

繰返し三軸圧縮試験による水硬性粒度調整 鉄鋼スラグ路盤材のレジリエントモジュラス について

吉田 信之¹・杉迫 泰成²・中村 大史³

¹正会員 Ph.D. 神戸大学助教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

²学生会員 工学士 神戸大学 大学院自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

³正会員 工修 関西電力(株) 木曾電力所 (〒399-5607 長野県木曾郡上松町大字小川字島 3024-1)

水硬性粒度調整スラグ路盤材のレジリエントモジュラスを評価するために、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、既往のレジリエントモジュラスとの比較および載荷方法の違いがレジリエントモジュラス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レジリエントモジュラスは、過去の結果と同様に、平均主応力と偏差応力に依存し養生期間が長いほど大きい値であることを確認した。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値はかなりの過小評価になっており、試験法の違いの影響は非常に小さいことがわかった。

Key Words : repeated loading, triaxial test, HMS, resilient modulus, small strain, AASHTO

1. 序論

水硬性粒度調整鉄鋼スラグ (以降、HMS-25 と称す) は、高炉スラグと製鋼スラグを単独又は組み合わせたもので JIS A5015 に挙げられている呈色判定、水浸膨張比などの規格を満足した 0~25mm に粒度調整を施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 と舗装設計施工指針¹⁾ に明示されている。また、近年の産業副産物の資源化・有効利用化傾向やアスファルト舗装の長寿命化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。平成 4 年に改訂のアスファルト舗装要綱の付録に多層弾性論を使用した設計方法例が示され、さらに平成 13 年暮れに発刊された舗装設計施工指針では多層弾性論を用いた構造解析に基づく設計法が具体的に提示されるに至っている。また、合衆国では NCHRP プロジェクトとして新設及び修繕舗装を対象とした 2002 年版構造設計指針を策定中であり、舗装材料の変形特性の非線形性を考慮した構造解析の導入を図りつ

つあると言われている。

構造解析を行う上で重要な入力データは、舗装材料のレジリエントモジュラスとポアソン比である。舗装設計施工指針では、典型的な舗装材料のレジリエントモジュラス及びポアソン比を「範囲」で示している。例えば、粒状材料のレジリエントモジュラスは 100~600MPa、ポアソン比は 0.30~0.40 (代表値として 0.35) となっている。また、等値換算係数が HMS-25 と同じ 0.55 であるセメント安定処理混合物については、レジリエントモジュラスは 1000~15000MPa (ただし、一軸圧縮強度が 3~15MPa の場合)、ポアソン比は 0.10~0.20 と記載されている。

ところで、HMS-25 のレジリエントモジュラスについては、西ら²⁾ が最適含水比及び最大乾燥密度で突き固めた供試体を用いた繰返し三軸圧縮試験を実施し、レジリエントモジュラスを偏差応力と平均主応力の関数で提示している。それによると、養生期間 0~12 ヶ月の供試体のレジリエントモジュラスは 100~2000MPa の範囲に収まっているが、上述のセメント安定処理混合物と比較してもかなり低めの値である。この原因として、軸変位の計測が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 で行っていたことが考えられる。

そこで本研究では、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圧縮試験を実施することによって、水硬性粒度調整鉄鋼スラグ路盤材のレジリエントモジュラスの再評価を試みた。さらに、軸ひずみの計測方法や繰返し軸応力の載荷方法が算定したレジリエントモジュラスに及ぼす影響についても考察を加えた。

2. 試料及び供試体作製

本研究で使用した HMS-25 は一般的かつ容易に入手可能なもので比重は 3.09 である。また、締固めエネルギー約 2500kJ/m³ の標準締固め試験から、最適含水比及び最大乾燥密度はそれぞれ 11.6%及び 2.26Mg/m³ である。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 20mm 以下になるように粒度をスケールダウンする必要があるが、ここでは HMS-25 の粒度分布が良いこと及び試料調整が容易であることから相似粒度ではなくフル目 19mm 以上の粒径を排除した尖頭粒度で試験を行った。粒径加積曲線を図-1 に示す。

