

舗装路下の地盤内増加応力に及ぼす 凍結融解の影響

岸川鉄啓¹・川口貴之²・中村大²・Dagvadorj Otgonjargal³・川尻峻三²

¹ 学生会員 北見工業大学 大学院 (〒090-8507 北見市公園町 165)

E-mail: m1752200124@std.kitami-it.ac.jp

² 正会員 博士 (工) 北見工業大学 工学部 (〒090-8507 北見市公園町 165)

³ 学生会員 北見工業大学 大学院 (〒090-8507 北見市公園町 165)

積雪寒冷地にある舗装路に関して、水道管やガス管などが埋設されている深度での地盤内鉛直応力は、周辺地盤の凍結融解に伴って大きく変化することが報告されている。また、路面からの車両輪荷重による地盤内の増加応力についても、凍結融解に伴って変化することが明らかになってきており、これらについて詳細に検討することは寒冷地における埋設管の設計や既存埋設管の損傷リスクを考える上で重要だと考えられる。

そこで本研究では、重量が大きく異なる 2 種類の車両を用いて、周辺地盤の凍結融解が輪荷重の大きさと地盤内増加応力の関係に与える影響について検討した。また、舗装路を模擬した屋外土槽を用いて、凍結融解が地盤内での荷重分散 (応力分布) に与える影響についても検討した。

Key Words : freezing and thawing, stresses in the ground, pavement, wheel load, cold region

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地における舗装路では、冬季の地盤凍結に伴う凍上現象や春季の融解に伴って、路面に局部的な沈下や亀甲状のクラックが生じることは良く知られている¹⁾。しかし、最近では水道管やガス管が埋設されている舗装路下 1~1.5 m 程度において、周辺地盤の凍結融解に伴って地盤内鉛直応力そのものが変動することや、路面からの車両輪荷重による地盤内増加応力についても変化することが明らかになってきている²⁾。

これらの事実は、寒冷地の舗装路下にある埋設管には、地盤凍結が生じない地域に比べて大きな外圧荷重が作用する可能性を示唆している。一方、寒冷地においても各種老朽管の更新作業が急速に進められており、水道管については迅速かつ安全に遂行するための浅層埋設も試みられている³⁾⁴⁾。よって、寒冷地の舗装路下における地盤内鉛直応力や車両輪荷重等による増加応力に関して、その変動量や変動メカニズムを明らかにすることは、埋設管に作用しうる外圧荷重を的確に把握し³⁾、損傷リスクを考慮して老朽管の更新に関する優先度を評価するためにも極めて重要になってきている⁵⁾。

このような背景を踏まえて、筆者らは数年前から北海道

北見市内にある 3 か所の舗装路 (車道) 下に土圧計等を埋設し、凍結や融解に伴う地盤内鉛直応力の変動を計測し続けている²⁾。また、定期的に同一車両を通行させ、輪荷重による地盤内の増加応力についても計測している。

そこで本文では、これらの計測結果とともに、その結果を踏まえて 2016 年度から新たに実施した、車体重量が大きく異なる 2 種類の車両を通過させた際に生じる地盤内鉛直増加応力の違いやその変化に関する検討結果を報告する。さらに、舗装路を模擬した屋外土槽で実施した路面上の載荷位置を変化させた際の地盤内鉛直増加応力の分散やその変化に関する検討結果も報告する。

2. 試験方法

(1) 車両輪荷重による地盤内増加応力に関する試験

図-1 は各種計測機器を埋設している北海道北見市内にある 3 か所 (地点 A~C) の舗装路 (車道) に関する概略図であり、2016 年 11 月から 2017 年 5 月までの期間で、この内の地点 B, C で実施した 2 種類の車両を用いた試験時の様子も示している。地点 B の写真には試験に使用した乗用車 (約 2t)、地点 C の写真には除雪用のホイールロ

