

## 論文

### 路盤の支持力に及ぼす碎石粒度の影響

#### Effect of Crushed Stone Grain Size on Bearing Capacity of Subbase Course

今井忠男<sup>1</sup>、杉本文男<sup>2</sup>、俵藤尋<sup>3</sup>、近間絵理<sup>3</sup>

IMAI, T., SUGIMOTO, F., HYODO, J. and CHIKAMA, E.

#### 1. はじめに

道路の舗装規格は、高級舗装と簡易舗装に大別されるが、高速道路や主要な国道を除くほとんどの一般道では、簡易舗装が採用されている。高速道路など高級舗装道においては、たわみや陥没などの変状が生じ難い上に、補修が迅速に行われているので、安全な路面環境が保たれている。しかし、一般道においては路面に変状箇所が多く、安全上問題のある道路が多くみられる。

舗装道路に変状が発生する要因には、(1)アスファルト層の摩耗、(2)路盤の破壊、(3)路床の変形などが考えられるが、たわみや陥没など道路の大きな変状の原因には、路盤や路床の支持力不足が疑われる。すなわち、これらの変状に関しては、路面の支持力を確保するための舗装の設計あるいは施工に問題があったと考えられる。

舗装の設計においては、路盤の厚みと路盤材の強度が重要となる。これまで、路盤材に関する規格には、修正 CBR 値が用いられてきたが、この試験値に岩石力学的な理論背景は少なく、学問的に十分な検証がなされていない。このため、道路の変状発生の原因として、路盤材の規格についても検証する必要がある。以前より著者ら<sup>1)</sup>は、岩石の疲労破壊特性および点載荷強度特性を用いて路盤材の破壊限界を理論的に考察し、路盤の安定的な支持力に関する理論式を提案してきたが、いまだこの理論は、十分に実証されてはいない。

本研究では、CBR 試験を用いて著者らの理論を実証し、さらに CBR 値の岩石力学的意味を検証した。具体的には、路盤材として粒度が異なる 5 種類の碎石を用いて CBR 試験を行い、CBR 値および路盤の破壊点を求めた。これらの実験値と理論式より求めた限界支持力(破壊点)とを比較検討することで、合理的な路盤材の評価基準について提案した。

---

1. 碎石研究会正会員・博士(工学)・秋田大学工学資源学部地球資源学科 准教授

2. 碎石研究会副会長・工学博士・秋田大学工学資源学部地球資源学科 教授

3. 秋田大学工学資源学部地球資源学科 学生

表 1 路盤材としての碎石の規格<sup>2)</sup>

路 盤	修正CBR	使用碎石
上 層	80 以上	粒度調整
下 層	30 以上	単粒度, クラッシュラン

表 2 セメント安定処理材の規格<sup>2)</sup>

路 盤	修正CBR	一軸圧縮強度	養生日数
上 層	20 以上	3 MN/m <sup>2</sup>	7日
下 層	10 以上	1 MN/m <sup>2</sup>	7日

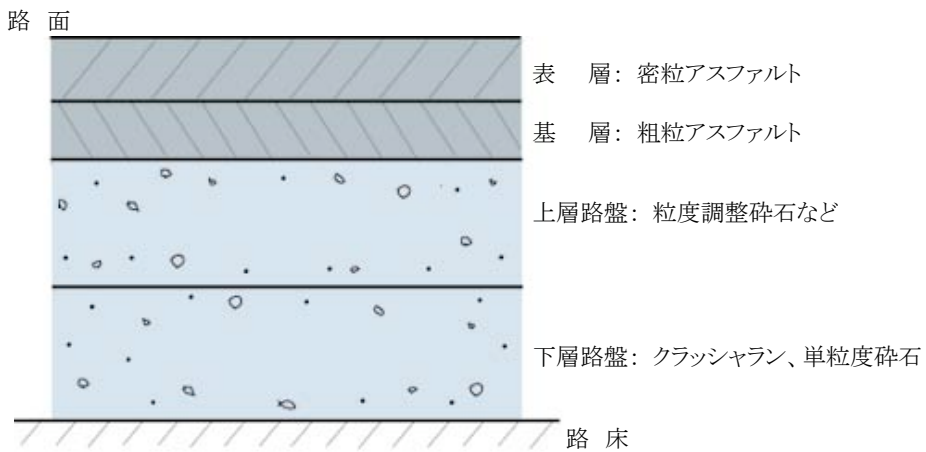


図 1 高級舗装道路の断面図

## 2. 路盤の設計と路盤材の規格

アスファルトによる高級舗装の断面を図 1 に示す。図のように高級舗装では、アスファルト層が表層および基層の 2 層、その下の路盤も上層と下層の 2 層ある。特に上層路盤では、粒度調整碎石あるいはセメント安定処理材料等が用いられ、堅固な構造となっている。これに対し、簡易舗装では、アスファルト層は基層のみで、路盤もクラッシュランや単粒度碎石などを用いて 1 層で構成されているため、路盤の設計によっては変状が生じ易い構造となっている。