供試体は、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、所定の乾燥密度（最大乾燥密度）が得られる量を直径 100mm 及び高さ 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、各層ができるだけ同じような密度になるように一層当りの締固め回数を調整しながら（約 40 回前後）締固めた。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したら。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受けるであろうと考えられ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

試験装置は、通常の土質材料を対象とした繰返し三軸圧縮試験機で、軸圧、側圧、背圧は全て圧縮空気を圧力源とする比較的安価なシステムである。繰返し

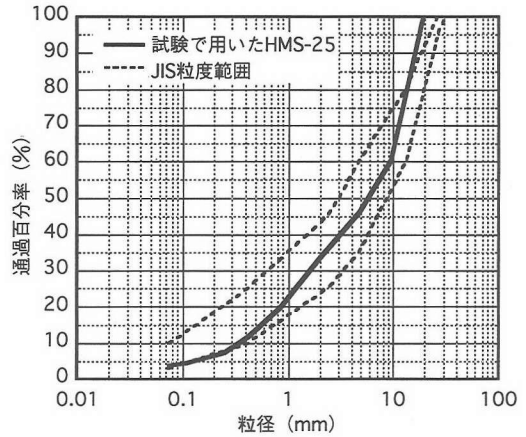


図-1 粒径加積曲線

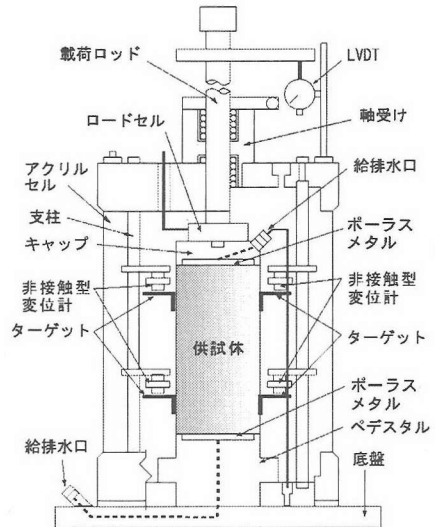


図-2 三軸セルの概要

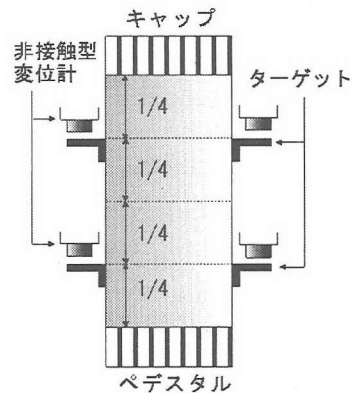


図-3 非接触型変位計の取付位置

表-1 載荷応力条件 (AASHTO 法に準拠)

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

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で設定しサーボ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。

三軸セルの概要を図-2 に示す。三軸セルは、透明ア

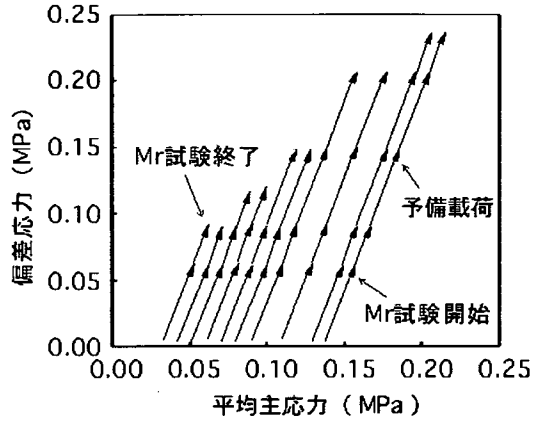


図-4 載荷応力経路

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軸荷重は、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ことによって各変量の計測精度を向上させている。なお、従来と同様にセル外にある載荷ロードに取り付けた LVDT でも軸変位を計測している。非接触型変位計のアルミ製ターゲットは、図-3 に示すように供試体の対角 2ヶ所で供試体上面及び下面からそれぞれ供試体長 4分の 1 の位置に印した後、ターゲット面を水平にして印に合わせて接着剤でメンブレンに直付けしている。軸変位量は、これら 2ヶ所での計測値の平均値である。用いた非接触型変位計の分解能は 1 μ m である。

