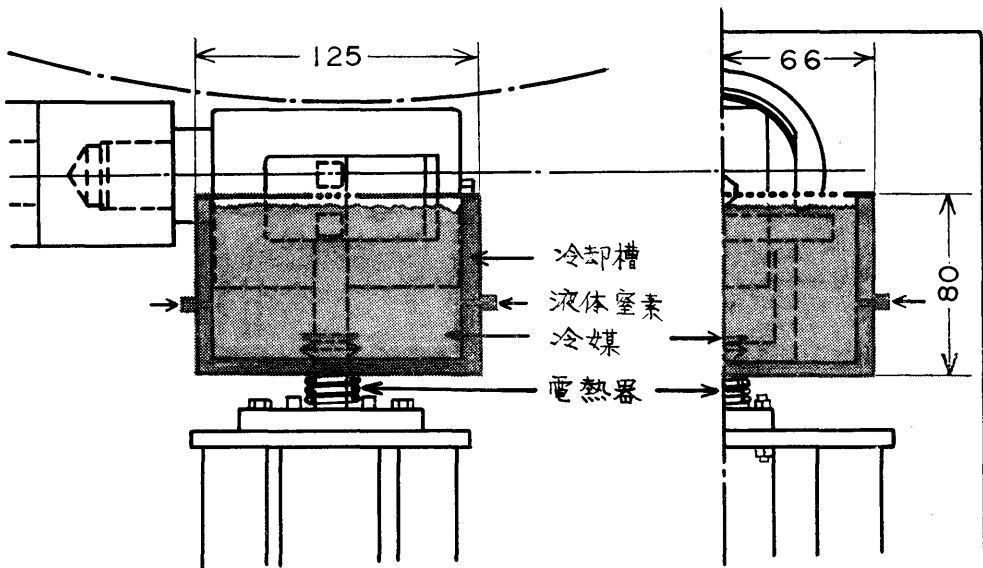


図-12 曲げ試験用冷却槽

-11 に示す円筒の冷却槽がとりつけられる。冷却槽にはらせん状の噴射ノズルが取り付けられる。試験片は冷却槽の中心にあり、液体窒素を間欠的に吹きつけて所定の試験温度にする。曲げ試験の場合は曲げ治具に冷却槽がおかれ（図-12）、適当な冷媒を液体窒素で冷却し、その中に試験片をジャブ漬することにより所定の試験温度を得る。温度変換素子にはクロメル・アルメル熱電対を用い、温度指示調節計（2位置式制御）の on-off により電磁弁を動作させる。試験温度は設定温度の $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内に制御される。

6. 制御装置

本試験機の始動—試験—停止は全て自動的に行われ

(288)

る。電氣的に制御されるのは大別して荷装置本体の加速回転と停止、押上げ装置の作動、試験速度の記録である。試験機の制御系統図を図-13 に示す。これらの制御は荷装置に取付けられた回転速度計をピックアップとして、試験速度および上限速度を設定することにより行われる。

これら一連の制御は全て図-14 に示すシーケンス回路に組込まれている。まず制御計測盤の電源を入れると後述する安全スイッチを確認の上、制動機用油圧源および押上げ装置用エアコンプレッサーを始動する。ここで速度設定器をはじめとする各計測器のスイッチを入れ、試験速度を設定する。円板の停止表示を確認の上電動機を起動させる。上限設定速度まで回転が上

