

繰り返し載荷実験による関東ローム で埋戻した道路の沈下量予測

南形 英孝¹・吉崎 浩司²・萩原 直人³・赤木 寛一⁴

¹正会員 東京ガス株式会社 パイプライン技術センター(〒230-0045 横浜市鶴見区末広町一丁目 7-7)

E-mail:minagata@tokyo-gas.co.jp

²正会員 工博 東京ガス株式会社 パイプライン技術センター(〒230-0045 横浜市鶴見区末広町一丁目 7-7)

³工博 東京ガス株式会社 パイプライン技術センター(〒230-0045 横浜市鶴見区末広町一丁目 7-7)

⁴正会員 工博 早稲田大学理工学術院教授(〒169-8555 新宿区大久保三丁目 4-1)

ガス導管等の埋設に伴う道路上の掘削工事において、路床の埋戻しに建設発生土を利用することは、環境負荷の低減に大きく貢献する。しかし、関東地方に広く分布する関東ロームを埋戻しに用いるためには、輪荷重の繰り返し作用によって路面に生じる沈下特性を調べる必要がある。そこで、実験室にて関東ロームに対して種々の応力を繰り返し載荷する実験を実施し、その結果をもとに路面の沈下量を予測する手法を考案した。さらに、実規模にて関東ロームで埋戻した道路に、実車両を繰り返し通過させる実験を実施し、車両の通過台数と路面の沈下量の関係を調べた。沈下量の予測値と実規模実験の計測値を比較した結果、輪荷重の繰り返し作用に起因する関東ロームで埋戻した路面沈下量を合理的な範囲で予測できることが示された。

Key Words : Kanto loam, reuse, cyclic loading, subgrade, subsidence

1. はじめに

わが国においては、毎年多量の建設発生土が排出されているものの、その多くが再利用されずに廃棄されている。そのため、埋め立て地や処分場の容量は年々減少しており、将来不足することが懸念されている¹⁾。特に、都市部においては、新たな廃棄用地の確保が困難であることから、現場内あるいは現場間での利用等による再利用率の向上が強く求められている。さらに、土砂を運搬する車両から排出されるCO₂やNO_x等による大気汚染や、新材の採取による環境への影響も問題視されている²⁾。

このような状況から、2002年5月には国土交通省において「建設リサイクル推進計画2002」³⁾が策定されている。その中で、建設発生土に関しては、2010年度の公共工事における有効利用率を90%とする目標が定められており、これを達成すべく建設発生土の利用促進のための環境整備等が進められている。

ところで、ガス導管の埋設のような道路上での比較的小規模な工事においては、掘削によって排出された建設発生土を処分場や再処理プラントまで運搬して廃棄し、路床の埋戻しには新たに購入した砂や改良土を用いている。このような施工を行う理由は、低品質な材料によって埋戻しを行うことにより、その後の輪荷重の繰り返し

に伴って路面が徐々に沈下し、大きな沈下に至るのを防止するためである。特に、関東地方に広く分布している関東ロームは、掘削により乱されたときの強度の低下が著しいという特徴を持っているため⁴⁾、一般的にそのまま埋戻しに用いるのに適していないとされている。国土交通省が定める建設発生土の土質区分基準⁵⁾によれば、掘削により乱された関東ロームは、コーン指数により第3種または第4種建設発生土に分類され、いずれも道路(路床)盛土に利用する場合には、施工上の工夫または安定処理が必要とされている。

しかし、輪荷重の繰り返しによって生じる路面の沈下量は、埋戻し材料の品質だけでなく、施工後に繰り返される輪荷重の大きさによっても異なる⁶⁾⁷⁾。したがって、建設発生土が関東ロームであっても、その土質条件および輪荷重の条件によっては、それをそのまま埋戻しに利用することができると考えられる⁸⁾。関東ロームを含めた建設発生土を、そのまま埋戻しに利用することにより、建設発生土量やCO₂やNO_x等の削減による環境負荷の低減および工事コストの削減が可能となり、非常に多くのメリットが得られる。ただし、大きな沈下に至らないための埋戻し材料の条件および輪荷重の条件の組み合わせは明らかとなっていない。

そこで、本研究では、関東ロームを対象として輪荷重

～120(%)⁴⁾程度とされており、本実験に用いた関東ロームは、これに近い値を示していた。また、この関東ローム採取時のコーン指数は 334(kN/m²)であったことから、国土交通省が定める建設発生土の土質区分基準⁵⁾においては、第4種建設発生土に分類される。

(2) 関東ロームの締固め実験

a) 実験方法

次式(1)を用いて供試体の締固めエネルギーを算定した.

