

寒冷地における省力化軌道用土路盤の凍上特性

Frost heave characteristics of subgrade soils under slab-track in cold regions

北海道旅客鉄道株式会社 ○正 員 綱嶋和彦(Kazuhiko Tsunashima)
 北海道旅客鉄道株式会社 正 員 瀧口孝司(Takashi Takiguchi)
 東日本旅客鉄道株式会社 正 員 相原宏任(Hiroataka Aihara)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 原口征人(Masato Haraguchi)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 赤川 敏(Satoshi Akagawa)

1. はじめに

寒冷地における鉄道線路は古くから凍上害が発生し、その対策は冬期の軌道管理を行なう上で重要な課題とされている。

平成14年1月、日本鉄道建設公団は国土交通省に対し、北海道新幹線新青森～札幌間の工事実施計画の認可申請を行った。近年、整備新幹線等の新設線における軌道構造は、建設費節減を図り盛土・切取・素地等の土路盤上省力化軌道(図-1)が採用され、その設計標準は、平成11年11月に鉄道総研により制定されている。

この土路盤上省力化軌道を寒冷地で施工する場合、既設在来線に見られる凍上害の発生が懸念される。建設後の省力化軌道用土路盤に凍上害が発生すると、営業線での補修となるため軌道保守が非常に困難であることから、北海道新幹線の着工を前に、省力化軌道用土路盤材料の凍上性について確認し、その予防対策を検討することが必要とされる。

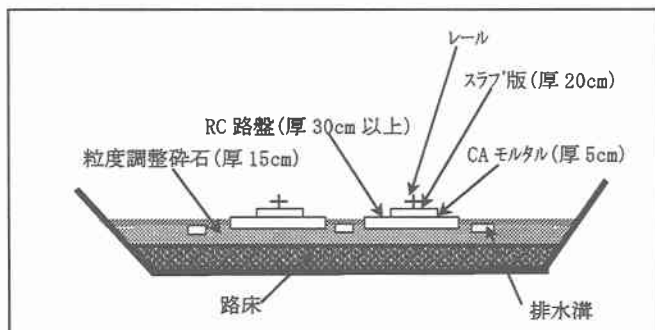


図-1 土路盤上省力化軌道の構造(切取区間)

2. 省力化軌道用土路盤の経年変化

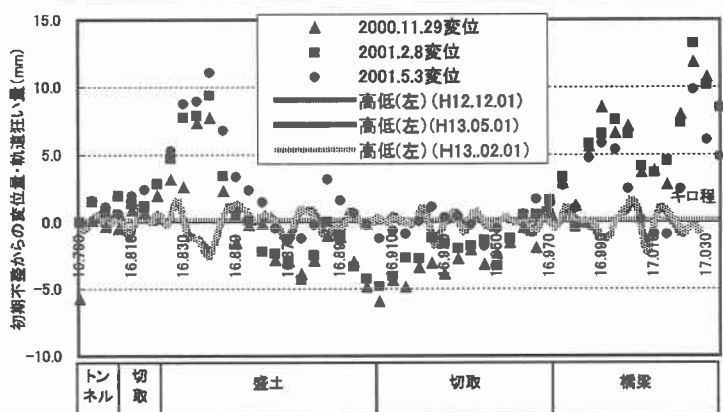
省力化軌道用土路盤の土木構造物としての経年変化を把握するため、表-1のとおり2箇所で大規模測量を行った。測点はRC路盤の突起ピンで、トンネル内の路盤あるいは高架橋上のBM等を不動点としている。これと各測点との高低差を算出したものと、高速軌道検測車による動的10m弦高低狂いを比較すると(図-2)、次のことが言える。

(a) 北陸新幹線高崎・安中榛名間(榎山路盤)