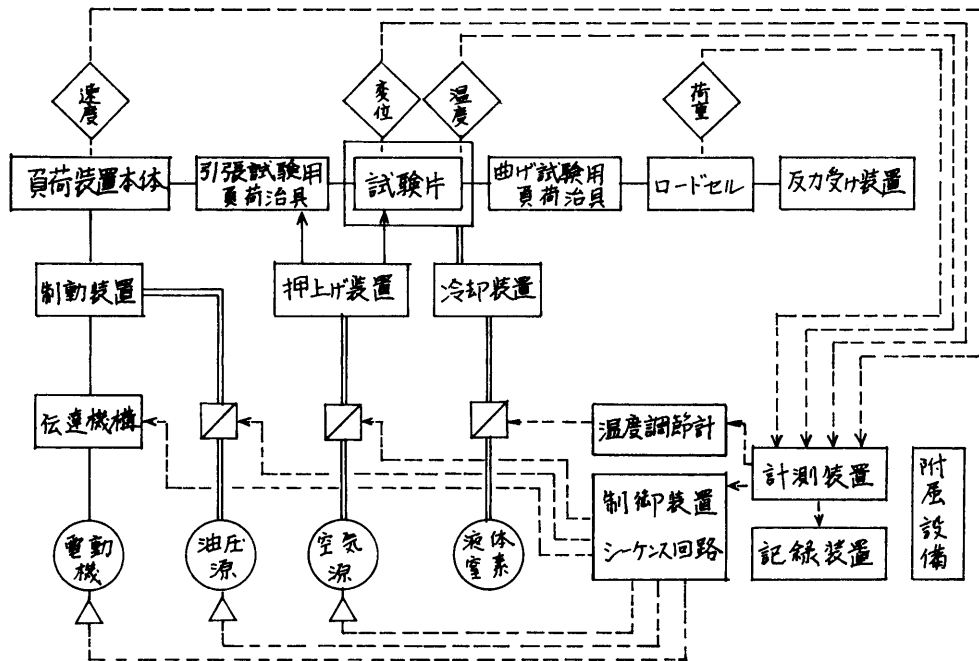


図-13 試験機の制御系統図

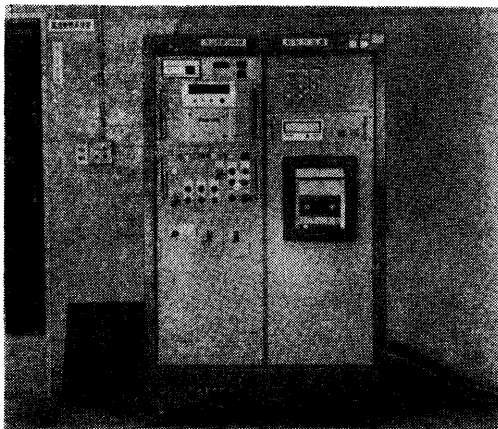


写真-9

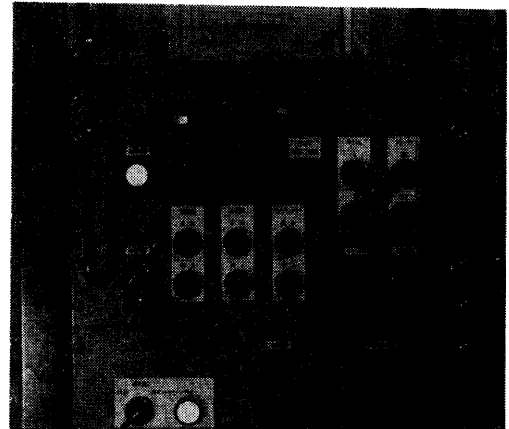


写真-10

がるとクラッチが離れ、電動機の電源が切られる。次いで回転体の速度が下限速度まで低下するとその速度を印字する。試験速度（ゼロマーク通過）になると押上げ装置が作動し試験片に負荷される。ついで3秒後の速度を印字する。そして制動機が働き回転円板は停止する。

これら制御装置は後述の各種計測装置とともに写真

-9の制御計測盤に組み込まれている。また試験機各装置の作動状態は各種安全警報表示とともに、図-14の各シーケンス段階で写真-10のようにランプ表示される。したがって表示ランプを確認しながら必要なスイッチを入れ、また計測の準備ができる。