表 1 に高級舗装における路盤材用碎石の規格 (修正 CBR 値) を示す<sup>2)</sup>。簡易舗装の路盤には、高級舗装の下層路盤の規格と同程度の値が用いられる。これに対し、表 2 のようにセメント安定処理材では、修正 CBR 値と共に、養生 7 日後の一軸圧縮強度を規格としている<sup>2)</sup>。地盤の支持力は、内部摩擦角を無視するとプラントルの式から剪断強度の 5 倍程度である。経験的に地盤材料の剪断強度は圧縮強度の 1/5 程度であることから、この一軸圧縮強度が路盤の支持力として期待されている値といえる。



写真 1 路盤表面

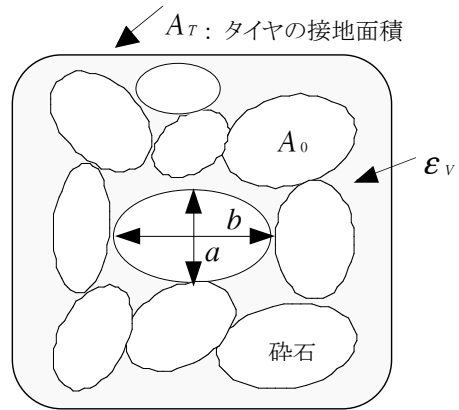


図 2 砕石を楕円とした路盤表面モデル

路盤の設計において砕石に問題があるならば、修正 CBR 試験において規格値が低いからあるいは試験法に問題点があることなどが考えられる。よって、路盤の支持力と CBR 値について以下で詳細に検討する。

### 3. 路盤の支持力

著者らは、次のようなモデルに基づいて、路盤材の平均破壊強さを導いた<sup>1)</sup>。写真 1 に単粒度砕石の路盤面を示す。この路盤面に自動車の荷重(輪荷重)がタイヤ接地面から伝わり、ある輪荷重に達したとき、路盤材は破壊する。このときの、単位面積あたりの輪荷重を路盤材の平均破壊強さとする。この荷重強さで路盤が急激に支持力を失うわけではないが、上部で破壊された砕石は下部の空隙へ落下し、路盤の厚みは徐々に低下する<sup>1)</sup>。このように路盤材が繰返し破壊され続けると、路盤面が低下し路面にはたわみや陥没が現れると考えられる。よって、本研究では、この路盤材の平均破壊強さをもって、路盤の破壊点と定義する。

図 2 は、写真 1 の砕石を短径  $a$ 、長径  $b$  の楕円体とし、これが水平に並んでいると仮定した路盤面に、車のタイヤが面積  $A_T$  で接地している場合を示している。タイヤの接地面積  $A_T$  は、輪荷重  $F_T$  を用いて、経験的に次式で示される<sup>3)</sup>。なお、ここでの単位は SI 単位系とする。

$$A_T = \pi \left( 0.12 + \frac{F_T}{1000} \right)^2 \cdots (1)$$

よって、タイヤの接地面から路面に作用する単位面積あたりの輪荷重強さ  $P$  は次式となる。

$$P = F_T / A_T \cdots (2)$$

ただし、アスファルト層は薄く弱いため、路盤上面には、輪荷重とほぼ等しい荷重が作用すると仮定する。

また、図 2 中の面積空隙率  $\epsilon_A$  は、路盤内の体積空隙率  $\epsilon_v$  によって、次式で与えられる<sup>4)</sup>。

$$\varepsilon_A = \frac{(16\varepsilon_V - 1)}{13} \cdots (3)$$

なお、碎石の体積空隙率  $\varepsilon_V$  は実績率  $G$  と次式の関係にあることから、 $\varepsilon_A$  は  $G$  の関数となる。

$$G = (1 - \varepsilon_V) \times 100 \cdots (4)$$

さらに、楕円体の長径方向の断面積  $A_0$  は次式となる。

$$A_0 = \frac{1}{r} \pi \bar{a}^2 \cdots (5)$$

$$\bar{r} = \bar{a} / \bar{b}$$

ただし、 $\bar{a}$  および  $\bar{b}$  はそれぞれ楕円の短径および長径の平均値、 $\bar{r}$  は楕円度の平均値である。

次に、接地面積  $A_T$  内の楕円粒子の個数  $n$  を次式で定義する。

$$n = \frac{A_T(1 - \varepsilon_A)}{A_0}$$

$$= \frac{\bar{r} A_T(1 - \varepsilon_A)}{\pi \bar{a}^2} \cdots (6)$$

ここで、路盤内で碎石が横方向の拘束を受けないと仮定すると、面積  $A_T$  内における路盤の破壊荷重  $S_T$  は、碎石の平均点載荷破壊荷重  $\bar{S}_0$  と個数  $n$  で決まる。