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \quad (1)$$

供試体を作成した後、それぞれの乾燥密度(JIS A 1225に基づく)と飽和度を調べ、これらの値と含水比および締固めエネルギーの関係を調べた。さらに、同じ条件で作成した供試体に対して一軸圧縮試験(JIS A 1216に基づく)を実施し、一軸圧縮強度と含水比および締固めエネルギーの関係も調べた。

図-2 に締固めエネルギーと乾燥密度の関係を示す。ケース A～ケース C について比較すると、低含水比の供試

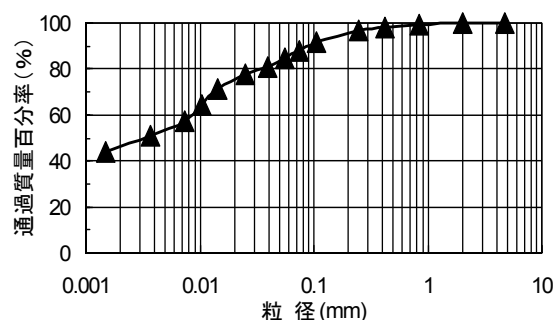


圖-1 粒徑加積曲線

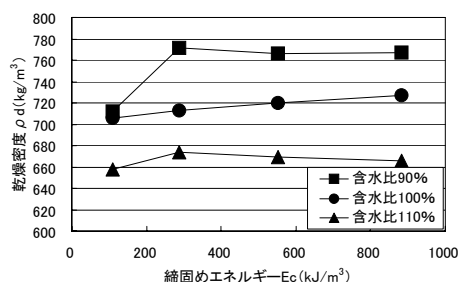


図-2 締固めエネルギーと乾燥密度との関係

ケース	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
試料	砂まじり火山灰質粘性土 (VH ₂ -S)											
含水比 w (%)	90.6	88.9	89.2	90.1	100.8	101.5	99.3	98.2	110.8	108.9	109.1	109.4
ランマ重量 W (kN)	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
ランマ落下高さ H (m)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
層当たりの突固め回数 N_L (回)	5	13	25	40	5	13	25	40	5	13	25	40
層数 N_B (層)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
締固めエネルギー E_c (kJ/m ³)	110.4	286.9	551.8	882.9	110.4	286.9	551.8	882.9	110.4	286.9	551.8	882.9

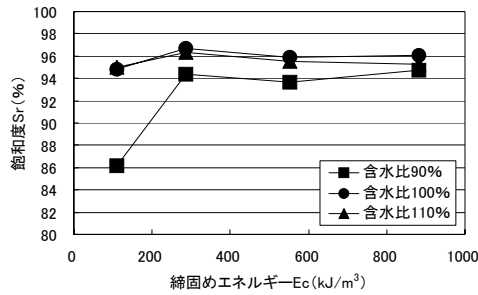


図-3 締固めエネルギーと飽和度との関係

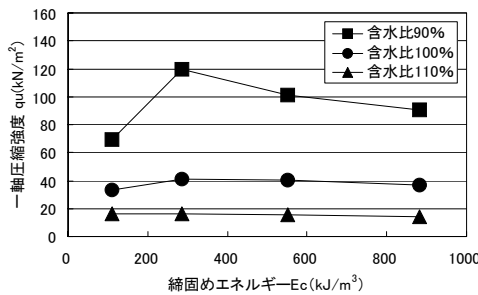


図-4 締固めエネルギーと一軸圧縮強度との関係

体ほど締固め後の乾燥密度は高くなる。また、締固めエネルギーが $110.4 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$ のときと $882.9 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$ のときとを比較すると、低含水比のものほど乾燥密度の増加量が大きいことがわかった。このことから、低含水比の関東ロームは、高含水比のものよりも締固めの効果が高いと言える。

図-3 に締固めエネルギーと飽和度の関係を示す。ケース A～ケース C のいずれにおいても、締固めエネルギー $286.9 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$ 以上のときの飽和度は $94\% \sim 97\%$ の範囲であった。

図-4 に締固めエネルギーと一軸圧縮強度の関係を示す。ケース A～ケース C で比較すると、一軸圧縮強度は低含水比のものほど高いことが確認された。また、ケース A、ケース B については、締固めエネルギー $286.9 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$ において一軸圧縮強度は最大となり、締固めエネルギーがそれよりも大きくなると一軸圧縮強度は徐々に低下した。

本実験から得られた、含水比、締固めエネルギーと乾燥密度、飽和度および一軸圧縮強度の関係は、既往の調査⁹⁾においても報告されているように相互に整合した結果であると言える。

c) 関東ロームの転圧方法の検討

本研究に用いた関東ロームを、機械式のランマを用いて締固める際の最適な転圧方法について検討した。

前項に述べた締固めによる一軸圧縮強度の低下は、過剰な締固めエネルギーの付与により、関東ローム中の吸着水が自由化し、土に水を加えたような状態となり、軟弱化したために発生したと考えられる⁴⁾。この性質が、

表-3 検討に用いた機械式ランマの仕様

エンジン	2 サイクルエンジン
出力(W)	3000
打撃回数(回/sec)	10
重さ(kg)	62
打撃板	スチール製

表-4 機械式ランマの締固めエネルギー

掘削幅 (mm)	敷きならし厚 (mm)	転圧回数 (回/層)	締固めエネルギー (kJ/m³)
400	300 (2 層)	1	332.0～377.5
		2	664.0～755
		3	996.0～1132.5
	600 (1 層)	1	166.0～188.8
		2	332.0～377.5
		3	498.0～566.3