安全対策として上記シーケンス回路に組み込まれているのは、ピット内作業スイッチと制御盤のキスイッ

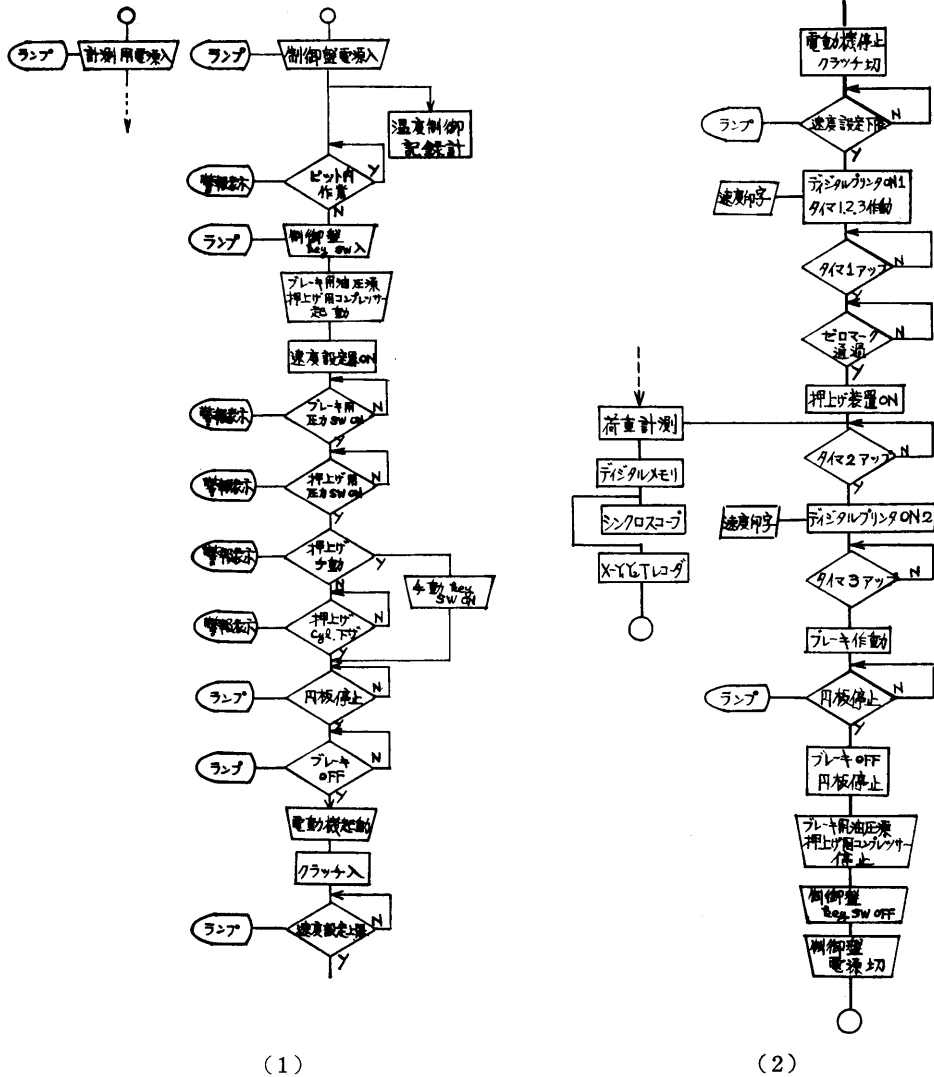


図-14 シーケンス回路

チである。前者は試験片取付けあるいは押し上げ装置のタイミング調整等で地下ピットに入る時、ピット入口のスイッチを on にすれば図-14 に示すように試験機は始動しない。後者は制御盤にあるキーを抜き取っておけばやはりシーケンスは進行せず、前者と合わせ2重のインタロック機構を取って安全を計っている。

以上の様に試験機は自動制御で動くが、一部手動操作も可能である。前記の如く試験機の機器の異常に対しては、軸受けの温度上昇、トルク・コンバータ作動油の温度上昇を感知して非常停止装置が働く。その他

の場合でも、回転円板を停止させるために手動による緊急停止を行うことができる。もうひとつは押し上げ装置の手動操作で、試験機およびハンマとの当りやタイミング調整に使用できる。

7. 計測・記録装置

本試験機に含まれる計測装置は速度、荷重、変位および温度で、変位計測装置以外は必要な記録計とともに写真-9の制御計測盤に組込まれている。各計測装置のピックアップは地下ピット内にあるため、試験機と

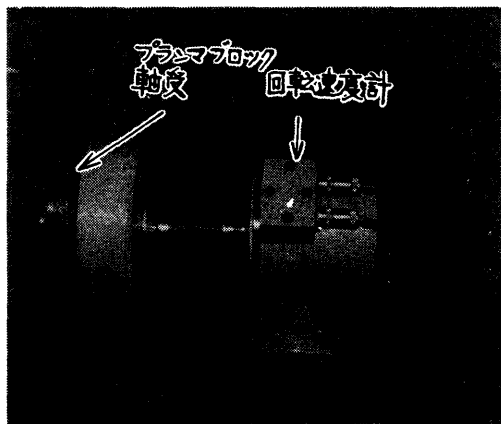


写真-11

壁をへだてた別の室に置かれた計測盤まではフレキシブルコンジット配線で結ばれている。また計測盤には専用の安定化電源が組込まれている。各計測装置について以下に述べる。なお詳細な仕様は附録に記した。

7.1 速度計

速度計測装置は制御用と計測用の2系統を備え、制御装置への信号の送出と同時に計測値を印字記録する。速度計測は円板の回転軸に取付けられた写真-11の回転速度計（ロータリエンコーダ、小野測器、RP-111-CQ）で行う。これは1回転当り1200のパルスが発生する。発生したパルスはレシオマルチプライア（小野測器、TA-102 写真-12左）に送られ、回転数が周速度に変換される。回転円板のハンマー中心の速度（試験速度）はデジタル回転計（小野測器、TM-133、写真-12中央）に100cm/sを10000で表示され、そのデータはデジタルプリンタへ送られる。デジタルプリンタ（小野測器、RQ-335、写真-12下）は試験前後の速度を前後3秒間隔で印字する。

制御用の速度設定は写真-12右上に示すデジタルスピードリレー（小野測器、GR-101）にて行う。2チャンネルの設定ダイヤルがあり、ch-2に試験速度を、ch-1にそれより大きい適当な速度（上限速度）を設定する。それぞれの信号は別置きのリレー群を駆動させ、前項に記した各種の制御を行う。

7.2 ロードセル

試験片に負荷された荷重の検出は反力受け装置に固着されたロードセル（図-5、7、8参照）にて行う。これは外径110mm、内径約55mm、長さ170mmの中空円筒で、外周に貼られた半導体歪ゲージにより1組の

