

ANALYSE DES CAUSES DES GLISSEMENTS DE TERRAIN SUR LES AUTOROUTES A LA FONTE NIVALE PAR DES TESTS EN LABORATOIRE

Kazuhiro Tsuchiya

Département Maintenance, Bureau régional du Hokkaido,
Japan Highway Public Corporation
Tél. :+81-11-896-5211 / Fax:+81-11-896-5888
E-mail:Kazuhiro_Tsuchiya@gw.japan-highway.go.jp

1. Abrégé

La fonte de la neige au début du printemps est une cause des glissements de terrain dans les régions couvertes de neige. L'infiltration de l'eau de fonte nivale dans la pente coupée le long de l'autoroute joue un rôle critique dans la réduction de la résistance au glissement. Malgré l'impact important sur les glissements de terrains de la fonte de la neige, l'écoulement de la fonte nivale n'est pas abordé dans la plupart des spécifications.

Par le biais de tests en laboratoire simples sur la fonte nivale et l'observation du processus de fonte nivale dans la topographie naturelle, cette thèse examine le cas d'un glissement de pente coupée survenu récemment sur l'autoroute du Hokkaido pendant la saison de fonte nivale, et décrit comment la neige fond et comment la fonte nivale s'infiltré dans le sol pour déstabiliser la pente coupée.

Les tests sur l'écoulement de la fonte nivale ont été effectués à la fois en et hors laboratoire, et centrés sur le fait que quand un petit bloc de neige fond, la fonte nivale goutte seulement de la partie inférieure du bloc. Dans les tests en laboratoire, des blocs de neige ont été placés sur deux pentes en sol sablonneux. Une pente a été complètement couverte de blocs de neige, et l'autre seulement dans la partie supérieure. Les résultats du test dans le premier cas ont montré que la fonte nivale se déplaçait vers le bas de la pente et s'écoulait de la couche de neige, laissant la pente en sol en bon état. Dans le second cas, la fonte nivale s'écoulant de la partie inférieure de la couche de neige s'est infiltrée dans le sol sablonneux, provoquant un glissement.

Des processus de la fonte nivale similaires à ceux observés dans les tests en laboratoire sont visibles sur les pentes naturelles.

Comme le site du glissement de pente coupée d'autoroute précité se situe dans la partie inférieure de la partie couverte de neige d'une pente coupée de l'autoroute, on peut déduire qu'un phénomène similaire s'est produit sur le site.

2. Introduction

Le 13 avril 1999, un glissement de terrain de grande envergure s'est produit dans la zone de Kuromatsunai sur le tronçon Oshamannbe-Abuta de l'autoroute du Hokkaido pendant la seconde saison de fonte de la neige après l'ouverture de l'autoroute (Figure 1, 2 et 3). Le volume de matériaux déplacés a été d'environ 7000 m³, ce qui était sans précédent pour une pente.

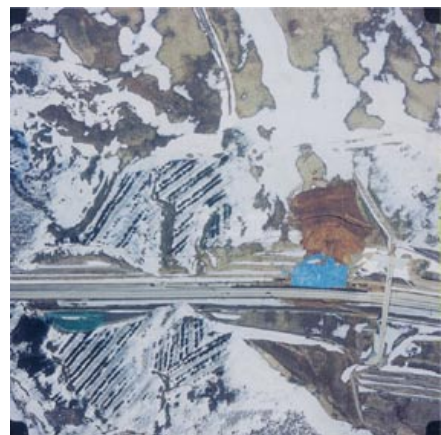


Figure 1 Zone de Kuromatsunai et site du glissement de terrain (15 avril 1999)

Kuromatsunai se situe dans une zone à chutes de neige importantes, où les chutes de neige cumulées en une saison hivernale dépassent généralement 10 m. La partie supérieure de la

pente est une vaste zone herbeuse utilisée comme pâturage, couverte de beaucoup de neige. Le glissement de terrain est estimé dû à une augmentation rapide de la fonte nivale due à une topographie favorisant la concentration de la fonte nivale sur les herbages et à une augmentation brutale de la température avant la catastrophe.

Pour l'analyse du glissement de terrain dû à la fonte nivale, il est nécessaire de vérifier le phénomène de fonte nivale de deux points de vue: comment la neige fond et comment la fonte nivale s'infiltré dans le sol pour déstabiliser la pente. L'analyse du phénomène de fonte nivale exige une étude détaillée des facteurs affectant la fonte de la neige, tels que la température atmosphérique et l'ensoleillement. Mais dans cette étude, le processus de fonte nivale a été considéré non pas du point de vue de la glaciologie, mais par observation du phénomène de fonte nivale naturel, et de test en et hors laboratoire.