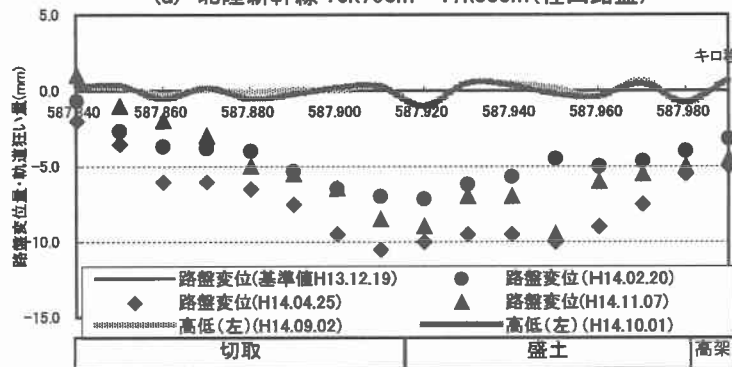
- ① 路盤施工時の初期不整からの変位は、盛土・切取の接続部付近で顕著な隆起・沈下が見られた。沈下については、圧密等によるものと考えられる。隆起についての明確な要因は判断し兼ねるが、不動点をトンネル内のRC路盤の突起ピンとしたために、この箇所では多少の沈下が影響したのと考えられる。

表-1 水準測量実施箇所と計測延長

測量現場	延長(m)
北陸新幹線高崎・安中榛名間(榎山路盤) 平成3年路盤工事施工、平成9年10月開業	238
東北新幹線二戸・八戸間(法師岡路盤) 平成12年路盤工事施工、平成14年12月開業	160



(a) 北陸新幹線 16k790m～17k035m(榎山路盤)



(b) 東北新幹線 587k840m～587k990m(法師岡路盤)

図-2(a)(b) 土路盤上省力化軌道における水準測量結果

- ② 動的10m弦高低狂いは、RC路盤突起ピンの変位が顕著に大きい箇所においては、比較的大きな振幅が見られるが、全体的な波形としては振幅が±3mm以内に収束しており、新幹線軌道整備心得に定める高低狂いの許容値7mm以内である。

(b) 東北新幹線二戸・八戸間(法師岡路盤)

- ① 施工後もない路盤の変位は、切取・盛土の接続部付近で最大となる沈下が見られた。これも北陸新幹線(榎山路盤)と同様、圧密沈下等によるものと考えられる。この沈下は、建設後2年ほどでほぼ終息している。
- ② 動的10m弦高低狂いは、振幅が±1mm以内に収束しており、新幹線軌道整備心得に定める高低狂いの許容値

7mm 以内である。

これらのことから、省力化軌道用土路盤は、建設直後及び数年経過後のどちらも変状が見られるが、その変状による軌道への影響は極めて小さいため、土路盤上の省力化軌道を高速走行する列車への影響は無いものと考えられる。

この計測 2 箇所の最大凍結深度は、北陸新幹線高崎・安中榛名間(榎山路盤)においてはほぼ 0cm で凍結せず、東北新幹線二戸・八戸間(法師岡路盤)においては 60cm とされている。後者においては、図-1 に示すように、凍結した路盤に粒度調整碎石層を数 cm 含むものの、それより上部は凍上しないコンクリート構造物であることから、これら 2 箇所の省力化軌道用土路盤の凍上性は小さいと言える。

すなわち、土路盤の凍結が予想されない箇所においては、既往の設計・施工法により良好な土路盤を構築することができると考えられる。

一方で、北海道新幹線の計画ルート上における最大凍結深度は、倶知安付近で 120cm(平成 12 年度冬期の積算寒度からの算出値)となる。これは、粒度調整碎石層以深まで達することを示すものであり、前記 2 つの例と異なり土路盤材料の凍上性をさらに検討することが必要と考えられる。

3. 既設在来線の道床バラストと省力化軌道用土路盤材料

既設在来線の道床バラストは、敷設後の繰返し列車荷重等による経年劣化によって、粒径 0.075mm 以下の細粒分が混在し、その量が増加していくのが実態である。これまで、鉄道線路の凍上害は、主に路盤で発生しているものと考えられてきたが、路盤からの噴泥やバラスト粒子に付着した細粒分が起因と考えられる道床バラスト部での凍上害も、無視できないものとなってきている。