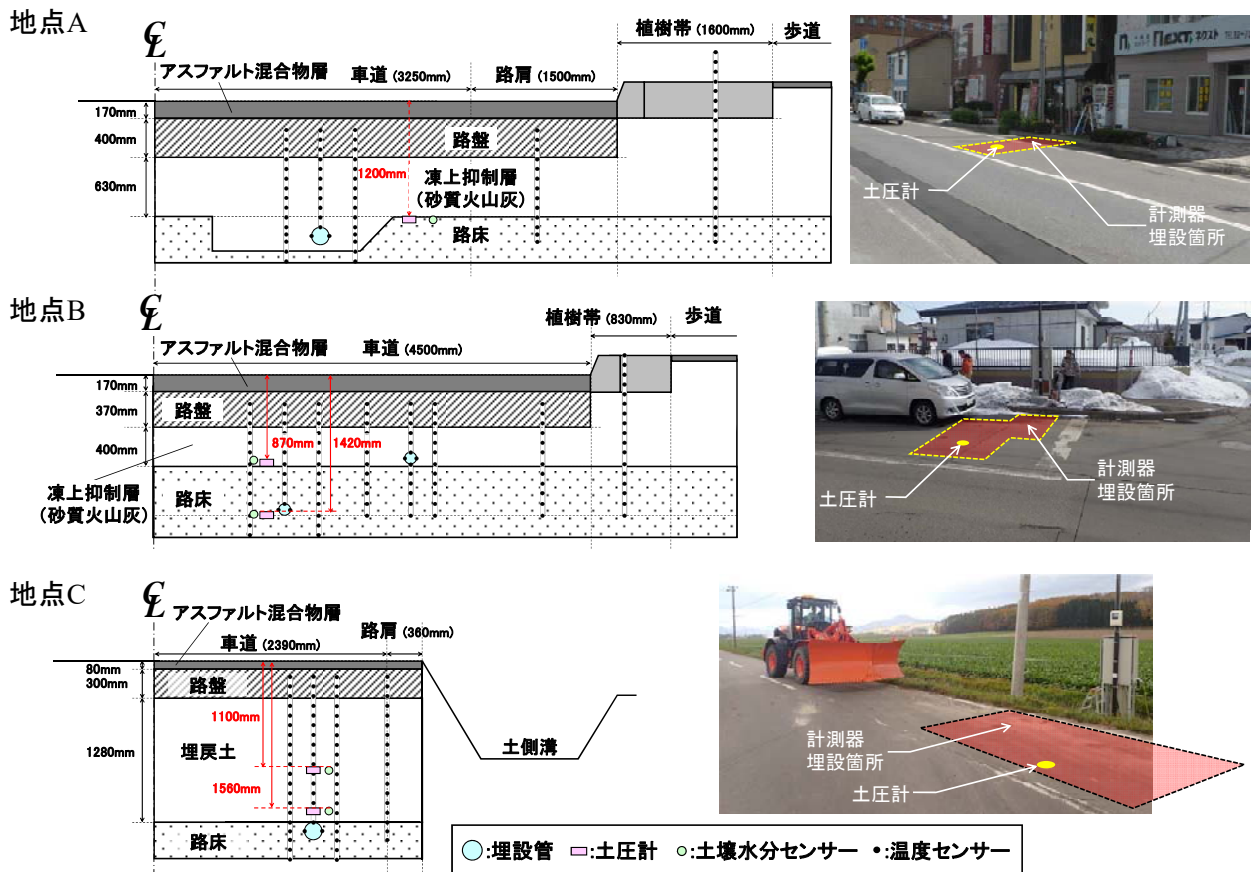


図-1 計測対象とした舗装路（車道）

ーダー（約10t）が示されている。

表-1 はこれら3か所の舗装構成と、埋設している計測機器（容量200kN/m²のロードセル型土圧計、土壤水分センサー）の設置深をまとめたものである。地点A, Bについては、砂質火山灰による凍上抑制層が設けられているが、地点Cについては古い道路であるために凍上抑制層は存在せず、計測機器を設置した後に掘削した土で埋め戻している。なお、これら土質の詳細については参考文献²⁾を参照されたい。また、上記の計測機器以外にも、土中の温度分布や凍結深さを把握するための多点温度センサー（熱電対センサーを深さ方向に10cm間隔で配置）も配置しており、定期的な実施した車両を通行させる試験時以外は毎時1回で計測している。また、車両を通行させる試験の際には、土圧計を高速サンプリング可能なセンサインタフェースに接続し、車両輪荷重による地盤内の鉛直増加応力 $\Delta\sigma_v$ を500Hzで集録した。

図-2 は2種類の車両を用いて実施した試験結果の例であり、計測日はそれぞれ未凍結期、厳冬期、融雪期に該当する。ここでは、常に未凍結領域に埋設されている地点Bの土圧計（1.42m）の計測結果のみを示している（凍結深さについては後述の図-6参照、計測期間中の最大凍結深さは101cm）。いずれの車両も可能な限り土圧計の直上に付けられた印の上を片輪が通過するようにし、走行速度は概ね10km/hとした。そして、数回実施した計測結果の中

表-1 調査地点の舗装構成と計測機器の埋設深

地点	層厚 (m)				埋設深 (m)
	アスファルト混合物層	路盤	凍上抑制層	埋戻土	
A	0.17	0.40	0.63	-	1.20
B	0.17	0.37	0.40	-	0.87
					1.42
C	0.08	0.30	-	1.28	1.10
					1.56

から $\Delta\sigma_v$ の最大値 $\Delta\sigma_{v,max}^V$ を抽出した。図中より、当然のことながら車体重量によって $\Delta\sigma_{v,max}^V$ は変化することが分かる。また、凍結領域の違いなどによって $\Delta\sigma_{v,max}^V$ が変化することや、未凍結期や融雪期では前輪と後輪による $\Delta\sigma_v$ のピークが確認できるが、厳冬期にはそのピークが不明瞭になることも確認できる。

(2) 屋外土槽による地盤内増加応力の分散に関する試験

図-3 は舗装路を模擬した屋外土槽（3.2×3.2×1.5m）の概略図であり、舗装構成はアスファルト混合物層0.1m、路盤0.45m、埋戻し土0.95mとした。図中には、2016年の秋から2017年春にかけて実施したタンピングランマーを用いて路面からの載荷位置を変化させた試験時の様子も示している。土圧計と土壤水分センサーは3深度（0.55, 0.85, 1.2m）に埋設されており、地盤内温度や凍結深さを

