【報　告】

路床土支持力比（CBR 値）の簡易測定法としての球体落下試験について

村　山　朔　郎*
植　下　協**
斎　藤　実***

要　旨　道路のタワミ舗装の厚さを決めるために現在広く用いられている路床土の CBR 値を現場で簡単に求めるために，著者らが新たに考案した試験法の原理と実際とについて述べる。この方法は一定の重さ，一定の直径の球体を一定高さより地面に落下させ，そのとき生ずる地面のくぼみの大きさから CBR 値を推定するものである。

1. 緒　　言

タワミ舗装の設計法についてはきわめて多くの方法が発表されているが[1),2)]，現在広く行われている設計法は CBR による方法である[3)]。しかしこのための CBR 試験を実際に行うことはかなり面倒で経費，時間も相当かかるので，設計法としては一応信頼されながら十分に利用されない傾向にある。

そこで著者らは道路舗装をしようとする現場で，一定条件のもとに球体を路床土上に落下させ，そのとき生ずる地面のくぼみの直径を測定してそれによつて土の CBR 値を簡単に推定する試験法（これを球体落下試験と名づける）を考案し，それに関し理論的考察と室内および現場の実験を行つて，その実用性を確かめることができたので報告する。

2. 球体落下試験の理論的考察

CBR の標準になる荷重強度（単位荷重）は**表—1**に示したが，**表—1**より CBR 標準荷重強度—貫入深さ曲線を画けば**図—1**のように両対数紙上で直線となる。ゆえに CBR 標準荷重強度 p(kg/cm²) は次のように表わせる。

$$p=162\,z^{0.61}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここに z は CBR 貫入ピストン（直径 5 cm，断面積 19.63 cm²）の貫入量を cm で表わしたものである。

一般に地表面で直径 d(cm) の円板による載荷試験を行うと，載荷板の沈下量 z(cm) と載荷板の荷重強度 p (kg/cm²) との間には次のような関係がある[4)]。

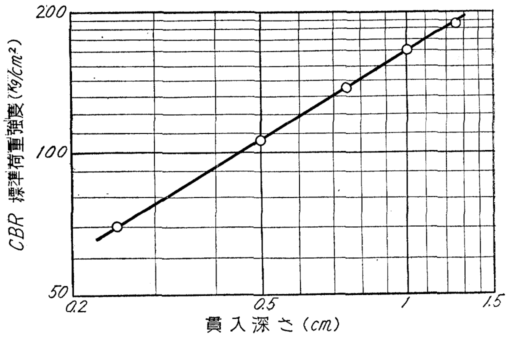
$$p=a\left(\frac{z}{d}\right)^{b}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

* 正員　工博　京都大学教授，工学部土木工学教室
** 正員　修士　京都大学講師，工学部土木工学教室
*** 准員　日本道路公団，名神高速道路京阪建設所

表—1　CBR 標準荷重

貫入深さ mm	荷重強度 kg/cm²	全荷重 kg
2.5	70	1 370
5.0	105	2 030
7.5	134	2 630
10.0	162	3 180
12.5	183	3 600

図—1　CBR 標準荷重強度—貫入深さ曲線（両対数紙上）



ここに a，b は土の種類によつて決まる定数である。b は (z/d) が大きくなると小さくなる傾向があるが，取扱う (z/d) の変化範囲が小さければ定数とみなしうる。

$d=5$ cm の CBR 貫入ピストン断面程度の載荷試験の場合に対しても，(2) 式が成立すると仮定して，(2) 式中の d が 5 cm のとき (2) 式が (1) 式と同一になるように係数 a，b を決めると，

$$p=432\left(\frac{z}{d}\right)^{0.61}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

となる。ゆえに CBR が η % の土については，荷重強度と貫入深さとの関係は次式で表わせる。

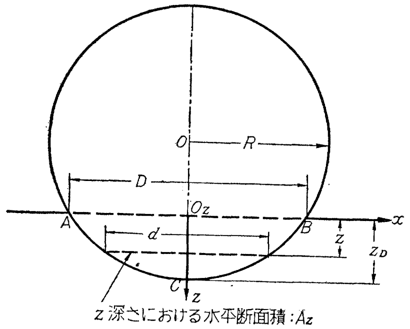
$$p=4.32\,\eta\left(\frac{z}{d}\right)^{0.61}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

