研　究　速　報

UDC 691.22：539.43

砕石材料の変形係数に及ぼす繰り返し載荷の影響 III
——繰り返し載荷時の変形係数に及ぼす影響——

Effect of Cyclic Prestraining on Deformation Characteristics of a Crushed Sandstone
——Cyclic Loading Tests——

孔　憲京*・龍岡文夫**・佐藤剛司**
木幡行宏**・小長井一男*
Xian Jing KONG, Fumio TATSUOKA, Takeshi SATO,
Yukihiro KOHATA and Kazuo KONAGAI

1. は じ め に

前々報と前報（孔ら，1992a, 1992b）では，繰り返し載荷履歴に引き続く単調載荷における変形係数に及ぼす影響について報告した．本報告では，繰り返し載荷中の変形係数およびポアソン比 ν に及ぼす繰り返し載荷履歴の影響を報告する．

2. 試 験 結 果

2.1 繰り返し載荷履歴が繰り返し載荷中の変形係数に及ぼす影響

図23は，初期間隙比 $e_{initial}=0.673$ の Virgin 供試体で，軸応力 $\sigma_a=0.212$ kgf/cm^2，側方応力 $\sigma_r=0.194$ kgf/cm^2 を中立応力状態とした10回の繰り返し載荷で得られた履歴曲線を示す．これは，図24においてAの記号で示すデータ群である．図24，25には，同一の供試体を用いて繰り返し載荷履歴を加える前後での各載荷段階での3～10回目の繰り返し載荷での等価ヤング率係数（Equivalent Young's modulus）：$E_{eq}=dq/d\varepsilon_a$ (SA) および履歴減衰係数 h と片振幅軸ひずみ $d\varepsilon_a$ (SA)（対数）の関係を示す．ここで，dq はピーク間の片振幅偏差応力，$d\varepsilon_a$ (SA) は片振幅軸ひずみである．0.001%以下のひずみレベルでデータが得られていることに注目されたい．また，ひずみレベルが大きくなるにつれて，同一の載荷段階でも繰り返し載荷とともに減衰係数がはっきり減少していて繰り返し載荷回数の関数である．これは，繰り返し載荷とともに砕石の供試体の内部構造が安定化していくためであろう．しかし，このような現象はヤング率にはあまり見られない．

図26，27に各載荷段階で繰り返し載荷回数5回目での E_{eq} と h と $d\varepsilon_a$ (SA)（対数）の関係を示す．$e_{initial}=0.677$ の供試体の $E_{eq}\sim d\varepsilon_a$ (SA) 関係は繰り返し載荷履歴によってあまり変わらないが，$e_{initial}=0.692$ の供試体は繰り返し載荷によって E_{eq} が全体的に大きくなっていて，より間隙比が小さな供試体の関係と似てきている．また，繰り返し載荷履歴を受けた二つの供試体の $E_{eq}\sim d\varepsilon_a$ (SA)（対数）関係では，いずれも $\varepsilon_a=0.01$%付近でひずみの増加につれてヤング率が若干増加している．これは，繰り返し載荷履歴のなんらかの影響と思われる．すなわち繰り返し載荷履歴中の最大せん断応力レベル付近ではより硬化したと言う一種の異方的構造が繰り返し載荷履歴によって形成されたためと思われる．一方，図27を見ると履歴減衰係数に対する繰り返し載荷履歴の影響はほとんど見受けられない．

2.2 ひずみレベルの依存性に及ぼす繰り返し載荷履歴の影響

図28は，平均主応力一定の中立応力のもとで今回行った砕石の実験結果（▽，△印のデータポイント）と，拘束圧一定（0.5 kgf/cm^2）の条件のもとでの姫礫・磯美礫の実験（孔ら，1990）から得られた等価ヤング率のひずみ依存性（●，■印のデータポイント）の比較である．明らかに，姫礫と磯美礫のヤング率のひずみレベル依存性の方が小さい．この結果を平均主応力が一定の中立応力条件のもとでの関係に補正した関係（○，□印のデータポイント）は，今回得られた関係に近づいている．これらのことは，拘束圧が常に一定のもとで繰り返し載荷荷重を増加することにより求めた変形係数のひずみレベル依存性は，平均主応力がほぼ一定の状態のもとで得られる変形係数のひずみレベル依存性を過小評価していることを示している．