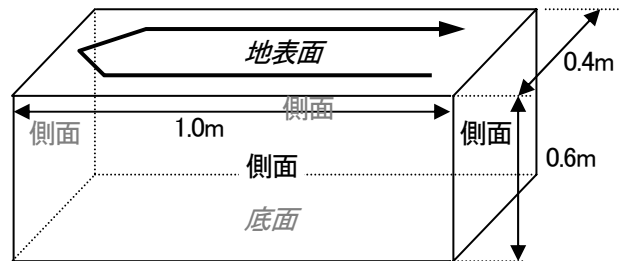


図-5 転圧回数 1 回(1 往復)

関東ロームの埋戻しを困難にしている要因のひとつとなっている。したがって、関東ロームを用いて路床を埋戻す場合には、締固めエネルギーの調節が必要である。

本研究で用いた関東ロームについては、締固めエネルギーが約 $300 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$ のときに一軸圧縮強度が最大となり、それ以上の締固めエネルギーを加えると軟弱化すると推定される。したがって、約 $300 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$ の締固めエネルギーにより関東ロームを締固めることにより、路床土を軟弱化させることなく支持力を高め、最も適した埋戻し状態とすることができる。

表-3 に本検討に用いた機械式ランマの仕様を示す。このランマを用いて砂質土を転圧したときの、打撃回数 1 回あたりの締固めエネルギーは $66.4 \sim 75.5 \text{ (J)}^{10)}$ である。また、図-5 に示すように、掘削穴を 1 往復転圧した状態を転圧回数 1 回と定義した。実際に長さ 1.0m、幅 0.4m の掘削穴を関東ロームで埋戻し、地表面を転圧したときの転圧回数 1 回の所要時間は約 60 秒であった。そこで、転圧回数 1 回のときの機械式ランマの打撃回数を 600 回とした。

以上の条件で、敷きならし厚および転圧回数をパラメータとして、路床土が受ける単位体積あたりの締固めエネルギーを算定した。表-4 に締固めエネルギーの算定結果を示す。その結果、敷きならし厚 300mm の場合には転圧回数 1 回のとき、敷きならし厚 600mm の場合には転圧

表-5 供試体の作成条件

ケース	A	B	C
土粒子の密度 (g/cm^3)	2.832		
飽和度 S_r (%)	95.0		
乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	0.767	0.707	0.660
含水比 ω (%)	90.3	100.8	110.4

回数2回のときに締固めエネルギーが $332.0 \sim 377.5(\text{kJ}/\text{m}^3)$ となり、路床土は最も適した埋戻し状態に比較的近くなる。ただし、敷きならし厚が大きい場合、転圧力が路床の下層部まで十分伝達されず、表層部のみが過転圧された状態となる可能性がある。したがって、本実験に用いた関東ロームを、機械式ランマを用いて埋戻す場合は、敷きならし厚を300mmとし、転圧回数1回で転圧するのが適切である。

3. 繰り返し載荷実験

輪荷重の繰り返し載荷によって生じる路面の沈下量を予測するため、繰り返し載荷実験を実施した。本実験では、前章の締固め実験に使用したのと同じ関東ロームを用いて作成した供試体に対して鉛直応力を繰り返し載荷し、供試体の土質条件、載荷する応力の大きさおよび回数と供試体に蓄積される鉛直ひずみ量の関係を調べた。

(1) 実験条件

a) 供試体の作成

表-5に供試体の作成条件を示す。前章に述べた締固め実験の結果、関東ロームを締固めた後の一軸圧縮強度は、締固めエネルギーおよび含水比によって異なることが明らかとなった。また、一軸圧縮強度が最大となるときに飽和度は約95%であった。そこで、締固め実験において使用したのと同じ関東ロームを、含水比がそれぞれ90%(ケースA)、100%(ケースB)、110%(ケースC)となるように調整し、十分締固めた状態を想定して飽和度95%となるように鋼製の円筒モールド(内径100mm、高さ127mm、内面にシリコングリスを塗布して摩擦低減を図っている)に詰めて供試体を作成した。なお、含水比を低減させる場合には、締固め実験と同様に自然乾燥させたのち加水した。

b) 載荷方法

図-6に繰り返し載荷実験に使用した装置の概要を示す。作成した供試体の上面と下面にポーラスストーンを設置することにより、供試体が排水・排気条件となる状態とした。この供試体に対して、容量980kPaの電空変換器(圧縮側：日本ムグ製 J813-004、伸張側：FAIRCHILD 製 T6000-06U)を介して、鉛直応力を繰り返し載荷した。

図-7に本実験における応力の載荷方法を示す。まず、応力を $\sigma_{\min} + \Delta\sigma/2$ まで加え、その後、最小応力 $\sigma_{\min}$ および最大応力 $\sigma_{\max}$ が一定となるように、周波数1Hzの正