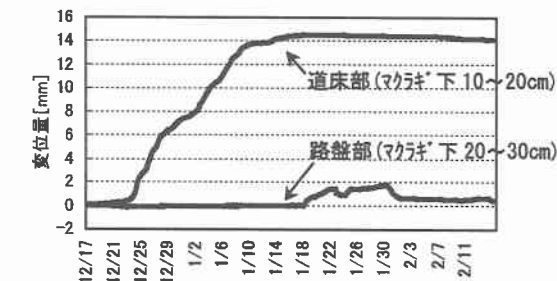


図-3 宗谷本線における凍上変位量の推移

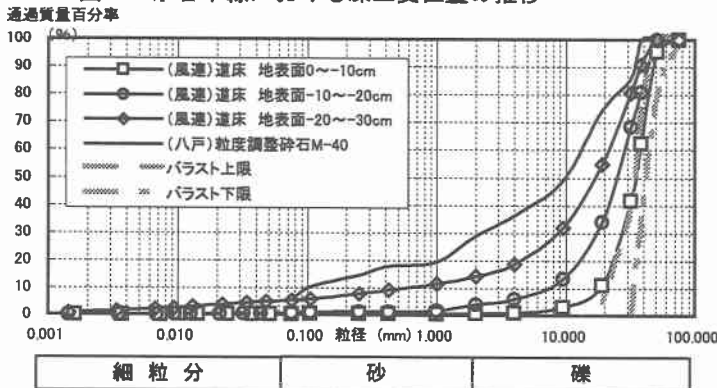


図-4 粒度分布の比較

平成 13 年度冬期に行なった、宗谷本線瑞穂・風連間における凍上計測の例を図-3 に示す。凍上変位計の経時変化を見ると、道床部でも凍上による変位が確認された。この計測箇所で採取した試料の粒度試験では、道床バラスト部は深くな

るにつれて粒度が小さくなり、細粒分含有量が増大することがわかった(図-4)。この細粒分を含む道床バラスト部が冬期に凍結し、凍上害が発生したと考えられる。

また、東北新幹線二戸・八戸間(法師岡路盤)の路盤材料に用いられた粒度調整碎石(M-40)の粒度分布も図-4 中に示す。風速で採取した道床バラスト(細粒分率 地表面-20~30cm で最大 5.4%)と、八戸の粒度調整碎石(M-40)(細粒分率 5.6%)を比べると、凍上に関係する細粒分がほぼ同じ含有量であることがわかる。つまり、省力化軌道用土路盤は、既設在来線の道床バラストと同様に有害な凍上発生危険性があり、検討すべき事項と言える。

4. 設計標準 1)による凍上対策

設計標準 1)によると、路盤材料に用いる粒度調整碎石について、細粒分を 2~10%含むものと定めている(表-2)。

また、切取・素地区間においては、“路床となる地盤が凍上しやすい土質(細粒分含有量の多い土質)の場合は、凍結深さまで凍上を起こしにくい材料で置換えるものとする”とされ、その材料の種類及び基準について、表-3 のように定められている。

これらの基準は、道路の建設で用いられているもので、凍上試験による既往の研究結果に基づくものである。しかし、その凍上試験法 2)には、①供試体とモールドの凍着、②凍結線の停止等の問題点もあり、以降、幾たびか試験法が改良されていることから、省力化軌道用土路盤の凍上性について、再検討する必要がある。

表-2 粒度調整碎石の粒度分布

「鉄道構造物等設計標準・同解説省力化軌道用土構造物」P.32 より

ふるいの取付法	ふるいを通るものの百分率(%)									
	50	40	30	25	20	15	10	5	2.5	0.4
M-40	40~0	100	95~100	-	-	60~90	-	30~65	20~50	10~30
M-30	30~0	-	95~100	-	60~90	-	30~65	20~50	10~30	2~10
M-25	20~0	-	-	100	95~100	-	55~85	30~65	20~50	10~30

表-3 凍上を起こしにくい材料の種類及び基準

「鉄道構造物等設計標準・同解説 省力化軌道用土構造物」P66 より

粒度調整碎石……粒径 4.7mm 以下のもののうち、
0.075mm 以下が 15%以下のもの。
砂 ……粒径 0.075mm 以下が 6%以下のもの。
火山灰、火山礫……凍上試験に合格したもの。ただし、凍上試験結果
の判定が要注意のものは粒径 0.075mm 以下が 20
%以下で、強熱減量が 4%以下のもの。

5. 粒度調整碎石の凍上試験

5.1 実験条件

省力化軌道用土路盤材料の凍上性評価として、粒度調整碎石の凍上試験を実施した。表-2 の粒度調整碎石で最も凍上危険度の高い、粒径の最も小さな M-25 の粒度分布を対象とし、細粒分率は 2~10%の適用範囲内で変化させた 6 通りのケースを設定した(表-4)。

