



舗装と交通荷重に関する地盤工学

4. 路床・路盤の材料・力学特性

佐藤 研一 (さとう けんいち)
福岡大学 教授

竹内 康 (たけうち やすし)
東京農業大学 教授

木幡 行宏 (こはた ゆきひろ)
室蘭工業大学 准教授

平川 大貴 (ひらかわ だいき)
防衛大学校 助教

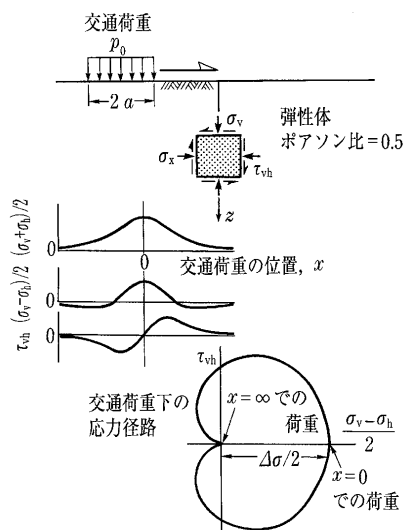
4.1 はじめに

舗装は、第2章の図—2.1にもあるように、アスファルト舗装の表・基層およびコンクリート舗装のコンクリート版の下部にある路盤と路床により、主に交通荷重を支持している。

路盤は、一般的に下層路盤と上層路盤に区別し、十分に締まった所定厚の層を通じて表層から伝えられた交通車両による荷重を均一に支持し、これを分散して路床に伝えることを主な役割とする。したがって、上層路盤は下層路盤に比べて強度的に強く、良質な材料を用いる。

路床は舗装の構造設計にあたって、基礎となる重要な部分であり、その評価は合理的に行わなければならない。我が国における路床の状況は、延長方向、深さ方向ともに変化に富んでおり、また軟弱な路床も多い。

図—4.1は Towhata et al. (1994)¹⁾が示した交通荷重が弾性体と仮定した地盤上を通過する場合の地盤内の応力状態である。この図からもわかるように、地盤内の主応力は、交通荷重の通過に伴い、連続的に回転している。Towhata らは、このような繰返し荷重下での変形量は、繰返し三軸試験から得られる結果の2倍程度であることを示している。しかしながら、路盤や路床の設計では、このような交通荷重の応力状態を考慮に入れることはなく、CBR 試験といった静的な荷重による材料の変形特



図—4.1 交通荷重による地盤内応力状態¹⁾

性から路盤・路床の層厚の検討を行っているのが現状である。

そこで、このような路盤・路床材料に用いられる材料の力学特性の現状と課題について①研究の動向、②材料・変形特性、③副産物の有効利用について概説する。

4.2 路床・路盤材料の現状と課題

我が国における路床・路盤材料に関する研究のトレンドから現状とその課題を明らかにするために、収集可能な範囲で文献検索を実施し、シソーラス（検索）用語の抽出を行った。使用した文献検索システムは、科学技術振興機構が有償で提供する科学技術全般データベース「JSTPlus」、「JST7580」を用いて1974年～2005年まで文献検索を実施した。なお、検索にあたっては、文献発行国を日本に限定し、「路床」、「路盤」を検索キーワードとし、約5 200件の論文を抽出した。

表—4.1に年代別にまとめた使用頻度の高い上位10個の検索キーワードおよび使用件数（括弧内は全キーワード数に対する割合）を示す。なお、表内において網掛けしたキーワードは、環境に関連するキーワードである。

紙数に制限があるため、詳細なキーワード表は割愛したが、舗装種目別キーワードのうち、使用頻度が最も高い「アスファルト舗装」に着目しその傾向を調べたところ、ヒートアイランド現象緩和、地下水涵養などの機能が謳われている「透水性舗装」の件数が著しく増加傾向にあった。このことより、近年の都市型環境問題に対する取り組みが活発になされているものと考えられる。また、舗装設計に必要な試験法に関連するキーワードを抽出したところ、「CBR 試験」が常にトップにあり、ついで「平板載荷試験」であったが、1990年代以降では「FWD 試験」に代表される新しい試験が多くなっていた。また測定値に関連するキーワードでは、1980年代までは CBR や K 値に代表される「支持力」が最も多かったが、1990年代以降では「変形・弾性係数」の使用頻度が最も高くなっていた。

1990年代以降のトレンドに注目すると、参考文献2)～7)にあるように、試験法キーワードの「CBR 試験」・「平板載荷試験」と測定値キーワードの「変形・弾性係数」は、現場試験である「FWD 試験（小型も含む）」によって関係づけられていることがわかる。また室内実

表—4.1 年代別にまとめた使用頻度の高い検索キーワード（上位10）

	1974~1979		1980~1989		1990~1999		2000~2005	
1	鉄道路盤	141(4.4%)	路盤	646(4.5%)	路盤	651(3.9%)	路盤	502(3.8%)
2	路盤	140(4.4%)	路床	314(2.2%)	鉄道路盤	315(1.9%)	リサイクル・再利用	245(1.9%)
3	路床	88(2.8%)	鉄道路盤	234(1.6%)	路床	310(1.8%)	路床	229(1.7%)
4	アスファルト	75(2.4%)	アスファルト舗装	205(1.4%)	リサイクル・再利用	264(1.6%)	鉄道路盤	196(1.5%)
5	舗装材料	68(2.1%)	廃熱利用	155(1.1%)	資源再生	212(1.3%)	資源再生	178(1.3%)
6	軌道	51(1.6%)	セメント安定処理	143(1.0%)	盛土	183(1.1%)	廃熱利用	124(0.9%)
7	盛土	49(1.5%)	スラグ	138(1.0%)	廃熱利用	175(1.0%)	CBR 試験	123(0.9%)
8	スラグ	43(1.3%)	軟弱地盤	135(0.9%)	舗装材料	162(1.0%)	盛土	118(0.9%)
9	軟弱地盤	42(1.3%)	盛土	131(0.9%)	アスファルト舗装	152(0.9%)	舗装材料	115(0.9%)
10	舗装設計	41(1.3%)	CBR 試験	126(0.9%)	CBR 試験	143(0.9%)	アスファルト	108(0.8%)

※：瀝青舗装を含む

験では、参考文献 8)～13)にあるように、繰返し三軸圧縮試験によりレジリエントモジュラス（復元弾性係数）を求めることが多くなってきている。これらの検索キーワードの動向および研究例より総合的に判断すると、CBR や K 値に基づいた経験的設計法から多層弾性理論に基づいた理論的設計法への移行が着実に進行しているものと考えられる。

また、表—4.1において網掛けした環境関連キーワードでは、「リサイクル・再利用」に代表される環境関連キーワードの使用頻度が1990年代以降に多くなっており、特に2000年代では全論文の検索キーワードである「路床」、「鉄道路盤」を上回っているのがわかる。これは、2000年の建設リサイクル法の制定による影響だと考えられるが、近年の環境関連法令の制定を背景にして、以下のようなキーワードの使用頻度が高くなっていた。

- ・環境保全：4 件（'70）、6 件（'80）、26 件（'90）、45 件（'00）
- ・二酸化炭素：0 件（'70）、1 件（'80）、6 件（'90）、15 件（'00）

以上の結果より、従来、表基層材料を中心に行われてきた環境問題解決型の研究課題が、「路盤」、「路床」を検索キーワードとした研究課題であっても顕在化してきているとともに、理論的な舗装設計確立に向けての動きも活発化していることがわかる。しかし、環境問題解決型の研究と理論的舗装設計が必ずしも連携しているわけではなく、研究テーマの多くが途上にあると言ってよい。

2005年に閣議決定された京都議定書目標達成計画では、舗装分野においても直接・間接的省 CO_2 化が求められており、(1)ヒートアイランド対策、(2)低燃費型建設機械の導入、(3)混合セメントの利用促進、(4)廃棄物の発生抑制、再使用、再生利用の促進、といった項目が挙げられる。このうち、項目(1)に着目すると、前述した「透水性舗装」はまさに的を射たテーマであるが、比較的交通量の多い舗装に従前の技術を適用しようとした場合、表層からの浸透水と交通荷重の繰返し作用とで路床が泥濘化し、通常の舗装に比べて寿命が短くなる。そのため、再構築あるいは維持修繕の頻度が多くなり、(4)の廃棄物の抑制が難しくなってしまう。