Figure 2 Site du glissement de terrain (en construction)



Figure 3 Glissement de terrain (après la reconstruction)

3. Tests en laboratoire sur le phénomène de fonte nivale

Pour savoir comment l'eau fondue s'écoule pendant la fonte nivale, plusieurs tests en laboratoire ont été effectués. La température ambiante dans le laboratoire était d'environ 22°C. Les tests suivants ont été réalisés en utilisant des échantillons de neige prélevés à la fin mars et la mi-avril, vers la fin de la saison de la fonte nivale.

3.1 Test en laboratoire sur le phénomène de fonte nivale

De petits blocs ont été placés sur un treillis métallique et observés pendant la fonte sous conditions du laboratoire. Dans le test, tant que les blocs de neige sont restés inclinés, même légèrement, l'eau de fonte a suinté vers le bas de la pente par les blocs de neige et s'est égouttée de la partie inférieure de la neige sans suinter de parties intermédiaires des blocs (Figure 4). Des tests similaires effectués à l'extérieur au soleil ont donné des résultats similaires.



Figure 4 Eau de fonte suintant de la partie inférieure d'un bloc de neige

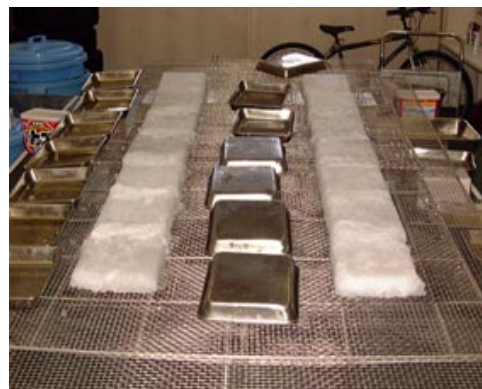


Figure 5 Test de la neige sur un treillis métallique (avant le test)

Ces faits ont laissé à penser que tant que la couche de neige est continue, l'eau de fonte ne se déplace pas à travers la couche tant qu'elle s'écoule de la partie inférieure de la couche de

neige.

Une pente neigeuse sur treillis métallique a été préparée en laboratoire pour tester cette hypothèse. Le processus de fonte a été observé et l'écoulement de l'eau de fonte mesuré. La pente de neige avait environ 1,6 m de long, et un gradient d'environ 8%. Une couche de neige continue a été formée en plaçant des blocs de neige sur le treillis métallique. Les blocs de neige granulaire mesurant 3 cm de profondeur, 18 cm de largeur et 23 cm de longueur ont été utilisés (Figure 5). Les observations suivantes ont été faites au cours de l'expérience:

L'écoulement de la fonte nivale dans la partie inférieure de la pente était proche de 100% du volume total de l'eau de fonte (Figure 6).

Après vaporisation de 50 cc d'eau sur la neige, l'écoulement d'eau de fonte dans la partie inférieure de la couche de neige a temporairement augmenté, mais il n'y a pas eu de flux d'eau vertical de parties intermédiaires de la couche de neige. Le temps requis par la neige pour fondre n'a pas été très différent (Figure 7).

C'est seulement quand la couche de neige est devenue fine et que la continuité des blocs de neige a été perdue que l'eau de fonte a suinté de parties de la couche de neige autre que l'extrémité inférieure.

Ces résultats de test en laboratoire montrent que l'eau de fonte dans une couche de neige continue s'écoule vers le bas de la pente via la couche de neige et en sort par l'extrémité inférieure.