供試体には、道内産の碎石試料を用いた。表-5 に示す実際の施工に即した条件を満たすように、締固め度は、施工標準 1)を満たす 95%以上を確保するもの、凍上試験時の上載圧は、粒度調整碎石層の上部構造(60kg レール・A 型スラブ・RC 路盤)の死荷重を考慮している。また水の状態は、土路盤施

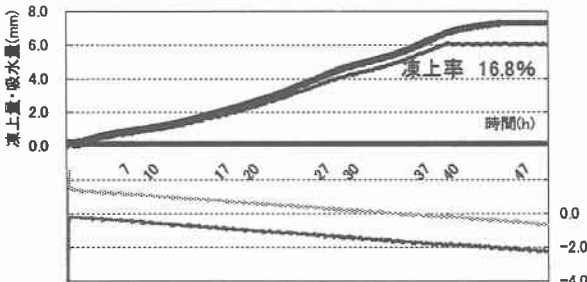
工後の通常状態を想定した不飽和状態と、降雨雪や切土区間の湧水等による最悪条件下を想定した飽和状態を設定した。試験はcase1～case4において3回ずつ行い、実験値のばらつき具合を把握し、凍上試験の妥当性も検討した。

表-4 凍上試験項目

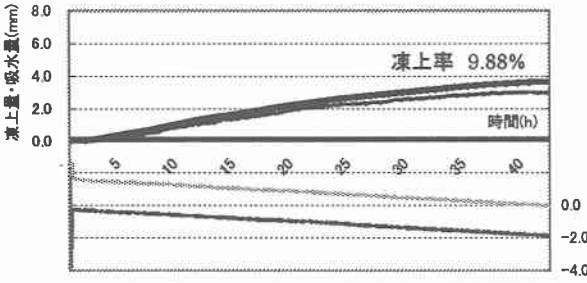
実験ケース	細粒分率	供試体直径	通過重量百分率										実施回数	
			50	40	30	25	20	13	5	2.5	0.4	0.075		
case0	100%	6cm	100%										1回	
case1	10%												10%	3回
case2	8%												8%	3回
case3	5%												5%	3回
case4-1	2%												2%	2回
case4-2													1回	

表-5 凍上試験における実験条件

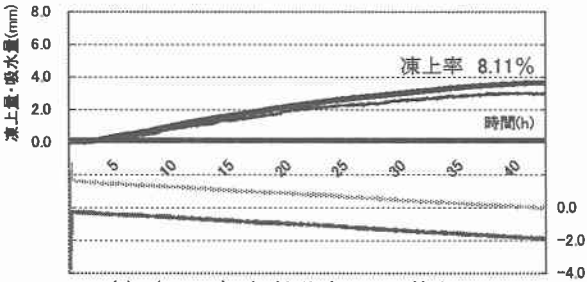
供試体	細粒分混じり礫の混合試料 (粒度調整碎石M-25の粒度分布 範囲内で細粒分率を変化させる)
供試体締固め度	締固め度95%以上
凍上試験時上載圧	12kPa
水の状態	不飽和(閉式)・飽和(開式)



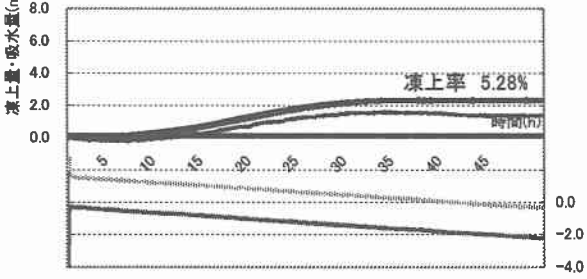
(a) (case0) 細粒分率 100% (飽和) 温度(°C)



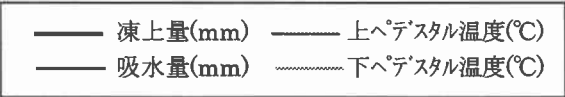
(b) (case1) 細粒分率 10% (飽和) 温度(°C)



(c) (case2) 細粒分率 8% (飽和) 温度(°C)



(d) (case3) 細粒分率 5% (飽和) 温度(°C)