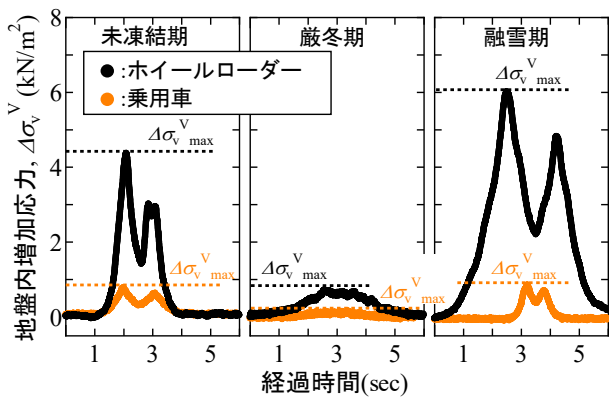


図-2 2種類の車両を用いた試験結果の例

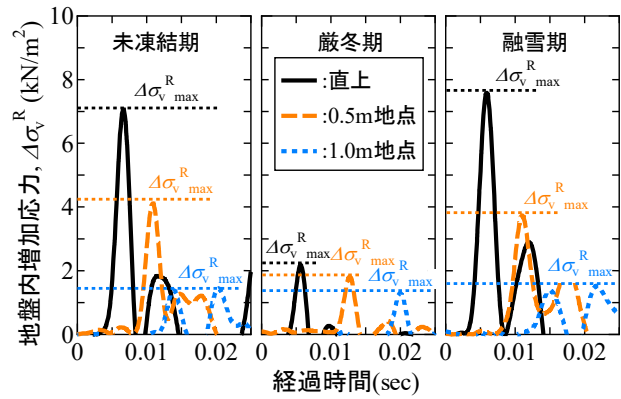


図-4 タンピングランマーを用いた試験結果の例

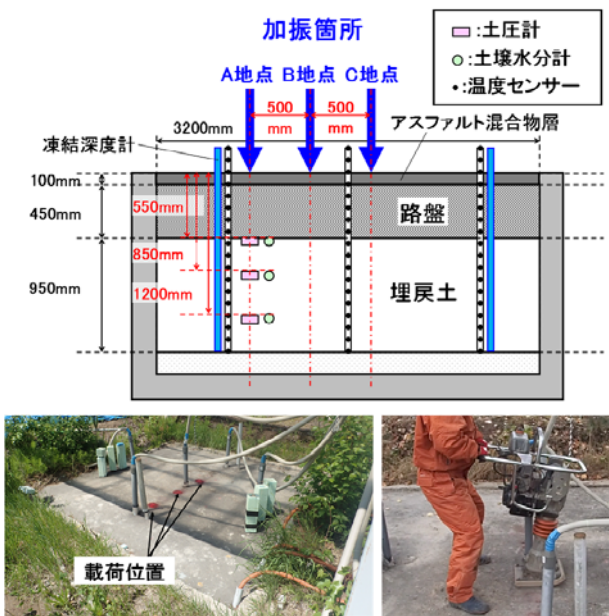


図-3 舗装路を模擬した屋外土槽

把握するための多点温度センサー(熱電対センサーを深さ方向に10cm間隔で配置)とメチレンブルー凍結深度計が配置されている。図中に示すように、試験は土圧計の直上と、そこから0.5、1.0m離れた位置で載荷した。なお、車両の試験と同様に、土圧計をセンサインタフェースに接続し、タンピングランマーによる地盤内の鉛直増加応力 $\Delta\sigma_v^R$ を集録した。ただし、集録周波数については、より動的な振動であることを考慮して10kHzとした。

図-4はタンピングランマーを用いて実施した載荷試験結果の例であり、常に未凍結領域に埋設されている最も深い位置の土圧計(1.20m)の計測結果のみを示している(凍結深さについては後述の図-11参照、計測期間中の最大凍結深さは68cm)。計測日はそれぞれ未凍結期、厳冬期、融雪期に該当し、それぞれ数回実施した計測結果の中から $\Delta\sigma_v^R$ の最大値 $\Delta\sigma_{v,max}^R$ を抽出した。先述した車両輪荷重による計測結果と同様に、凍結領域の違いなどによって $\Delta\sigma_{v,max}^R$ が変化することや、載荷する位置が土圧計の直上から離れるほど $\Delta\sigma_{v,max}^R$ が小さくなることが確認できる。

3. 試験結果と考察

(1) 車両輪荷重による地盤内増加応力に関する試験

図-5~7は2013年11月から2017年5月までの期間における各種計測結果をまとめたものであり、それぞれ地点A(図-5)、B(図-6)、C(図-7)の結果に該当する。

積算寒度については、地点A、Bでは最も近いアメダス観測地点である北見(図-5,6)、地点Cでは留辺蘂の計測データを用いて計算している(図-7)。また、凍結深さについては、土圧計近傍に設置された多点の温度センサーでの計測結果を比例配分することで算出した0℃の位置である。各シーズンの最大凍結深は凍結指数に応じて変化していることが分かる。