(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。メンブレン装着し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、載荷過程に移る。

繰返し軸応力の載荷方法は、AASHTO が推奨する方法³⁾ に準じた。載荷時間は 0.4 秒、休止時間は 1.2 秒、波形はハーバーサイン波である。なお、試験装置容量の制約条件により、過去の試験²⁾ と比べると載荷時間が 0.3 秒より若干長い、この差はレジリエントモジュラスにはほとんど影響しないと考えられる⁴⁾。表-1 に載荷応力条件を、図-4 に模式的に載荷応力経路を示す。

載荷手順の概略は次の通りである。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) で予備繰返し載荷を 1000 回行った後、3) 所定の偏差応力 (0.059~0.236MPa) で順次本繰返し載荷を行う (図中の Mr 試験開始)。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

載荷を行う。6) 4) 及び5) を全側圧段階が終了するまで繰り返す(図中のMr 試験終了)。

なお、試験は養生期間毎に2本の供試体で行っており、後節の図中にはそれら2本の結果を示している。

表-2 試験定数

養生 期間	非接触型変位計				LVDT			
	K	M	N	R ²	K	M	N	R ²
0日	1564	0.774	0.163	0.922	859	0.798	0.188	0.970
	4577	1.406	0.313	0.908	2655	1.521	0.374	0.953
15日	3128	0.691	0.236	0.864	1334	0.801	0.231	0.989
	5755	1.198	0.405	0.950	2224	1.152	0.215	0.975
30日	3171	0.699	0.331	0.796	990	0.544	0.023	0.988
	4661	0.575	0.235	0.788	2265	1.011	0.133	0.941
90日	5742	0.712	0.403	0.797	1278	0.645	0.080	0.949
	14077	0.813	0.360	0.817	1461	0.834	0.277	0.986

4. 試験結果及び考察

(1) レジリエントモジュラス

図-5 に、一例として偏差応力 0.088MPa の場合のレジリエントモジュラスと平均主応力の関係を、また平均主応力 0.157MPa の場合のレジリエントモジュラスと偏差応力の関係を図-6 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、レジリエントモジュラスは、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レジリエントモジュラス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。

レジリエントモジュラスを従来²⁾と同様に次式で表わされるものとし、試験定数を供試体ごとに重線形回帰分析によって求めると、表-2 のようになる。表中の R² は決定係数である。

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

ここで、 M_r = レジリエントモジュラス (MPa)

p = 平均主応力 (MPa)

q = 偏差応力 (MPa)

K, M, N = 試験定数

表から相関係数 R は 0.888~0.974 の範囲にあるこ

とがわかり、上式でかなり良く試験結果を近似できることがわかる。

(2) 供試体軸変位の計測方法の影響

本試験では、前述したように、供試体の軸変位量を供試体側面の非接触型変位計で計測すると同時に、従来からルーティンワークとして行われている三軸セル外部の載荷ロッドに取り付けた LVDT でも計測している。これら2つの軸変位量から算定したレジリエントモジュラスの相違について考察する。

さて、前掲の表-2 にはセル外の載荷ロッドに取り付けた LVDT で計測した軸変位量をもとに算定したレジリエントモジュラスに対する回帰結果も載せている。図-7 に一例として偏差応力 0.137MPa の場合のレジリエントモジュラスと平均主応力の関係を示す。なお、煩雑をさけるために回帰線のみで示し 15 日養生供試体の結果を省いてある。また、ここには示さないが他の応力条件の場合も同じような傾向の結果が得られている。図から、90 日養生のレジリエントモジュラスが非