$$S_T = n \cdot \bar{S}_0 \cdots (7)$$

上式の平均点載荷破壊荷重  $\bar{S}_0$  は、平均短径の大きさで決まる値であり、次式で表せる<sup>1)</sup>。

$$\bar{S}_0 = \alpha \cdot \bar{a} \cdots (8)$$

ただし、 $\alpha$  を碎石の点載荷強度特性とする。すなわち、路盤の破壊荷重は平均短径の路盤材の破壊荷重とその個数によって決まる。したがって、式(7)に式(6)を代入すると、次式が求まる。

$$S_T = \frac{\alpha \cdot \bar{r} A_T(1 - \varepsilon_A)}{\pi \bar{a}} \cdots (9)$$

さらに、路盤の単位面積あたりの破壊点を  $q_c$  とすると、以下の式となる。

$$q_c = S_T / A_T$$

$$= \frac{\alpha \cdot \bar{r}(1 - \varepsilon_A)}{\pi \bar{a}} \cdots (10)$$

この路盤の破壊点は、碎石の平均短径  $\bar{a}$ 、平均楕円度  $\bar{r}$ 、実績率  $G$  および点載荷強度特性  $\alpha$  によって、理論的に決まる値である。

また、安全率を  $f$  とすると路盤の安全支持力  $q_f$  は次式となる。

$$q_f = f \cdot P \cdots (11)$$

したがって、次式が路盤の安定条件となる。

$$q_c \geq q_f \cdots (12)$$

上述の理論の妥当性および CBR 値との関係を調べるため、以下の実験を行った。

#### 4. 試料砕石の物理特性

##### 4. 1 試料岩石の基礎物性および試料砕石

本研究で用いた砕石は、秋田県産の安山岩である。この物性を表 3 に示す。表より本試料岩石は、圧縮強度が十分大きく硬岩に分類され、道路用砕石の規格値(比重>2.45、吸水率<3.0%)<sup>5)</sup>を満たしており、優良な砕石であることがわかる。本実験では、この岩石の粒度を JIS(A5001)規格<sup>5)</sup>に基づいて 5 種類に調合し、CBR 試験に供した。5 種類の砕石を写真 2(a)~(e)に示す。S-20 および S-13 は単粒度砕石であり、それぞれ粒度が 13-20mm、5-13mm を示している。C-40 は 40mm 以下のクラッシュランで、M-40 は 40mm 以下の砕石を JIS 規格の粒度分布で調合した粒度調整砕石である。なお、C-40(1)に比較し細粒の砕石を増やしたものが C-40(2)であり、クラッシュランの粒度分布に多少の差をつけた。

図 3 に各砕石の粒度分布と平均粒径を示す。クラッシュランおよび粒度調整砕石は、ふるいの 50%通過粒度を平均粒径として、図から読み取った。また、単粒度砕石の平均粒径は単純平均値とした。この結果、S-20 以外の砕石では、平均粒径は近い値を示している。この研究では、