路床・路盤関連の研究技術開発において、環境問題解決型の研究課題への取り組みは重要であり、多くの研究者や技術者が積極的に取り組むべき課題ではあるが、透水性舗装の一例に代表されるように、設計あるいは維持修繕のことを常に念頭に置き、取り組んでいく必要があると考えられる。

4.3 路床・路盤材料の強度・変形特性

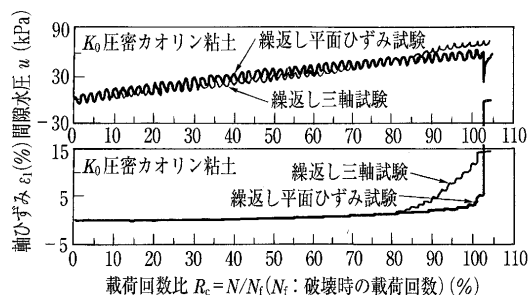
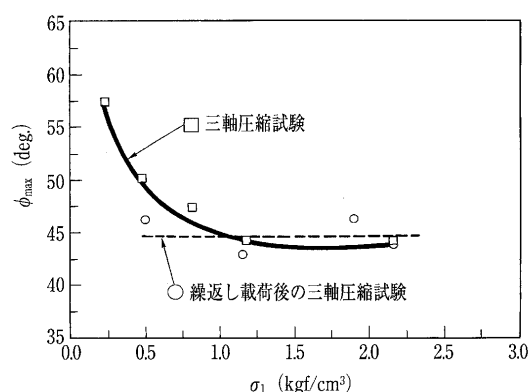
道路、鉄道、空港など交通荷重を受ける構造物では、舗装されることが一般的となっており、舗装下の地盤材料に求められる荷重条件は繰返し荷重となる。したがって、土質力学で一般的となっている土の強度特性を表す粘着力 c やせん断抵抗角 ϕ は、道路、鉄道、空港の路床・路盤材料の強度評価や路床・路盤厚さを決定する設計ではほとんど用いられていない。これは、これらの構造物が静的荷重によるせん断破壊よりはむしろ破壊に至る前の交通荷重による変形量と支持力が重要となるからである。ここでは土質力学的な視点から、低拘束圧下および繰返し載荷や移動荷重を受ける路床・路盤材料の強度・変形特性について述べることにする。

4.3.1 路床・路盤材料の強度特性

路床・路盤材料に作用する応力は低拘束圧条件での繰返し荷重である。さらに、交通荷重は移動荷重であるため、路床・路盤に作用する応力は主応力回転を伴い、卓越振動数は海洋波浪や地震より大きく、鉄道で 5～7 Hz 程度、道路交通で 10～30 Hz である¹⁴⁾。また、路床・路盤は地下水位以上で不飽和土の場合が多いが、降雨などの影響で飽和土となることもある。

飽和粘性土は、繰返し荷重を受けると過剰間隙水圧が発生する。図—4.2は、 K_0 圧密カオリン粘土に対して行った非排水繰返し三軸および平面ひずみ試験による間隙水圧および軸ひずみと載荷回数比の関係である¹⁵⁾。載荷回数とともに間隙水圧が上昇し、破壊ひずみの 8 割程度から軸ひずみが増大している。特に、平面ひずみ試験では、破壊直前で軸ひずみが急増し、急激に破壊に至る特徴を示している。

路盤材として用いられることが多い粒度調整碎石の三軸圧縮試験および繰返し三軸試験で得られるせん断抵抗


図—4.2 繰返し载荷による間隙水圧の発生¹⁵⁾

図—4.3 粒度調整碎石のせん断抵抗角と拘束圧の関係¹⁶⁾

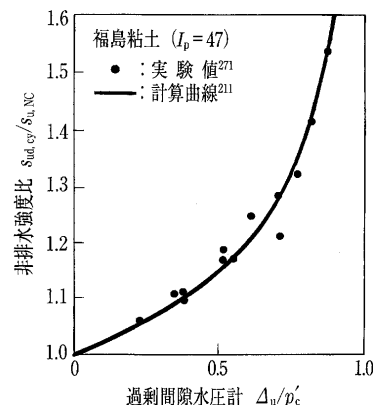
角を、 $\phi_{\max} = \arcsin\{(\sigma'_1 - \sigma'_3)/(\sigma'_1 + \sigma'_3)\}$ として求めた場合の $\phi_{\max}$ と拘束圧の関係を図—4.3に示す¹⁶⁾。一般に、破壊時のモールの応力円に接する包絡線は曲線を描き、拘束圧が大きいほど $\phi_{\max}$ は小さくなる。図—4.3に示す例では、低拘束圧では、繰返し载荷を与えない場合には $\phi_{\max}$ が50°以上の値を示しているが、繰返し载荷後の三軸圧縮試験による $\phi_{\max}$ は、45°程度で拘束圧にかかわらずほぼ一定である。言い換えると、繰返し载荷により静的強度が低下したと言える。一方、粘性土のような粘着力を持つ地盤材料が非排水状態で繰返し载荷を受け、その後、排水され過剰間隙水圧が消散すると、低下した非排水強度が繰返し载荷を与える前より増加する。

図—4.4は非排水強度比と過剰間隙水圧比の関係である¹⁷⁾。図中、 $s_{ud, cy}$ は過剰間隙水圧消散後、 $s_{u, NC}$ は正規圧密粘土の非排水せん断強度をそれぞれ表している。非排水強度比は、過剰間隙水圧比が大きいほど大きいことから、非排水繰返しせん断中に発生する過剰間隙水圧が大きいほど、繰返し载荷後の排水による強度回復が大きくなることが分かる。

最近、降雨による雨水を路盤・路床に浸透させる透水性舗装が行われているが、舗装下と路盤・路床間に十分な排水機能を持たせないと、短時間の雨水浸透で過剰間隙水圧が急激に増加し、路床・路盤材料の強度が一時的に急激に減少することが考えられる。したがって、透水性舗装を行う場合には、適切に十分な排水層の設置が望まれるところである。

4.3.2 路床・路盤材料の変形特性

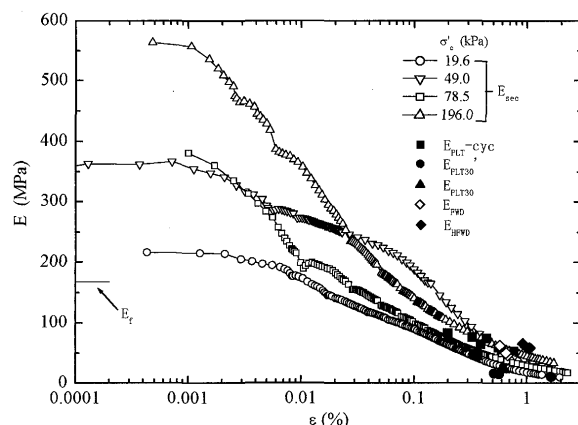
交通荷重や地震荷重などの動的荷重を解析する場合に必要な地盤材料の変形特性を「動的変形特性」と呼


図—4.4 排水後の強度回復と間隙水圧比の関係¹⁷⁾

ぶことが多いが、これは誤解を招く用語である。「動的」とは、本来、加速度や速度項の影響が無視できない現象を指し、「動的」に対する「静的」は加速度や速度項の影響が無視できる現象である。したがって、本来の意味から言えば、地盤材料の変形特性を求めるための室内試験における「動的载荷試験」は加速度や速度を測定する振動・波動による試験であり、「静的载荷試験」は、加速度や速度を測定せず、荷重・圧力と変位・ひずみの測定を行う試験である⁵⁾。特に、弾性限界以下の微小ひずみレベルでは、単調载荷と繰返し载荷による三軸試験から得られる地盤材料の剛性の値は基本的に一致する。また、地盤材料の変形特性は、非線形性があることから、剛性を表す指標である「弾性係数」という用語は用いず、「ヤング率」や「変形係数」という用語を用いるのが一般的となりつつある。図—4.5は、粒度調整碎石を用いた試験盛土で実施した各種原位置試験と室内作製供試体による大型三軸圧縮試験によって得られた変形係数のひずみレベルによる比較である¹⁹⁾。図中、 $E_{PLT-cyc}$ は繰返し平板载荷試験の再载荷曲線での最大割線勾配、 E_{PLT30} は道路の平板载荷試験での変位1.25 mmにおける割線勾配、 E_{PLT30}' は平板载荷試験で変位1.25 mm付近における接線勾配、 E_{FWD} および E_{HFWD} は、FWDおよび小型 FWD による変形係数である。さらに、 E_{sec} は図中に示された拘束圧で実施した大型三軸圧縮試験から得られた割線変形係数である。 E_{sec} は軸ひずみ ϵ_a の増加とともに減少しており、変形係数のひずみレベル依存性が示されている。10⁻³ レベルのひずみで得られる原位置試験の変形係数と E_{sec} の値は、締固め程度の影響により多少の違いが見られるが、同じひずみレベルでおおむね一致していると考えられる。