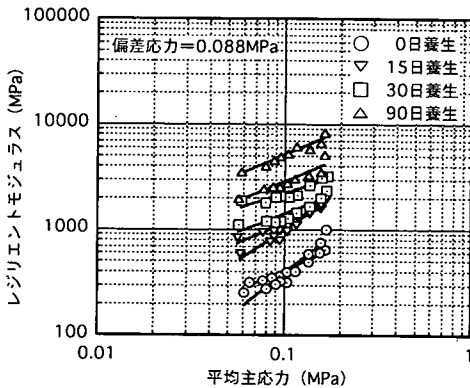


図-5 レジリエントモジュラスと平均主応力の関係

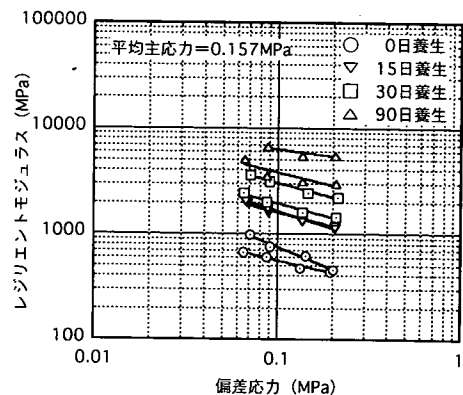


図-6 レジリエントモジュラスと偏差応力の関係

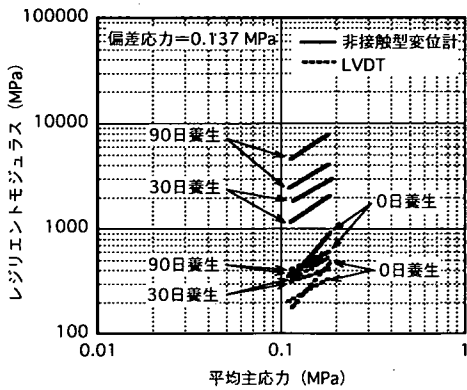


図-7 軸変位の計測方法の影響 (レジリエントモジュラスと平均主応力の関係)

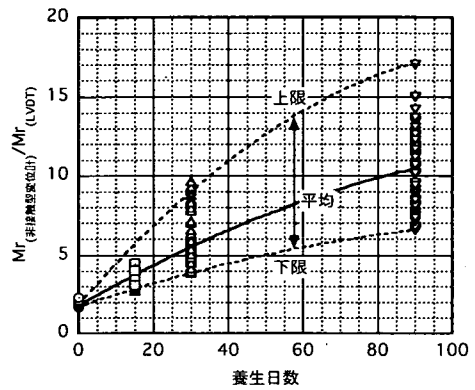


図-8 軸変位の計測方法の影響 (レジリエントモジュラスの比と養生日数の関係)

接触型変位計での 0 日養生とほぼ同じ程度であり、LVDT で計測した軸変位量に基づくレジリエントモジュラスの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に起因していると考えられる。

また、図-8 は LVDT によるレジリエントモジュラスと非接触型変位計によるものとの比、すなわち $M_r(\text{非接触型変位計})/M_r(\text{LVDT})$ を養生日数ごとにプロットしたものである。図中には上限・平均値・下限値をそれぞれ内挿した曲線も描いてある。図から、養生 0 日で 1.6~2.3 (平均 1.86)、養生 90 日で 6.5~17.1 (平均 10.40) の範囲にあり、養生期間が長くなるほど両者のレジリエントモジュラスの差が大きくなることわかる。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ものと解釈できる。