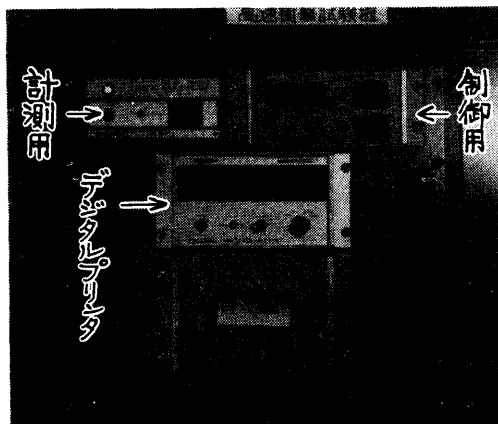


写真-12

ブリッジ回路が組まれたものである。中空部に冷却水を貫流させ、ロードセルの温度を一定に保っている。定格出力は負荷10tonに対し歪量で約 200×10^{-6} strainである。

この種高速試験での荷重計測は重要であるが、技術的に困難な問題が多い。まず試験片に負荷された荷重を忠実に測定できる時間特性が重要となる。本試験機ではロードセルに直流電源を組み込み出力を直続する方法と市販の最も良い周波数特性をもつ歪増幅器を使用する方法を併用することとした。標準装備された半導体歪ゲージ用増幅器は日章電機製のAM-5Sで、増幅度400倍、応答特性約45kHzのものである。

7.3 変位計

引張試験片の伸びあるいは曲げ試験片の荷重点変位を計測するのに非接触型光学式微小変位計（Zimmer,



写真-13

200X)を使用する。これは70mmのゲージレンジをもち、2点間の歪あるいは個々の変位を400kHzまでの応答性で計測できる。現在視野範囲10mmのレンズを所有しており、その分解能は同周波数特性で $45\mu\text{m}$ である。視野(測定範囲)に関しては0.5~100mmまでのレンズが使用可能である。

7.4 温度記録計

前記のように試験温度は試験片に取付けられた冷却槽への液体窒素の吹きつけを on-off することにより制御される。温度の検出はクロメル・アルメル熱電対を用いる。温度制御は温度指示調節計(千野, DS-121, 写真-13上)で行う。 $+50^{\circ}\text{C}$ ~ -200°C まで、2位置式の電位差方式で調節される。

試験温度の計測記録は6打点式の自動平衡記録計(千野, EK-100, 写真-13下)で、測定範囲は高温試験も予定して -200°C ~ 1000°C である。

7.5 記録装置

荷重および変位の記録は、ロードセルおよび変位計の出力をいったんデジタルメモリに記憶させる。これをシンクロスコープカメラ, X-Y-Tレコーダあるいは紙テープに穿孔する。

デジタルメモリは理研電子のトランジェントレコーダ(TCED-4000S)を装備した。記憶容量が7ビット4000ワードで、 $0.05\mu\text{s}$ ~ $0.25\text{m}\cdot\text{sec}/\text{word}$ の超高速型2チャンネルである。シンクロスコープは岩崎通信機製のDS-5016で、UP-11型ポラロイドカメラ撮影装置をもつ。X-Y-Tレコーダは2ペン型の横河電機製のTYPE-3078である。紙テープへの穿孔は理研電子製のITC-1を使用し、パンチングコードは当所計算機センターのTOSBAC-5600および船体構造部のFACOM-270/20の両計算機への入力を可能にする方式を採用した。

8. 建屋および附属設備

8.1 建屋および基礎

試験機の本体は厚い防護壁に囲まれた半地下の強固な基礎に設置されている。試験は地下のピット内で行う。これらの概要を図-15に示す。

防護壁は負荷装置本体の破損は絶対に生じないことを前提に設計されている。試験片の打込まれる砂場の鉄筋コンクリート壁の厚さは50cmある。他の防護壁の厚さは20~30cmになっており、おおいの防護蓋は30cmである。これらは回転円板の爪の部分が破損して、その半分が100m/sの速度であった時にも耐える。

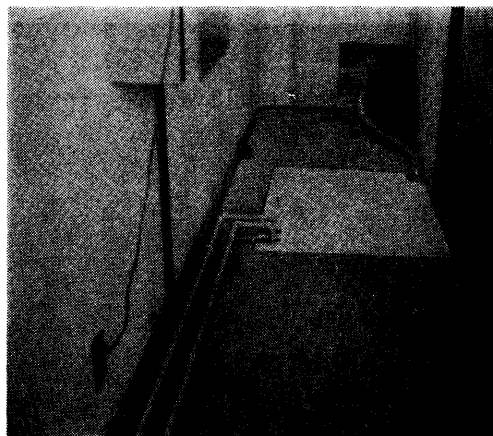


写真-14 (A)



写真-14 (B)



写真-15

定盤の下の基礎の大きさは $800\text{mm} \times 2300\text{mm} \times 850\text{mm}$ で、軸受ら各装置の取付けられた基礎は $800\text{mm} \times 800\text{mm} \times 500\text{mm}$ および $2750\text{mm} \times 800\text{mm} \times 500$