表 3 試料砕石の基礎物性値

岩種	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
安山岩	135	15.3	2.65	1.12

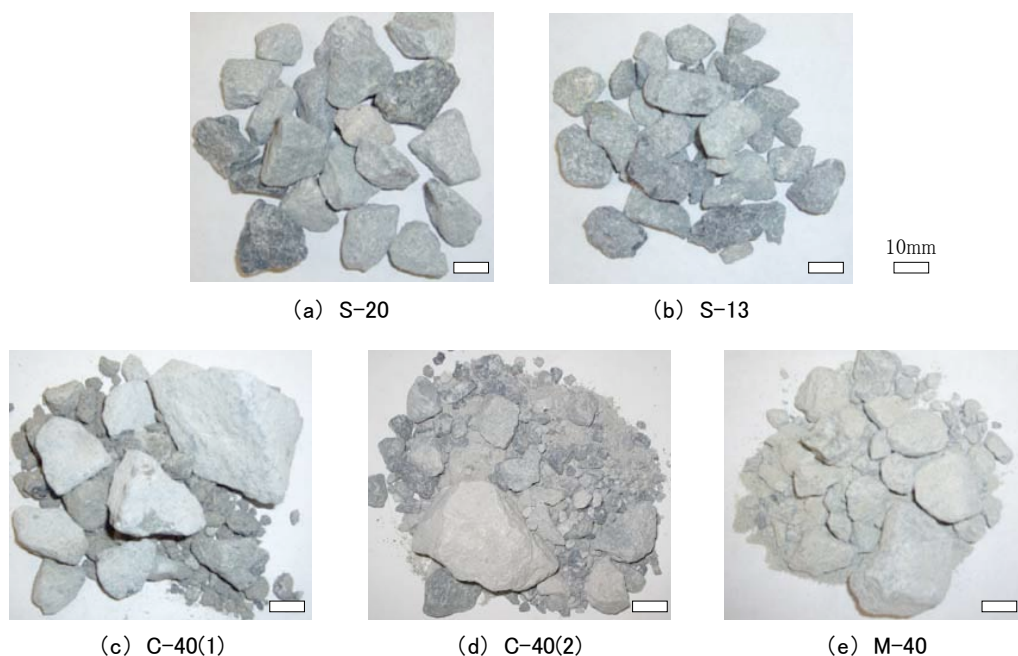


写真 2 粒度別の砕石試料

ふるい分けによる平均粒度を短径の平均値  $\bar{a}$  とする。

#### 4.2 砕石の楕円度および点载荷強度

この砕石を楕円体と見なし、短径と長径をノギスによって計測した結果を図 4 に示す。データにバラツキはあるものの、粒度の小さいものから大きいものまで、短径と長径は良い相関を示し、この砕石の平均楕円度  $\bar{r}$  は 0.345 程度であることがわかった。

次に、これら砕石を用い、短径方向に点载荷試験を行った。その結果を図 5 に示す。砕石の短径が大きくなるにしたがい、破壊荷重は比例的に増大し、この砕石の点载荷強度特性  $\alpha$  は 0.398 MN/m であることがわかった。

#### 4.3 突固めと実績率

砕石は突固めると実績率が増加するため、砕石ごとに突固め回数と実績率との関係を調べた。突固め方法は JIS(A1210)規格<sup>6)</sup> に基づいて、直径 150mm のモールドと質量 2.5kg のランマーを用い、突固め回数を 17、42、92 回の 3 段階とし、砕石を 3 層に分けて突固めた。ここで、実績率  $G$  は次式によって求めた。

$$G = \frac{M}{V \cdot \rho} \times 100 \quad \dots (13)$$

ただし、 $M$  は容器中の砕石の質量、 $V$  は容器の容積、 $\rho$  は岩石の密度である。

この結果を図 6 に示す。図より、S-20 および S-13 の単粒度砕石の実績率は、突固め回数に関わらず一致している。このことは、単粒子径の球を充填した場合、粒径に関わらず、最密充填 ( $G=0.74\%$ ) 以上に充填率(実績率)が上がらないことと同様のことを示している。粒子は細粒のも