次に球体を最下端が z_D となるだけ（**図—2** 参照）土中へ押し込むに要するエネルギー E (kg・cm) を求めると，

$$E=\int_0^{z_D} A_z\cdot p\,dz\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

となる。ここに A_z は球体の地表より z(cm) の深さにおける水平断面積 (cm²)，p は地中へ球体が貫入すると

図―2 球体を地中へ押し込んだ場合の各ディメンジョン



きzの深さの水平断面に鉛直に働いたと考えた荷重強度(kg/cm²)で，いずれもzとdの関数である。

ここで球の地中に貫入している部分を計算の便宜上回転放物線で近似する。球の中心Oを通る鉛直断面上で，鉛直な球軸の地表面の高さの点 O_z を原点にとり，z軸を鉛直下方に，x軸を水平方向にとる。ゆえに地中における球中心を通る鉛直断面 ACB は次式で近似される。

$$z_D - z = cx^2 \cdots\cdots(6)$$

ここで係数 c は $z=0$ で $x=D/2$ となるようにきめると，$c=4\,z_D/D^2$ となり次式をうる。

$$z_D - z = \frac{4\,z_D}{D^2}x^2 \cdots\cdots(6')$$

深さ z における球の水平断面積 A_z は，

$$A_z \fallingdotseq \pi\,x^2 = \frac{\pi\,D^2}{4\,z_D}(z_D - z) \cdots\cdots(7)$$

と表わせる。また (4) 式における d は (6′) 式より次のように近似する。

$$d \fallingdotseq \frac{D}{z_D{}^{0.5}}(z_D - z)^{0.5} \cdots\cdots(8)$$

そこで球体の反力が鉛直応力のみよりなるとして(4)，(7) および (8) 式を (5) 式に代入すれば次式をうる。

$$E = \frac{4.32\,\pi}{4}\eta\frac{D^{1.39}}{z_D{}^{0.70}}\int_0^{z_D}(z_D z^{0.88} - z^{1.88})^{0.70}dz$$

上式の積分のため $0\,z_D$ 間を 10 等分し，シンプソンの公式を適用して上式を近似積分すれば，貫入に必要なエネルギー E は次のように求められる。

$$E = 1.01\,\eta\,D^{1.39}z_D{}^{1.62} \cdots\cdots(9)$$

この試験法では球体貫入のために必要なエネルギー E は球体の落下によつて与えるが，落下によつて与えたエネルギーの全部が球体貫入のために使われるわけでないから，有効係数 k を乗じて貫入のために供給したエネルギーを表わすと，

$$E = k\cdot W(H + z_D) \cdots\cdots(10)$$

となる。ここで W は球体の重量 (kg)，H は落下前の球体最下端より地表までの距離 (cm) である。なお z_D (cm) は球の性質から次のように表わせる。

$$z_D = R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}} \cdots\cdots(11)$$

ここに R は球体の半径 (cm) である。(11) 式を (9)，(10) 式に代入し，(9)，(10) 式を等置して η について解くと，

$$\eta = \frac{k\cdot W\left(H + R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}}\right)}{1.01\,D^{1.39}\left(R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}}\right)^{1.62}} \cdots\cdots(12)$$

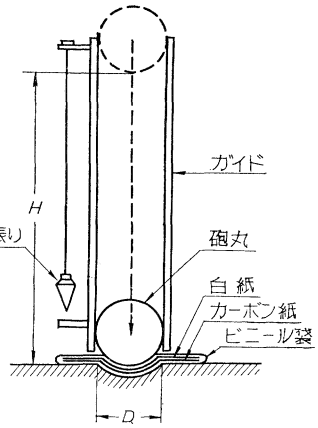
をうる。これが CBR η % と，くぼみの直径 D cm すなわちD値との関係を表わす一般式である。