(1) 変形特性を求めるための室内試験方法

土質力学的手法による繰返し変形特性を求めるための室内試験方法は、「地盤材料の繰返し変形特性を求めるための三軸試験方法 (JGS 0542)」(以下、JGS 0542) による場合が多く、地盤工学会基準として制定されている²⁰⁾。一方、道路分野では、「路盤材・路床土のレジリエントモデュラス試験方法 (E016)」(以下、E016) が行われている²¹⁾。この試験方法は、米国の AASHTO による試験方法 (T307-99 (2003)) に準じて、日本道路

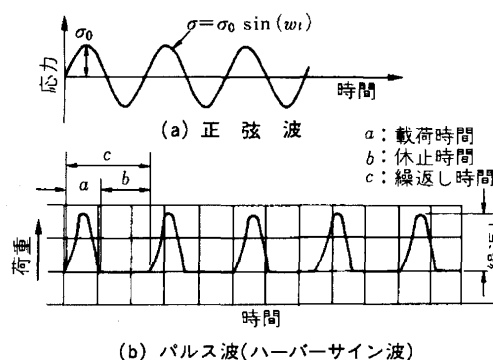

図—4.5 各種試験による粒度調整碎石の変形係数の比較¹⁸⁾

協会の「舗装調査・試験法便覧，第4分冊」に記載されている。レジリエントモデュラス試験によるレジリエントモデュラス M_r は，偏差応力（軸差応力）を偏差応力の最大値で発生した軸ひずみで除した値で定義され，「復元弾性係数」や「復元変形係数」などと訳されている。

AASHTOにおけるレジリエントモデュラス試験方法（以下， M_r 試験方法）は，1986年に「路床土のレジリエントモデュラス試験方法基準（Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrade Soils），T 274-82（1986）」として，初めて制定された。この試験方法では，最大 M_r が104 MPaを超えるような比較的硬い路床土材料の場合には，供試体上下端面の緩み層などに起因する軸変位量の測定誤差（ベディングエラー）を除去する目的で，軸変位量を供試体側面で測定し，最大 M_r が104 MPa以下の路床土材料の場合には，圧密によりベディングエラーの影響が少なくなることから，軸変位量の測定を外部変位計による载荷ロッドの鉛直変位量としてよいと記述されている。しかし，2003年に改訂された「土と粗粒材料のレジリエントモデュラス試験方法基準（Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials），T 307-99（2003）」では，試験時間の短縮や試験方法の簡便化のため，ベディングエラーの影響を考慮した供試体側面での軸変位量測定の記載が削除され，軸変位量の測定は外部変位計のみとなっている。一般に，粗粒材の三軸圧縮試験では，外部変位計を用いて軸変位量を測定すると，ベディングエラーの影響により得られる変形係数が過小評価されることが知られていることから，T 307-99による試験方法では得られる M_r の値は，実際の剛性を過小評価したものとなり不適切な値となる。言い換えると，軸変位量の測定に関しては，T 307-99の試験方法は時代の趨勢に逆行した試験方法である。

なお，欧州各国は，我が国と同様，CBR試験によって舗装設計を行っている場合が多いことから，ここでは触れないこととする。

地盤工学会基準（JGS 0542）と舗装調査・試験法便覧記載の試験方法（E016）の大きな相違点は载荷条件にあり，JGS 0542では载荷速度を0.05～1.0 Hzの間の



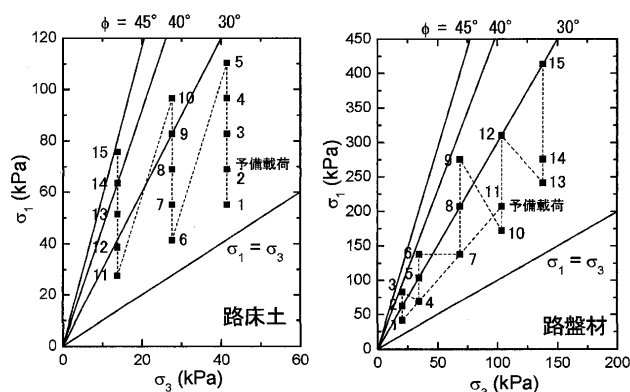
図—4.6 荷重波形の模式図

表—4.2 E016とJGS 0542の試験方法における主な比較

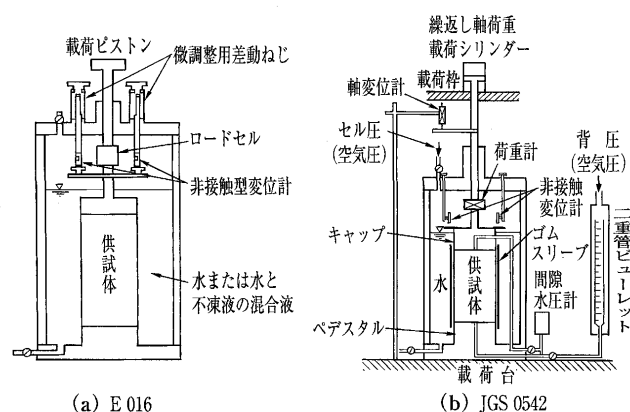
	アスファルト舗装要綱 E016 路盤材・路床土のレジリエントモデュラス試験方法	地盤工学会基準 JGS 0542 地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法
試験の目的	レジリエントモデュラスの測定	繰返し载荷中の変形特性
対象とする地盤材料	路盤材，路床土	砂質土，粘性土，礫，軟岩，改良土等の地盤材料
供試体作製方法	乱さない試料 ・トリミング法 乱さない試料 ・静的締め，振動締め	JGS 0520「土の三軸試験の供試体作製・設置方法」で規定された方法 ・トリミング法 ・負圧法
供試体の状態	不飽和または飽和状態	飽和状態
排水条件	非排水	非排水または排水
圧密条件	非圧密，ただし予備载荷あり	等方圧密または異方圧密
応力	全応力	有効応力
試験装置	三軸試験装置	三軸試験装置
载荷波形	ハーバーサイン波	サイン波，三角波
载荷条件	予備载荷（1000回）後に本試験 本試験 ・所定の拘束圧下で等方応力状態から所定の偏差応力まで片振りで繰返し载荷 ・1回100波，全15回 载荷段階 路床土 ・3種類の拘束圧と5種類の偏差応力による組合わせ 路盤材 ・5種類の拘束圧と3種類の偏差応力による組合わせ	圧密後に繰返し载荷 第1回目 ・片振幅軸ひずみが0.001%程度以下となるように等方応力状態または異方応力状態から両振り11波の繰返し载荷 第2回目 ・第1回目载荷での片振幅軸ひずみの2倍程度になるように両振り11波の繰返し载荷 第3回目以降 ・第2回目载荷と同様に载荷，载荷が可能な限り，繰返し载荷段階を繰り返す。
载荷速度	载荷時間0.1秒，休止時間0.9秒 周期1秒	0.05～1.0 Hzの間の一定周波数
各载荷段階の採用データ	最後の5波の平均鉛直復元変位	5波目と10波目の軸差応力と軸ひずみの履歴曲線
得られる結果	レジリエントモデュラス	等価ヤング率，履歴減衰率，片振幅軸ひずみ，履歴曲線

一定周波数で载荷波形を正弦波（サイン波）や三角波としているが，AASHTOのT 307-99に準拠したE016では，図—4.6に示すような载荷時間0.1秒，休止時間0.9秒，周期1秒のハーバーサイン波としている点である。正弦波とハーバーサイン波では，残留変形量の比率がサイン波のほうが3倍になり，1回当たりの残留ひずみ量に対する载荷回数との関連性は，現場との適合性を考慮すると，ハーバーサイン波のほうが高いとされている。表—4.2に両試験方法の比較をまとめた。表に示すように，JGS 0542では各载荷段階の途中で排水状態にするのに対して，E016では繰返し载荷を非排水条件で行う。また，繰返し载荷前に圧密を行わないで予備载荷を行い，その後，本試験を行うことから，非圧密・非排水試験（UU試験）である。各载荷段階における荷重条件を最大主応力 σ_1 ～最小主応力 σ_3 関係の応力経路図として図—4.7に示す。図中の●印が最大振幅における各载荷段階の応力点である。また，図には粘着力 $c=0$ として，モール・クーロンの破壊規準に基づいて $\sigma_1 = (1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi) \cdot \sigma_3$ から算定した $\phi = 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ の破壊線を示した。路床土に対するE016では，初めに大きい拘