体積含水率 θ については、設置した土壌水分センサー周辺の土を用いた検定は行っていないため、3Vの励起電圧に対する出力電圧データRaw(mV/mV)を一律に砂質土を対象とした以下の式で $\theta(m^3/m^3)$ に変換したものである⁹⁾。

$$\theta = 0.079Raw - 0.355 \quad (1)$$

地点Aや地点Cの深い位置で計測された θ は計測期間中の変化がほとんどないことから、概ね地下水位以下にあることが分かる。また、地点Bの浅い位置で計測された θ については周辺地盤の凍結によって大きく低下し、融解とともに急上昇していることが分かる。さらに、地点Cの浅い位置で計測された θ は、頻繁に上昇しているが、これらは降雨が確認されたタイミングと一致していることを確認している。地点Cは歩道が無い農道であり、舗装路にも凍上によるクラックが数多く存在し、更には道路両脇が草地や畑であることから、舗装路下に雨水が浸透しやすい状況にあることが分かる(図-1参照)。

土圧計から計測された地盤内鉛直応力 α については、初期値が不明な地点もあるため、凍結の影響のない時期の α が舗装を構成する各材料の標準的な単位体積重量を用い

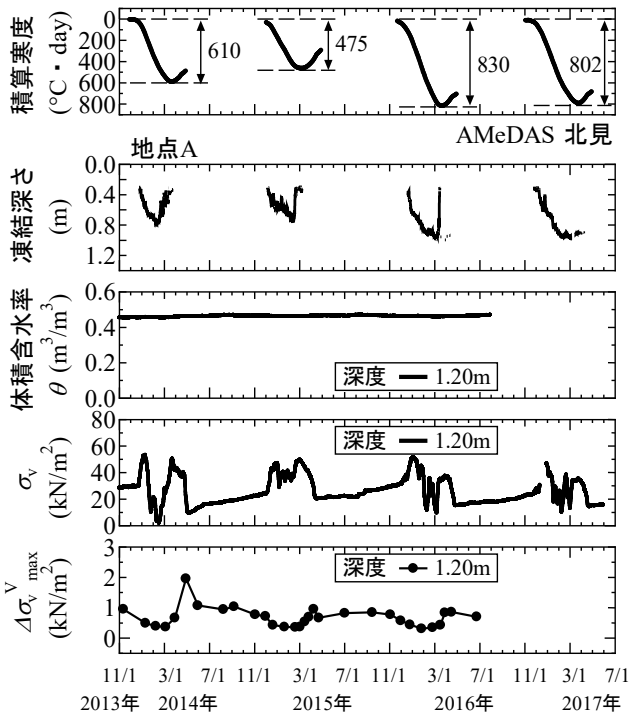


図-5 各種計測結果のまとめ (地点A)

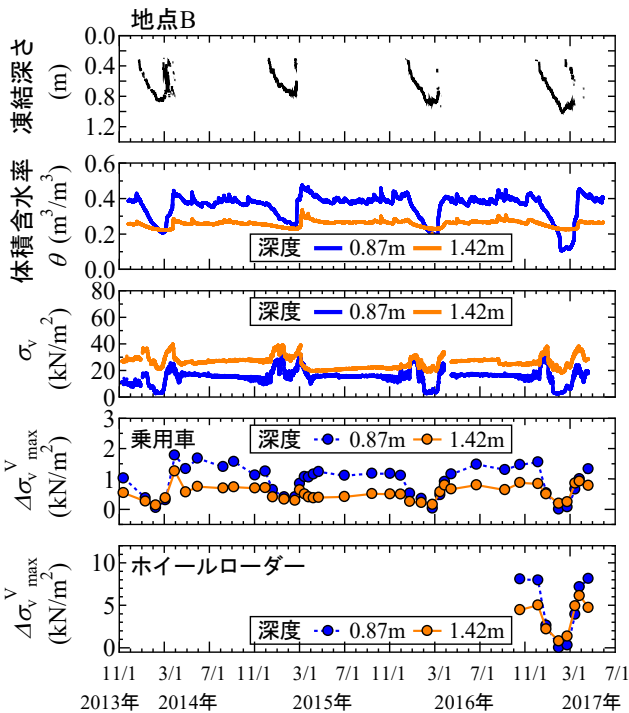


図-6 各種計測結果のまとめ (地点B)

て概算した土被り圧と等しくなるようにし、そこからの増減を表している。いずれの地点においても凍結期間において σ_v が大きく増減しており、未凍結期の2~3倍にまでなりうる事が分かる。冬期間の増減傾向については、厳密には地点によって多少異なっており、地点A、Bについては初冬に路盤が凍結する期間には σ_v が増加するが、凍上抑制層が凍結し始めた時点から大きく減少しているのに対し、地点Cでは路盤下部の埋戻し土が凍結し始めても暫

