



繰返し三軸圧縮試験に基づく水硬性粒度調整スラグ 路盤材の復元変形係数の評価

吉田, 信之
中村, 大史
杉迫, 泰成

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 6:123-130

(Issue Date)

2002-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00317621>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00317621>



繰返し三軸圧縮試験に基づく水硬性粒度調整スラグ路盤材の復元変形係数の評価

Resilient modulus of Hydraulic Mechanically Stabilized slag base-course material based on repeated loading triaxial compression test

吉田 信之¹⁾
Nobuyuki Yoshida
中村 大史²⁾
Hiroshi Nakamura
杉迫 泰成³⁾
Yasunari Sugisako

概要：水硬性粒度調整スラグ路盤材の復元変形係数を評価するために，軸変位及び軸荷重の計測精度を向上させて，AASHTO 試験法で推奨されている繰返し載荷方法に準じて繰返し三軸圧縮試験を実施した。さらに，西らが採用している載荷方法でも試験を行い，既往の復元変形係数との比較および載荷方法の違いが復元変形係数に及ぼす影響について考察した。その結果，水硬性粒度調整スラグ路盤材の復元変形係数は，過去の結果と同様に，平均主応力と偏差応力に依存すること，養生期間が長いほど大きい値を示すことを確認した。さらに，従来のようなセル外部の LVDT による軸変位計測から算定した復元変形係数はかなりの過小評価になっていること，また試験法の違いの影響は非常に小さいことがわかった。

キーワード：繰返し三軸圧縮試験，水硬性粒度調整スラグ，復元変形係数，微小軸ひずみ

1. 序論

水硬性粒度調整スラグ（以降，HMS と称す）は，高炉徐冷スラグ単独，あるいは高炉徐冷スラグと転炉スラグ，高炉水砕スラグを混合したもので，0mm～25mm に粒度調整した水硬性を有する上層路盤材である。その等値換算係数は，0.55 とアスファルト舗装要綱¹⁾に明示されており，近年の産業副産物の資源化や有効利用の観点からも今後ますます利用の増加が予想される材料である。

さて，アスファルト舗装の構造設計は，従来の半経験的手法から力学挙動に則った理論的手法へと移行しつつある。路面損傷解析や供用性評価で基本要素となる舗装の構造解析で，最も重要な入力データが舗装材料の復元変形係数である。しかしながら，アスファルト舗装要綱や舗装設計施工指針²⁾では HMS の復元変形係数は明示されていない。ちなみに，等値換算係数が同じ 0.55 であるセメント安定処理上層路盤材については，一軸圧縮強度が 3～15MPa の場合 1000～15000MPa の範囲と記載されているが，養生効果に関する記述はない。西ら³⁾は，最適含水比・最大乾燥密度で突き固めた HMS 供試体で繰返し三軸圧縮試験を実施し，復元変形係数を偏差応力と平均主応力の関数で表現した。それによると，養生期間 0～12 ヶ月の供試体の復元変形係数は，100～2000MPa の範囲にある。ただし，軸変位及び軸荷重は，当時では標準的であった三軸セル外部の載荷ロードに取り付けた LVDT 及びロードセルによって計測が行われている。

本研究では，アスファルト舗装の構造解析に供する水硬性粒度調整スラグ路盤材の復元変形係数を評価するために，特に微小軸変位及び軸荷重の計測精度を向上させた繰返し三軸試験を実施した。繰返し載荷は，

AASHTO が推奨する方法⁴⁾ に準じて行ったが、過去の実験結果との比較検討のために西らが用いた方法³⁾ でも実施した。

2. 試料及び供試体作製

本研究で使用した HMS は一般的かつ容易に入手可能なもので、比重は 3.09 であり、また締固めエネルギー約 2500kJ/m³ の標準締固め試験から得られた最適含水比及び最大乾燥密度はそれぞれ 11.57% 及び 2.26Mg/m³ である。粒径加積曲線を図-1 に示す。ただし、試験の実施に際しては、供試体の寸法（直径 100mm、高さ 200mm）を考慮して最大粒径が供試体直径の 1/5 以下、すなわちフルイ目 19mm 以上の粒径を排除した尖頭粒度で試験を行った。