講座



図—4.7 各載荷段階に対する応力経路図



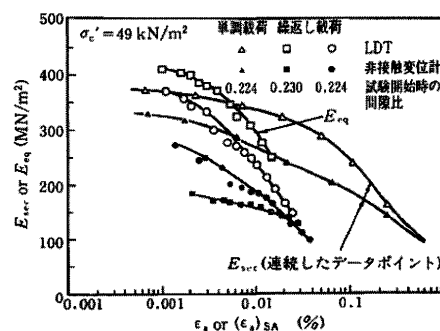
図—4.8 E016とJGS 0542の試験装置概略図

束圧で載荷段階が進むごとに応力振幅を大きくし、その後、拘束圧を小さくしていくのに対し、路盤材に対するE016では、路床土とは逆に、小さい拘束圧から繰返し載荷を行い、載荷段階が進むごとに応力振幅を大きくし、その後、拘束圧を大きくしていく。各載荷段階における最大振幅での応力点は、 $\phi = 30^\circ$ の場合には大きく破壊線を越える場合があるが、 $\phi = 45^\circ$ の場合には、破壊線近くの応力点もあるが、おおむね破壊線を越えていない。

図—4.8には両試験方法を行うための標準的な三軸試験装置の概略図をそれぞれ示す。E016は間隙水圧測定や載荷段階の間で排水を伴わないため、間隙水圧計や排水ルートがないが、JGS 0542は間隙水圧計と二重管ピュレットなどの排水量測定装置が設置されている。

(2) 変形係数

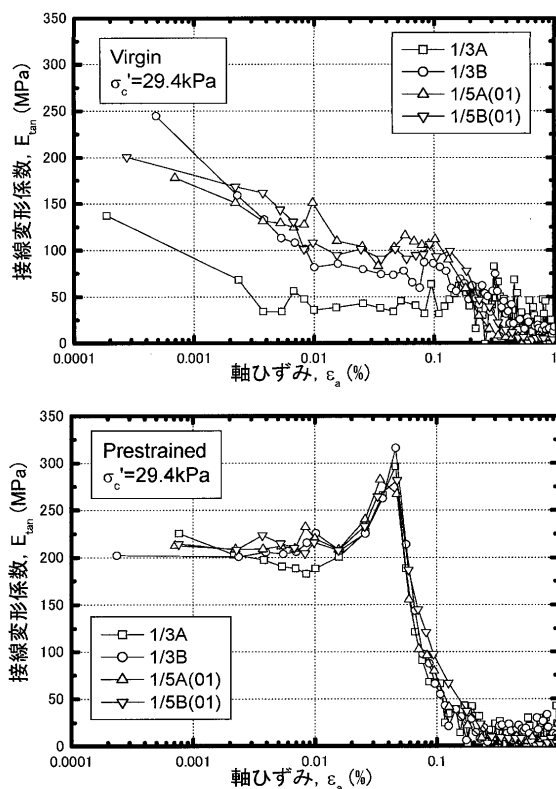
一般に、繰返し三軸試験から得られる変形係数 E は、等価ヤング率 E_{eq} と呼ばれ、軸差応力～軸ひずみ関係の履歴曲線から得られ、繰返し軸差応力の片振幅を軸ひずみの片振幅で除した値で定義される。一方、三軸圧縮試験においては、軸差応力～軸ひずみ関係の割線勾配を割線変形係数 E_{sec} 、接線勾配を接線変形係数 E_{tan} 、0.01%程度の軸ひずみレベルにおける接線勾配を初期変形係数 E_0 として、それぞれ定義することがある²⁰⁾。また、一軸圧縮試験では、応力～ひずみ関係において一軸圧縮強さ q_u の1/2における点での割線勾配を変形係数 E_{50} として定義している。レジリエントモデュラス試験によるレジリエントモデュラス M_r は、偏差応力（軸差応力）


図—4.9 粒度調整碎石の $E_{eq} \sim (\epsilon_a)_{SA}$, $E_{sec} \sim \epsilon_a$ 関係²⁰⁾

を偏差応力の最大値で発生した軸ひずみで除した値で定義される²¹⁾。 M_r は、「復元弾性係数」や「復元変形係数」などと訳されている。

図—4.9は、JGS 0542による密に締固めた粒度調整碎石の繰返し三軸試験による等価ヤング率と軸ひずみの関係である²⁰⁾。図中には、同一の圧密条件で行った三軸圧縮試験から得られた割線変形係数 E_{sec} も示されている。また、非接触変位計は供試体の上部キャップの変位を測定する外部変位計による結果であり、LDTは供試体側面から測定された結果である。外部変位計に基づく変形係数はLDTに基づく変形係数に比べて小さく、剛性を過小評価する。これは供試体上下端面の緩み層などに起因するベディングエラーの影響によるものである。すなわち、路盤材などの硬質地盤材料に対して繰返し三軸試験を実施して適切な変形係数を求めるには、供試体側面での軸ひずみ測定を行うことが望ましい²²⁾。また、変形係数には拘束圧依存性やせん断応力レベル依存性（載荷軸方向応力依存性）があり、さらに、異方性、排水条件、ひずみ速度など様々な要因に影響されることが分かってきた。これらの変形係数に及ぼす種々の影響については、文献²³⁾, ²⁴⁾に詳述されているので参考にされたい。

交通荷重を受ける地盤材料として、路床・路盤のほかは鉄道における道床バラストがある。道床バラストは軌道を支持するほかに、軌道構造にいくらかの弾性を持たせる役割があり、単粒度碎石が用いられている。図—4.10は、道床バラストの基準粒度範囲内にある2種類（粗粒な試料：A試料（ $U_c = 1.5$ ）、細粒な試料：B試料（ $U_c = 1.71$ ））の粒度分布に対して、それぞれ相似比1/3（ $D_{max} = 19.1$ mm）および1/5（ $D_{max} = 13.2$ mm）に粒度調整した単粒度碎石（1/3A, 1/3B, 1/5A, 1/5B）に対して行われた単調載荷三軸圧縮試験（図—4.10(a)）と1万回の繰返し載荷終了後に実施した単調載荷三軸圧縮試験（図—4.10(b)）から得られた軸差応力～軸ひずみ関係における接線勾配で定義した接線変形係数 E_{tan} のひずみレベル依存性を示している。繰返し載荷履歴を与えない場合には（図—4.10(a)）、粒度によらず E_{tan} は ϵ_a の増加とともに減少傾向にあり、初期剛性は粗粒なA試料に比べて細粒なB試料が大きい傾向にある。一方、履歴を与えた場合には（図—4.10(b)）、粒度によらず $E_{tan} \sim \log \epsilon_a$ 関係はほぼ等しいが、小ひずみレベルでは

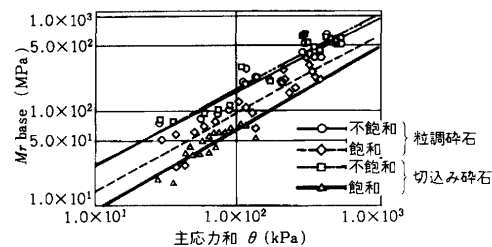


図—4.10 単粒度碎石の $E_{tan} \sim \varepsilon_a$ 関係²⁵⁾: (a) 繰返し載荷履歴を与えない場合, (b) 繰返し載荷履歴を与えた場合

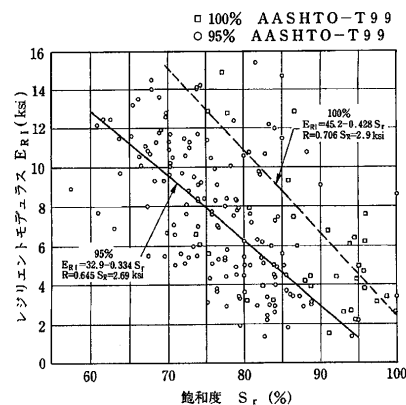
E_{tan} がほぼ一定の値を示した後に、繰返し載荷時の q_{max} に相当する $q = 110$ kPa のひずみレベル、すなわち $\varepsilon_a = 0.04\%$ 程度まで E_{tan} は増加傾向を示し、その後、減少傾向に転じる。粗粒材料に繰返し載荷履歴を与えた場合には、応力～ひずみ関係が S 字型を示し、繰返し載荷時の q_{max} における範囲内で弾性的性質が卓越したためであると考えられている²⁵⁾。