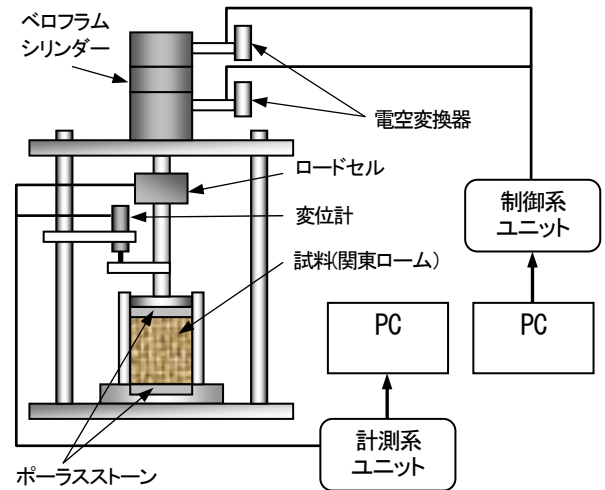
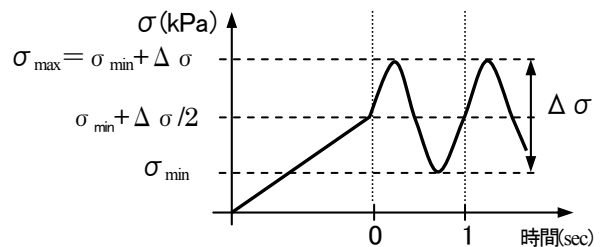


図-6 繰り返し載荷実験における装置概要

図-7 応力の載荷方法¹¹⁾

弦波形式¹¹⁾にて、応力を10万回まで繰り返し載荷した。

最小応力 $\sigma_{\min}$ については、生活道路の一般的な舗装構造であるアスコン35型を想定し、鉛直土圧の平均値に相当する深さ0.462mにおける静止土圧である9.2kPaとした。なお、静止土圧の算定においては、アスファルトコンクリートの厚さを0.1m、砕石(M-40)の厚さを0.1m、砕石(C-40)の厚さを0.15m、関東ロームの厚さを0.112mとした。各材料の密度は、アスファルトコンクリートでは $2.367(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、砕石(M-40)では $2.248(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、砕石(C-40)では $2.188(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、関東ロームでは $1.368(\text{g}/\text{cm}^3)$ とした。

また、最大応力 $\sigma_{\max}$ は、10tトラック(車両総重量98.1kN、積載無し)の後輪荷重39.3kNによって、路床に生じる最大鉛直応力を考慮して23.6kPa、62.5kPa、101.3kPaとした。

c) 計測方法

供試体に作用する荷重の大きさを、ロードセル(容量：1000N、東京測器製 TCLZ-1000N)を用いて計測した。また、繰り返し載荷した応力が、 $\sigma_{\min} + \Delta\sigma/2$ となるときに供試体上面の初期位置からの変位量 Δl を、軸変位計(容量：30mm、東京測器製 DDP-30A)を用いて計測した。なお、次式(2)に示すように、計測した変位量 Δl を供試体の初期高さ L で除した値を、供試体に蓄積されたひずみ ε と定義した。

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L} \quad (2)$$

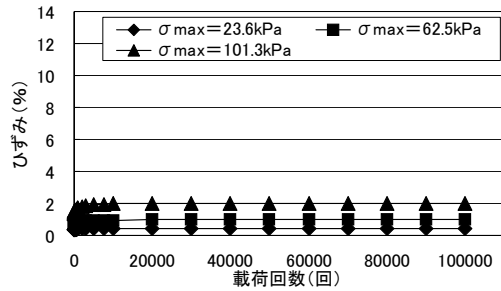


図-8 繰り返し載荷回数とひずみの関係(ケース A)

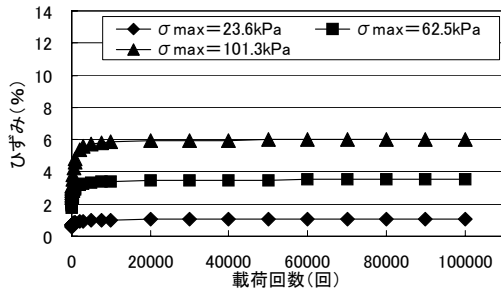


図-9 繰り返し載荷回数とひずみの関係(ケース B)

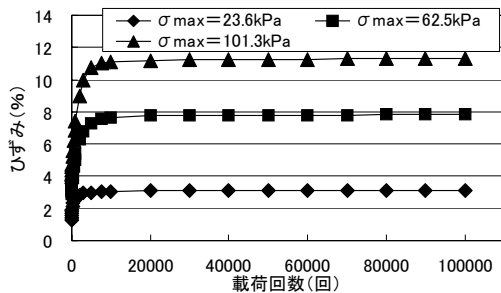


図-10 繰り返し載荷回数とひずみの関係(ケース C)