供試体は、尖頭粒度の試料に蒸留水を加え一様に混合し最適含水比になるように含水比調整を行った後、直径 100mm・高さ 200mm 供試体作製の二つ割りモールドに 5 層に分けて入れ、4.5kg ランマーを用いて落下高さ 0.45m で突き固めて作製した。このとき、締固めエネルギーが上述の締固め試験の場合と同じになるように一層当りの締固め回数（約 40 回）を決定した。最上層の突き固め終了後、2mm ふるい通過試料を用いて上端面を均一にならした。その後、供試体上面をポリエチレンフィルムで被覆し質量 49N の重りを上端部に載せた後、さらに全体をナイロン袋で被覆して、温度約 20℃ の冷暗所にて所定期間（0, 15, 30, 90 日）養生した。ここで、49N の重りは路盤材が原位置で一般に受ける上載荷重を想定したものである。

3. 試験概要

(1) 試験装置

試験装置の概要を図-2 に示す。繰返し軸荷重は、所定の繰返し載荷波形をファンクションシンセサイザーで設定しサーボアンプを介して電空変換器によって圧縮空気圧を制御して複動式ペロフラムシリンダーを動作させて負荷するものである。繰返し載荷時の軸荷重の最大容量は 3kN、サイン波から矩形波まで任意の波形が載荷でき、周波数は 0.01~3Hz の間で制御可能である。また、側圧及び背圧の最大容量は 0.6MPa である。