一方、レジリエントモデュラス試験によって得られる M_r については、未解明な部分が多いようである。図—4.11は、路盤材の主応力とレジリエントモデュラスの関係をそれぞれ示している²⁶⁾。ここで、主応力 θ は、 $(\sigma_1 + 2\sigma_3)$ である。三軸圧縮試験や繰返し三軸試験から得られる変形係数と同様に、 M_r にも拘束圧依存性やせん断応力レベル依存性が見られる。また、飽和状態と不飽和状態で圧力レベル依存性の程度 ($\log M_r \sim \log \theta$ 関係傾き) は同じある。図—4.12は、路床土の飽和度とレジリエントモデュラスの関係である²⁷⁾。締固め度にかかわらず、飽和度が小さくなるにつれ、レジリエントモデュラスが大きくなっている。これらは不飽和土のサクシオンによる影響などが考えられる。

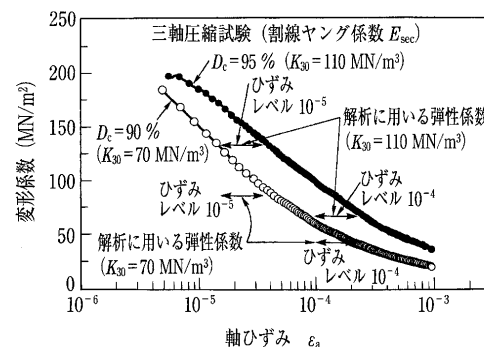
これまで述べてきたように、変形係数にはひずみレベル依存性があるので、種々の試験で得られた変形係数の比較は同一のひずみレベルで評価しなければならない。したがって、ひずみレベルを考慮した変形係数を用いることで合理的な設計を行うことができる。例として、図—4.13に、局所変形測定装置 (LDT) を用いた三軸圧縮試験 (拘束圧 20 kPa, 軸ひずみ速度 0.1%/min) によ



図—4.11 飽和状態の違いによる路盤材のレジリエントモデュラスの違い²⁶⁾



図—4.12 路床土の飽和度とレジリエントモデュラスの関係²⁷⁾

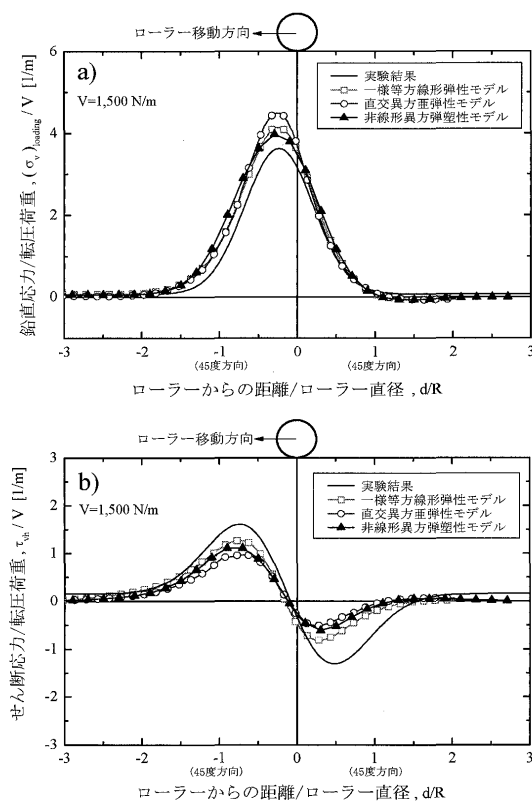


図—4.13 ひずみレベルと地盤の変形係数の関係²⁸⁾

る礫質砂の変形係数と軸ひずみの関係を示す²⁸⁾。この図から、 10^{-4} のひずみレベルにおける変形係数は 10^{-3} のひずみレベルにおける変形係数の 2.5 倍程度、 10^{-5} のひずみレベルにおける変形係数は 10^{-4} のひずみレベルにおける変形係数の 2 倍程度の関係にあることが分かる。

(3) 輪荷重 (Wheel load: 移動載荷) 作用時の変形特性

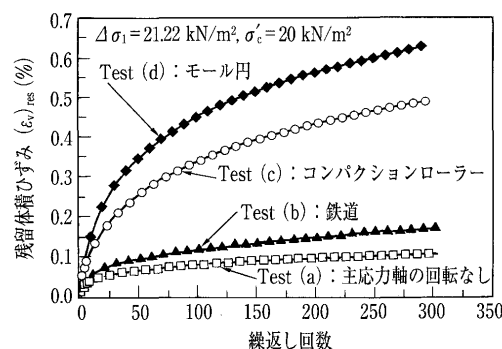
地盤 (路床・路盤) 内の応力値に応じたひずみが蓄積された結果が地表面沈下であると考え、移動載荷によって生じる地盤の残留変位の予測には地盤 (路床) 内の応力分布状態とその影響範囲の適切な理解・モデル化が重要となる。輪荷重が作用した時の地盤内応力分布を検討した模型実験結果²⁹⁾と FEM 解析結果³⁰⁾の比較を図—4.14に示す。数値解析で用いた解析モデルは、1) 一様等方線形弾性モデル、2) 直交異方弾性モデル、3) 非線形異方弾塑性モデルである。図—4.14より、ロー



図—4.14 輪荷重作用時での地盤内応力分布（実測値と解析値の比較）：a) 直応力分布，b) せん断応力分布^{29),30)}

ラー半径と同等な深さでの地盤内応力分布は、直応力分布（図—4.14(a)）は正規分布形、せん断応力分布（図—4.14(b)）は輪荷重の移動方向に応じて方向の異なるせん断応力が作用することが分かる。すなわち、この外力条件ではせん断応力の方向と大きさの変動に伴って主応力方向が連続的に回転する。この特性は地表面に鉄道軌道³¹⁾があっても同様である。

盛土材の残留変形に及ぼす主応力回転の影響は、未だ未解明な部分が多い。図—4.15は主応力の連続的な回転が繰返し载荷によって生じる残留変形に及ぼす影響を実験的に検討した結果³²⁾である。図—4.15より主応力の回転を考慮しないと残留変形量を過小評価することが分かる。このような知見は Towhata et al. (1994)¹⁾に一致する。一方、応力分布に関して実測結果と各解析モデルでの FEM 解析結果を比較（図—4.14）すると、検討した三つのモデル間では大きな差がなく、地表面に輪荷重が作用した時のローラー半径程度の地盤内応力分布での実測値と解析値は一致している。すなわち、载荷点からある一定距離離れた地盤内の応力分布は地盤材料の物性には大きく依存せず、弾性解の適用性は高い。輪荷重作用時において、载荷点（舗装表面）からある一定程度離れた地盤内応力分布、特に鉛直応力分布の一様等方線形弾性解の高い適用性については、例えば Sowers, G. F et al. (1961)³³⁾も同様な結果を報告している。また、輪荷重と表層の境界条件（すべり率）によってローラーの設置応力分布は大幅に異なるが³⁴⁾、载荷点からある一定程度離れた地盤内の鉛直応力分布の一様等方線形弾性



図—4.15 主応力の連続的な回転が地盤材料の残留変形に及ぼす影響³²⁾

解の適用性は高い。

上述の知見は、移動载荷によって生じる路盤・路床の残留変形は、载荷点近傍の粒状体のせん断変形が主要因であることを示している。輪荷重によって生じる残留変形量の正確な予測には、表層付近の構造体に関する精緻な構成モデルと主応力の回転を考慮するといった外力条件の適切なモデル化、および主要な影響範囲を考慮することが重要であろう。

4.4 副産物の路床・路盤材料への適用と課題

資源の有効利用と環境保全を促進するために、建設副産物をはじめ、建設工事以外から発生する他産業副産物を公共工事の建設工事に積極的に受け入れることが求められている。建設工事の中でも最も多量にリサイクル材の利用が望める舗装工事には多くのリサイクル材が持ち込まれ、かつその研究も盛んである。そこで、リサイクル材を使用するにあたり、材料の品質基準と適用範囲について述べる。また、最近のリサイクル品の研究の動向についてもまとめる。