2.3 初期ヤング率 E_{max} と間隙比の関係

図13に，単調載荷実験で得られた E_{sec} の最大値 E_{max} と間隙比の関係（○，●印のデータポイント）と，繰り返し載荷試験で得られた E_{eq} の最大値 $(E_{sec})_{max}$ と間隙

*東京大学生産技術研究所　第1部
**東京大学生産技術研究所　第5部

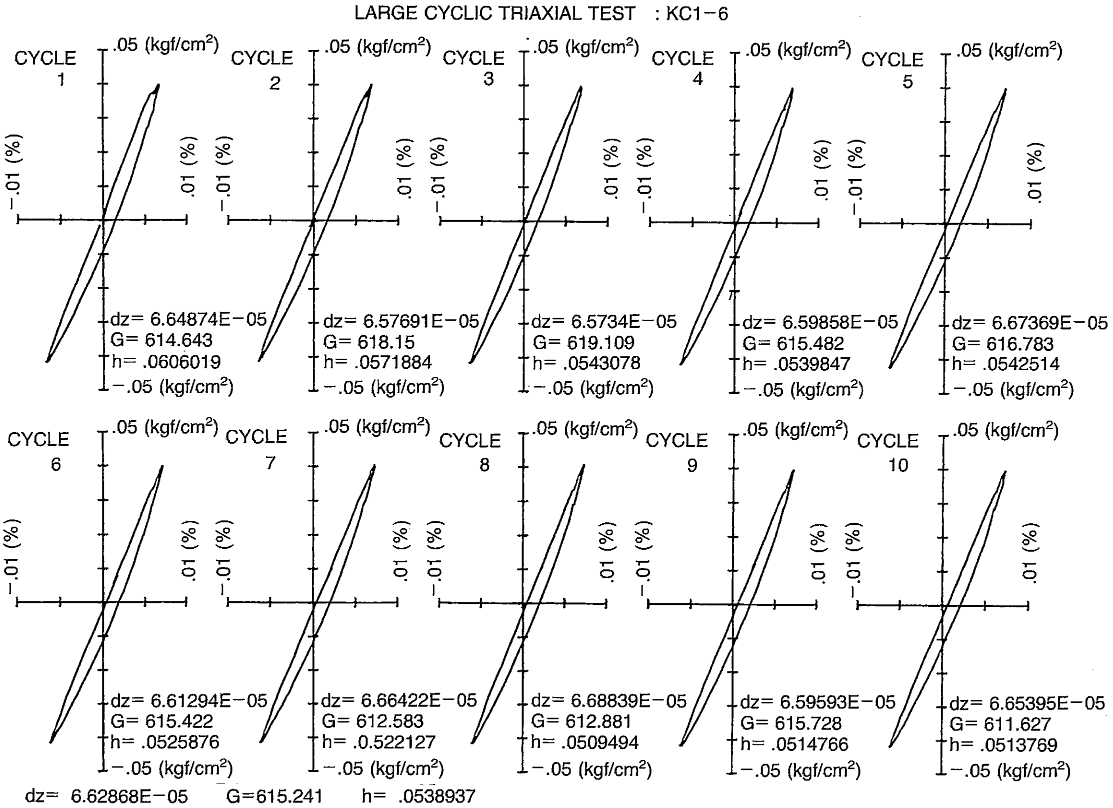

図-23 繰り返し載荷による履歴曲線の代表例

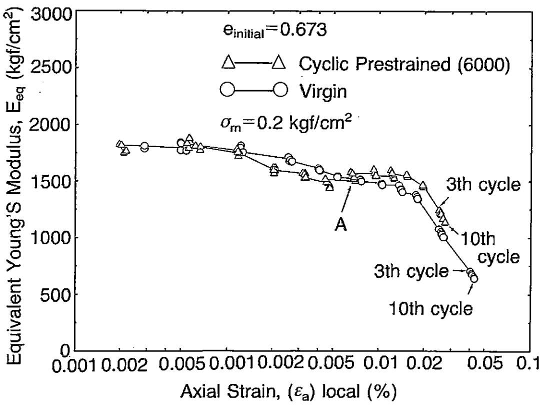

図-24 等価ヤング率 E_{eq} と片振幅軸ひずみ（対数）の関係（繰り返し載荷回数の影響）：Virgin 供試体と Prestrained 供試体の比較

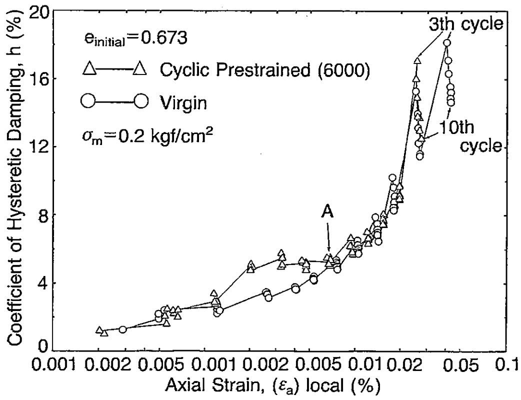

図-25 履歴減衰係数と片振幅軸ひずみ（対数）の関係（繰り返し載荷回数の影響）：Virgin 供試体と Prestrained 供試体の比較

研　究　速　報

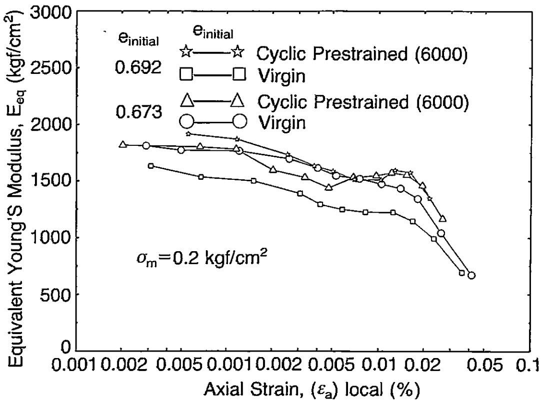

図-26　等価ヤング率 E_{eq} と片振幅軸ひずみ（対数）の関係：Virgin 供試体と Prestrained 供試体の比較

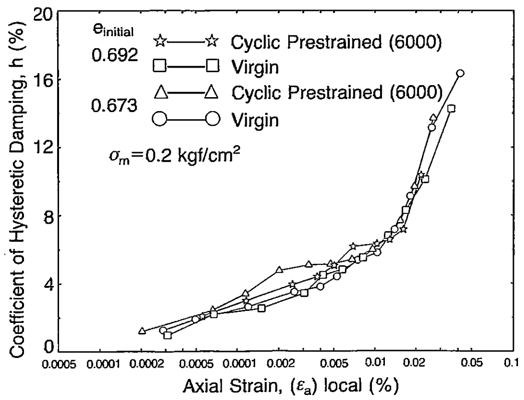

図-27　履歴減衰係数と片振幅軸ひずみ（対数）の関係：Virgin 供試体と Prestrained 供試体の比較

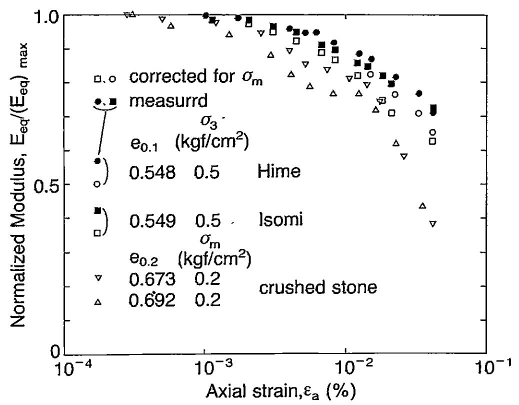

図-28　$E_{eq}/(E_{eq})_{max}$～片振幅軸ひずみ（対数）の関係：砂岩砕石と姫礫・磯美礫

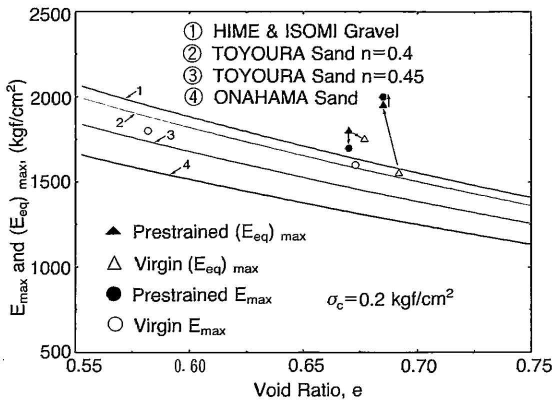

図-13　単調載荷試験での E_{max} 及び繰り返し載荷試験での $(E_{eq})_{max}$ と載荷開始時の間隙比の関係：Prestrained 供試体と Virgin 供試体の比較