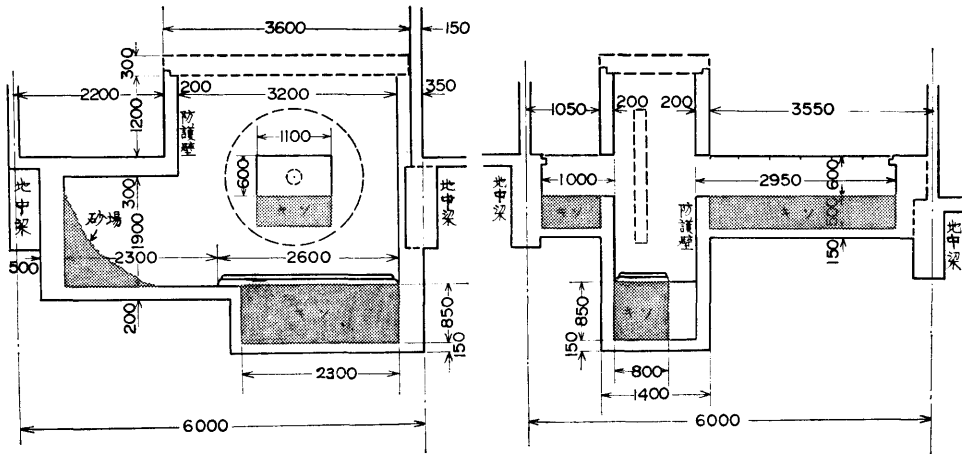


図-15 防護壁及び基礎

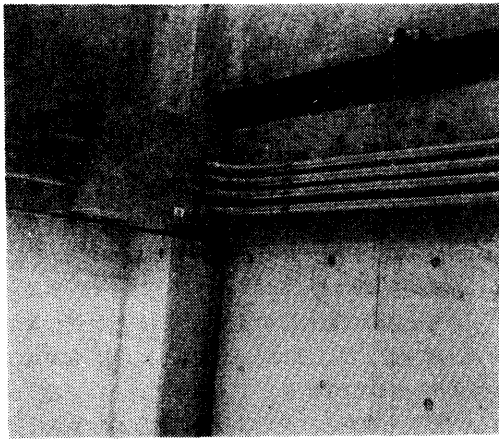


写真-16(A)

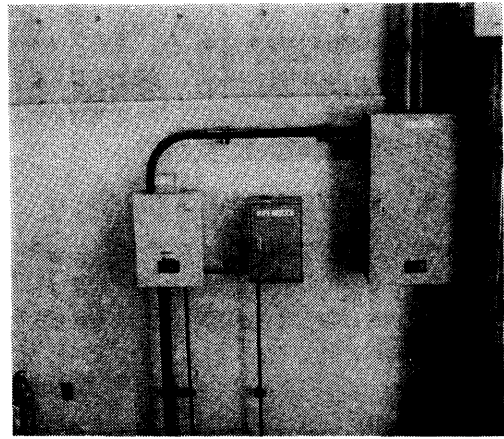


写真-16(B)

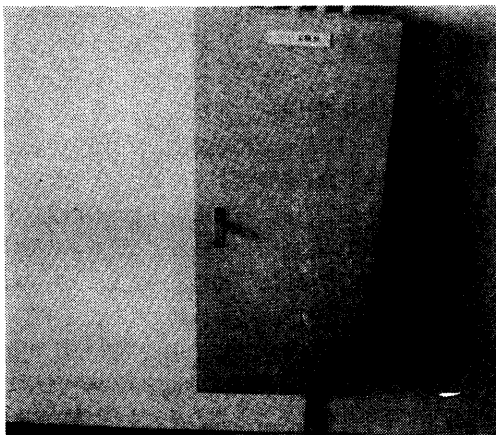


写真16(C)

mmである。これらは地中で鉄筋に連結して、非常に強固なものとなっている。

軸受け、駆動装置および制動装置等はすべて床面より下に設置され、平坦で広い床面を作り出している(写真-14A, B)。

8.2 排気装置

試験は冷媒として液体窒素やドライアイスおよびアルコール等を使用するので、地下ピットの換気が必要である。換気は排気ダクトに $60\text{cm}^3/\text{min}$ の換気扇が取り付けられており、屋外に排気される(写真-15)。

8.3 電源、配管および照明

実験室内の分電盤から駆動用ならびに制御用配線は全て金属管または金属ダクト工事で配線されている

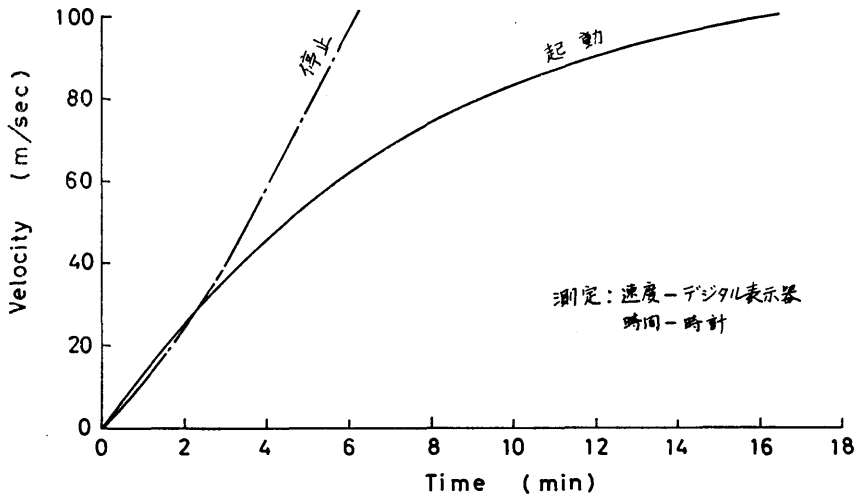


図-16 起動および停止時間

(写真-16)。計測用電源は別系統とし、制御・操作の影響はうけない。試験片の飛散による照明器具の破損はある程度許し、その防護については特に考慮せず、できるだけ試験片の飛散してこない場所に取付けた。