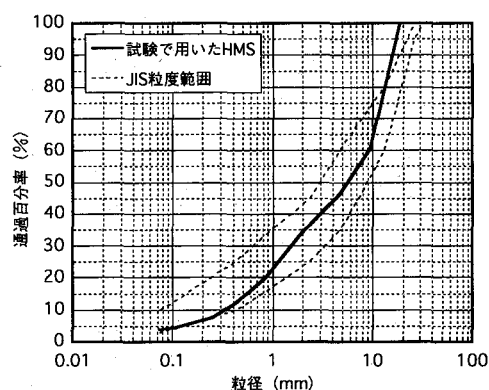


図-1 HMS の粒径加積曲線

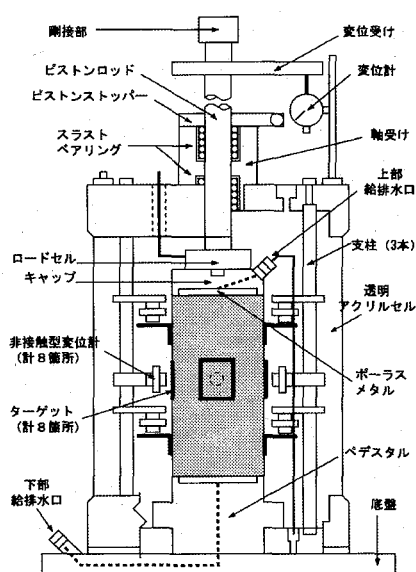


図-3 三軸セル

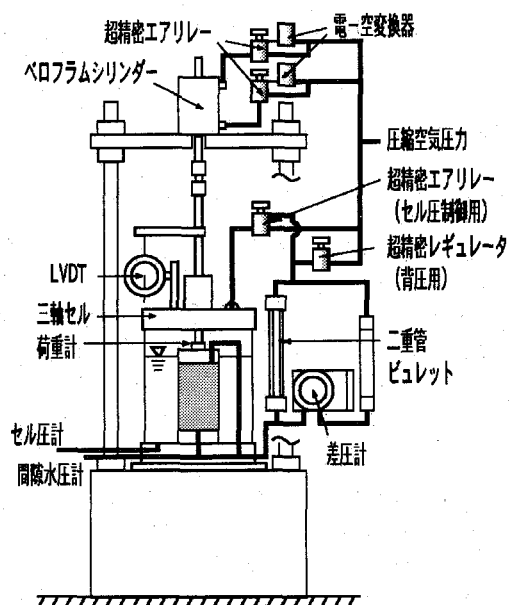


図-2 試験装置の概要

三軸セルの概要を図-3 に示す。三軸セルは、透明アクリル円筒が支柱外にある完全密閉式の外セル方式である。供試体の軸変位及び荷重は、それぞれ三軸セル内の非接触型変位計とロードセルで計測する。なお、従来と同様にセル外にある荷重ロッドに取り付けた LVDT でも軸変位を計測している。非接触型変位計は、図-4 に示すように供試体の対角 2 ヶ所で供試体上下端より 1/4 の位置にアルミ製ターゲット面が来るように設置しており、これら 2 ヶ所での計測値の平均値を軸変位量としている。用いた非接触型変位計の分解能は $1\mu\text{m}$ である。

なお、横方向の変位量も同じ非接触型変位計を用いて計測を行っているが、本報ではそれについては触れない。

(2) 試験方法

供試体を三軸セルへ設置する方法は、標準的な三軸試験の場合と同じである。メンブレン装着後、非接触型変位計及びそのターゲットを所定の箇所に設置した後、脱気水を所定の高さまで注水し、荷重過程に移る。

繰返し荷重は、荷重時間 0.4 秒、休止時間 1.2 秒のハーバーサイン波とした。表-1 に荷重応力条件を、図-5(a) に模式的に荷重応力経路を示す。繰返し荷重手順の概略は、1) 所定の側圧 (0.137MPa) で等方圧密し、側圧を維持したまま 2) 所定の偏差応力 (0.147MPa) で予備繰返し荷重を 1000 回行った後、3) 所定の偏差応力 (0.059~0.236MPa) で順次本繰返し荷重を行う。引き続き、4) 次の側圧 (0.128MPa) に減圧した後、5) 所定の偏差応力 (0.059~0.236MPa) で順次本繰返し荷重を行う。6) 4) 及び 5) を全側圧段階が終了するまで繰り返す。なお、荷重回数等の詳細については、参考文献 4) を参照していただきたい。

西らの荷重方法に準じた繰返し荷重手順では、1) 所定の側圧 (0.029MPa) で等方圧密を行った後、2) 所定の偏差応力 (0.147MPa) で繰返し荷重を残留軸ひずみ増分が無視できる程度小さくなるまで (10000 回程度) 行い、3) さらに 500 回程度の繰返し荷重を行う。引き続き、4) 繰返し荷重時の平均主応力 (0.078MPa) を変化させずに側圧を調整して繰返し偏差応力を次の値 (0.117MPa) まで減少させて、5) 500 回程度の繰返し荷重を行い、6) 4) 及び 5) を所定の偏差応力 (0.059MPa) まで繰り返す。次に、7) 側圧を調整して次の荷重時平均主応力 (0.157MPa) に移り、1) ~ 6) を繰り返す。8) 7) を全荷重時平均主応力段階が終了するまで繰り返す。表-2 に荷重応力条件を、図-5(b) に模式的に荷重応力経路を示す。