比の関係（△，▲印のデータポイント）を示す．○，△印のデータポイントは Virgin 供試体の実験結果であり，●，▲印のデータポイントは Prestrained 供試体の実験結果である．同一の供試体のデータは↑印で結んである．単調載荷試験と繰り返し載荷試験でほぼ同一のヤング率が得られている．

今回の実験は拘束圧0.2 kgf/cm²だけで行ったので，E_{max} と拘束圧 σ_c の関係を求めることができない．図13中にこれまでに得られている以下に示すいくつかの経験式を示す，E_{max} と σ_c の単位は kgf/cm²である．

① 姫礫，磯美礫に対する経験式（孔ら，1990）

$$E_{max}=1280\frac{(2.07-e)^2}{1+e}(\sigma_c)^{0.531}$$

②，③ 豊浦砂（岩崎，龍岡ら，1978）

$$E_{max}=2(1+\nu)900\frac{(2.17-e)^2}{1+e}(\sigma_c)^{0.38}$$

④ 小名浜砂（中空ねじり，低拘束圧）（孔ら，1986）

$$E_{max}=2(1+\nu)616\frac{(2.17-e)^2}{1+e}(\sigma_c)^{0.278}$$

ただし，ポアソン比 ν=0.25と仮定した．

図13により，今回の Virgin 供試体の結果は，姫礫・磯美礫の経験式と良く似た値である．また，礫と砕石のヤング率は豊浦砂・小名浜砂のヤング率よりもやや大きいことが分かる．しかし，これら試料の間での粒径の大きな相違を考えると，E_{max} に及ぼす粒径の影響は小さいと言える．

ま と め

繰り返し載荷中の変形係数は，微小ひずみレベルでは単調載荷の場合と同様に繰り返し載荷履歴の影響をあまり受けない．繰り返し載荷におけるやや大きなひずみレベルでの変形係数も，繰り返し載荷での変形係数ほどは繰り返し載荷履歴の影響を受けないことがわかった．

(1992年4月20日受理)

参 考 文 献