さらに、図では示していないが、0 日養生と 90 日養生のレジリエントモジュラスの比、すなわち $M_{r,90\text{日養生}}/M_{r,0\text{日養生}}$ は、非接触型変位計に基づく場合は 5.8~13.2 (平均 7.73) の範囲、LVDT に基づく場合は 1.2~2.0 (平均 1.63) の範囲となっており、LVDT 計測によるものでは養生に伴うレジリエントモジュラスの増分をかなり過小評価していることがわかる。

(3) 繰返し載荷方法の影響

西らがこれまで採用してきた偏差応力漸減法²⁾で実施した試験から得られたレジリエントモジュラスについて考察する。載荷応力経路を図-9 に示すが、偏差応

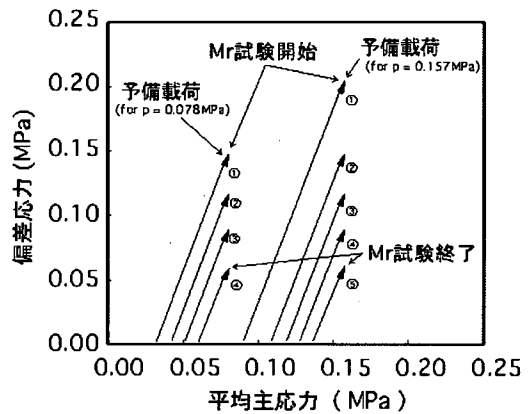


図-9 載荷応力経路 (西らの方法に準拠)

力漸減法では、まず 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) で繰返し載荷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 回程度の繰返し載荷を行う。引き続き、4) 繰返し載荷時の平均主応力 (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 回程度の繰返し載荷を行う。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載荷時平均主応力 (0.157MPa) に移り、1) ~ 6) を繰り返す。8) 7) を全載荷時平均主応力段階が終了するまで繰り返すというものである。

図-10 に、一例として偏差応力 0.088MPa の場合の

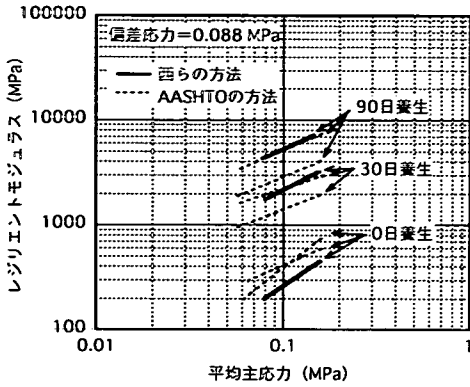


図-10 繰返し載荷方法の影響 (レジリエントモジュラスと平均主応力の関係)

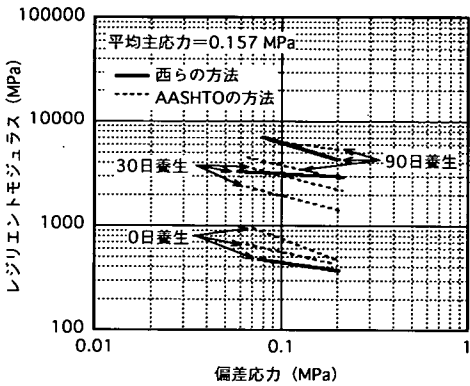


図-11 繰返し載荷方法の影響 (レジリエントモジュラスと偏差応力の関係)

レジリエントモジュラスと平均主応力の関係を、また平均主応力 0.157MPa の場合のレジリエントモジュラスと偏差応力の関係を図-11 に帰線でのみ示す。なお、図中には前掲の AASHTO 法による結果も示してある。また、西らの方法では 15 日養生供試体で試験を行っていないので AASHTO 法による結果も省いてある。図から、レジリエントモジュラスは AASHTO 法による結果と同様に平均主応力の増加及び偏差応力の減少とともに増加する傾向を示していることがわかる。またその大きさもほぼ同じオーダーであることがわかる。試験本数が少ないため断言はできないが、少なくとも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のではないかと推察できる。