なお、作製供試体の数の制約から、各養生期間当り AASHTO 荷重法では 2 本の試験を行ったが、西らの荷重法では 1 本の試験しかできなかった。

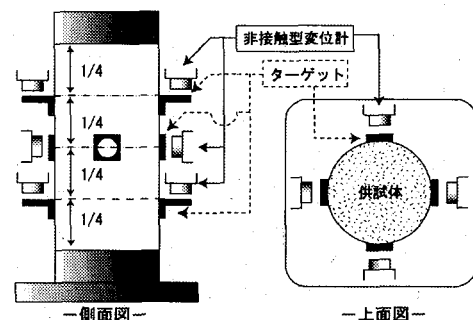
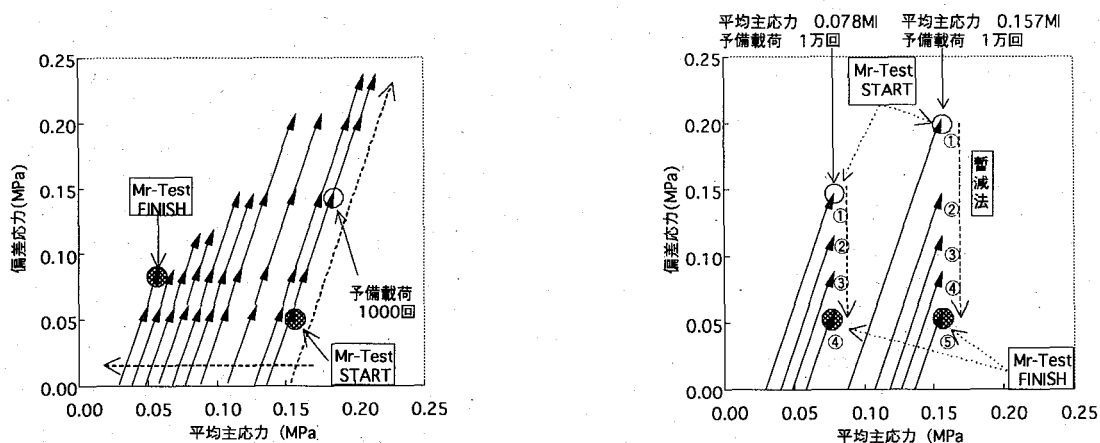


図-4 非接触型変位計の取付け位置



(a) AASHTO 試験法

(b) 西らの試験法

図-5 荷重応力経路

表-1 載荷応力条件 (AASHTO 法)

側圧 (MPa)	平均主応力 (MPa)	偏差応力 (MPa)	載荷回数 (回)
0.137	0.157	0.059	50
	0.167	0.088	50
	0.186	0.147	50
	0.206	0.206	50
	0.215	0.236	50
0.128	0.148	0.059	50
	0.157	0.088	50
	0.177	0.147	50
	0.197	0.206	50
	0.207	0.236	50
0.108	0.128	0.059	50
	0.137	0.088	50
	0.157	0.147	50
	0.177	0.206	50
0.088	0.107	0.059	50
	0.117	0.088	50
	0.137	0.147	50
	0.157	0.206	50
0.078	0.098	0.059	50
	0.107	0.088	50
	0.127	0.147	50
0.068	0.088	0.059	50
	0.097	0.088	50
	0.117	0.147	50
0.058	0.078	0.059	50
	0.087	0.088	50
	0.097	0.117	50
0.049	0.069	0.059	50
	0.078	0.088	50
	0.088	0.117	50
0.039	0.059	0.059	50
	0.068	0.088	50
0.029	0.049	0.059	50
	0.058	0.088	50

表-2 載荷応力条件 (西らの方法)

側圧 (MPa)	平均主応力 (MPa)	偏差応力 (MPa)	載荷回数 (回)
0.029	0.078	0.147	500
0.039		0.117	500
0.049		0.088	500
0.058		0.059	500
0.088	0.157	0.206	500
0.108		0.147	500
0.118		0.117	500
0.128		0.088	500
0.137		0.059	500

4. 試験結果及び考察

(1) 復元変形係数

図-6 に、一例として偏差応力 0.088MPa の場合の復元変形係数と平均主応力の関係を、また平均主応力 0.157MPa の場合の復元変形係数と偏差応力の関係を図-7 に示す。なお、図中の線は後述の重線形回帰分析による回帰線である。図より、復元変形係数は、平均主応力の増加とともに増大し偏差応力の増加とともに減少することがわかる。また、養生日数が長くなるとともに、水硬性が発揮されて復元変形係数が大きくなっている。ここでは示さないが、他の応力条件の結果も同じような傾向を示している。

復元変形係数を従来と同様に次式で表わし、実験定数を重線形回帰分析によって求めると、表-3 のようになる。表中の R^2 は決定係数である。

$$M_r = K \frac{p^M}{q^N} \quad (1)$$

ここで、 M_r = 復元変形係数 (MPa)

p = 平均主応力 (MPa)

q = 偏差応力 (MPa)

K, M, N = 実験定数

表から、相関係数 R は 0.888~0.974 の範囲にあり、上式でかなり良く実験結果を近似できることがわかる。

また、実験は各養生期間で 2 本しか行っていないが、実験定数 M と N 、すなわち両対数表示で直線の勾配を見てみると、養生日数が長くなるほどばらつきが小さくなり、それぞれ一定値に収束する傾向がある。