3. 球体落下試験の実験

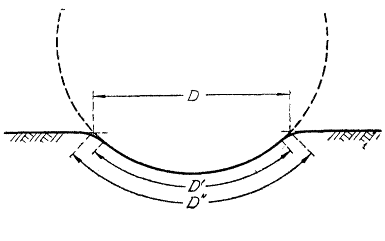
(1) 実験方法

球体を一定高さから予定の地点へ落下させるには **図―3** に示す，さげ振りつきガイドを用いた。くぼみの地表面における直径Dは直接測定してもよいが，その際には土は **図―4** に示すように，くぼみの縁が明瞭な線となつてくぼまないから，球面と地表面の交線を想定して，その想定円の直径をD値とせねばならない。この操作にともなう測定の不確実さを避け，かつ現場で迅速な測定を行うために著者らは次のようなD値記録法を工夫した。これによれば **図―3** に示すように，10 cm 角ぐらいの薄い記録用白紙と複写用カーボン紙をあわせて，両者を湿らないようにビニールの袋に入れたものを，測定地点に置き，軽くガイドの下端で押え，ついでガイドを鉛直に保つてガイド上端の一定高さより球体を落下させれば，記録用白紙には **図―5** に示すような球体によるカーボン紙の痕跡ができる。**図―5** で示した記録用白紙上の痕跡の

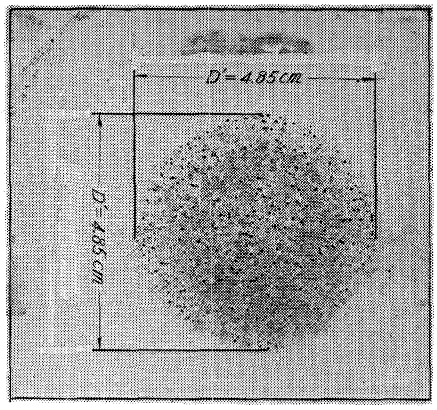
図―3 球体落下試験実施のための装置



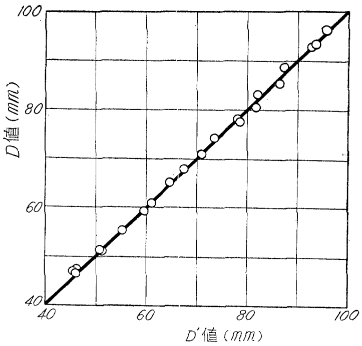
図―4 D値測定上の注意



図—5　記録用白紙上の球体の痕跡



図—6　D値と D' 値との実験的関係



直径 D' は実際は 図—4 に示す D' の部分 (<D'') の痕跡であつて，D' とDとを実測によつて比較した結果，両者は 図—6 に示すように実用上等しいとみてよいことがわかつた。ゆえに D の代りに痕跡の直径 D' を測定し，D' をDとすれば十分である。

なお球体落下試験の指数として，くぼみの深さを測ることも一応考えたが，ここで採用したD値の測定の方が容易で精度も高い。

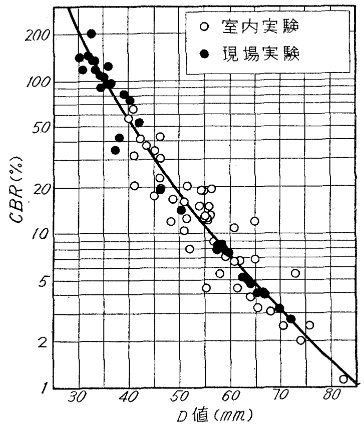
（2）実験結果

a）室内実験　JIS A 1211 に従い，CBR モールド中に突固めた供試体の CBR 値をまず供試体の表面 (JIS A 1211 に従つた正規の CBR 試験面) で求め，次に CBR モールドに入つたままの供試体の裏面に球体 (直径 9.04 cm，重量 4.07 kg，真ちゆう製) を 60 cm の高さから落下させてD値を求めた。この場合，供試体は4日水浸のものを使つたが，供試体の表と裏で CBR 値が異なると考えられるので，あらかじめ 46 個の供試体で4日水浸供試体の表面の CBR 値 $\eta(\%)$ と裏面の CBR 値 $\eta'(\%)$ の関係を実験的に調べた結果，この実験では

$$\eta'=0.949\,\eta^{0.938} \quad \cdots\cdots(13)$$

という関係があつた。ゆえにこの関係を利用して，供試体表面で得られた CBR を供試体裏面の CBR に換算し，その換算した裏面の CBR と裏面で直接求めたD値との関係 (実測数 50) を 図—7 の○印のようにプロットした。図—7 中の各○印の実測点の CBR 値とD値を (12) 式に代入して各 k 値を求め，それらを平均すると 0.46 となつた。