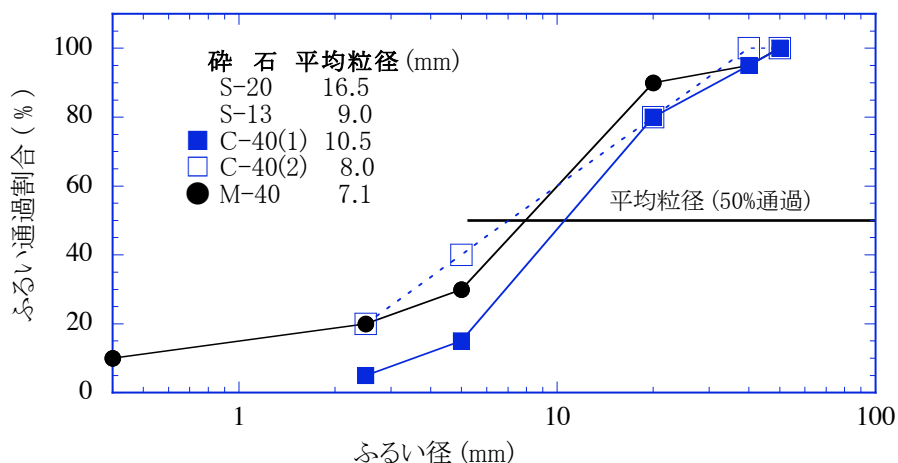


図 3 試料砕石の粒度分布

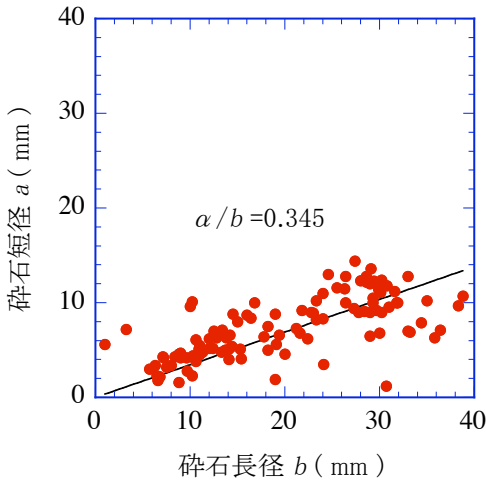


図 4 試料砕石の楕円度

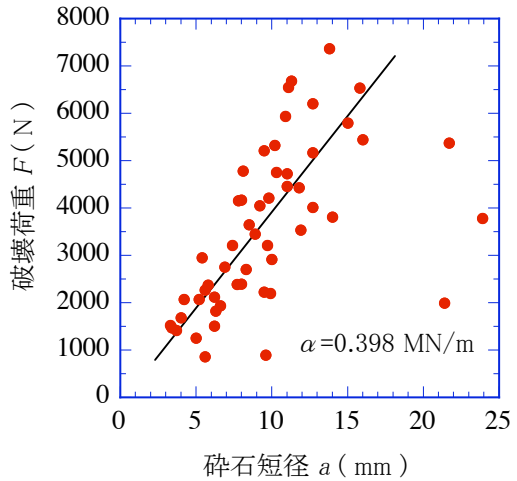


図 5 試料砕石の破壊荷重

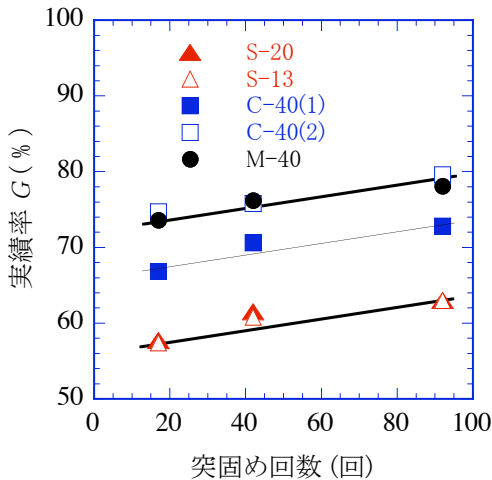


図 6 突固めによる実績率の変化

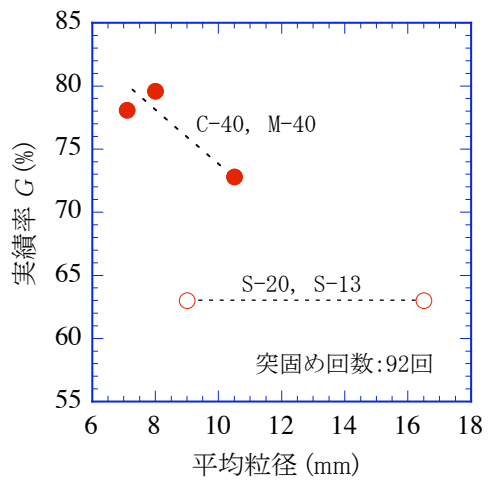


図 7 平均粒径と実績率の関係

のまで幅広く分布した方が、実績率は増加することが知られており<sup>4)</sup>、単粒度砕石より、クラッシュランの方が実績率は大きいことがわかる。とくに、C-40(1)より細粒が多い C-40(2)の方が実績率は大きいことがわかった。また、粒度調整砕石の実績率は C-40(2)と同程度であることがわかった。これらの結果を平均粒径でまとめたものを図 7 に示す。図中の実績率は 92 回突固めの値である。図より、この試料岩石の実績率は 80%程度が最大値と思われる。

## 5. CBR 試験における路盤の破壊点

### 5.1 CBR 試験法

CBR 試験は JIS(A1211)規格<sup>7)</sup>に基づいて行った。はじめに、4.3 節の要領にしたがい、モールド内で砕石を所定の回数で突固め、このモールド内の路盤面を直径 50mm のピストンで貫入

させて、荷重強さ-貫入量線図を求めた。この線図より、2.5mm 貫入量のときの荷重強さ(評価値)を求め、この値を標準荷重強さ  $6.9 \text{ MN/m}^2$  で割ったものを、CBR 値とした。実験は、突固め回数 17、42、92 回の試料について、それぞれ行った。

道路用砕石の規格である修正 CBR 試験<sup>3)</sup>では、単位体積重量が最大となる最適な含水率を求め、この含水状態で CBR 試験を行い、突固め回数 17、42、92 回ごとの単位体積重量-CBR 線図を作成する。この線図から、92 回の単位体積重量に対し 95%となる CBR 値を算定し、修正 CBR 値としている。したがって、修正 CBR は 92 回の CBR 値より必ず小さい値となる。単位体積重量と密度の比が実績率であることから、本実験では、砕石を含水させて実績率を上げることがせず、最も実績率の低い乾燥状態において CBR 試験を行った。