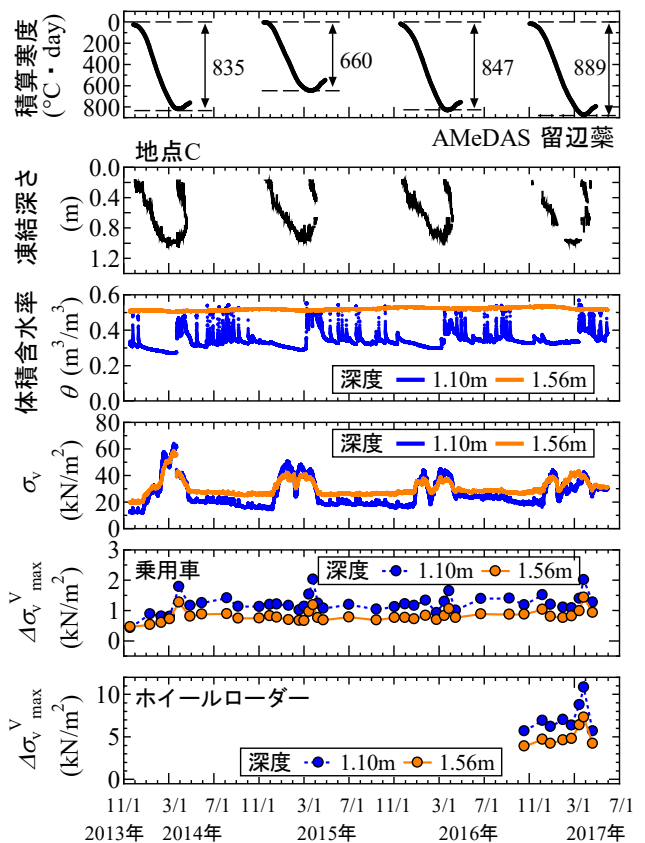


図-7 各種計測結果のまとめ (地点C)

くは σ_v が増加している。凍結期間における σ_v の上昇は凍結や凍上による土の膨張に伴って周辺地盤から受ける反力によるものだと考えられることから、上記の違いは主に凍結領域に存在する土の凍上性によるものだと推察される。また、いずれにおいても、凍結深さの進行が停滞した時期に σ_v が減少することについては凍土のクリープによるものだと推察されるが、融雪期には一旦上昇した後に減少している。この理由については不明であり、これについては今後も継続的に検討していきたいと考えている。

車両通過に伴う $\Delta\sigma_v^V$ については、先述したようにホイールローダーを用いた試験は地点B、Cでのみ実施したため(乗用車については地点Aでも一定期間実施)、図-6、7(地点B、C)にだけ乗用車の $\Delta\sigma_v^V$ と別に表示している。地点A、Bで実施した乗用車の試験結果において、凍結期間に $\Delta\sigma_v^V$ が低下することが分かる。これについては、多層弾性解析プログラムGAMES^{7,8)}において、凍結域の弾性係数を上昇させることで概ね表現可能であることが既に明らかとなっている²⁾。しかしながら、地点Cでは凍結期の低下が明瞭ではなく、地点A、Bとは傾向が異なっており、ホイールローダーを用いた試験でも同様であることが分かる。この理由については不明であるが、先述したように地点Cは歩道のない農道であるのに対し、地点A、Bには歩道があり、その両脇には建造物があることを考えると、境界条件の違いが理由の一つとして考えられる。

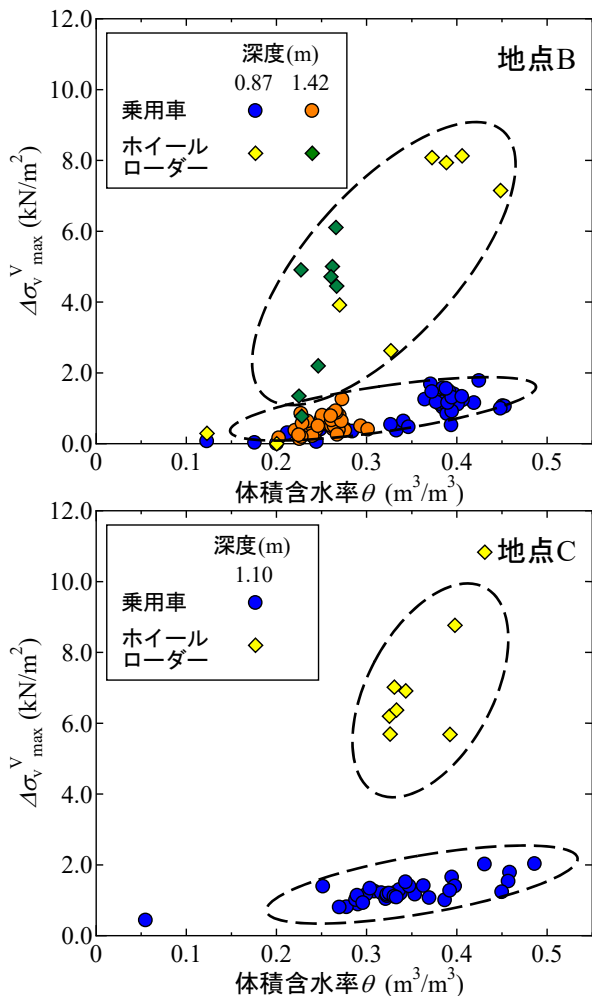


図-8 鉛直増加応力 $\Delta\sigma_v^{\max}$ と体積含水率 θ の関係

また、地点 C については土圧計の直上が車線中央に近いために直上を走行しにくいこと、更には土質の違いなどが影響していると考えられ、今後走行位置による詳細な違いを検討するとともに、室内試験やFEM解析などを行うことで更に検討していきたいと考えている⁹⁾。一方、いずれの計測地点においても、融雪期(春)に $\Delta\sigma_v^{\max}$ が大きくなる傾向については共通であることが確認できる。

