

### (33) 高速載荷を受けるRC板の押抜きせん断破壊特性について

防衛大学校土木工学科 ○北川 真  
防衛大学校土木工学科 大野 友則  
防衛大学校土木工学科 内田 孝

#### 1. はじめに

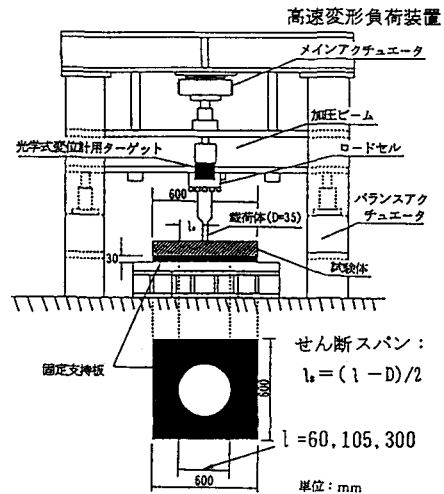
原子力発電関連施設や落石防護構造物などの耐衝撃設計法を確立するためには、まず構造部材の耐衝撃性を評価するための基礎的資料を得る必要がある。一般に、構造部材の耐衝撃性を評価するための衝撃実験は、高速衝突実験、爆発実験および高速載荷実験の3種類に大別される。このうち、高速衝突実験および爆発実験は、実際の衝撃現象や構造部材などの衝撃挙動を再現するには有効であるが、得られる結果に、応力波や慣性力などの影響が混在するため、構造部材固有の応答特性ならびに終局限界性能（耐荷力、エネルギー吸収容量）を定量的に把握することは困難である。したがって、構造部材などの衝撃挙動や耐衝撃性を解明するには高速載荷実験を行うことが適切である。著者らは既に、小型衝突体を用いた高速衝突実験<sup>1)</sup>（衝突速度約170m/sec）を行い、その衝撃応答特性や耐衝撃性について調べている。高速衝突においては、貫通や裏面剝離などの局部破壊がきわめて重要な破壊現象となるが、本報告では、このうち貫通現象の破壊機構を解明する手がかりを得るために、前報告<sup>1)</sup>の高速衝突実験と同一縮尺モデル（試験体諸元、載荷面積）の高速載荷実験を行っている。

すなわち、本研究では、高速衝突時におけるRC板の貫通抵抗特性を解明するための基礎段階として、RC板の押抜きせん断破壊に着目した高速載荷実験を行い、載荷速度やせん断せん断比がRC板の動的せん断破壊特性（破壊性状や終局限界性能）に及ぼす影響を調べるものである。

#### 2. 高速載荷実験の概要

##### 2.1 高速変形負荷装置

本実験には、高速変形負荷装置を用いた(図-1)。本装置は、試験体を一定の速度で任意に設定した変位量まで変形させることができ、試験体の弾塑性挙動や終局限界性能に及ぼす載荷速度の影響を調べることができる。本装置の載荷方式は、油圧ポンプにより一定の圧力に保たれたメイン・アクチュエータの荷重(最大荷重50tf)を左右にある2基のバランス・アクチュエータで保持し、バランス・アクチュエータに内蔵された制御バルブを機械的に一定の速度で下方向に作動させて設定した速度で試験体を変位させるものである。載荷体の変位速度は、0~4m/secの範囲で任意に設定できる。また、最大可能変位量は150mmである。



	載荷速度
高速	$4 \times 10^{-5}$ m/sec
静的	3 m/sec

図-1 実験装置の概要

##### 2.2 載荷方法

本実験を高速衝突実験と対応させる目的から、載荷体は高速衝突実験で用いた飛翔体と同一径(直径:D=3.5 cm)を有する円柱載荷体(鋼製)を使用した。載荷速度は、静的 ( $4 \times 10^{-5}$  m/sec程度)と高速 (2~3 m/sec程度)

の2種類とした。試験体は、図-1に示すように中央部に円形開口部を有する固定支持板(鋼製)上に載せ、周辺単純支持とした。また、支持スパン(開口部直径:  $l$ ) は6cm、10.5cmおよび30cmの3種類とし、せん断スパン( $l_s = (l - D)/2$ )を変化させた。支持板の開口部を矩形ではなく円形とし、最大支持スパンを30cmとしたのは、過去に行った高速衝突実験<sup>1)</sup>の結果(試験体裏面は衝突点を中心に直径約30cm以内の範囲内で円状に損傷・破壊すること)を考慮したものである。また、載荷体の最大変位量は試験体を完全に貫通破壊させるため試験体の板厚に等しくした。

