

三浦哲彦  
村田秀一 共著  
原田 敦

## “含水比変動に伴う破碎性土のせん断特性変化”への討議

(土木学会論文報告集 第336号・1983年8月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

福本 武明 (立命館大学)

By Takeaki FUKUMOTO

本論文は、破碎性土の含水比増加に伴うせん断強度低下の現象について毛管結合力・摩擦・セメンテーション・粒子破碎の4つの効果を取り上げて検討し、特に粒子破碎効果の影響が大きいことを具体的に示しており、興味深く読ませていただきました。しかし、討議者は、文中で使われている粒子破碎量の定義の仕方に疑問を感じており、指標という性格上、一般性のある統一した表現法が望まれている時機でもあるので、あえて以下の点をお尋ねし、著者らのご意見をお聞かせ願いたいと思う次第です。

(1) 著者らは粒子破碎を数量化するための尺度として試料の表面積  $S(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$  を用い、その増加つまり破碎前後の  $S$  の差  $\Delta S(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$  で粒子破碎量を定義している。 $S$  は次の関係から求めている。

$$S = S_w \times \rho_a \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $S_w$  は比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )、 $\rho_a$  は供試体の乾燥密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) である。さて、式(5)中の  $S_w$  は粒子破碎がない限り一定であるのに対し、 $\rho_a$  はせん断過程で刻々と変化する量である。したがって両者の積  $S$  とその差である粒子破碎量  $\Delta S$  は、当然のことながら仮にせん断中に粒子破碎が起こらない場合でも刻々と変化するようになるし、粒子破碎を伴う場合には一体どれだけが粒子破碎の大ききなのか判然としない難点がある。このように密度変化の項を含むような粒子破碎量の定義は、とりわけ粒子破碎とそれに伴う密度増加(あるいは透水性低下)等との関係を究明しようとする立場の者にとっては受け入れられないものである。要するに、式(5)に代わって土粒子比重  $G_s$  と水の密度  $\rho_w(\text{g}/\text{cm}^3)$  による通常の表面積  $S_v(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ 、すなわち

$$S_v = S_w \times G_s \times \rho_w \dots \dots \dots (9)$$

を用いたのではないのか。これならば、粒子破碎が起こらない限り試料の表面積は不変という認識とも一致する。

(2) 次に表面積の差  $\Delta S$  を採ることについての疑

問であるが、Moavenzadeh ら<sup>23)</sup>はアスファルト混合物の骨材破碎に関する研究の中で  $\Delta S$  が適切な尺度でないとして、おおよそ次のような主旨のことを述べている。すなわち、初期比表面積  $S_{w0} = 100 \text{ cm}^2/\text{g}$  の材料が破碎後に  $\Delta S_w = 100 \text{ cm}^2/\text{g}$  の増加があるとき、 $S_{w0} = 1000 \text{ cm}^2/\text{g}$  の材料が  $\Delta S_w = 100 \text{ cm}^2/\text{g}$  増加するときでは細粒化 (degradation) の程度が同等とは考えられず、前者は表面積において100% (または2倍) もの増加なのに後者は10% (または1.1倍) しか増加していないことになるから、 $\Delta S_w$  よりむしろ何% (または何倍) という表現の方がよく、こうすることによって材料の比重の違いによる表面積値の補正も必要でなくなる。

ところで、著者らが差  $\Delta S$  を選んだ背景には Rittinger の粉碎理論があり、「粉碎に要する仕事  $W$  は材料の表面積の増加  $\Delta S$  に正比例する」という考え方を支持してのことと思われる<sup>15)</sup>。しかし粉碎理論には、周知のように他にも Kick, Bond, あるいは田中の理論などがある<sup>24)</sup>。これらの粉碎理論は、表面積で整理してみると結局、初期表面積  $S_{w0}$  と粉碎による表面積増加率 (または比) との2要素から組み立てられていることがわかる。この解釈からすれば、Rittinger の理論も  $\Delta S_v = S_{v0} \times (\Delta S_w / S_{w0})$  と書くことからやはり2要素を考慮しており、最も簡単な形の特別な場合に相当する。要するに粒子破碎量を定義するにあたっては、仕事  $W$  を意識して無理に1:1の対応を追い求める必要はなく、あくまでも素朴に初期表面積  $S_{w0}$  の何%か (または何倍か) ということに注目した方がよいのではないだろうか。

### 参 考 文 献

- 23) Moavenzadeh, F. and Goetz, W. H. : Aggregate Degradation in Bituminous Mixtures, Highway Research Record, Vol. 24, pp.106~137, 1963.  
24) 久保・水渡・中川・早川 : 粉体—理論と応用, 丸善, 1962.