図—7　CBR とD値との関係 (現場および室内実験による) 球体の直径 9.04 cm，重量 4.07 kg，落下高 60 cm



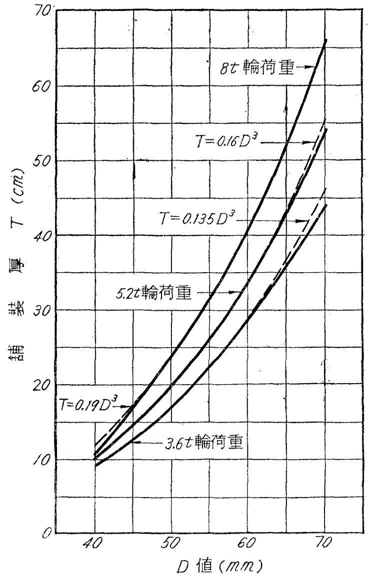
b）現場実験　比叡山ドライブウエイおよび大阪市庭窪浄水場で JIS A 1211 による現場 CBR 試験をおこなう機会を得たので a) の実験に用いたのと同じ球体を同じ方法で落してD値を求め CBR 値と比較した。すなわち現地で正規の CBR 試験を1個行うたびに，その付近で 4～6 個のD値を測り，その平均値を求めて CBR 測定値と対比した。その結果は 図—7 の●印となり，各実測値 (33点) の k 値の平均は 0.44 となり室内実験 (○印) の場合ときわめて近い値となつた。図—7 中に記入した実線は全実測点の k 値の平均 0.45 を (12) 式に代入して画いたものであるが，この理論曲線は実験結果をかなりよく代表することがわかる。なお $k=0.46$ または $k=0.44$ を代入した (12) 式の曲線を画くと，それらは 図—7 の関係曲線の上縁および下縁をとおり，ほぼ重なつてしまう。

なお 図—7 の室内実験結果 (○印) は現場実験結果 (●印) よりも実測点のバラツキが大きいのは，室内実験では供試体の裏面の CBR を表面の CBR から (13) 式を用いて推定し，しかも1個の測定 CBR と1個の測定D値を対応させたのに対し，現場実験では，1個の測定 CBR に対して，その付近の 4～6 個の測定D値の平均値を対応させえたことによると考えられる。

4. D値によるタワミ舗装厚設計公式

わが国で用いられている CBR よりタワミ舗装厚 T (cm) を求めるいわゆる CBR 設計曲線[3]において，CBR の代りに 図—7 の関係曲線で示されるD値を用いるならば，D値より舗装厚を求める設計曲線が 図—8 の実線の

図—8　D値から舗装厚を設計するための曲線



ように求められる。これらの実線の設計曲線は図—8の点線のような次式の関係で近似することができる。

$$T=aD^3 \quad \cdots\cdots(14)$$

ここに a は設計輪荷重できまる定数で，8 t 輪荷重の場合は $a=0.19$, 5.2 t 輪荷重の場合は $a=0.16$, 3.6 t 輪荷重の場合は $a=0.135$ とする。交通量を基準に考えれば，1日1車線交通量が 300 台以下のときは $a=0.135$, 300 台から 2 000 台までのときは $a=0.16$, 2 000 台以上のときは $a=0.19$ とすればよい[3]。

(14) 式を用いれば現場で D 値を求めて，すぐに必要舗装厚の算出ができる。この点，従来の数式化しにくい CBR 設計曲線を使用せねばならない CBR 試験よりもさらに利用しやすい性格を，そなえているといえよう。