図-8は $\Delta\sigma_v^{\max}$ と θ の関係をプロットしたものである。なお、図中には θ の変化が極めて小さい地点 A と地点 C の深い位置での計測結果は除外している。両者には概ね正の相関があることから、鈴木ら⁹⁾が指摘しているように、 $\Delta\sigma_v^{\max}$ の変動は融雪等に伴う周辺地盤の水分上昇によって生じた剛性の低下やポアソン比の増加が主な要因だと考えられる。

図-9は地点 B, C で実施した2種類の車両の通行から得られた代表的な $\Delta\sigma_v^{\max}$ と Boussinesq の弾性理論解を用いた計算結果 $\Delta\sigma_v^B$ を比較したものである。なお、図中には4本のタイヤから作用する荷重をそれぞれ集中荷重と考え、計算される増加応力が最も大きくなる前片輪が土圧計の直上にある場合の合計値と、Boussinesq の弾性理論解を積分することで得られる関係式を使い、タイヤの荷重をそれ

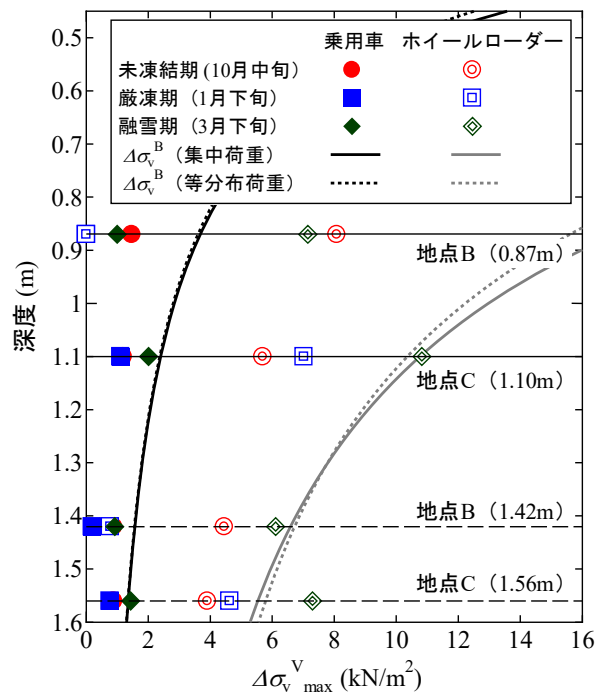


図-9 鉛直増加応力 $\Delta\sigma_v^{\max}$ と弾性理論解 $\Delta\sigma_v^B$ の比較

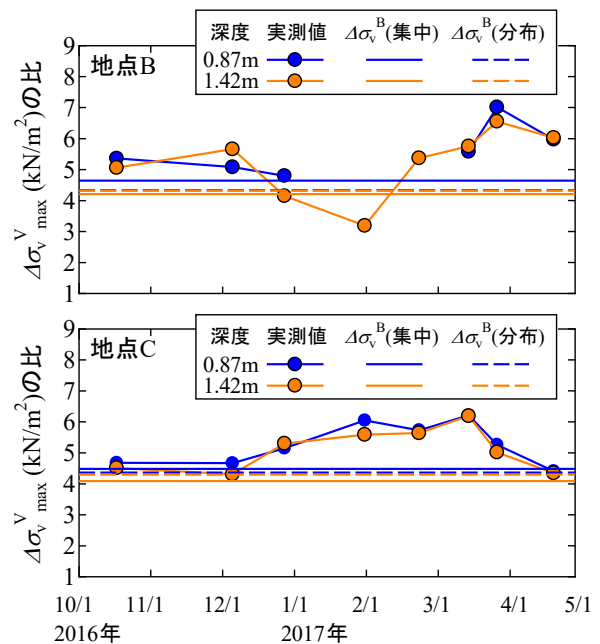


図-10 2種類の車両による鉛直増加応力 $\Delta\sigma_v^{\max}$ の比

ぞれ等分布荷重と考えて、同様に前片輪が土圧計の直上にある場合の合計値を示している。なお、等分布荷重はタイヤ幅が一辺となる正方形とした。また、Boussinesq の弾性理論解には弾性係数等の地盤情報は含まれないため、 $\Delta\sigma_v^B$ はタイヤから作用する荷重と深度にしか依存しない。

地点 B ではいずれの時期でも $\Delta\sigma_v^{\max}$ は $\Delta\sigma_v^B$ を超えていないが、地点 C については融雪期に実施したホイールローダーによる $\Delta\sigma_v^{\max}$ が $\Delta\sigma_v^B$ を超えており、特に深い位置で顕著であることが分かる。