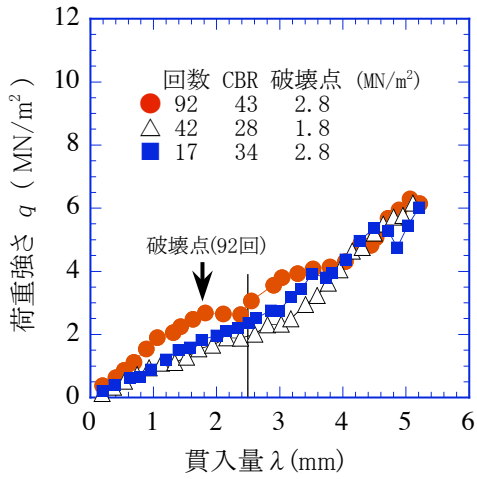
## 5.2 貫入試験結果

図 8(a)~(e)にそれぞれの砕石粒度における荷重強さ-貫入量線図を示す。図中には、突固め回数 17、42、92 回の状態におけるそれぞれの線図を示している。

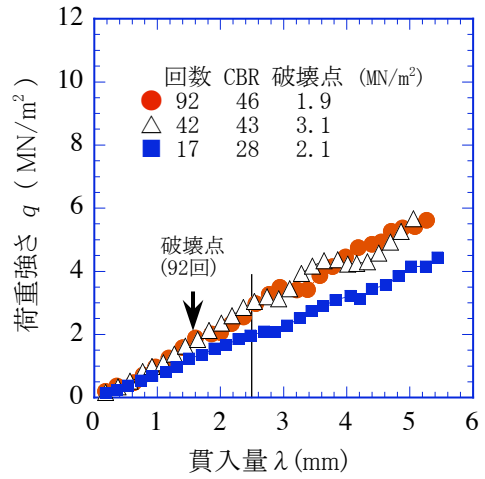
この試験結果における、路盤の破壊点  $q_c'$  を次のように定義する。この線図の多くは、貫入量に対して荷重強さは直線的には増加せず、増減を繰返しながら増加する傾向にある。荷重強さが減少する原因は、砕石間のズレあるいは砕石の破壊が考えられる。しかし、大きな衝撃荷重による 92 回の突固め後に、低い荷重で砕石がズレるとは考えにくい。さらに、貫入試験後の砕石の粒度がより小さくなっている傾向から、荷重強さの減少は、砕石の破壊が主な原因であると推察される。よって、荷重強さの最初の減少点を、路盤の破壊点  $q_c'$  と定義し、実験による路盤の破壊点と呼ぶこととする。この荷重を超えると路盤の破壊が進行すると考えられる。

上述の定義より、図中に突固め回数 92 回の線図における破壊点を矢印で示した。また、CBR の評価値を定める貫入量 2.5mm を縦線で示し、破壊点と CBR の評価値を比較した。図より、突固め回数 92 回の場合、S-20、S-13、C-40(1)の線図では、貫入量 2.5mm より前に破壊点があり、CBR の評価値の方が大きくなっている。すなわち、これらの砕石では、いずれも CBR 値が 40 を超えているが、破壊点を超えたところで CBR を評価しているため、この値は不適切である。これらに比較し、C-40(2)の線図では、貫入量 2.5mm の直後に破壊点があり、さらに M-40 の線図には破壊点は見られない。このような線図における CBR 値は、路盤の評価基準として有効であるが、一般的に、路盤材の破壊を無視した CBR 評価法には問題が多いと考えられる。なお、M-40 の線図に破壊点が見られない原因は、実績率が高く砕石間の拘束力が大きくなり、点載荷破壊荷重が増加したためと考えられる。