4.4.1 他産業副産物の利用技術の現況と課題

国土研究所では、2006年に他産業から排出される副産物を建設業に積極的に受け入れることを大前提に「他産業リサイクル材料利用技術マニュアル³⁵⁾」を発刊し、材料受け入れの際の品質、環境安全、経済性、供給量等の条件についてまとめている。表—4.3は、このマニュアルのうち、リサイクル材料として比較的信頼性の高い材料でかつ路床・路盤材料への適用する場合について、試験評価方法、利用技術そして課題についてまとめたものである。マニュアルでは、他産業の副産物を地盤材料として用いる場合の環境安全性については重要な項目として取り上げていることが分かる。試験法では、環告46号での溶出量ばかりではなく、環告19号の含有量も項目として挙げられ、測定項目や試験の頻度について詳細に決められている。また、設計法では「舗装設計施工指針」、「アスファルト舗装要綱」、「セメントコンクリート舗装要綱」、「簡易舗装要綱」に示される手順に従うことになっており、従来の施工方法に準じている。しかしながら、試験成績表や設計図書といった工事記録の保管を義務化し、材料によっては繰返し利用と処分についても検討することとなっている。さらに、各材料の今後の

表—4.3 副産物の路床・路盤材への適用法³⁵⁾

副産物名	(1)適用範囲	(2)試験評価方法	(3)利用技術	(4)課題
一般廃棄物 溶融スラグ	路盤材料	1) 品質基準と試験方法: 「舗装設計施工指針」等に示されるクラッシュラン・粒度調整砕石の品質基準(「舗装試験法便覧」による)を満足しなければならない。 2) 環境安全基準と試験方法: ■溶出量は、「一般廃棄物溶融固化物の再生利用の実施促進について」に示される6項目(Cd, Pb, Cr(VI), As, Hg, Se)の溶出基準を満足しなければならない。 ■含有量は、「土壌汚染対策法施行規則」に示される上記の6項目の含有基準を満足しなければならない。 3) 試験方法: 溶出量試験(環告46号), 含有量(環告19号) 4) 安全管理: 発注者は一定ロット毎に溶出試験を実施	1) 設計: 「舗装設計施工指針」および「アスファルト舗装要綱」・「セメントコンクリート舗装要綱」・「簡易舗装要綱」等に示される方法と手順に準じて行う。ただし、舗装計画交通量 $T > 1000$ 台(台/日・方向)の場合は施工実績のある溶融スラグ骨材を使用する。 2) 施工: 路盤の施工は、「舗装設計施工指針」に順ずる。 3) 記録または繰返し再生利用と処分: 発注者は施工場所の平面図、断面図、数量表等の設計図書を、溶融スラグを用いた路盤材料の試験成績票および施工図面とともに保存し、当該路盤材料路盤材料の繰返し再生利用と処分に際して利用できるように備えるものとする。	1) 物理化学特性: スラグの性状は、溶融固化処理施設や焼成条件により異なるので、予め使用するスラグの品質を調査する必要がある。また要求性能を満足する材料であるか吟味する。 2) 利用実績: ①長期安全性の確保、②他の材料との混合利用法の検討 3) 供給性: 製造場所が限定されるため生産性・運搬経路等の確保 4) 二酸化炭素の発生量: スラグ製造時のCO ₂ の発生量の増加
下水道汚泥 溶融スラグ	路盤材料	一般廃棄物溶融スラグに準ずる。	一般廃棄物溶融スラグに準ずる。	1) 物理化学特性: スラグの性状は、骨材使用設備と管理方法によってかなりの差がある。品質の調査が必要 2) 利用実績: 利用実績が少なく、材料購入時の環境安全性を要確認。 3) 供給性: 必要入手可能調査の必要あり 4) スラグ製造時のCO ₂ 大量発生
石炭灰セメント 混合固化	下層路盤材	1) 品質基準と試験方法: 「舗装設計施工指針」および「アスファルト舗装要綱」でのセメント安定処理に準ずる。 2) 環境安全基準と試験方法: ■溶出量は、「土壌の汚染に係わる環境基準」に示される27項目から銅を除いた26項目(「土壌汚染対策法施行規則」)の溶出限界を満足しなければならない。 ■含有量は、「土壌汚染対策法施行規則」に示される上記の9項目の含有基準を満足しなければならない。 3) 試験方法: 溶出量試験(環告46号), 含有量(環告19号) 4) 安全管理: 発注者は一定ロット毎に溶出試験を実施	1) 設計: 「舗装設計施工指針」および「アスファルト舗装要綱」等に示す方法と手順に従って、路床条件・交通量・施工条件・経済性等を考慮して決定する。 2) 施工: 「舗装設計施工指針」および「アスファルト舗装要綱」に示される施工方法に順ずる。 3) 記録: 試験成績票および工事記録を残しておくなければならない。	1) 物理化学特性: 石炭灰の粒度・重金屬含有・溶出量は、火力発電所の構造と使用原料により異なり、製造ロットによっても異なる。また、重機転圧による圧砕・乾燥繰返しによるスレーキングの影響が懸念。 2) 利用実績: 使用例が非常に少ない。 3) 供給性: 常設のプラント設置が難しく、大規模供給できない。 4) 二酸化炭素の発生量: 製造時のCO ₂ の発生はない。
石炭灰石灰 混合固化	下層路盤・路床材料	1) 品質基準と試験方法: 「舗装設計施工指針」および「アスファルト舗装要綱」の石灰安定処理下層路盤に準ずる。 2) 環境安全基準と試験方法: 石炭灰セメント混合固化に準ずる	1) 設計: 下層路盤材料として等値換算係数は、0.25とする。路盤材料として、置き換えて使用する場合のCBRは、20%とする。 2) 施工: 土砂と同様の施工方法とする。 3) 記録: 試験成績票および工事記録を残しておくなければならない。	1) 物理化学特性: 製造後長期間保存ができないので、搬入後は速やかに使用する必要がある。 2) 供給性: 入手可能性の調査が必要。 3) 繰返し利用性: 再度固化処理を実施する必要あり。
廃ガラス(ガラスカレット)	下層路盤材料	1) 品質基準と試験方法: 適用する道路舗装の種類に応じて「舗装設計施工指針」・「舗装施工便覧」等の品質規格を準用する 2) 環境安全基準と試験方法: 一般廃棄物溶融スラグに準ずる	1) 設計: 「舗装設計施工指針」に示される方法と手順に準ずる 2) 施工: 路盤工法に応じ「舗装設計施工指針」等に示される方法と手順に準ずる。 3) 記録および繰返し利用: 記録は、一般廃棄物溶融スラグに準ずる。繰返し利用には、支障がない。	使用例が少なく、施工性、耐久性、経済性等のデータを蓄積するとともに、長期的な耐用性の把握に努めなければならない。

課題にも触れ、各材料の長期安全性・耐久性の確保、供給量の問題、CO₂発生量の問題を指摘している。特に長期的な安全性・耐久性については副産物を積極的に利用してゆく上においては、地盤環境・地盤工学上重要な課題であることはいうまでもない。

さらに、今後路床・路盤材として利用が望め、試験施工で用いる材料として、①一般廃棄物焼却灰焼結・焼成固化物破砕材、②下水汚泥焼却灰石灰・セメント混合固化材、③クリンカアッシュと、今後検討を待つ材料として①石炭灰溶融固化材、②瓦・陶磁器くず、③貝殻、④廃プラスチックについても概説している。いずれにしても今後このような副産物が道路建設において路床・路盤材料として用いられることは避けられず、その際に4.3で述べた材料特性の把握についても今後しっかりと検討していく必要があると言える。

4.4.2 副産物有効利用に関する研究の動向

副産物を道路の路床・路盤材料として用いることを前提としてその力学性質と適用性について研究を行っている事例を調べるために、過去10年間に発表された地盤工学会、土木学会の年次講演概要集から検索を行った。その結果、検索論文数は50編と毎年5件程度の発表があることが分かった。表—4.4は、研究対象となっている副産物の分類を示している。ただし、同一論文中に2つの副産物がある場合はそれぞれにカウントしている。

結果を見ると石炭灰を路盤材料として用いる研究が最も多い結果となった。特に石炭灰の中でもPFBC灰の固結力を生かした研究や石炭灰を造粒させた材料に関する

表—4.4 研究対象副産物の分類

副産物名	件数	副産物名	件数
石炭灰	11	コンクリート塊	3
建設発生土・汚泥	7	浄水・下水汚泥	3
アスファルト舗装発生材料	7	都市ゴミ溶融スラグ・焼成処理材	2
ガラスカレット・発泡廃ガラス	5	廃棄ビニール	2
鉄鋼スラグ	5	その他	3