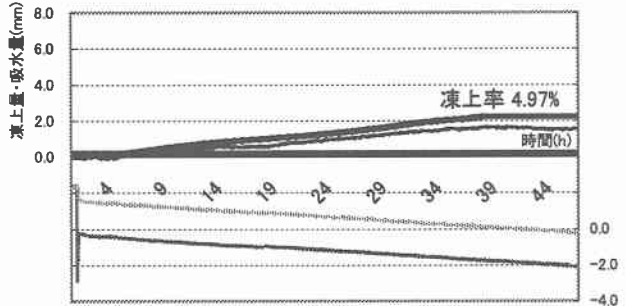


5.2 実験結果と考察

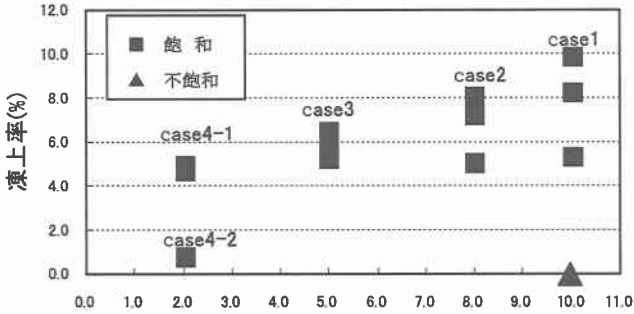
試験結果を図-5に示す。凍上試験では、各 case ともに、同一の温度勾配 (0.5°C/cm) 及び凍結線進行速度 (0.08cm/hr) で供試体を凍上させたが、図-5(a)～(e)より、温度降下に伴い凍結線が供試体上部から下部へ進行し、吸水しながら凍上が発生していることがわかる。最終的に下ペダスタル温度が 0°C を通過するころ、吸水が停止し、それに追従して凍上量も変化しない状態となった。ここで、凍上試験を終了とした。

このようにして、全 case について試験を行い、細粒分率と凍上率の関係について示した図-5(f)より、次のことが言える。

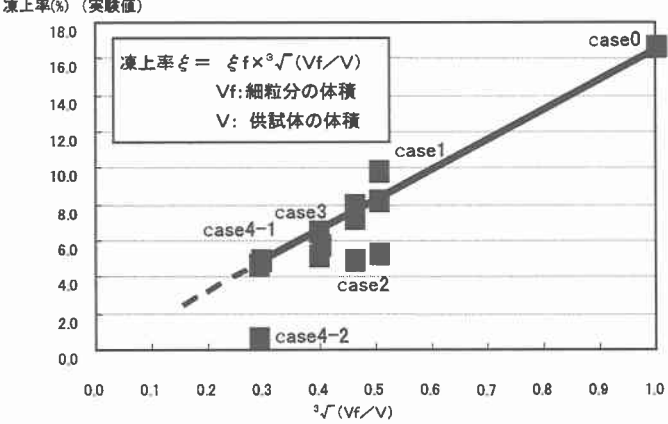
- ① 不飽和状態では、細粒分率が最大の 10% の場合でも凍上しなかった(凍上率 0.0%)。予備試験として、細粒分率 100% の不飽和状態で凍上試験も行なったが、凍上率 0.74% と殆ど凍上しなかったことから、施工後の通常状態における粒度調整碎石は、殆ど凍上しない。
- ② 飽和状態では、細粒分率の増加とともに凍上率も増加の傾向を呈している。
- ③ 実験値のばらつきは、最大 4% ほど見られるが、これは供



(e) (case4) 細粒分率 2% (飽和) 温度(°C)



(f) 細粒分率と凍上率の関係



(g) 細粒分体積率と凍上率の関係

図-5(a)～(g) 粒度調整碎石の凍上試験結果

試体の飽和度や間隙比等の多少の差がもたらすものと考えられるが、既往の凍上試験実績より、凍上率誤差は数10%程度であることから、今回の試験は正確性が高いと判断できる。

- ④ case4-1とcase4-2は、細粒分率は同じ(2%)だが、砂・礫の粒度の大きいcase4-2のほうが、case4-1より凍上率が小さい。このことから、細粒分と混合している砂や礫は、粒度が大きいほど凍上性は小さい。このことから、省力化軌道用土路盤に用いられる他の粒度調整碎石(M-30、M-40)の凍上性は、このM-25よりも小さい。

また、粒度調整碎石の凍上性評価モデルとして、細粒分が占める体積分だけ凍上による上向きの変位が生じるものとして、次式を考える。

$$\xi = \xi f \times \sqrt[3]{(V_f/V)}$$

ξ : 粒度調整碎石の凍上率(%)

ξf : 細粒分100%の場合の凍上率(%)