さて、図-12 は西らの既往のデータとの比較例である。西らの方法で行った試験の結果 (非接触型変位計によるものと LVDT によるもの) の帰線と既往のデータを示したものである。まず、非接触型変位計から算出したレジリエントモジュラスと LVDT から算出したレジリエントモジュラスの関係は、すでに図-7 で認められたように LVDT による方が小さくなっており、既往のデータはこの LVDT のレジリエントモジュラスと同じオーダーであることがわかる。また、前述のように、養生日数の増加に伴うレジリエントモジュラスの増分も過小評価していることがわかる。したがって、既往のデータ、特に養生期間が長い場合のレジリエントモジュラスを舗装の構造解析等で利用する場合には注意を要する。

5. 結論

本研究では、水硬性粒度調整鉄鋼スラグ路盤材のレジリエントモジュラスを評価するために、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、既往の試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) 水硬性粒度調整鉄鋼スラグ路盤材のレジリエントモジュラスは、既往の結果と同様に、平均主応力の増加及び偏差応力の減少とともに増大し、また平均主応力と偏差応力のべき型関数で近似できる。また、レジリエントモジュラスは養生期間の増加とともに大きくなる。
- 2) 供試体側面に設置した非接触型変位計による軸変

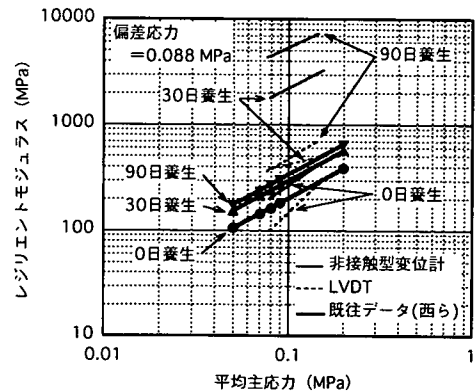


図-12 西らの既往データとの比較

位置から求めたレジリエントモジュラスと三軸セル外部に設置した LVDT から求めたレジリエントモジュラスの比は、養生0日で平均1.86、養生90日で平均10.40であり、養生期間が長くなるほど大きくなる。

- 3) LVDT に基づいてレジリエントモジュラスを評価する場合、養生日数の増加に伴うレジリエントモジュラスの増分をかなり過小評価する。
- 4) 本研究で採用した応力レベル範囲では、繰返し載荷方法の違い (ASSHTO 法と西らの方法) の影響は非常に小さいことが推察される。

なお、本論文で示したレジリエントモジュラスの値については、試験舗装での原位置 FWD 調査によってこれまでに得られている施工直後の HMS-25 路盤のレジリエントモジュラスが 392 ~ 981MPa (平均 547MPa) の範囲にあり本論文の試験結果と同じオーダーにあることから、妥当な値であると考えられる。なお、原位置調査から得られたレジリエントモジュラスの詳細については、データの蓄積を待って別の機会に報告する予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：舗装設計施工指針，2001.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 例えば, Seed, H.B. and Chan, C.K.: Effect of duration of stress application on soil deformation under repeated loading, *Proceedings, 5th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng.*, Vol. 1, pp. 341-345, 1961.

(2002.11.12 受付)

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

Nobuyuki YOSHIDA, Yasunari SUGISAKO and Hiroshi NAKAMURA

The resilient modulus M_r of hydraulic mechanically stabilized slag base-course material was evaluated by carrying out a repeated loading triaxial compression test with improved measurement techniques of axial strain and applied load. The repeated loading was imposed following the method suggested by AASHTO and also the one used by Nishi *et al.* for comparison. From the results, M_r depended on both applied mean principal stress and applied deviator stress and increased with curing time. Use of axial strain measured by LVDT outside the triaxial cell underestimated M_r and the hydraulic nature. Two loading methods gave little difference in the estimated M_r for the stress level applied in this study.