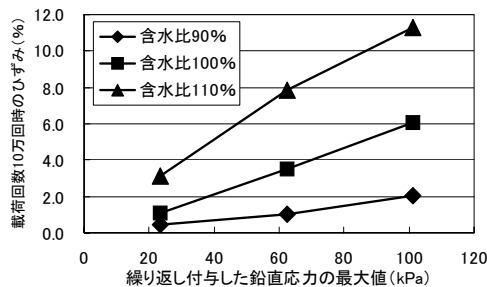


図-11 載荷した鉛直応力の最大値とひずみとの関係

(2) 実験結果

図-8～図-10 に各ケースにおける繰り返し載荷回数と供試体に蓄積されたひずみの関係を示す。実験の結果、ひずみは載荷の初期段階に大きく増加するものの、載荷回数が 1 万回に達すると増加量は極めて微小となり、ほぼ一定のレベルとなった。このことから、1 万回以上載荷した後のひずみは、載荷した応力の最大値に依存することが明らかとなった。

図-8～図-10 の実験結果のうち、繰り返し載荷回数 10 万回時におけるひずみと繰り返し載荷した鉛直応力の最

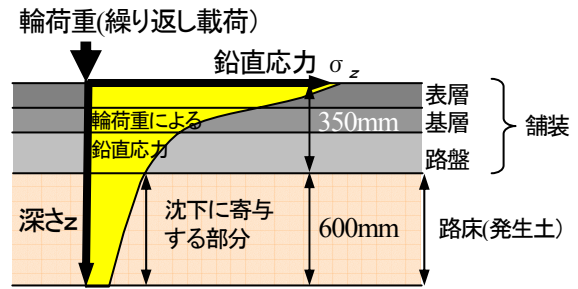


図-12 沈下のメカニズムおよび道路のモデル(アスコン 35 型)

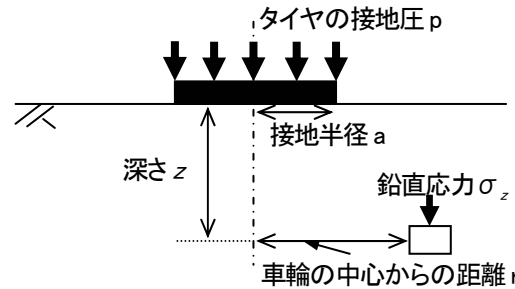


図-13 タイヤの接地圧および路床における鉛直応力

大値 $\sigma_{\max}$ の関係を図-11 に示す。その結果、ひずみは鉛直応力の最大値 $\sigma_{\max}$ と正比例の関係にあり、含水比が高いほどその傾きは大きくなることがわかった。

4. 沈下量の予測

第 3 章に述べた繰り返し載荷実験の結果を用いて、輪荷重の繰り返しによって生じる路面の沈下量を予測する方法について検討した。さらに、実規模にて関東ロームで埋戻した道路に、実車両を繰り返し通過させる実験を実施し、その結果と予測値とを比較することにより予測手法の妥当性を検証した。

(1) 沈下量の予測

a) 沈下のメカニズム

図-12 に沈下量の予測において仮定した沈下のメカニズムおよび道路のモデル(アスコン 35 型)を示す。本予測においては、埋戻した路床部分(路床厚 600mm)に輪荷重の繰り返しによるひずみが蓄積され、路面が沈下すると仮定した。なお、舗装部分(舗装厚 350mm)に蓄積されるひずみは、路床部分に蓄積されるひずみと比較して極めて小さいと考えられることから、完全な剛体であるとみなし、この部分には輪荷重の繰り返しによるひずみは蓄積されないものとした。

b) 輪荷重による鉛直応力

車両が路面を通過するときに舗装および路床に発生する鉛直応力 σ_z を算定した。Foster と Ahlvin¹²⁾は、輪荷重がタイヤの空気圧 p とタイヤの接地面積の積と釣り合うという関係から、図-13 に示すようにタイヤの接地圧 p がタイヤの接地面積と同じ面積をもつ半径 a の円の面積

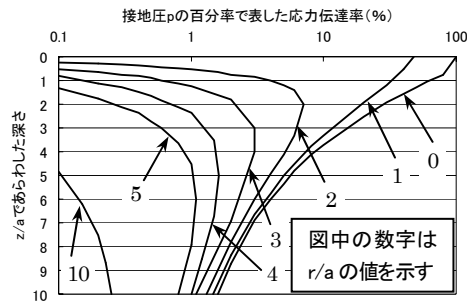


図-14 鉛直応力 σ_z と z/a の関係(Foster and Ahlvin¹²⁾)

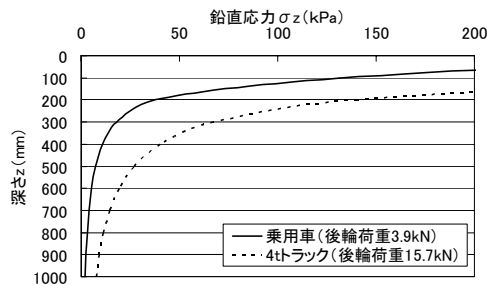


図-15 後輪荷重による鉛直応力 σ_z と深さ z との関係

に等しく分布すると考え、輪荷重による鉛直応力 σ_z を解析的に求めた。図-14 に接地半径 a 、深さ z 、タイヤの空気圧 p の百分率で表した鉛直応力 σ_z およびタイヤ中心からの距離 r の関係図¹⁰⁾を示す。また、この関係図およびタイヤの接地圧を用いて、乗用車(車両総重量 9.8kN、タイヤの接地圧 343.4kPa)の後輪荷重 3.9kN および 4t トラック(車両総重量 39.2kN、タイヤの接地圧 637.7kPa)の後輪荷重 15.7kN による鉛直応力 σ_z (車輪の中心からの距離 $r=0$)を算定した。図-15 に算定結果を示す。なお、タイヤの接地圧 p はタイヤの種類によって異なるものの、本検討では JIS D4202 および JIS D6401 を参考に設定した。