ついで舗装厚を誤差 10% 以内の精度で設計するために必要なD値測定の誤差限界を考察してみる。現段階の舗装厚設計法では，この程度の誤差は十分許容されると考えられる。

(14) 式を微分すれば，

$$\frac{dT}{T}=3\frac{dD}{D} \quad \cdots\cdots(15)$$

をうる。ここで $dT/T=0.1$ とおくと，

$$dD=\frac{1}{30}D \quad \cdots\cdots(16)$$

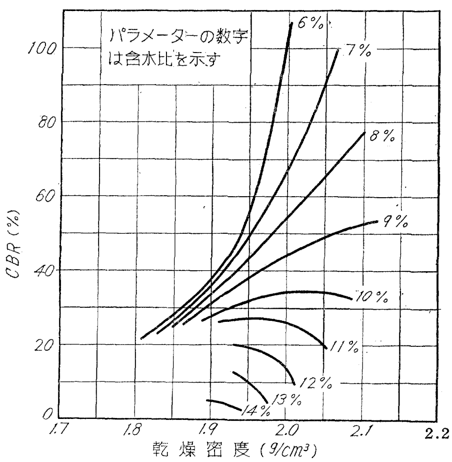
となる。これによると，$D=4$ cm のときはD値測定許容誤差 $\varDelta D_a=1.3$ mm, $D=7$ cm のときは $\varDelta D_a=2.3$ mm となり，この程度の測定は，慎重に行つた 4〜5 個の測定D値の平均を利用することによつて，十分達せられるから，この試験法がタワミ舗装厚設計のための路床土調査法として十分利用できることがわかる。

5. 球体落下試験による締固め施工管理およびトラフィカビリティ判定への応用

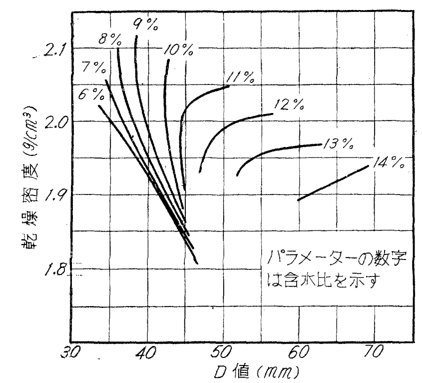
礫混り砂（改訂 P.R. 法による分類では A-1-b にあたり，キャサグランデによる分類では SW にあたる）を試料とした著者らの実験によると，CBR 値と乾燥密度との関係は含水比をパラメーターにとれば図—9に示すようになる。図—7 の CBR-D 関係曲線を用いて図—9 の CBR をそれに対応するD値に直すと図—10 に示す曲線群をうる。図—10 の特性は各試料土について直接実験すれば容易に求められるから，この特性図をあらかじめ締固め現場の土について求めておけば，従来のような現場乾燥密度の測定をせずに，球体落下試験によつて締固めの施工管理ができる。

図—10 において 10% 以上の含水比の場合には，締固め密度をあげると，かえつてD値が増し強度が減少するいわゆる過転圧現象[5]が生ずることがわかる。またもし締固め作業の施工管理を土の強度の指数として CBR 値

図—9　含水比をパラメーターとした CBR と乾燥密度との関係



図—10　含水比をパラメーターとした乾燥密度とD値との関係



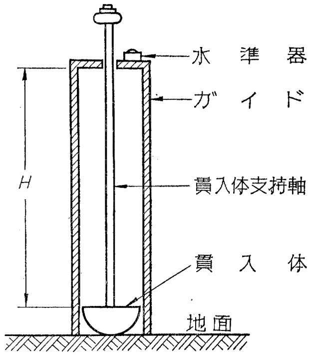
を目安として行う場合には，図—7 の関係を利用すれば十分目的が達せられる。

また本試験のD値と特定車両の走行の可否とを調べた結果，あるD値以上では確実に走行不可能となることが認められ，本試験法はトラフィカビリティ試験法としても有効なことが認められた。