(2) 供試体軸変位の計測方法の影響

前掲の表-3 には、セル外の載荷ロードに取り付けた LVDT で計測した軸変位量をもとに算定した復元変形係数に対する回帰結果も載せている。図-8 に、一例として偏差応力 0.088MPa の場合の復元変形係数と平均主応力の関係について回帰線による比較結果を示す。図から、復元変形係数は、外部で計測した軸変位量に基づく方が明らかに小さい結果になっていることがわかる。これは、従来から言われているように、外部計測では供試体端面の乱れやベディングエラーの影響のため供試体の軸変位量を過大評価していること

表-3 実験定数

養生期間	非接触型変位計				ダイヤルゲージ			
	K	M	N	R2	K	M	N	R2
0日-No1	1564	0.774	0.163	0.922	859	0.798	0.188	0.970
0日-No2	4577	1.406	0.313	0.908	2655	1.521	0.374	0.953
15日-No1	3128	0.691	0.236	0.864	1334	0.801	0.231	0.989
15日-No2	5755	1.198	0.405	0.950	2224	1.152	0.215	0.975
30日-No1	3171	0.699	0.331	0.796	990	0.544	0.023	0.988
30日-No2	4661	0.575	0.235	0.788	2265	1.011	0.133	0.941
90日-No1	5742	0.712	0.403	0.797	1278	0.645	0.080	0.949
90日-No2	14077	0.813	0.360	0.817	1461	0.834	0.277	0.986

に起因している。

また、 $Mr_{(非接触型変位計)} / Mr_{(外部 LVDT)}$ の値は、養生 0 日では 1.8~2.1 (平均 1.869) であるが、養生 90 日では 8.1~12.5 (平均 10.477) である。表-4 に、非接触型変位計による Mr /外部 LVDT による Mr の平均値を養生期間ごとにまとめている。養生期間が長いほど、両者の復元変形係数の差が大きくなる傾向が認められる。これは、供試体が硬化するほど発生する軸変位量が小さくなるため、より高い計測精度が求められることを示唆している。

さらに、 $Mr_{90日養生} / Mr_{0日養生}$ を考えると、非接触型変位計による値では 8.1~12.3、外部 LVDT による値では 1.3~2.3 となっており、外部 LVDT 計測では養生に伴う復元変形係数の増分を過小評価している。

(3) 繰返し載荷方法の影響

前述のように、本研究では西らの方法でも繰返し載荷を行った。図-9 に、一例として偏差応力 0.088MPa の場合の復元変形係数と平均主応力の関係を、また平均主応力 0.157MPa の場合の復元変形係数と偏差応力の関係を図-10 に示す。なお、図中には前出の AASHTO 法による結果も載せている。また、重線形回帰分析の結果を表-4 に示す。試験本数が少ないため断言はできないが、図より、得られた復元変形係数は、平均主応力及び偏差応力の変化に対して AASHTO 法による結果と同じ傾向を示しており、またその大きさもほぼ同じであることがわかる。したがって、本研究で採用した応力レベルでは、繰返し載荷方法の違いの影響は小さいものと判断できる。