c) 路面の沈下量予測

第 2 章および第 3 章の実験において使用した関東ロームを用いて路床を埋戻し、舗装を構築した後に輪荷重の繰り返しを十分受けたときの路面の沈下量を予測した。第 3 章に述べた繰り返し載荷実験において、繰り返し載荷回数が 1 万回以上になると、ひずみの増加量は極めて微小となった。このことから、繰り返し載荷回数が 10 万回のとき、路床は十分な繰り返し載荷を受けた状態とみなせる。そこで、図-11 に示した載荷した鉛直応力の最大値とひずみの関係および図-15 に示した後輪荷重による鉛直応力と深さの関係を用いて、埋戻しに用いる関東ロームの含水比および繰り返し作用する輪荷重が異なる条件での路面の沈下量を予測した。なお、関東ロームの自然圧密および舗装を構築する際の転圧による沈下は考慮しないこととした。

図-12 に示したメカニズムによって沈下が発生すると仮定した場合、路面の沈下量 δ (mm)は、輪荷重の繰り返しによって生じるひずみを路床の深さ方向に 350mm から 950mm まで積分することによって算定できる。この算

表-6 路面の沈下量の予測結果

	含水比(%)		
	90.3	100.8	110.4
荷重条件	繰返し載荷回数 10 万回 における沈下量(mm)		
乗用車(9.8kN)	0.6	1.9	3.8
4tトラック(39.2kN)	2.3	7.1	14.1

定式は下式(3)で表される。

$$\delta = \int_{350}^{950} \varepsilon(z) dz \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon(z)$: 輪荷重の繰り返しによって深さ z の位置に蓄積されるひずみ、 z : 深さ(mm)

第 3 章に述べた繰り返し載荷実験から得られた最大鉛直応力とひずみの関係を用いて、輪荷重の繰り返しによって深さ z の位置に蓄積されるひずみ $\varepsilon(z)$ を求めた。図-11 において、最小自乗法を用いて含水比ごとに切片 0 の直線で近似して得られた式を $\varepsilon(z)$ とした。以上の手順により得られた含水比ごとの $\varepsilon(z)$ を式(4)～式(6)に示す。

$$\varepsilon_{w=90.3\%}(z) = 0.0189 \times \sigma_{\max}(z) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{w=100.8\%}(z) = 0.0582 \times \sigma_{\max}(z) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{w=110.4\%}(z) = 0.1161 \times \sigma_{\max}(z) \quad (6)$$

ここで、 $\sigma_{\max}(z)$: 輪荷重によって深さ z の位置において生じる最大鉛直応力(kPa)

以上の式を用いて、関東ロームおよび輪荷重の条件ごとに、繰り返し載荷回数 10 万回における路面の沈下量を予測した。表-6 に路面の沈下量を予測した結果を示す。予測の結果、乗用車および 4t トラックが走行する道路においては、埋戻しに用いた関東ロームの含水比が比較的高い 110% の条件であっても、路面の沈下量は 14mm 程度であった。

なお、実際の道路工事においては、路床を埋戻した直後に比較的簡易な舗装を構築(仮復旧)し、一定の期間車両を交通させた後、最終的な舗装を再構築(本復旧)している。繰り返し載荷実験の結果によると、沈下は繰り返し載荷の初期段階に発生し、その後は一定レベルとなることから、1) 仮復旧の段階においては、輪荷重の繰り返しにより路床にひずみが蓄積され、路面にある程度の沈下が生じるのに対して、2) 本復旧した後においては、輪荷重の繰り返しにより路床に蓄積されるひずみ量は微小であると考えられる。このことは、本復旧後の路面の沈下量は、今回予測した沈下量よりもさらに小さいことを示す。さらに、舗装厚が大きい道路においては、路床に作用する鉛直応力がより一層小さくなるため、沈下量は今回予測した沈下量よりも小さくなる。

これらのことから、本検討で算定した沈下量は安全側の評価となっており、交通荷重が 4t トラックと同程度の道路において、本研究に用いた関東ロームによる埋戻しは十分可能と判断される。