る研究が中心であった。また、アスファルト舗装発生材やコンクリート塊(コンクリート舗装発生材料)に関する研究も多く、道路から発生した副産物を道路建設に積極的に使用していこうとする姿勢が研究の方向性にも現れていると言える。この中には、アスファルト舗装の下面に付着している材料(グリズリアンダー材)についての研究もあった。また、未だ有効利用が遅れている建設発生土・汚泥に関する研究件数も多いこともわかる。次にすでにJIS化され副産物の優等生である鉄鋼系のスラグ、産業副産物であるガラスカレット、ペーパースラッジと様々な副産物を道路事業へ適用しようとする研究も見受けられる。また、その他の中には、廃石膏、カーバイドなどもあり、今後さらに多くの副産物が道路工事適用されることが伺える。

しかしながら、いずれの研究も力学的な挙動をつかむものが中心で副産物を利用する場合の環境影響評価や、長期的な耐久性・安全性についてはほとんど議論されていない。この点については、前節の表に示されているような環境安全性の担保は重要な課題と言える。

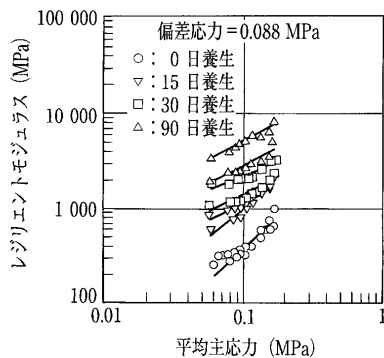
講座

4.4.3 副産物の強度・変形特性

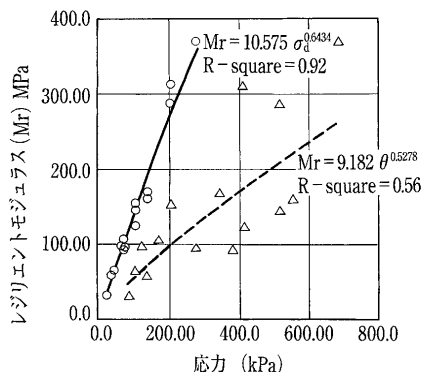
副産物を路床や路盤で用いる場合、前節で述べられたように各材料の強度変形特性を知る必要が生じる。しかしながら、副産物の研究事例のほとんどは、副産物の基本的な物理特性や修正 CBR 値を調べ、現況使われている材料との比較を行い、その適用性を論じているものが大半を占めている。そこで、ここではその中でも特にリサイクル材料の変形特性に着目した事例を紹介する。

図—4.16は、水硬性粒度調整鉄鋼スラグについて平均主応力とレジリエントモジュラスの結果を示している。材料の変形係数は、平均主応力の増加と養生日数の経過に伴って増加している。また、セメントキルンダストについて養生に伴う材料固化の影響について図—4.17に示すような結果も示されている。

表—4.5は、セメント添加を行った石炭灰を路盤材にて FWD のたわみ測定から、等値換算厚と等値換算係数の値の推定を行った結果である。石炭灰で構築された路盤は、技術基準に示す下層・上層路盤の基準を十分に満足することを示している。また、図—4.18に PFBC 灰を路盤材として用いた場合の室内走行試験結果を示している。自硬性を有する PFBC 灰は、普通路盤と比較しても走行回数に伴う変形量は小さく、良好な結果を示している。いずれの結果を見ても水硬性を有するような副産物では、養生日数の影響が変形特性の結果に現れ、その効果を考えると一般の路盤材より優れていることが分かる。しかしながら、いずれも長期的な耐久性については未だ未解明な部分があると言える。



図—4.16 レジリエントモジュラスと平均主応力の関係³⁶⁾



図—4.17 レジリエントモジュラスと応力の関係

4.4.4 副産物利用時における経済評価

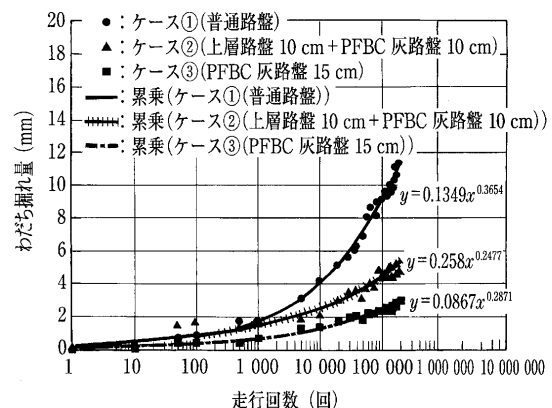
副産物のリサイクルを進めることは、循環型社会の構築の上で重要な課題の一つである。しかしながら、建設工事現場では、多様な副産物リサイクル材を用いることは、中間処理コストに伴う材料価格の上昇により、相変わらず安い天然材の利用を優先させているのが現状である。このような現状は、副産物のリサイクルを遅らせるばかりか、新しい技術の発展を遅らせることになっている。さて、平成14年度の国土交通省の調査によると建設発生土は、約7割が工事以外の利用の受入地、すなわち農地のかさ上げ、砕石採取地の埋立て、廃棄物処分場の覆土などの内陸受入地に利用されており、建設工事での建設発生土有効利用率はわずかに65%程度となっている。その結果、首都圏を中心とした地域では、大量の土砂の放置により自然環境・生活環境に影響を及ぼすとともに、約40%を占める新材（天然資源）の採取により、生態系の変動、水質汚濁、振動騒音問題や大気汚染など自然環境に多大な影響を及ぼしている。

地盤工学技術者において、「環境保全」や「リサイクル」は重要だと理解していても、昨今の厳しい情勢下においては、それらへ掛ける経費の算定やそのために得られる効果を適切かつ定量的に説明することが求められるため、具体的な対応に苦慮している場合が多い。特に問題が「生態系保全」に関連する場合は、「環境の経済評価手法」が必要不可欠となり、その考え方は非常に難しい。

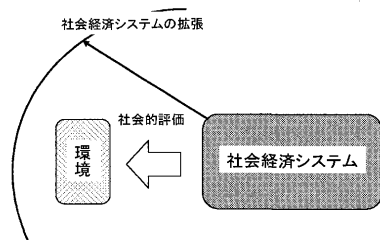
図—4.19に示すように、環境問題を解決する前提は、環境を社会経済システムの外側にあるものとして捉える捉え方を転換し、積極的にその内側に取り込むことである⁴⁰⁾。これまで、建設工事は材料費や運搬費などの直

表—4.5 一軸圧縮強さと FWD 調査結果³⁸⁾

No	FWDによる 等値換算厚 (T_{Ao}) $\bar{X}_{1-X} \cdot \sigma$	下層路盤		上層路盤		FWDによる 等値換算厚 (T_{Ao}) $\bar{X}_{1-X} \cdot \sigma$
		含水比 (%)	一軸圧縮 強さ (MPa)	含水比 (%)	一軸圧縮 強さ (MPa)	
A	39.80	17.4	2.55	0.66	17.6	2.79
B	35.50	18.4	1.88	0.60	18.0	3.86
C	34.00	16.7	2.21	0.58	17.6	3.17
						0.69
						0.63
						0.60



図—4.18 走行回数とわだち掘れ量の関係³⁹⁾

図—4.19 社会的評価と社会経済システムの拡張⁴⁰⁾

表—4.6 国内の環境コスト算定方法

評価方法	特徴
LCCO ₂ ²⁾ (生涯二酸化炭素放出量)	二酸化炭素(CO ₂)発生量による変化
産業総合研究所 ⁵⁾ (土木学会)	LIME(日本版被害算定影響評価手法)による評価 [資源使用量, 大気排出物質, 土地改良などを貨幣化]
地盤工学会 ⁴⁾ 九州支部	便益移転法による評価 [森林の公益的機能, 生態系環境コストを貨幣化]
循環型社会形成 推進基本法	数値目標として資源生産性概念導入 資源生産性: GDP(国内総生産)/天然 資源など投入量で定義されている指標

接コスト(内部コスト)のみが計算され, 総コストとされていた。これに対し, 建設工事に関する総コストを直接コスト(内部コスト)と環境コスト(外部コスト)の和として捉え, 環境に適切な経済評価を行い, 適切な環境価値付けを行う必要がある。国内では表—4.6に示すように建設に伴う環境コスト評価法として, 四つの方法が国内において提唱されている。いずれの環境コストの評価手法も長・短所がある。しかし, このような手法を積極的に利用し, 副産物利用による環境コスト(外部コスト)を正確に経済評価することによって環境に優しく, 経済的な事業を行うことができ, 副産物を積極的に用いる循環型社会の構築につながると言える。