### 2.3 試験体

試験体は、寸法60×60cmの正方形RC板で厚さが8, 10cmの2種類を使用した。鉄筋間隔15cmおよび鉄筋径6mmは一定とし、複鉄筋構造とした。基本となるRC板の寸法・配筋を図-2に示す。

また、試験体のタイプは図-2に示すように、通常のRC板(Type-A)と試験体中央部(載荷位置)に深さ1cm、縦横5×5cmの切欠き部を有する切欠きスラブ(Type-B)の2種類とした。Type-Bの切欠きは、衝突時に衝突点で生じる表面破壊を想定したものである。

### 2.4 実験計測

計測は、載荷荷重、試験体の変位(載荷位置)について行った。荷重の計測には、載荷体に取り付けた50tロードセルを用いた。また、本実験では、試験体の変位量を載荷装置の加圧ピストンの移動量と等価であるとみなし、50mm以下の小変位に対しては渦電流式非接触変位計(最大測定容量: 50mm, 応答周波数: 50kHz)、50mm以上の変位に対しては光学式変位計(応答周波数: 500kHz)を用いて測定を行った。

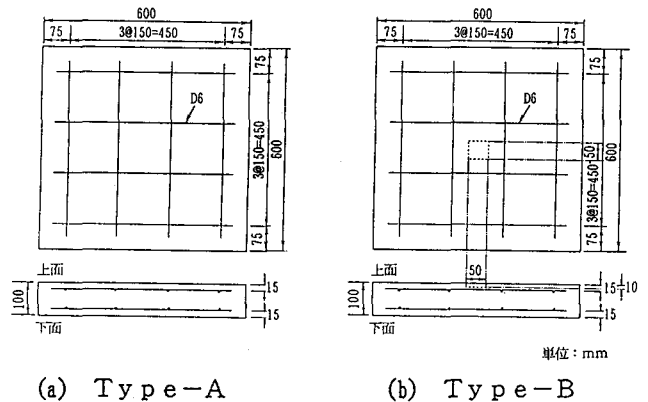


図-2 RC試験体の寸法・配筋(RC板厚: 10cm)

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 載荷速度およびせん断スパン比がRC板の破壊性状に及ぼす影響

図-3は、載荷終了後のType-Aの試験体の破壊状況に基づいて、各支持スパンにおけるRC板の破壊断面を模式化して示したものである。(a)は高速載荷、(b)は静的載荷の場合である。図より、載荷速度の影響は、とくに載荷面側において顕著であり、高速載荷の方が静的載荷に比べて載荷位置近傍の表面破壊が大きくなっている。これは、高速載荷の場合には、当初、載荷体を試験体に接触させた状態から急速載荷するため、載荷面側に支圧破壊が生じることを示すものである。また、(a)について、各支持スパンにおける破断面の発生位置を比較すると、スパン6cmと10.5cmの場合には、破断は当初載荷位置から鉛直方向に向かい、ほぼ中央付近に到達したあとと支点端部に向かい、引張鉄筋付近で緩やかな勾配になっている。さらに、スパン6cmの場合には、載荷面側の圧縮側コンクリートに表面破壊が生じているのに対し、スパン30cmの場合には載荷位置の貫通孔を除き破壊は認められなかった。これは、スパン30cmのようにせん断スパンが大きくなると曲げの影響が大きくなり、斜め引張応力による引張破壊が生じやすくなるためと考えられる。このことから、せん断スパンの大小によりRC板の破壊形式は、せん断圧縮型と斜め引張型に区分でき<sup>2)</sup>、両者の場合でコンクリート強度の影響度が異なってくると考えられる。すなわち、せん断スパンが小さい場合(スパン6cmや10.5cm)にはせん断圧縮型の破壊であり、圧縮強度が押抜きせん断耐力に影響を及ぼす主な要因となる。また、せん断スパン比が大きい場合(スパン30cm)には斜め引張型で引張強度が主な影響因子となる。