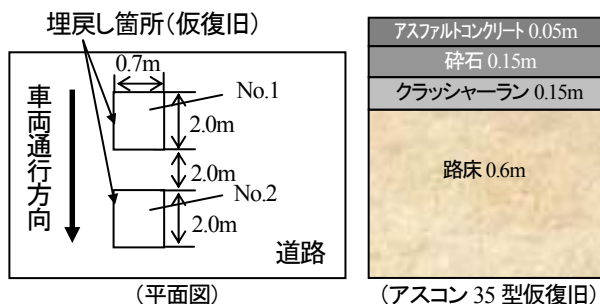


図-16 埋戻しの状況

表-7 埋戻し条件および施工後の土質条件

施工条件		No.1	No.2
		敷きならし厚(m)	0.3
土質試験結果	転圧回数(回)	1	1
	名称	火山灰質粘性土	
	土質分類	VH ₂	
	土粒子の密度(g/cm ³)	2.802	
	塑性限界(%)	88.2	
	液性限界(%)	111.2	
	設計CBR(%)	0.8	
施工後の土質条件測定結果	湿潤密度(g/cm ³)	1.368	1.378
	乾燥密度(g/cm ³)	0.679	0.695
	含水比(%)	101.6	98.4
	間隙比e	3.13	3.03
	コーン指数(kN/m ²)	521	747

(2) 沈下量の予測手法の検証

a) 実験方法

図-16 に示すように 2 つの掘削溝を関東ロームで埋戻した。埋戻した箇所の舗装構造は、生活道路において最も一般的なアスコン 35 型の仮復旧の状態とした。表-7 に施工条件、埋戻しに用いた関東ロームの土質試験結果(JGS 0051, JIS A 1202, JIS A 1203, JIS A 1205, JIS A 1211, JIS A 1228 に基づく)を示す。また、図-17 に埋戻し土の粒径加積曲線(JIS A 1204 に基づく)を示す。また、埋敷きならし厚を 300mm とし、各層を転圧回数 1 回で転圧した。

図-16 における仮復旧箇所の中央を車輪が通過するように車両を通過させた。最初に乗用車を沈下量の増加が観察されなくなった 600 台まで繰り返し通過させた後、4t トラックを同じ台数まで繰り返し通過させ、車両の通過台数と路面の沈下量の関係を調べた。

b) 実験結果

図-18 に車両の通過台数と路面の沈下量の関係を示す。実験の結果、実験室における繰り返し載荷実験と同様に、車両を数十台通過させた初期段階で大きく沈下し、その後は沈下速度が漸減する傾向を示すことが確認された。特に、埋戻し後の路面近傍の初期不整などによって、2mm 程度の沈下が観測されているが、その後は通過台数の増加とともにほぼ単調に沈下が発生している。

なお、同じ関東ロームで埋戻しを行ったものの、No.1 および No.2 の沈下量には 1mm 程度のばらつきが生じていた。これは、転圧時間や舗装の施工精度の差異および

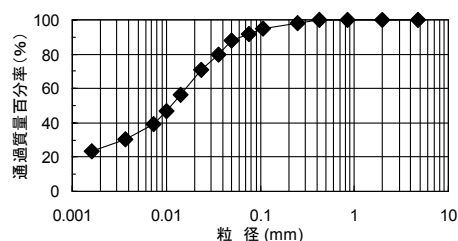


図-17 粒径加積曲線

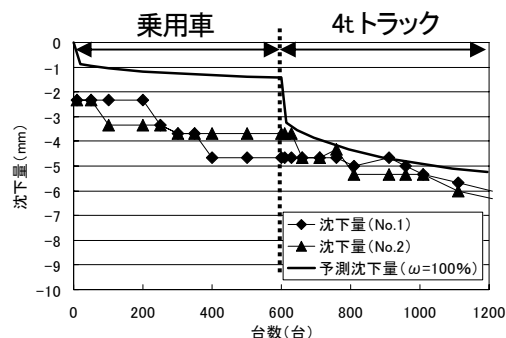


図-18 車両の通過台数と路面の沈下量の関係

測量誤差により生じたものであると考えられる。また、車両の通過台数 800 台～900 台にかけて、沈下量の計測値が 1mm 増加した後、再び 1mm 減少したものの、この値は計測上のミスと判断し、実験データから除去した。

c) 沈下量の予測値と計測値の比較

図-9 の繰り返し載荷回数とひずみの関係(含水比 100%) から、車両の各通過台数と鉛直応力の最大値とひずみの関係をそれぞれ調べた。これらの関係と図-15 から得られる乗用車と 4t トラックが通過する際に路床土の各深さに生じる鉛直応力の最大値を用いて、式(3)により実規模実験の路面の沈下量を予測した。なお、乗用車に引き続き 4t トラックが通過した場合の予測沈下量については、乗用車が 600 台通過した時点での沈下量に、4t トラックが 600 台通過したときの予測沈下量を重ね合わせた。

図-18 に沈下量の予測値を計測値とあわせて示す。沈下量の予測値と実規模実験から得られた計測値を比較した結果、実規模実験において、路面近傍の初期不整などによって 2mm 程度の沈下が生じたため、予測値と計測値には 1mm～2mm の乖離があるものの、いずれも載荷の初期段階で沈下が増大し、その後は車両の通過台数の増加とともに徐々に増加する傾向が確認された。これらのことから、今回提案した手法により、輪荷重の繰り返し作用に起因する関東ロームで埋戻した路面沈下量を合理的な範囲で予測できることが示された。