図-10は2種類の車両を通過させたときに得られたそれ

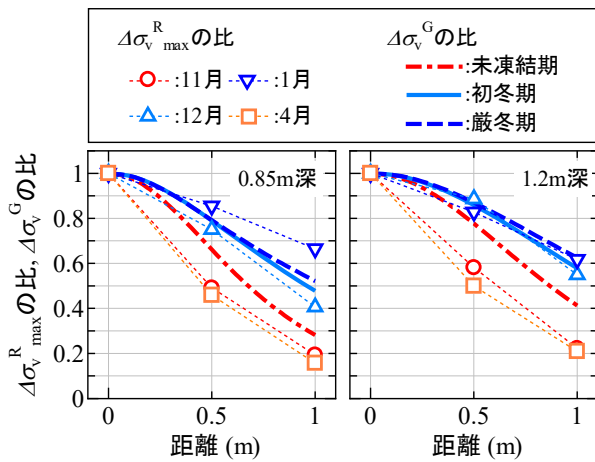


図-13 多層弾性解析プログラムによる計算結果との比較

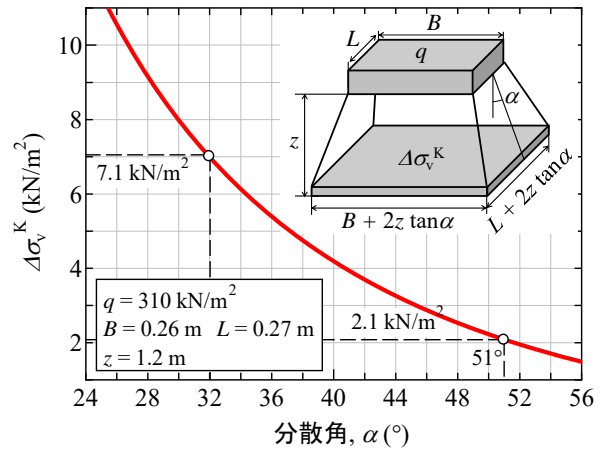


図-14 鉛直増加応力 $\Delta\sigma_v^K$ と分散角 α の関係

表-2 解析に用いた舗装構成と物性値

舗装構成	弾性係数 E (MN/m ²)			層厚 (m)
	未凍結期	初冬期	厳冬期	
アスファルト混合物層	4930	12000	12000	0.10
路盤	252	2082	2082	0.25
		252		0.20
路床	77	77	2082	0.10
			77	0.85
ベッドロック	4930			-

$\Delta\sigma_v^R$ の比 (図-12) を比較したものである。また、表-2は解析に用いた各層の層厚と物性値をまとめたものである。層厚については屋外土槽の舗装構成としており、土槽底面から下はベッドロックとし¹⁰⁾、各層のポアソン比は共通に0.35、層間すべり率は0とした。各層の凍結・未凍結状態における弾性係数 E (MN/m²)は安倍らの研究成果¹¹⁾を参考にして決定したが、凍結した埋戻し土の E については不明であったため、ここでは凍結した路盤と同じ値を採用した。また、未凍結状態のアスファルト混合物層の E には温度依存性があることが知られているが、ここでは簡略化するために15℃に相当する値とし、ベッドロックについても同じ値を採用した。荷重については先述の長方形 (0.26×0.27m) と面積が等しい円形等分布荷重と近似して計算した。

多層弾性解析プログラム GAMES^{7),8)}を用いることによって、荷重位置が離れることに伴う比の減少はある程度表現できており、この変化が主に凍結に伴う剛性の増加によるものであることが伺える。なお、計算に用いた荷重は先述のように公称値としたが、計算結果 ($\Delta\sigma_v^G$ の比) は荷重の大きさによらないことを確認している。

図-14 は荷重分散法に基づいて計算した地盤内の鉛直増加応力 $\Delta\sigma_v^K$ と分散角 α の関係であり、 $\Delta\sigma_v^K$ は次式で算出した。

$$\Delta\sigma_v^K = \frac{qBL}{(B + 2z \tan \alpha)(L + 2z \tan \alpha)} \quad (2)$$

ここで、 q は地表面に作用する長方形等分布荷重、 B と L はそれぞれ長方形等分布荷重の長辺と短辺、 z は求めたい $\Delta\sigma_v^K$ までの深さである。 B と L は先述の長方形における各辺の長さとし (0.26, 0.27 m)、 z は最も深い土圧計の埋設深 (1.2 m) とした。ただし、実際に作用した q については不明であるため、未凍結期に直上で載荷した際に最も深い土圧計で計測された $\Delta\sigma_v^R$ (7.1 kN/m²) に等しくなる場合の長方形等分布荷重を先述の Boussinesq の弾性理論解を用いて逆算した値を q とした (310 kN/m²)。

未凍結期で計測された荷重位置直下の $\Delta\sigma_v^R$ (7.1 kN/m²) に等しくなる場合の α は32°程度であり、一般に用いられている範囲内 (30~45°) であることが分かる (図-11 参照)。一方、厳冬期に計測された荷重位置直下の $\Delta\sigma_v^R$ (2.1 kN/m²) に等しくなる場合の α は51°程度であり (図-11 参照)、この計算結果から凍結地盤では荷重分散角が大きくなると解釈できる。