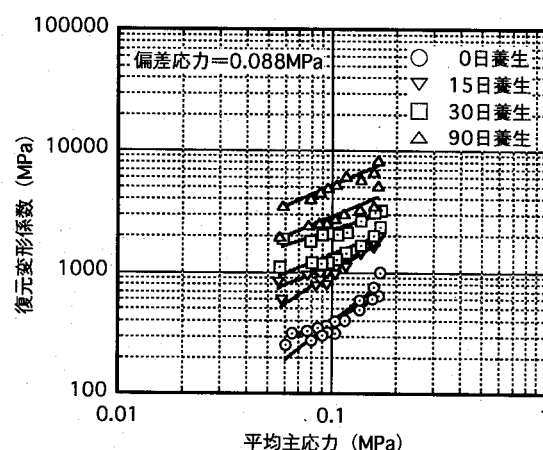


図-6 復元変形係数と平均主応力の関係

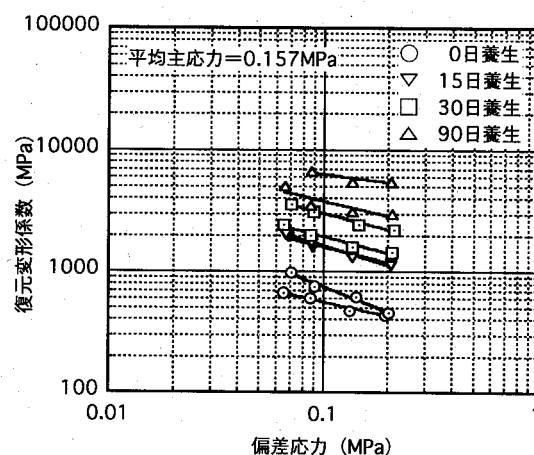


図-7 復元変形係数と偏差応力の関係

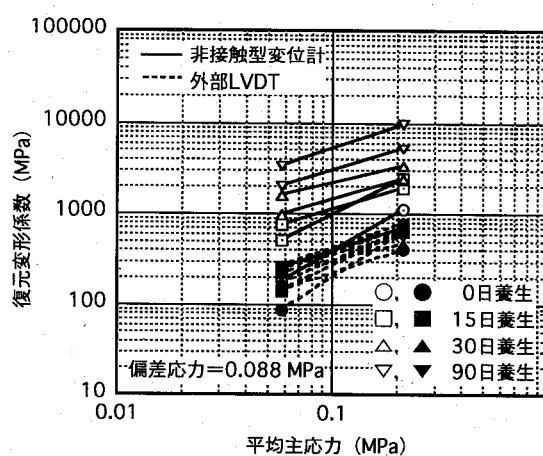


図-8 復元変形係数と平均主応力の関係
(セル外の LVDT で計測)

表-4 実験定数

養生 期間	非接触型変位計				ダイヤルゲージ			
	K	M	N	R ²	K	M	N	R ²
0 日	2330	1.200	0.245	0.988	4606	1.711	0.201	0.996
15 日	91506	1.928	0.086	0.962	10304	1.583	0.162	0.945
30 日	10924	0.817	0.119	0.946	654	0.400	0.199	0.952
90 日	9607	0.727	0.437	0.631	2662	0.935	0.154	0.985

5. 結論

本研究では、水硬性粒度調整スラグ路盤材の復元変形係数を評価するために、軸変位及び軸荷重の計測精度を向上させた試験装置を用いて AASHTO 試験法で推奨されている方法に準じて繰返し三軸圧縮試験を実施した。また、過去の実験結果との比較検討のために西らが採用している方法でも試験を行った。得られた結果を以下に列挙する。

- 1) 水硬性粒度調整スラグ路盤材の復元変形係数は、過去の結果と同様に、平均主応力の増加、偏差応力の減少とともに増大し、平均主応力と偏差応力のべき型関数で近似できる。また、養生期間が長いほど大きい値を示すことが確認された。
- 2) 非接触型変位計による軸変位量から求めた復元変形係数は、外部 LVDT から求めた値よりかなり大きな値である。これは、外部計測では供試体端面の乱れやベディングエラーの影響のため供試体の軸変位量を過大評価していることに起因している。
- 3) 非接触型変位計と外部 LVDT から求めた復元変形係数の比は、養生期間が長くなるほど大きくなる傾向があり、養生 0 日で 1.8~2.1、養生 90 日では 8.1~12.5 にもなる。したがって、供試体が硬化するほど、より高い計測精度が求められることになる。
- 4) 本研究で採用した応力レベルの範囲内では、繰返し載荷方法の違い (AASHTO 法と西らの方法) の影響は非常に小さい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，1992。
- 2) 日本道路協会：舗装設計施工指針，2001。
- 3) Nishi, M., Yoshida, N., Hatakeyama, S. and Tujimoto, T.: Deformation characteristics of iron and steel slags and crushed stone as base-course materials, Pre-failure of Deformation of Geomaterials, Vol.1, pp. 287-292, 1994.