9. 本測定装置の変形

以上の試験法では地面への貫入体として球体を用いた。球体を使用する利点は球は貫入する部分の形が方向によつて変わらないこと，各部分が一様に使われるので磨耗が一様であること，球体としてどこでも入手できる競技用砲丸が用いられること，器具が軽小で運搬の便なこと，操作が簡単で速かにでき，経費のかからないことなどである。しかし，この試験法は簡単な反面，球を正確な点へ落下させるにはガイドの保持に正確性を要し，また土の CBR が高いときは球が反動でとび，痕跡の境界が見にくくなる。この欠点を防止するため 図—11 のような貫入体にガイドをつけたものを試みた。これによれば土に貫入する部分は球面に限らず任意の回転体または正多角形を底面とする角錐とすることができる。

図—11 球体落下試験装置の変形



7. 結　論

現在の道路舗装の設計法のうち CBR 法はタワミ舗装厚設計法として広く信頼され，利用されているが，CBR 値を各路床土について求めるには多くの時間と労力を必要とし，また貴重なトラックを荷重として使わねばならないため，実際の利用が敬遠されがちである。しかしここに提案した新しい CBR 測定法は一定の重さ，一定の直径の球体を一定高さより地表に落下させ，そのとき生ずる地面のくぼみの直径から CBR 値を推定するもので，操作が簡単であつて一地点の測定には1人の測定者で1分間くらいで十分であり，経費もやすく，その原理についての理論は実験値とよく一致する。しかもD値からタワミ舗装厚を直接算出できる，きわめて簡単な舗装厚設計公式も見出すことができた。

また本試験法は締固め作業の施工管理や，トラフィカビリティの推定にも有効に利用でき，道路工事の合理化に大いに役立つであろうと思う。

なお現在はまだ実験例が少ないが，今後測定資料の集積を増せば，CBR-D 関係曲線の性格も判然とし，一そう信頼できる試験法となるであろう。

終りに，本試験法のトラフィカビリティ試験への応用については神戸大学　谷本喜一助教授の照査を，室内実験には京都大学　山本順一助手，新見吉和，玉置　享両大学院学生の協力を，また現場実験には京阪電鉄　志茂山保夫，昌子雅樹両氏の援助をいただいたことを記し，ここに各位に謝意を表するものである。

参　考　文　献

1) Road Research Laboratory (D.S.I.R.) : Soil Mechanics for Road Engineers. Her Majesty's Stationary Office, London, 1952, pp. 397～438.
2) 竹下春見：アスファルト系舗装の厚さの設計，土と基礎，第16号，1956, pp. 28～32.
3) 竹下春見：路床土支持力比試験方法（JIS A 1211），土質試験法解説（第1集），土質工学会，1955, pp. 95～122.
4) J.O. Osterberg,: General Discussion for Symposium on Load Tests of Bearing Capacity of Soils, 50th Annual Meeting A.S.T.M., 1947, Special Technical Publication No. 79, pp. 128～139.
5) S. Murayama, and K. Ueshita : Soil Moisture Conditions and their Effects on the Engineering Properties of Compacted Soils. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University, Vol. 19, No. 4, 1957, pp. 325～350.