9) 孔　憲京，龍岡文夫，佐藤剛司，木幡行宏，小長井一男，砕石材料の変形係数に及ぼす繰り返し載荷の影響　I，—試験方法および強度—，生産研究，Vol. 44, No. 6, 1992a

10) 孔　憲京，龍岡文夫，佐藤剛司，木幡行宏，小長井一男，砕石材料の変形係数に及ぼす繰り返し載荷の影響　II，—単調載荷時の変形係数に及ぼす影響—，生産研究，Vol. 44, No. 6, 1992b

11) Shibuya, S., Kong, X. J. and Tatsuoka, F. (1989): Deformation Characteristics of Gravels Subjected to Monotonic and Cyclic Loading —with particular reference to small strain behaviour—, Proc. of 8th Japanese Symp. on Earthquake Eng., pp. 771–776.

12) Iwasaki, T. and Tatsuoka, F. (1977): Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, Soils and Foundations, Vol. 17, No.3.

13) Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y. (1978): Shear moduli of sands under cyclic torsional loading, Soils and Foundations, Vol. 18, No. 1, pp. 39–56.

14) Kong, X. J., Tatsuoka, F. and Pradhan, T. B. S. (1986): Dynamic deformation properties of sand at extremely pressures, Proc. of 7th Japan Symp. on Earthquake Eng., pp. 631–636.