4. まとめ

寒冷地における舗装路下の地盤内増加応力に関して検討した本研究の成果を以下にまとめる。

- ・ 舗装路下1~1.5m程度の地盤内鉛直応力は周辺地盤の凍結融解によって増減し、未凍結期の2~3倍にまでなりうる事が明らかとなった。
- ・ 車両輪荷重による地盤内増加応力は周辺地盤の凍結融解によって変動し、体積含水率が大きい融雪期に上昇することが分かった。また、車体重量比に関する検討から、この上昇は車体重量が大きいほど顕著になり、その大きさは Boussinesq の弾性理論解を超える場合があることも明らかとなった。

- ・凍結の有無によって、載荷位置が土圧計直上から離れることに伴う地盤内増加応力の減少傾向は大きく異なり、凍結すると載荷位置の直下に生じる鉛直増加応力自体は小さくなるが、同程度の増加応力が広範囲に伝播しやすくなることが明らかとなった。また、多層弾性解析プログラム GAMES によって、その変化は凍結に伴う剛性の増加によるものであることが分かった。
- ・荷重分散法を用いた検討により、周辺地盤が凍結すると、地盤内における荷重分散角が大きくなったと解釈できることが分かった。

以上のことから、寒冷地の舗装路下を対象とした埋設管の設計では、表層地盤の凍結融解に伴う常時の地盤内鉛直応力や車両通過等に伴う鉛直増加応力の上昇を見込んだ方が良いことや、損傷リスクが高まる時期についてはある程度明らかになったと考えている。しかし、その変動メカニズムについては不明な点も多く残っており、老朽管の更新に関する優先度を的確に評価するためには、更なる研究が必要だと考えている。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、北見市上下水道局ならびに北海道ガス株式会社、北見工業大学大学院修士の鈴木信太郎氏（現日本工営株式会社）には多大なるご協力を頂いた。また、本研究は JSPS 科研費 26420476 の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会北海道支部 地盤の凍上対策に関する研究委員会：寒冷地地盤工学―凍上被害とその対策―，中西出版，2009.
- 2) 鈴木信太郎，川口貴之，中村大，川尻峻三，山下聡，内島典子：寒冷地の道路内における鉛直土圧の季節変化，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol. 71, No. 2, pp. I_475-I_484, 2015.
- 3) 公益財団法人日本水道協会：水道施設設計指針 (2012 年版)，2012.
- 4) 国土交通省：建設工事公衆災害防止対策要綱，土木工事編，1993.
- 5) 高圧ガス保安協会：北海道北見市ガス漏れ事故原因技術調査最終報告書，2007.
- 6) 三石正一，飯山一平，溝口勝：デカゴン土壌水分センサーの簡易キャリブレーション方法，土壌水分ワークショップ要項，pp. 115-120, 2008.
- 7) 濱中亮，南形英考，川口忍，赤木寛一：車両輪荷重が舗装路下の埋設管に及ぼす土圧の評価手法に関する実験的検討，土木学会舗装工学論文集，Vol. 14, No. 19, pp. 132-137, 2009.
- 8) 社団法人土木学会：多層弾性理論による舗装構造解析入門―GAMES (General Analysis of Multi-layered Elastic Systems) を利用して―，舗装工学ライブラリー3，丸善，2005.
- 9) 兵動正幸，村田秀一，安原一哉：交通荷重を受ける飽和砂質地盤の地中応力の評価，山口大学工学部研究報告，Vol. 39, No. 1, pp. 159-167, 1988.
- 10) 藤波潔，James MAINA，井上武美，松井邦人，菊田征勇：粒状材層の弾性係数の応力依存性を考慮した舗装の構造解析，土木学会舗装工学論文集，Vol. 9, pp. 201-207, 2004.
- 11) 安倍隆二，熊谷政行，丸山記美雄：積雪寒冷地におけるアスファルト舗装の理論的設計方法に用いる材料特性および環境条件に関する検討，土木学会論文集 E1 (舗装工学)，Vol. 67, No. 3, pp. 17-25, 2011.

EFFECTS OF FREEZING AND THAWING ON INCREMENTAL STRESSES IN THE GROUND BENEATH PAVEMENTS

Tetsunori KISHIKAWA, Takayuki KAWAGUCHI, Dai NAKAMURA,
Otgonjargal DAGVADORJ and Shunzo KAWAJIRI

Regarding pavements in cold regions, it has been reported that vertical stresses in the ground at the depths where water or gas pipes are buried greatly changes along with the freeze-thaw cycling. In addition, it has also been revealed that incremental stresses in the ground due to vehicle wheel loads from the road surface changes along with freezing and thawing.

In this study, we investigated the effects of freezing and thawing under pavement on the relationship between the magnitude of the wheel load and the incremental stress in the ground, using vehicles of two types, which were of greatly different weights. We also investigated the effects of freezing and thawing on the stress distribution (transmission) in the ground, using a large scale soil container to simulate a paved road.

As a result, we found that the incremental stress in the ground increases with the vehicle weight and that the rate of increase changes with freezing and thawing. The stress distribution in the ground was also found to change with freezing and thawing.