(1984.2.20・受付)

▶回答者 (Closure)

三浦哲彦 (佐賀大学)・村田秀一・原田 敦 (山口大学)

By Norihiko MIURA, Hidekazu MURATA and Atsushi HARADA

著者らの論文に討議を寄せていただき感謝いたします。2項目にわたるご意見に対して次のように回答いたします。

(1) 粒子破碎量の尺度として用いる表面積増加  $\Delta S$  ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ) は次のように2項目に分解できる。

$$\begin{aligned} \Delta S &= S_w \rho_d - S_{w0} \rho_{d0} \\ &= \Delta S_w \rho_d + S_{w0} \Delta \rho_d \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

ここに、サフィックス0は初期状態を意味する。上式は明らかに、比表面積増加に関する項と密度増加に関する項の和となっている。さて、討議者の疑問は、 $\Delta S_w = 0$ の場合にも密度増加によって  $S$  の値が増加することの矛盾に向けられていると解される。しかし、式(10)を提案したとき<sup>15)</sup>にも断ったように、われわれは粒子破碎を生じる場合に式(10)を用いてきたのであり、この限りでは何ら問題はない。粒子破碎を生じない場合には、 $\Delta S = S_{w0} \Delta \rho_d$  となるが、これは外力に起因する密度変化によって表面積変化を生じたのであるから、これを広義粒子破碎現象であると解釈すれば、外力による仕事  $W$  と表面積  $S$  の関係の考察を非粒子破碎領域にまで拡張し得ることになる。

討議者が提案された式(9)を粒子破碎量の尺度として用いることは、また一つ尺度が増えるだけのことであって一向に構わないが、(2)でも述べるように粒子破碎現象をエネルギー的観点から調べようとする場合には、空隙を含めて土塊の単位体積に関して考察する必要があるので式(9)は使いにくい。

(2) 粒子破碎量の尺度として表面積の比を用いることの問題点は、先の研究<sup>15)</sup>に示したとおりである。たとえば、 $S = 100 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$  の試料がせん断中に破碎され  $S_1 = 1000 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$  となり(第1段階)、さらにせん断が進んで  $S_2 = 10000 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$  となった場合(第2段階)を考えてみる。 $S$  の比をとれば、 $S_1/S_0 = S_2/S_1 = 10$  と同じ値となって、これでは第1段階および第2段階でのエネルギー消費量の差(およそ10倍)を説明するのが難しくなる。

ご教示いただいた Moavenzadeh の論文でも指摘しているように、 $S = 100 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$  が  $200 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$  となる場合と  $S = 1000 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$  が  $1100 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$  となる場合(い

ずれも  $\Delta S = 100 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ ) では粒子破碎状況は異なる。このことは著者らももちろん認めているのである。具体的には、 $S \sim W$  (塑性仕事) 曲線は Rittinger 説のように直線関係とはならず田中説のように曲線勾配は漸減することを実験データによって示した。そして、 $S \sim W$  曲線の勾配 ( $dS/dW$ ) を粒子破碎率と定義し、この量を用いて砂のせん断強度に及ぼす粒子破碎の影響を明らかにした<sup>15)</sup>。以上のような理由から、著者らは粒子破碎量の尺度として表面積増加は誠に合理的であると考えている。

最後に、討議者は粒子破碎と塑性仕事の対応関係を調べることにさしたる意義はないとの意見を述べておられる。これに対しては、その後を得た研究成果を簡単に述べて著者らの見解を示したい。

著者の1人は最近、砂中の杭の先端支持機構を粒子破碎エネルギーの観点から考察した<sup>25), 26)</sup>。すなわち、杭先端付近の粒子破碎量分布 ( $\Delta S$  の分布) を調べ、別途三軸圧縮試験により定めた  $S \sim W$  曲線を用いて、 $\Delta S$  に相当する塑性仕事 (= 粒子破碎に消費された仕事  $W_c$ ) を推定した。一方、杭の応力～沈下量曲線に基づいて杭頭でなされた全仕事  $W$  を求めた。そして、この  $W$  値に対する  $W_c$  の割合を調べた結果、粒子破碎に消費されるエネルギーは全エネルギーの実に80～90%に相当することがわかった。これらの研究によって砂中の杭の先端支持力は、砂の粒子破碎特性に著しく依存することを実証できたと考えている。

上述の考察は、粒子破碎現象をエネルギーの観点から調べることによって初めて可能となったのであり、このことからこれまでのわれわれの研究手法は間違っていたと思うのである。

#### 参 考 文 献

- 25) 三浦哲彦：杭先端付近における砂の粒子破碎と杭の支持機構，土と基礎，Vol.32, No.2, pp.45～50, 1984.
- 26) Miura, N.: Effect of Particle-Crushing on the Point Resistance of Piles in Sand, Proc. 11th ICSMFE, 1985. (投稿中)

(1984.8.1・受付)