9. 性能検査および騒音測定結果

試験機完成時に主要機能および精度についての立会検査を行った。据付、作動状態等には特に異常は認められず、試験機に必要な主要機能はほぼ満たされていた。検査時に特に目立った事項および設計段階においては予想できなかった点として次のようなことがあげられる。

(1) 試験速度到達時間

回転円板の周速度が試験速度に到達する時間は試験機の使用効率に関係する。これは円板を含む回転部分の慣性重量と電動機の駆動力ならびにトルクコンバータの伝達効率の函数となる。本試験機においては各周速度に到達する時間は図-16のようになり 100m/sec の最高速度になるには16分24秒を要した。

(2) 制動、停止時間

試験終了後あるいは緊急時にはブレーキを働かせて回転円板を停止させる。停止までの時間は試験速度に到達する時間と同様に使用効率ならびに安全性に関係がある。しかし急激な停止は制動ディスクならびにパットの消耗に影響するので問題がある。本試験機の各設定速度からの停止時間は図-16のとおりである。最高速度からの停止時間は6分11秒で、メーカーの資料に

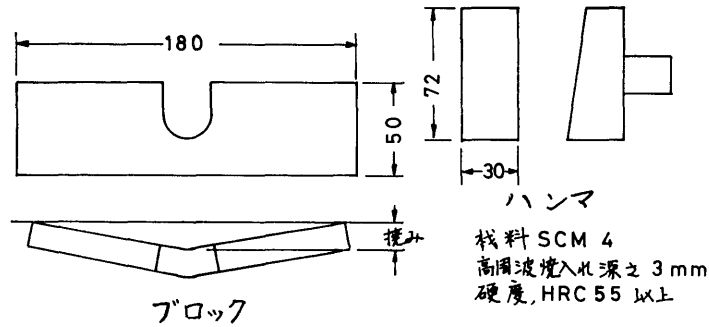
よるとこの条件での制動機の寿命はパット800回以上、ディスクは半永久的となっている。

(3) 試験片破断後の速度低下

常温で各種材料をもちいた試験片で破断試験を行い、荷重の計測ならびに速度低下率を検査した。使用した材料はアルミ(静的強度18kg/mm²)、軟鋼(45kg/mm²)および60キロ高張力鋼(62kg/mm²)である。試験速度20, 40, 80m/secで、材料の種類および引張りと曲げ試験片での速度低下率の差は生じなかった。速度低下率は20m/secで約1.1%、40m/secで約0.6%そして80m/secで0.4%であった。速度の測定は試験の直前と、その3秒後の速度を回転速度計により得た。回転円板の慣性エネルギーが、試験片の吸収エネルギーよりはるかに大きく、この速度域での試験による速度低下はほとんど無視できると考えられる。

(4) 引張試験用受け金具の形状

実際に製作据付を終った時点で生じた問題のひとつに引張試験用受け金具の破損があった。4.3項で述べた引張試験片を回転円板の爪に引掛けるための受け金具が1回の衝撃で彎曲あるいは破断した。この状態は試験片を用いず受け金具のみを打上げ装置により爪に当てるいわゆる“空打ち”でも観察された。受け金具が瞬間的に高速運動するために生じた“慣性力”が作用するためと考えた。実用上、40m/sの試験速度で5回以上の使用に耐えることを必要条件として、受け金具の改造を行った。材料の強度を上げるためにより



試験条件: 速度 40m/s で試験片を切らず空打ち。

NO.	断面形状	重量	材質	撓み	傷	ハンマ傷	備考
1	30	2040g	SKS3	4.0mm	有	無	初期設計品
2	15	1,020	S45C 調質	14.3	有	無	
3	15	1,020	S45C 高周波焼入	8.2	無	有	
4	15	1,020	SCM4 高周波焼入	7.9	無	有	
5	15	1,020	SKS3	破断	無	有	
6	15 30	1,430	S45C 調質	2.0~ 2.3	有	無	打上金具変形
7	15 30	1,800	S45C 調質	9.5	有	無	
8	30 40	2,314	S45C 調質	2.3~ 2.4	有	無	打上金具変形
9	32 55	2,300	SCM4	<2.0 (5回)	有	無	採用品 (図-5 参照)