め引張型で引張強度が主な影響因子となる。

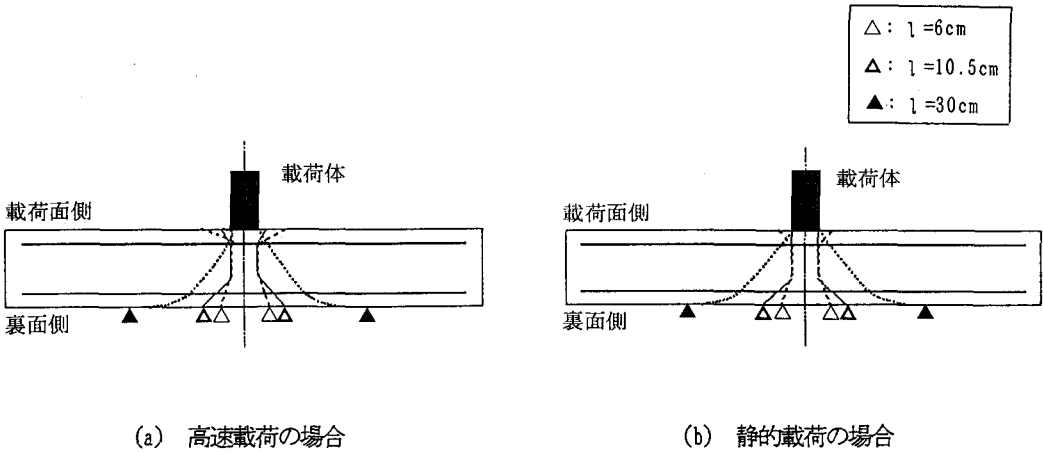


図-3 RC板の破壊断面(Type-A)

### 3.2 荷重速度およびせん断スパン比がRC板の終局限界性能に及ぼす影響

#### (A) 荷重～変位曲線

図-4に、本実験より得られた荷重～変位曲線の一例を示す(RC板厚:8cm, 支持スパン:10.5cm)。本実験では、押抜きせん断破壊が生じやすい条件( $0.15 \leq l_w/d \leq 2.41$ )としたため、いずれのケースも図に示すような押抜きせん断破壊型の荷重～変位曲線が得られた。

図より、荷重速度の影響をみるとType-AとType-Bのいずれの場合にも静的荷重に比べ、高速荷重の方が終局耐力が増大しており、ひずみ速度効果による耐力増加が認められる。また、Type-AよりもType-Bの方が荷重が下回っているのは、Type-Bの方が荷重位置における有効高さが小さいためであり、有効高さがRC板の押抜きせん断耐力を支配する重要な要因の一つであることがわかる。

#### (B) せん断応力度

本実験で得た押抜きせん断耐力には、RC板の有効高さや荷重辺長など重要なパラメータが含まれるので、その影響を考慮するため、ここでは、以下に示すせん断応力度 $\tau$  (kgf/cm<sup>2</sup>)によって表す方法を用いる。すなわち、

$$\tau = P / (b \cdot d) \quad \dots \dots (1)$$

ここに、P: 押抜きせん断耐力(kgf)、b: 仮定する荷重断面(設計断面)の周長(cm)、d: 有効高さ(cm)、である。

なお、本考察では、bの値を土木学会標準示方書<sup>3)</sup>(設計押抜きせん断耐力の算定手法)に示されている設計断面、すなわち、荷重縁からd/2離れた位置(限界断面)における周長として与えている(図-5(a))。ただし、せん断スパン比が非常に小さく( $l_w/d < 1$ )、荷重縁からd/2離れた位置に破壊面が設定できない場合には荷重縁より $l_w/2$ 離れた位置、すなわち実際の破壊面の中央部における周長として与える(図-5(b))。