V : 供試体の体積(cm³)

V_f : 細粒分のみの体積(cm³)

このとき、凍上試験で得られた凍上率と比較すると(図-5(g))、細粒分の体積分の3乗根と凍上率(実験値)とは、相関関係にある傾向が見られる。

6. 実路盤上での検討

粒度調整碎石の凍上試験から得られた各 case の凍上率(%)と図-1より(粒度調整碎石の厚さ15cm)、粒度調整碎石(M-25)の実路盤での凍上量は図-6となる。ここで、新幹線軌道整備心得より、高速軌道検測車による10m弦の許容値(高低狂い7mm以内、水準狂い5mm以内)と比較すると、飽和状態において、細粒分率2～10%の範囲すべて許容値を超える。

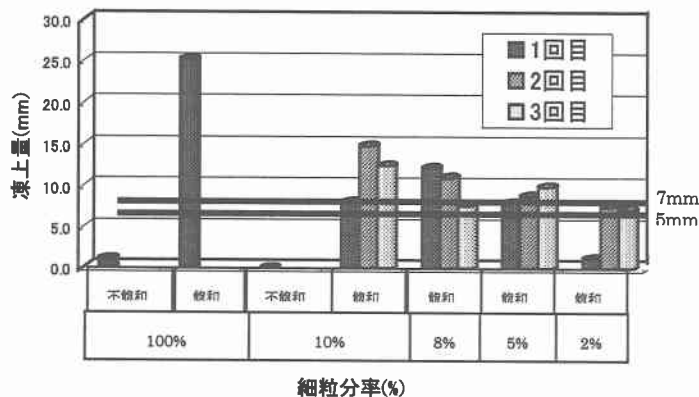


図-6 省力化軌道用土路盤における
粒度調整碎石の凍上量

しかし、建設後の土路盤上省力化軌道は、RC路盤・スラブ版・60kgレール等の連続体構造をなしており、粒度調整碎石の凍上量と同じ変位がレールに生じるとは考え難い。これは先述のとおり、北陸新幹線高崎・安中榛名間(楡山路盤)及び東北新幹線二戸・八戸間(法師岡路盤)における高低狂いの波形が、路盤変位に比べ極めて小さいことが裏付けている。

よって、土路盤の凍上により、列車の高速走行に影響を及ぼす恐れは殆ど無いものの、土路盤の凍結融解により発生す

る凍上による応力作用で、RC路盤等が劣化することが危惧されるため、土路盤はなるべく凍上させないことが重要である。

7. 結論

- ① 省力化軌道用土路盤材料である粒度調整碎石も、飽和状態では有害な凍上害をひきおこすが、列車の高速走行に影響を及ぼすものではない。
- ② 粒度調整碎石の凍上評価法として、体積割合を考慮したモデル式による評価を試行し、その妥当性を一例により確認できた。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 省力化軌道用土構造物、1999。
- 2) 社団法人 日本道路協会：道路土工一排水工指針、pp.238～243、1987。
- 3) 高橋毅・佐々木政男・荻野治雄：切込碎石の粒度およびシルト含有量とCBRについて、北海道土木試験所月報 No.170、pp.1～11、1967。
- 4) 大越孝雄・新井貞夫：凍上対策用置換材料の品質に関する実験的研究—砂について—、北海道土木試験所報告 No.16、pp.41～73、1957。
- 5) 小山道義・高橋毅・川井優：火山灰の凍上性について、北海道土木試験所月報 No.131、pp.12～17、1964。
- 6) 地盤工学会：新規制定の地盤工学会案「凍上量予測のための土の凍上試験方法」および「凍上性判定のための土の凍上試験方法」について、土と基礎 Vol.50、No.536、pp.85～93、2002。
- 7) 瀬在武・三嶋信雄・菊池勝三：寒冷地における路床の凍上対策—現行凍上対策の問題と凍上試験法—、日本道路公団試験所報告(昭和59年度)、pp.13～33、1985。
- 8) 土質工学会：土の凍結—その理論と実際—第1回改訂版、1994。
- 9) 日本鉄道建設公団：北海道新幹線(新青森・札幌間)環境影響評価準備書(北海道)、2000。
- 10) 日本鉄道建設公団：北海道新幹線(新青森・札幌間)環境影響評価準備書 環境影響評価関連図集(北海道)、2002。