4.5 おわりに

路床・路盤は, 道路構造の中で重要な機能を果たしている。今後透水性舗装や副産物の利用などこの分野の研究課題は多く, その発展性は大いに期待できると言える。

参考文献

- 1) Towhata, I., Kawasaki, Y., Harada, N. and Sunaga, M.: Contraction of soil subjected to traffic-type stress application, *Proc. of Inter. Sympo. on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, pp. 305~310, 1994.
- 2) 木幡行宏・関根悦夫・村田 修・矢崎澄雄・阿部長門・JIANG J. G.: れき材を用いた鉄道盛土の転圧試験(6)各種試験による変形係数の比較, 地盤工学研究発表会, 1996.
- 3) 関根悦夫・村田 修・木幡行宏・矢崎澄雄・菅野 宏・広津栄三郎: れき材を用いた鉄道盛土の転圧試験(4)締固め程度と K 値, 地盤工学研究発表会, 1996.
- 4) 関根悦夫・嶋 智彦・阿部長門・丸山暉彦: FWD による K 値と K_{30} 値との比較, 土木学会第54回年次学術講演会, pp. 384~385, 1999.
- 5) 田中秀明・佐藤研一・吉田信夫・永谷謙治: FWD を用いた道路舗装の支持力管理に関する検討, 地盤工学研究発表会, 1999.
- 6) 藤田博久・上浦正樹・高橋 顕: HFWD を用いた路床強度の評価, 土木学会第51回年次学術講演会, pp. 16~

- 17, 1996.
- 7) 尾本志展・溝渕 優: コンパクショングラウチングによる路床支持力の増強効果に関する基礎的研究, 土木学会第51回年次学術講演会, pp. 152~153, 1996.
- 8) 吉村啓之・中村悟志・森嶋洋幸: FWD による路床 CBR の推定, 第22回日本道路会議論文集, pp. 694~695, 1997.
- 9) 阿部長門・雑賀義夫: 路盤材料のレジリエントモジュラス, 舗装, 29-6, pp. 9~13, 1994.
- 10) 谷口 博・小林秀行・工藤正幸: 路盤材のレジリエントモジュラスに関する一検討, 土木学会第57回年次学術講演会, pp. 925~926, 2002.
- 11) 磯部雅紀・岡藤博国・片山潤之助: レジリエントモジュラスから見た路盤材料の力学特性に関する一検討, 土木学会第58回年次学術講演会, pp. 1409~1410, 2003.
- 12) 吉村啓之・谷口 博: 安定処理路盤材のレジリエントモジュラスに関する一検討, 土木学会第58回年次学術講演会, pp. 1403~1404, 2003.
- 13) 吉田信之・杉迫泰成・中村大史: 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, 土木学会論文集, pp. 213~219, 2003.
- 14) Massarsch, K. R., Madshus, C. and Bodare, A.: Engineering Vibrations and Solutions, General Report Session XI, Proc. of 3rd Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol. III, pp. 1349~1353, 1995.
- 15) 木全 卓・内田一徳・長谷川高士: K_0 圧密カオリンの非排水繰返し挙動, 第28回土質工学研究発表会講演概要集, Vol. 1, pp. 1023~1026, 1993.
- 16) 蔣 関魯・龍岡文夫・古関潤一・木幡行宏: 大型三軸試験による締固めたレキの変形・強度特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 96~97, 1996.
- 17) 安原一哉・松田 博: 粘性土の動的性質, 2. 粘性土の動的性質(その2), 土と基礎, Vol. 46, No. 12, pp. 59~64, 1998.
- 18) 木幡行宏・山下 聡・プラダグ・テージ: 地盤材料の小ひずみでの非線形性と地盤変形問題への適用, 2. 室内試験法(その1), 土と基礎, Vol. 45, No. 2, pp. 61~66, 1997.
- 19) 木幡行宏・関根悦夫・村田 修・矢崎澄雄・阿部長門・蔣 関魯: 礫材を用いた鉄道盛土の転圧試験(6)―各種試験による変形係数の比較―, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 2349~2350, 1996.
- 20) 地盤工学会: 変形特性を求めるための繰返し三軸試験, 土質試験の方法と解説―第1回改訂版―, pp. 659~678, 2000.
- 21) 日本道路協会: 路盤材・路床土のレジリエントモジュラス試験方法, 舗装調査・試験法便覧, 第4分冊, pp. [4]-55~[4]-64, 2007.
- 22) 龍岡文夫・木幡行宏: ベディングエラー, 土と基礎, Vol. 42, No. 9, pp. 53~55, 1994.
- 23) 澁谷 啓・小高猛司・龍岡文夫: 地盤材料の小ひずみでの非線形性と地盤変形問題への適用, 3. 地盤材料の変形特性(その1), 土と基礎, Vol. 45, No. 4, pp. 59~64, 1997.
- 24) 田中幸久・畑中宗憲・木幡行宏: 地盤材料の小ひずみでの非線形性と地盤変形問題への適用, 3. 地盤材料の変形特性(その2), 土と基礎, Vol. 45, No. 5, pp. 61~66, 1997.
- 25) 木幡行宏・三浦宏介・井口 充・関根悦夫: 相似粒度による単粒度碎石の強度・変形特性, 鉄道力学論文集, Vol. 7, pp. 25~30, 2003.
- 26) 阿部長門・雑賀義夫: 路盤材料のレジリエントモジュラス, 舗装, Vol. 29, No. 6, pp. 9~13, 1994.
- 27) Tompson, M. R. and Robnett, Q. L.: Resilient properties of subgrade soils, *Transportation Engineering Journal*,

講座

- ASCE, Vol. 105, TE1, pp. 71~89, 1979.
- 28) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説—土構造—，付属資料48，丸善，pp. 609~617, 2006.
 - 29) 川崎紘誉・平川大貴・龍岡文夫：転圧時における砂地盤内応力分布の実験的検討，第35回地盤工学研究発表会，pp. 1623~1624, 2000.
 - 30) 平川大貴・川崎紘誉・M. S. A. Siddiquee・龍岡文夫：地盤内応力に対する弾性解適用の検討，第35回地盤工学研究発表会，pp. 1625~1626, 2000.
 - 31) 石川達也・関根悦夫・三浦精一：粒状材料の繰返し変形挙動に及ぼす移動輪荷重の影響評価，土木学会舗装工学論文集，Vol. 11, pp. 23~32, 2006.
 - 32) Momoya, Y., Watanabe, K., Sekine, E., Tateyama, M., Shinoda, M. and Tatsuoka, F.: Effects of continuous principal stress axis rotation on the deformation characteristics of sand under traffic loads, *Design and Construction of Pavements and Rail Tracks—Geotechnical aspects and Processed Materials—*, pp. 77~87, Taylor & Francis, 2007.
 - 33) Sowers, G. F. and Vesic, A. B.: Stress distribution beneath pavement of different rigidities, *Proceeding of the fifth international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Vol. 2, pp. 327~331, 1961.
 - 34) 田中 孝：農業車輪下の土中における応力分布，農業機械学会誌，Vol. 21, No. 1, pp. 9~14, 1959.
 - 35) 舩土木研究所：建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル．
 - 36) 吉田信之・杉迫泰成・中村大史：繰返し三軸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，土木学会論文集，No. 739, V-60, pp. 213~219, 2003.
 - 37) Jian-Hua Zhu, M. Zaman, and J. G. Laguros: Resilient modulus and microstructure of Cement-Kiln-Dust stabilized base/subbase aggregate, *Soils and Foundations*, Vol. 39, No. 6, pp. 33~42, 1999.
 - 38) 田中 全・内田直人・池田浩一・山形恵也：石炭灰を用いたセメント安定処理路盤の実証施工について，土木学会第59回年次学術講演会概要集，V-661, pp. 1319~1320, 2004.
 - 39) 戸村豪治・黒島一郎・斉藤 直・安野孝生・濱田純夫・松尾栄治：加圧流動床石炭灰（PFBC 灰）を用いた路盤の室内走行試験（その2），土木学会第58回年次学術講演会概要集，III-346, pp. 691~692, 2004.
 - 40) 地盤工学会九州支部：建設発生土と廃棄物の有効利用に関する研究委員会報告書，2003.