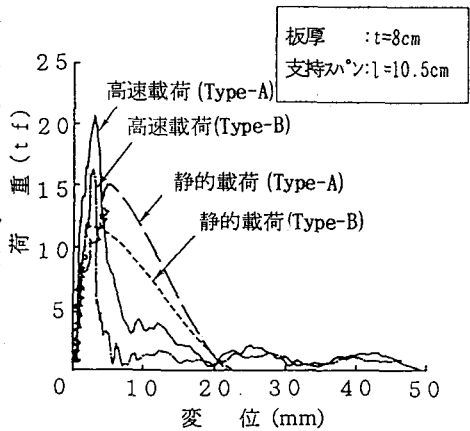


図-4 荷重～変位曲線の一例

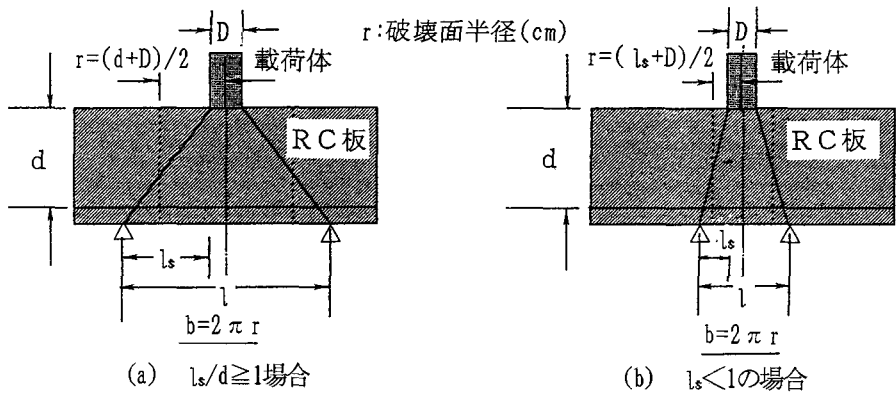


図-5 破壊面周長bの決定

(C) 荷重速度およびせん断スパン比が押抜きせん断耐力に及ぼす影響

図-6は、縦軸に $\tau/fc'$ 、横軸に $l_s/d$ (せん断スパン比)をとり、本実験結果を整理したものである( $fc'$ :コンクリートの静的圧縮強度=335kgf/cm<sup>2</sup>)。横軸の $l_s/d$ を対数表示(片対数表示)したところ、 $\tau/fc'$ と $l_s/d$ の間に図に示す線形的な関係が認められた。

図より、静的荷重(図中、○および△印)において、せん断スパン比が1より大きい場合には、 $\tau/fc'$ は0.1付近の値となっており、せん断応力度 $\tau$ は $fc'$ の約10%、すなわちコンクリートの静的引張強度(32kgf/cm<sup>2</sup>)に相当する値となっている。また、せん断スパン比が1より小さくなると $\tau/fc'$ はほぼ直線的に増加する傾向が認められる。一方、高速荷重(●および▲印)においては、 $\tau/fc'$ は全般的に静的荷重時よりやや大きめの値であるが、静的荷重の場合と同様にせん断スパン比が小さくなるにつれて $\tau/fc'$ はほぼ直線的に増加している。

図-6において、それぞれ高速、静的荷重の場合について最小二乗法により近似式を求め、式(1)を用いて押抜きせん断耐力を求める式に直すと次式が得られる。すなわち、

<高速荷重時>

$$P = [-0.54 \log(l_s/d) + 0.31] \cdot fc' \cdot b \cdot d \quad \dots \dots (2)$$

(0.15 ≤  $l_s/d$  ≤ 2.51, 相関係数:-0.97)

<静的荷重時>

$$P = [-0.49 \log(l_s/d) + 0.21] \cdot fc' \cdot b \cdot d \quad \dots \dots (3)$$

(0.15 ≤  $l_s/d$  ≤ 2.51, 相関係数:-0.95)

である。

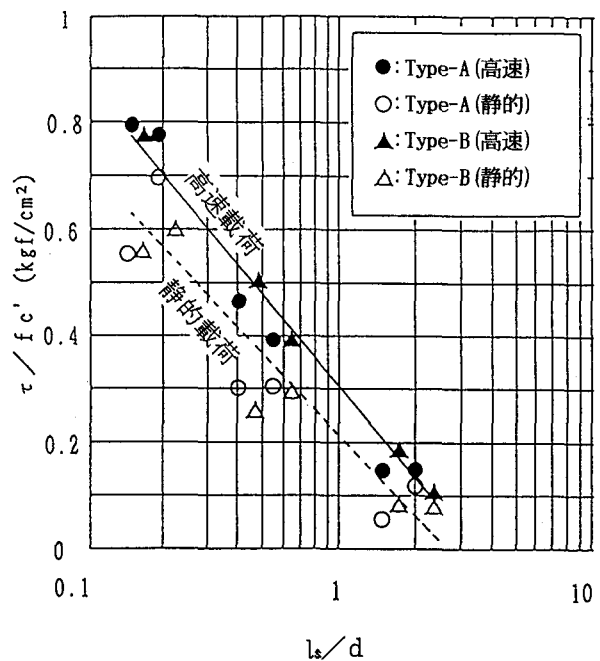


図-6  $\tau/fc' \sim l_s/d$

(D) 貫通時抵抗力の推定および実験結果との比較

ここでは、参考までに既往の評価式のうち修正NDRC式<sup>4)</sup>を用いてRC板の貫通時抵抗力を計算し、静的および高速載荷時の押抜きせん断耐力との比較を行う。