図-17 受け金具（ブロック）の改良試験結果

強い材料の使用と熱処理条件を変えた。また、受け金具の重量を軽減することおよび曲げ応力を小さくするためにいくつかの形状寸法をもつ受け金具の試作試験を行った。結果を図-17に示す。一方東工大で使用されている受け金具の形式寸法と重量および爪の間隔で本試験機へ換算した。以上の結果から前述の受け金具（図-6）を採用した。

40m/s の速度で5回のテストを行った結果、撓み量は数mmで、使用に耐え得るものと判断した。

(5) 騒音試験結果

試験機引渡し後、建屋および試験機の基礎を担当した関東地方建設局の方から試験機の騒音測定を行うよう申し渡された。設計段階では安全対策については十分検討したが、騒音については具体的な要求値を示さなかった。しかし測定結果は良好であり、最高速度で運転中に指示騒音計（日本電子測器㈱SCP-21）で測定した結果は実験室から10m離れた地点で63dBで、これはほとんど暗騒音とみなせるものである。し

かし地下壕では 102dB, 実験室内で 93dB であったが、両者とも壁には無響塗装がほどこされていないのが欠点であった。

10. 結 言

これまで述べてきたように、本試験機は材料の高速度衝撃試験を精度良く、能率的にかつ安全に行うことができる特徴をもつものである。

本試験機を計画するにあたって、御指導ご協力を賜った東京工業大学中村正久教授、堀江史郎技官に厚くお礼を申し上げます。また、建屋の建設に当たった建設省関東地方建設局の方々、試験機の製作を担当した萱場工業㈱の方々、建設にご指導ご鞭撻をいただいた船舶技術研究所安藤所長をはじめ関係各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 例えば、作井誠太他, “軟鋼の低温における衝撃引張特性” 鉄と鋼, 1963, 第49年・1号 pp. 55~62.
- 2) 例えば, A. K. Shoemaker and S. T. Rolfe, “The Static and Dynamic Low-Temperature Crack-Toughness Performance of Seven Structural Steels”, Engineering Fracture Mechanics, 1971, vol. 2, pp. 319-339.
- 3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section, III Appendix G, 1972.
- 4) E. Dürrwächter, “Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf das Zähigkeitsverhalten”, Schweiss Technik, 1970, 20. 8, pp. 367-369.
- 5) 小倉信和, “マンガンスリコン高張力鋼の大型シャルピー衝撃試験” 溶接学会誌, 昭和31年, 25巻5号, p. 64.
- 6) E. A. Lange and F. J. Loss, “Dynamic Tear Energy-A Practical Performance Criterion for Fracture Resistance”, ASTM STP 466, 1970, pp. 241-258.
- 7) R. Roberts and G. V. Krishna, “An Alternate Measure of Fracture Toughness”, Engineering Fracture Mechanics, 1977, vol. 9, pp. 87-93.
- 8) W. S. Pellini and F. J. Loss, “Integration of Metallurgical and Fracture Mechanics Concepts of Transition Temperature Factors Relating to Fracture-Safe Design for Structural Steels”, NRL Report 6900, 1969.
- 9) H. Kolsky and L. S. Douch, “Experimental Studies in Plastic wave Propagation”, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1962, vol. 10, pp. 195-223.
- 10) 河島佑男他, “高圧空気源を用いた高速衝撃試験機の試作” 九大工学集報, 昭和39年, 第37巻・2号, pp. 155-160.
- 11) R. M. Davis, “A Critical Study on the Hopkinson Pressure Bar”, Philosophical Transaction of Royal Society of London, 1948, A 240, p. 375.
- 12) 河田幸三, “固体の高速および超高速衝撃と宇宙工学的関連” 航空学会誌, 1963, 第11巻・112号, pp. 121-135.
- 13) M. Manjoine and A. Nadai, “High-Speed Tension Tests at Elevated Temperatures”, Proceedings of ASTM, 1940, vol. 40, pp. 822-839.
- 14) D. S. Clark and P. E. Duwez, “Discussion of the Forces Acting in Tension Impact Tests of Materials”, Journal of Applied Mechanics, 1948, pp. 243-247.
- 15) 作井誠太, 中村正久, 布村成具, “高速衝撃試験機による鉄鋼材料の引張特性” 鉄と鋼, 第46年3号, pp. 234-235.

附 録

各計測記録計の性能仕様

- (1) ロータリエンコーダ (小野測器, RP-111-CO)
 - 光源 発光ダイオード
 - 受光素子 フォトトランジスタ
 - 発振数 1200P/R, および 1P/R
 - 応答周波数 20kHz
 - 分割精度 1ピッチ10%以下
 - 出力信号波形 2方形波列
 - 最高回転数 4000rpm
 - 使用温度 $-5^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$
- (2) レシオマルチプライヤー (小野測器, TH102)
 - 入力信号 $0.1 \sim 20\text{V rms}$ 正弦波または矩形波
 - 入力周波数 50Hz \sim 100kHz
 - 出力信号 “1” : $+10\text{V} \pm 2\text{V}$, “0” : $+0.5\text{V}$ 以下
 - 比率設定 $0.9999 \sim 0.0001$ および 1, 4 桁
 - 使用温度 $-5^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$
- (3) デジタル回転計 (小野測器, TM-133)
 - 計数速度 150kHz
 - 発振器周波数および確度 1MHz, $\pm 3 \times 10^{-5}/\text{day}$
 - 表示方式および桁数 記憶表示, 5桁
 - 測定範囲 $1 \sim 15,000\text{rpm}$
 - 測定時間 1sec (60P/R)