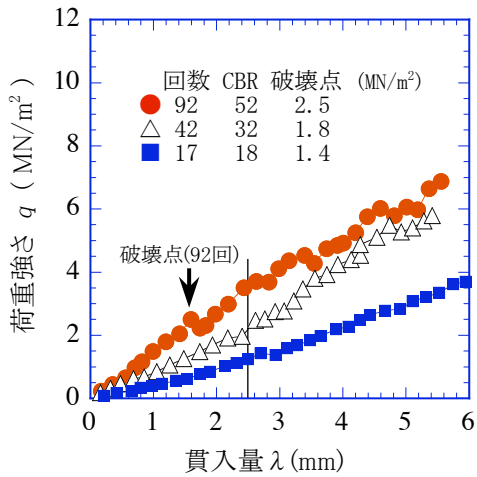




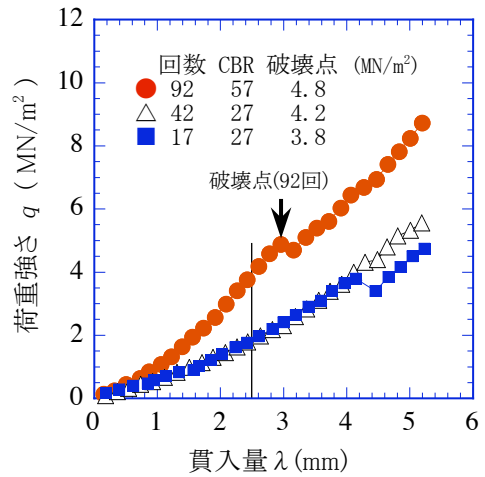
(a) S-20



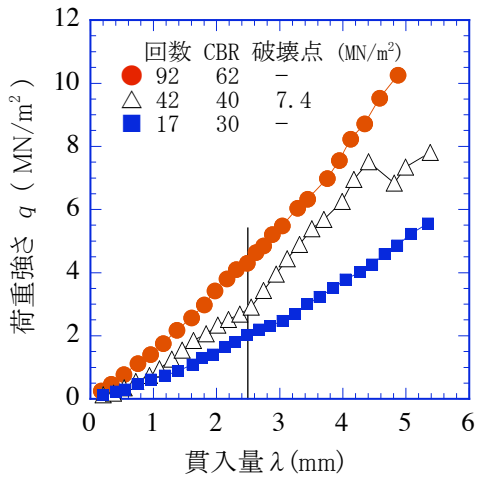
(b) S-13



(c) C-40(1)



(d) C-40(2)



(e) M-40

図 8 貫入試験結果

### 5.3 路盤の破壊点および CBR 値と実績率との関係

図 8 および図 6 の結果から、CBR 値と実績率との関係を図 9 に示す。図より、単粒度砕石とその他の粒度分布をもつ砕石とは、実績率が大きく異なるため、それぞれ別のデータ群として示した。幅広い粒度分布をもつ C-40 および M-40 では、実績率の増加にしたがい CBR 値がほぼ直線的に増加することがわかった。これに対し、単粒度砕石ではデータのバラツキが大きく、実績率と CBR 値の相関はあまりよくない。前図と同様に、図 10 は破壊点と実績率との関係をまとめたものである。図中の破壊点は、貫入試験からの実験値と式(10)による理論値の 2 つを示した。理論値の算定には、4 章で求めた物性値を用いた。なお、M-40 には荷重の増減点が 1 箇所しか見られなかったため、データから除いた。図より、単粒度砕石では、実績率に関わらず、破壊点はあまり変化しないことがわかる。これに対し、クラッシュランでは、実績率の増加にしたがい破壊点がほぼ直線的に増加することがわかった。また、破壊点の実験値と理論値は、ほぼ対応する結果となった。

以上の結果から、路盤の支持力を増加させるには、幅広い粒度分布の砕石を用いて、実績率を増加させることが効果的であることがわかった。

### 5.4 路盤の支持力の評価法

図 11 に実験による路盤の破壊点と CBR 値との関係を示す。図中のプロット点は、突固め回数 92 回において、破壊点が CBR 評価点より大きいグループ I (C-40(2))と小さいグループ II (S-20, S-13, C-40(1))とに分けて示している。グループ I と II では傾向が異なり、グループ I に比較しグループ II は、破壊点に対して大きな CBR 値を算定していることがわかる。すなわち、グループ II の CBR 値は、実際の路盤の支持力を過大に評価していると考えられることから、CBR 試験法には再考の余地があると思われる。

図 12 は路盤の破壊点について実験値と理論値の関係を示したものである。両者はある程度比例しており、その比がほぼ 1 であることから、理論式は概ね妥当であることがわかった。したがって、路盤の支持力は、砕石の楕円度、粒度分布および点載荷強度特性によって算定できることがわかった。すなわち、楕円度と点載荷強度特性は砕石に固有な値なので、砕石の粒度分布を調整することで、路盤の支持力を増加できることがわかった。

次に、路盤面にはどの程度の支持力が必要となるか算定し、路盤の評価基準値について検討する。舗装の設計にあたっては、交通量に応じて輪荷重の規定がある<sup>3)</sup>。いま、後輪 1 本あたりの規定値を 78.5kN(約 8ton)とすると、式(3)および式(4)より、輪荷重強さ  $P$  は  $0.634\text{MN}/\text{m}^2$  と算定される。安全率  $f$  を 3 と仮定すると、路盤の安全支持力  $q_f$  は  $1.9\text{MN}/\text{m}^2$  となる。この値は、表 2 のセメント安定処理材の規格における下層の圧縮強度の約 2 倍である。この値を路盤評