(1) 基本式

修正NDRC式によると、飛翔体のコンクリート中への貫入量 $X_{NDRC}$ は次式で与えられる。

すなわち、

$$X_{NDRC} = 0.00697 \sqrt{N \cdot W \cdot D \cdot (V_0/D)^{1.8} / \sqrt{f_c'}} \quad X \leq 2D \quad \dots \dots (4)$$

$$X_{NDRC} = \{1.21 \cdot 10^{-5} \cdot N \cdot W \cdot (V_0/D)^{1.8} / \sqrt{f_c'}\} + D \quad X \geq 2D \quad \dots \dots (5)$$

ここに、 $X_{NDRC}$ :貫入量(cm),  $N$ :先端形状係数(平坦=0.72),  $W$ :飛翔体重量(kgf),  $D$ :飛翔体直径(cm),  $V_0$ :衝突速度(cm/sec),  $f_c'$ :コンクリート圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>), である。

また、コンクリートの貫入抵抗力(単位断面あたり)を $R$ 、飛翔体の貫入時断面(一定)を $A$ とすると、以下に示す運動方程式が成立する。

すなわち、

$$(W/g) \cdot d^2X/dt^2 + A \cdot R = 0 \quad \dots \dots (6)$$

ここに、 $W$ :飛翔体重量(kgf),  $g$ :重力加速度(cm/sec<sup>2</sup>),  $X$ :任意の時刻における飛翔体の貫入量(cm),  $R$ :単位断面あたり貫入抵抗力(kgf/cm<sup>2</sup>),  $A$ :飛翔体の貫入時断面(cm<sup>2</sup>), である。

(ただし、RC板は、飛翔体に比べて重量が非常に小さいのでRC板の変位は無視している。)

ここで、 $R$ は、貫入速度( $dX/dt$ )を $V$ (cm/sec)で表すと次式により与えられる。

すなわち、

$$R = 58.9 \cdot (f_c')^{0.5} \cdot (V/D)^{0.2} \cdot X / (2 \cdot D \cdot N) \quad X \leq 2D \quad \dots \dots (7)$$

$$R = 58.9 \cdot (f_c')^{0.5} \cdot (V/D)^{0.2} / N \quad X \geq 2D \quad \dots \dots (8)$$

(ただし、 $t=0$ ;  $dX/dt=V_0$ ,  $X=0$ および $dX/dt=0$ ;  $X=X_{NDRC}$ )

なお、飛翔体の貫入速度 $V$ および貫入量 $X$ は、式(6)より求めた貫入加速度( $d^2X/dt^2$ )より、積分計算によって求める。また、貫通時抵抗力を算出するには、貫通の有無を判定する必要がある。そこで、貫通の判定には、以下に示す貫通評価式を用いる。

すなわち、

$$X_p = 3.19 \cdot X - (0.718 \cdot X^2/D) \quad X < 1.35D \quad \dots \dots (9)$$

$$X_p = 1.32 \cdot D + 1.24 \cdot X \quad X > 1.35D \quad \dots \dots (10)$$

$X > 13.5D$  適用外      ここに、 $X_p$ :貫通限界厚(cm), である。

計算においては、時々刻々と変化する $X$ から式(9), (10)を用いて貫通限界厚 $X_p$ を逐次計算し、 $X_p$ がRC板厚より大きくなった時点で貫通とみなす。貫通時抵抗力は、その時の貫入抵抗力( $R \cdot A$ )として求めている。

(2) 計算モデル

計算は、本実験で用いたType-A試験体(コンクリート静的圧縮強度:335kgf/cm<sup>2</sup>)に飛翔体(重量:0.43kgf)が衝突速度約170m/secで衝突する場合について行う。なお、飛翔体は、高速衝突実験<sup>1)</sup>で使用した飛翔体のうち、胴体部に一般構造用炭素鋼管(STK41)を用いた鋼<sup>ハ</sup>17°飛翔体とする(図-7)。

また、式(4)および式(9)を用いて、本計算条件下における貫通限界厚を計算したところ、約8.7cmであった。よって、ここでは、高速載荷実験で使用した板厚8cmの試験体(Type-A)について計算し、実験結果との比較を行うことにする。