- 使用温度 $-10\sim+50^{\circ}\text{C}$
- (4) デジタルスピードリレー (小野測器, GR-101)
 基準発振器, 水晶発振器 1 MHz
 測定時間 1 sec
 測定範囲 $0.1\sim 100,000\text{rpm}$
 計数方式 2進10進
 計数範囲 4桁, 0000~9999
 設定方法 上, 下限 2ch., 4桁
 温度範囲 $-10\sim+55^{\circ}\text{C}$
- (5) デジタルプリンタ (小野測器, RQ-335)
 印字速度 約350m sec (約3行1sec)
 印字桁数 19桁 (内単位, 文字3桁)
 データ入力 4要素2進10進符号化信号
 記録紙 幅80mm, 長さ25m折畳紙
- (6) ロードセル用増幅器 (日章電機, AM-5S)
 適用ロードセル $350\sim 1000\Omega$ フルブリッジ形式
 印加電圧 DC10V
 平衡調整範囲 350Ω に対して $\pm 2\%$
 入力電圧範囲 $0\sim\pm 1000\text{mV}$
 電圧増幅度 最大にて約400倍
 感度変化 測定値の $0.03\%/^{\circ}\text{C}$ 以内
 応答特性 約45kHz/ -3dB 以上 (最大増幅度)
 使用条件 温度: $0\sim 40^{\circ}\text{C}$, 湿度: 90% 以内
- (7) 光電式微小変位計 (Zimer社, 200X)
 変位範囲 10mm full scale ($0.5\sim 100\text{mm}$)
 ゲージレンジ 70mm ($0\sim 100\text{mm}$)
 分解能 full scale 0.008% (10kHz) $\sim 0.45\%$ (W. Band)
 応答性 400kHz (-3dB A, Bの単一出力)
 $0\sim 100\text{kHz}$ (歪出力)
 直線性 $\pm 0.2\%$ of range
 出力 $\pm 5.0\text{V}$ full scale A, B出力
 $\pm 10.0\text{V}$ full scale 歪出力
 出力インピーダンス 50Ω (A, B出力)
 0.02Ω (歪出力)
 温度 $10\sim 50^{\circ}\text{C}$
- (8) 制御用温度計 (千野 DS121) 2位置式
 測定方式 熱電式—電位差計方式
 目盛長さ 有効長さ 140mm
- 指示精度 測定範囲の $\pm 1.0\%$
 不感度範囲 測定範囲の 0.2%
 平衡時間 全目盛移動約5sec
- (9) 記録用温度計 (千野 EK-100)
 測定方式 熱電式—電位差計方式
 目盛長さ 180mm
 指示精度 測定範囲の $\pm 0.5\%$
 不感度範囲 測定範囲の $\pm 0.1\%$
 平衡時間 全目盛移動約2sec
 記録箇所数 6箇所
 記録方式 6箇所, 6色印点記録
 記録紙繰出速さ $250/500\text{mm/h}$ 2段切換
 印字切換時間 5sec
- (10) デジタルデータレコーダ (理研 TCDE-4000S)
 チャンネル数 2ch.
 入力電圧 $\pm 0.05\sim 50\text{V}$ full scale
 記憶容量 各7bit 4096 Word
 サンプリングタイム $0.05\mu\text{sec}\sim 0.25\text{msec/word}$, 12 steps
- (11) シンクロスコープ (岩通 DS-5016)
 周波数帯域幅 DC結合のとき, DC $\sim 1\text{MHz}$
 AC結合のとき, 4Hz $\sim 1\text{MHz}$
 入力電圧 $50\mu\text{V/cm}\sim 10\text{V/cm}$
 有効管面 $80\text{mm}\times 100\text{mm}$
 撮影装置 UP-11 ポラロイドカメラ付
- (12) X-Y-Tレコーダ (横河 TYPE3078)
 入力数 X軸1, Y軸2, (2ペン型)
 入力範囲 $0.1\text{mV/cm}\sim 10\text{V/cm}$ (16レンジ)
 時間軸 $0.1\sim 10\text{sec/cm}$, 直線性 $\pm 2\%$
 有効記録幅 $250\text{mm}\times 250\text{mm}$
 許容差 有効記録幅の $\pm 0.3\%$,
 検出感度 $\pm 0.15\%$
- (13) 穿孔用インタフェース (理研 ITC-1)
 入力 2進, 10bit
 アドレス 4999 Word/ch
 チャンネル 2ch.
 スピード 1step 50msec Max
 パンチング方式 ファコムコード