5. まとめ

本研究では、関東ロームを対象として応力を繰り返し載荷する実験を実験室にて実施し、その結果を用いて輪荷重の繰り返し作用によって生じる路面の沈下量を予測

する手法について検討した。さらに、実規模にて関東ローームで埋戻した道路に、実車両を用いて輪荷重を繰り返し載荷する実験を実施し、沈下量の予測値と実験における計測値の比較を行い、沈下量の予測手法の妥当性を検証した。その結果、明らかとなった事項は以下のとおり。

(1) 締固め実験の結果、低含水比の関東ローームは、高含水比のものよりも締固めの効果が高い。

(2) 締固め実験における一軸圧縮試験の結果、含水比が90%および100%のケースについては、締固めエネルギー $286.9(\text{kJ/m}^3)$ において一軸圧縮強度は最大となり、締固めエネルギーがそれよりも大きくなると一軸圧縮強度は徐々に低下した。

(3) 締固め実験に基づいて転圧方法を検討した結果、本実験に用いた関東ローームを、機械式ランマを用いて埋戻す場合は、敷きならし厚を300mmとし、転圧回数1回で転圧するのが適切である。

(4) 繰り返し載荷実験の結果、ひずみは載荷の初期段階に大きく増加するものの、載荷回数が1万回に達すると増加量は極めて微小となり、ほぼ一定のレベルとなった。このことから、1万回以上載荷した後のひずみは、載荷する応力の最大値に依存することが明らかとなった。また、繰り返し載荷回数10万回時に供試体に蓄積されたひずみは、繰り返し載荷した鉛直応力の最大値と正比例の関係にあり、含水比が高いほどその傾きは大きくなる。

(5) 沈下量の予測値と実規模での実験から得られた計測値を比較した結果、実規模実験において、路面近傍の初期不整などによって2mm程度の沈下が生じたため、予測値と計測値には1mm～2mmの乖離があるものの、いずれも載荷の初期段階で沈下が増大し、その後は車両の通過台数の増加とともに徐々に増加する傾向が確認された。これらのことから、今回提案した手法により、輪荷重の繰り返し作用に起因する関東ローームで埋戻した路面沈下量を合理的な範囲で予測できることが示された。

謝辞：本研究の実施にあたり、東京ガス株式会社の横山知章氏から貴重な助言をいただいた。また、本研究にお

ける実験の遂行にあたっては、株式会社関配の高橋泰之氏、基礎地盤コンサルタンツ株式会社の林三男氏に多大なる御協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：建設副産物の現状，国土交通省のリサイクルのHP (<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/fukusanbutsu/genjo/index.htm>)，pp.13，2005
- 2) 国土交通省：建設発生土等の有効利用に関する行動計画，建設発生土等の有効利用に関する検討会，別添-2，pp.1-2，2003.
- 3) 国土交通省：建設リサイクル推進計画2002，pp. 6，2002.
- 4) 高速道路調査会：関東ローームの土工—その土質と設計施工，共立出版，pp. 38-39，pp. 82-91，1973.
- 5) 財団法人 土木研究センター：建設発生土利用技術マニュアル，pp. 24，1997.
- 6) Monismith, C. U., Ogawa. S. and Freeme, C. R. : Permanent Deformation Characteristics of Sub-grade Soils due to Repeated Loading, Transportation Research Board, 1975.
- 7) Dingqing, Li. and Ernest, T. Selig. : Cumulative Plastic Deformation For Fine-Grained Subgrade Soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996.
- 8) 南形英孝, 吉崎浩司, 萩原直人, 石川元道, 坂本克己：導管工事における発生土抑制，2006 年都市ガスシンポジウム要旨集，日本ガス協会，2006.
- 9) 社団法人 地盤工学会：土質試験の方法と解説 第一回改訂版，pp.757，2000.
- 10) George, M. Fliz. and Thomas, L. Brandon. : Compactor Force and Energy Measurements, Geotechnical Testing Journal, ASTM, 1993.
- 11) 久楽勝行, 三木博史：改良土の道路下埋戻しへの利用に関する一考察，土木技術資料33-10，1991.
- 12) Foster, C. R. and Ahlvin, R. G. : Stress and Deflections Induced by a Uniform Circular Load, HRB Proc, 1954.

SUBSIDENCE PREDICTION OF KANTO LOAM SOIL BASED SUBGRADE USING CYCLIC LOADING EXPERIMENT

Hidetaka MINAGATA, Koji YOSHIZAKI, Naoto HAGIWARA and Hirokazu AKAGI

In a road excavation to lay a gas distribution pipeline, the re-use of the excavated soil for the subgrade backfill greatly reduces the environmental impact. However, when Kanto loam soil, which is widely distributed in the Kanto region, is employed for the backfill material, the relationship between the amount of the subsidence of the subgrade soil and the cyclic traffic loading is needed. In this study, cyclic loading tests on Kanto loam soil were conducted to investigate the subsidence characteristics. The subsidence prediction method of Kanto loam soil based subgrade under cyclic traffic loading was proposed using the cyclic loading test results. A full scale traffic loading experiments against road beds backfilled with Kanto loam soil were carried out. Consequently, a good correlation was shown to exist between the amount of the predicted subsidence and the measurement results.