### (3) 実験結果との比較

図-8は、Type-A試験体(板厚:8cm)の実験結果と修正NDRC式より求めた貫通時抵抗力を比較したものである。縦軸が押抜きせん断耐力( $P$ )で、横軸がせん断スパン比( $l_s/d$ )である。なお、修正NDRC式は、せん断スパンをパラメータに含まないため、計算結果(図中、実線で表示)には、せん断スパン比の影響は考慮されていない。

計算の結果、貫通時抵抗力は約27.2tfであった。図において、計算値と実験値を比較すると、せん断スパン比が小さくなるほど両者の値は近づく傾向があり、とくに、せん断スパン比が0.19の場合には、計算結果(27.2tf: 図中、□印)に対し、実験結果は、静的(○印)で22.5tf、高速(●印)で24.9tfとかなり近い値となっている。このことから、貫通抵抗力はRC板の動的せん断耐力に依存するものと推定される。すなわち、貫通破壊を防止する有効な手段として、RC板の押抜きせん断耐力を大きくすることが考えられる。

## 4. 結論

以上、本研究の成果を要約すると次のようになる。

- (1) 集中荷重を受けるRC板の破壊形式は、せん断スパン比の大小により、大別して、せん断圧縮型と斜め引張型に分けられる。せん断スパン比が小さい場合にはせん断圧縮型であり、コンクリートの圧縮強度の影響を受ける。一方、せん断スパン比が大きい場合には斜め引張型であり、引張強度の影響を受けやすい。
- (2) 本研究では、主としてせん断スパン比が小さい場合( $0.15 \leq l_s/d \leq 2.41$ )を対象として検討した。実験結果から、せん断スパン比は、はり部材と同様、RC板の終局耐力に影響を及ぼす重要な因子の一つとなることがわかった。すなわち、せん断スパン比が小さくなるほど終局耐力は増大する。また、本実験結果に基づいて、せん断スパン比とコンクリートの静的圧縮強度に関する動的押抜きせん断耐力算定式(実験式)を提案した。
- (3) 高速荷重時(約3m/sec)の押抜きせん断耐力と修正NDRC式により求めた貫通時抵抗力(衝突速度約170 m/sec)を比較したところ、比較的近い結果が得られた。このことから、貫通破壊はRC板の動的押抜きせん断耐力に依存するものと推定される。貫通を防止するには、押抜きせん断耐力を大きくする、すなわち①コンクリートの圧縮強度を増大する、板厚を増加する、②衝突点付近にせん断耐力の大きい材料を用いる、などの方法を検討すればよい。

### [参考文献]

- 1) 北川、大野、内田、井元：飛翔体の高速衝突に対する2重RC板の耐衝撃性、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、第1部、pp.1112~1113、平成4年9月。
- 2) 角田、井藤、藤田：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第229号、pp.105~115、1974.9。
- 3) 土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書(設計編)、昭和61.10。
- 4) 内田、大野：柔飛翔体の高速衝突による鉄筋コンクリート板の局部損傷の予測、防衛大学校理工学研究報告、pp.209~217、平成4年3月。

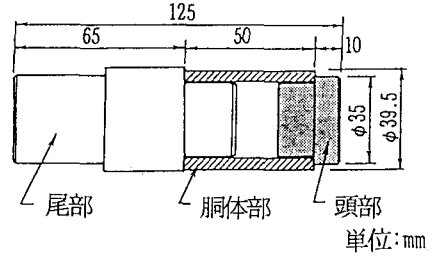


図-7 飛翔体の概要(鋼板 $17^\circ$ )

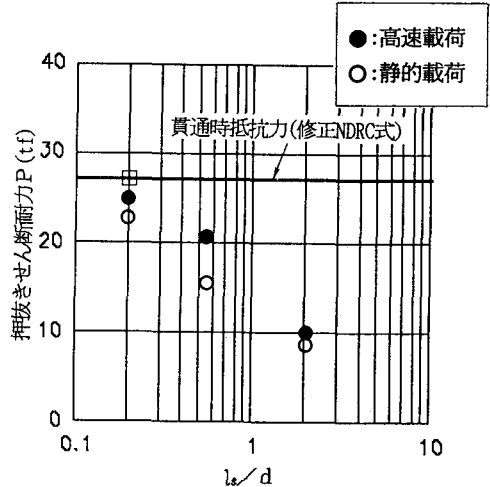


図-8 貫通時抵抗力(計算値)と実験結果の比較  
(Type-A, 板厚:8cm)