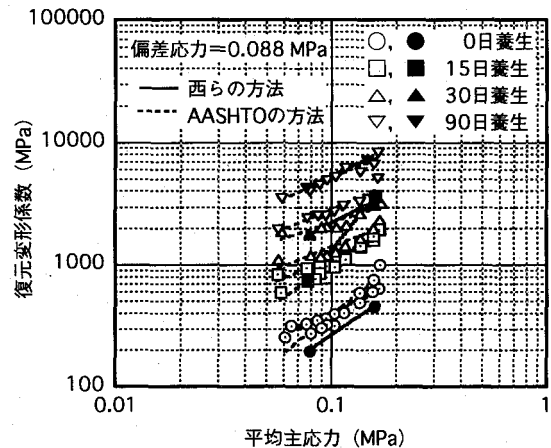


図-9 復元変形係数と平均主応力の関係
(西らの載荷方法による)

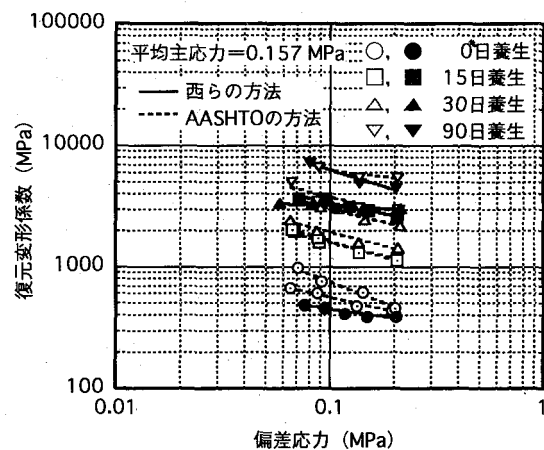


図-10 復元変形係数と偏差応力の関係
(西らの載荷方法による)

- 4) American Association of State Highway and Transportation Officials : Resilient modulus of subgrade soils and untreated base/subbase materials, Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Part II Tests, pp. 1057-1071, 1998.

筆者：1) 吉田信之，都市安全研究センター，助教授；2) 中村大史，神戸大学大学院自然科学研究科，学生；3) 杉迫泰成，神戸大学工学部建設学科，学生

RESILIENT MODULUS OF HYDRAULIC MECHANICALLY STABILIZED SLAG BASE-COURSE MATERIAL BASED ON REPEATED LOADING TRIAXIAL COMPRESSION TEST

Nobuyuki Yoshida
Hiroshi Nakamura
Yasunari Sugisako

Abstract

In this paper, in order to investigate the resilient modulus of hydraulic mechanically stabilized slag base-course material used in asphalt pavement, a repeated loading triaxial compression test was carried out with improved measurement techniques of axial strain and applied load. The repeated loading was conducted following the method suggested by AASHTO; and for comparison, the method the authors have adopted so far (hereafter called 'Nishi's method') was also applied. From the test results obtained, the followings can be pointed out.

- 1) The resilient modulus obtained in this study was similar to the one obtained in the past experimental study: it increases as the applied mean principal stress increases and also as the applied deviator stress decreases. It is modelled in the form of a power function of mean principal stress and deviator stress. Moreover, the resilient modulus increases as the curing time increases.
- 2) The resilient modulus obtained from axial strain measured with gap sensors was quite larger than the one obtained from axial strain measured with LVDT mounted outside the triaxial cell. This is due to the over-estimate of axial strain resulting from bedding error and disturbance at the end faces of a specimen.
- 3) The ratio of the resilient modulus based on gap sensor measurements to the one based on LVDT measurements increases as the curing time increases, and it ranges from 1.8 to 2.1 for a curing time of 0 day and from 8.1 to 12.5 for a curing time of 90 days. This indicates that higher accuracy is required in the measurement of axial strain as the specimen hardens.
- 4) In the stress level applied in this study, difference in loading method, AASHTO or Nishi's methods, has little influence on the estimated resilient modulus.