学会備付年報，要覧等（国内）一覧（13）

昭．33．7～12．間に寄贈または交換により受領の分

1．官公庁関係

○運輸技術研究所年報　昭32年度

2．学校関係

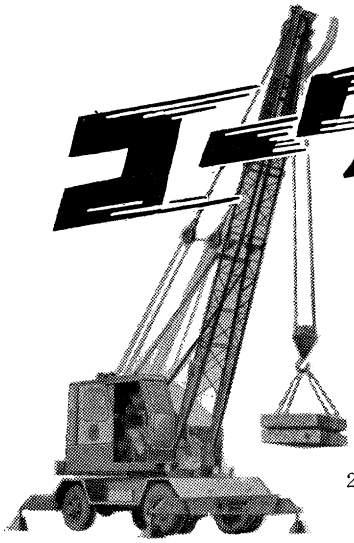
○東大工学部付属綜合試験所年報　第17年第1号

3．官公庁，学校関係以外

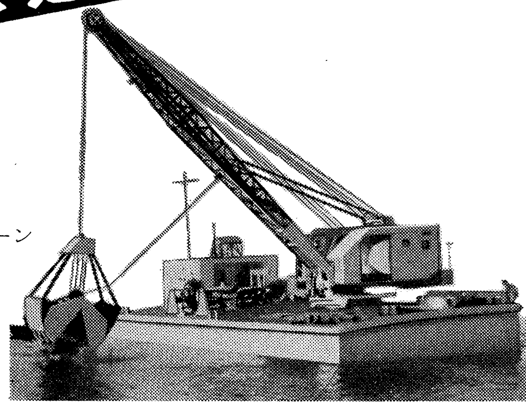
○港湾荷役機械化協会要覧 1958　○電源開発KK 現況と展望 1958　○日本原子力研究所年報　昭32年度　○保線年報 1958（昭．32．4．～ 33．3．）（日本保線協会）

付記　学会備付年報，要覧等（国内）一覧（12）は **43—7・p. 4** に掲載

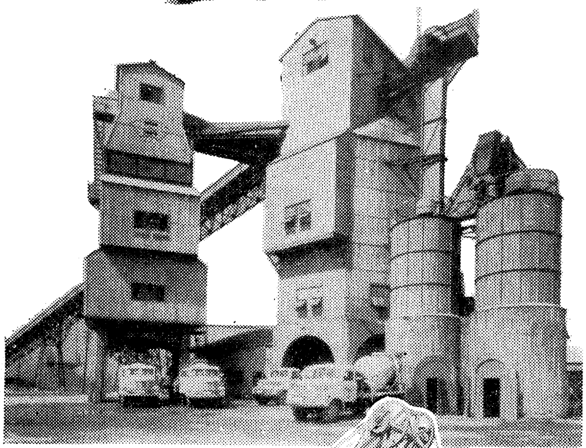
コーリングの土木建設機械



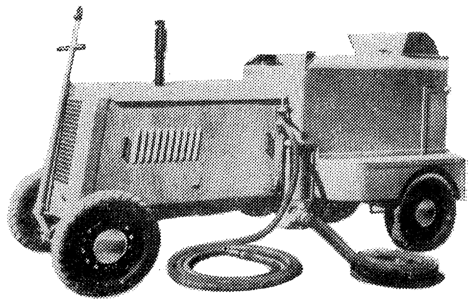
205 型クルーザークレーン



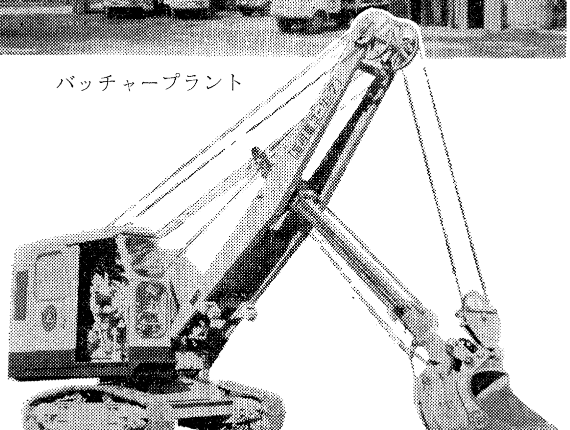
605 型ドレッヂャー



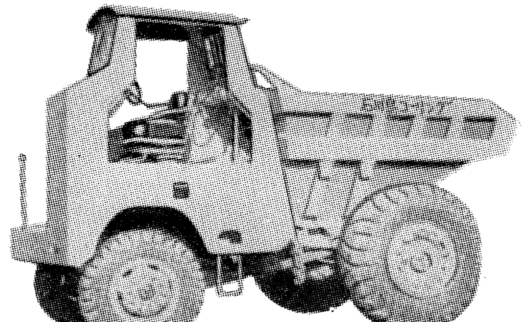
バッチャープラント



50 型マドジャック



205 型パワーショベル



60 WS 型ダンプター

KOEHRING HEAVY DUTY

石川島コーリング株式會社

営業所　東京都中央区日本橋通3―2(広瀬ビル)TEL(27)5675―7
大阪・九州・北海道・仙台・名古屋・広島