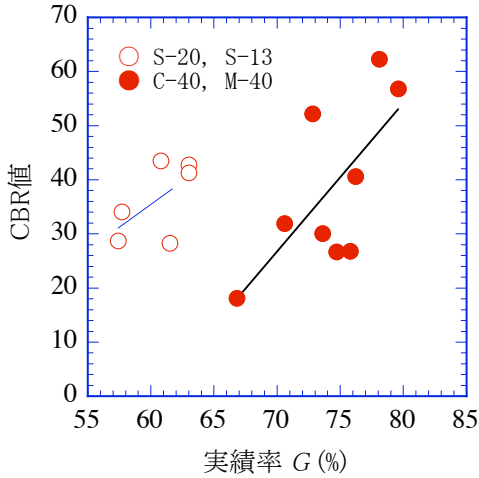


図 9 CBR 値との実績率との関係

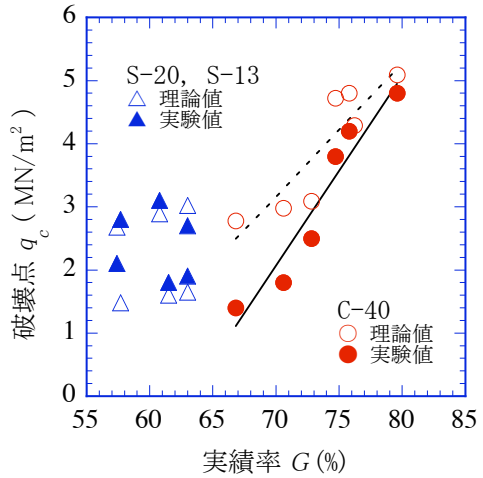


図 10 破壊点と実績率との関係

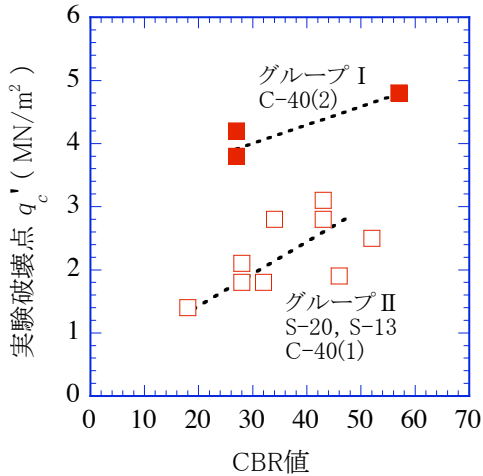


図 11 路盤の破壊点と CBR 値との関係

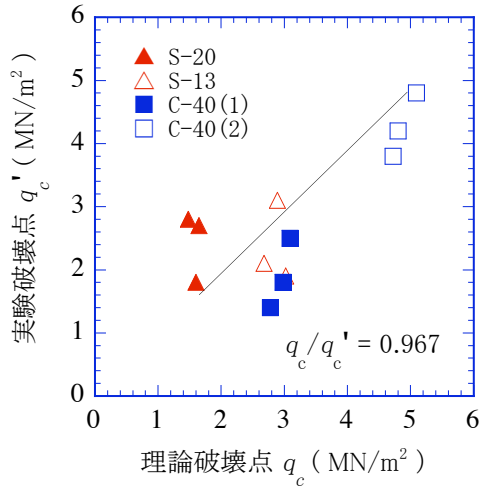


図 12 路盤の破壊点の実験値と理論値

価の基準値とし、図 12 を用いて本砕石を評価すると、理論値では、S-20 砕石が不適合となり、実験値においては、S-20、S-13、C-40(1)の砕石が基準値ギリギリの範囲にあることがわかった。

このように、輪荷重の規定値に応じた支持力の基準値を定め、路盤の破壊点を評価する方法が、道路用砕石の規格として妥当と思われる。

## 6. まとめ

本研究では、CBR 試験を用いて著者らの理論式を実証し、さらに CBR 値の岩石力学的意味を検証した。これらの結果を要約すると以下のようなものである。

(1) 単粒度砕石や実績率の低いクラッシュラン砕石では、CBR の基準値である 2.5mm 貫入前に、路盤が破壊することがわかった。このため、これらの砕石の CBR 値は過大に評価されていることになる。

(2) CBR 試験における路盤の破壊点は、理論式の値と概ね一致することが実証された。したがって、路盤の限界支持力は、理論的に砕石の楕円度、実績率、平均粒度および点荷強度特性によって算定できることがわかった。

(3) 粒度幅の広いクラッシュラン砕石は、粒度調整砕石に近い支持力特性をもつことが明らかになった。

今後は、クラッシュラン砕石の粒度分布と支持力との関係をより詳細に解明することで、クラッシュランによる容易に質の高い路盤材が供給できる可能性があると思われる。

### 引用文献

- 1) 鴨志田直人・今井忠男・杉本文男・山下秀・大塚尚寛:岩石の疲労破壊を考慮した路盤の設計、骨材資源、No.130、pp.76-82、2001.
- 2) 土木工学会編:アスファルト舗装便覧、土木工学会、pp.100-200、1965.
- 3) 内田一郎・鬼塚克忠:道路工学、森北出版、pp.137-158、2003.
- 4) 奥山喜久夫・増田弘昭・諸岡成治:微粒子工学、オーム社、pp.42-47、1992.
- 5) 日本工業規格:道路用砕石、JIS A 5001、日本規格協会、1995.
- 6) 日本工業規格:突固めによる土の締固め試験方法、JIS A 1210、日本規格協会、1999.
- 7) 日本工業規格:CBR 試験方法、JIS A 1211、日本規格協会、1998.