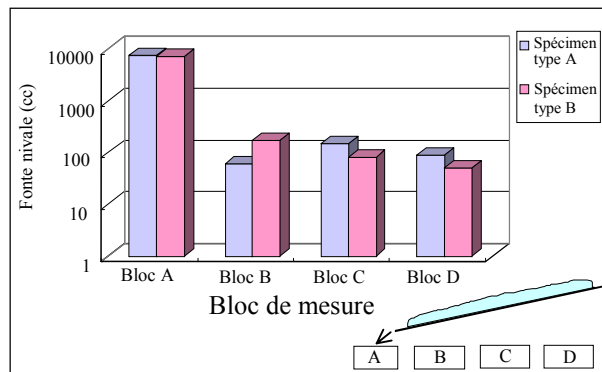


Figure 6. Écoulement de la fonte nivale par bloc

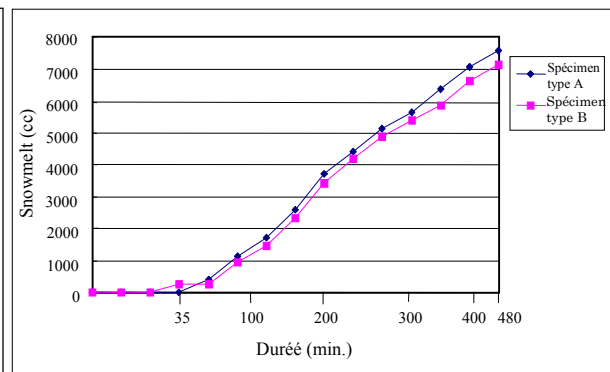


Figure 7. Changement au fil du temps de l'écoulement de la fonte nivale à l'extrémité inférieure

3.2 Test à l'extérieur

Les taux de fonte nivale dans les conditions intérieures, où les températures sont élevées mais où il n'y a pas de rayonnement solaire, diffèrent des conditions à l'extérieur, où la température est basse, mais il y a rayonnement solaire. C'est pourquoi un test de fonte nivale a été effectué à l'extérieur. Une pente à treillis métallique de 7 m de long placée à une inclinaison de 7% a été utilisée. La neige utilisée pour le test était de la neige granulaire lourde prélevée dans une étape tardive du processus de fonte nivale naturel.

Dans ce test, aux heures du soir ou du matin où les températures sont basses, l'eau de fonte a suinté via la partie pratiquement inférieure de la couche de neige et s'est écoulee de l'extrémité inférieure de la couche (Figure 8). Mais avec l'augmentation de la température et du rayonnement solaire pendant la journée, la neige est devenue à moitié fondue. Elle a ainsi commencé à pendre à travers les ouvertures du treillis métallique en fondant, et l'eau de fonte a commencé à s'égoutter de plusieurs emplacements (température ambiante: 5-6°C).

Sous les conditions intérieures, la température ambiante était élevée, mais les courants d'air convecteurs étaient



Figure 8 Expérience à l'extérieur

faibles. En conséquence, le taux de fonte nivale est resté pratiquement constant. Dans les conditions extérieures, la neige a fondu rapidement sous l'influence du rayonnement solaire et du vent parce que les blocs de neige utilisés pour le test avaient une petite section transversale. C'est sans doute pourquoi les résultats du test à l'extérieur ont été différents de ceux du test à l'intérieur. En principe, la température sous la couche de neige sur le sol reste de 0°C. Il se peut qu'un phénomène de fonte nivale similaire à celui observé en laboratoire soit survenu sur la pente naturelle.

3.3 Test de la neige sur le sol

Des tests ont été réalisés pour rechercher les différences entre l'écoulement de la fonte nivale dans le cas d'une couche de sol couverte de neige et le cas d'une couche de sol non couverte de neige sur la base des résultats des tests de la neige sur un treillis métallique. On suspectait que si l'eau de fonte s'écoulait à travers la couche de neige, l'eau de fonte ne s'infiltrerait pas dans le sol.

3.3.1 Sol sablonneux

La couche de sol utilisée comme spécimen de test mesurait 15 cm (largeur) \times 15 cm (profondeur) \times 60 cm (longueur). Le spécimen de test a été compacté au degré nécessaire pour éviter l'effondrement. La teneur en eau initiale était de 37%.

Test A: Le spécimen de test a été couvert de neige de sorte que l'eau de fonte suinte directement dans le spécimen de test (Figure 9: appelé par la suite Test A dans ce document).

Test B: Le dessus et la face avant du spécimen de test ont été couverts de neige (Figure 10, test B).

Dans le test A, l'eau de fonte s'écoulant de la partie inférieure de la couche de neige a infiltré le spécimen de test, résultant en un glissement deux heures et demie plus tard (Figure 11 et 12). Le Tableau 1 montre le processus menant au glissement.



Figure 9 Test de fonte de neige en utilisant un spécimen de sol (gauche: test A, droite: test B)



Figure 10 Test B (extrémité de la couche de neige en-dehors du spécimen de test)

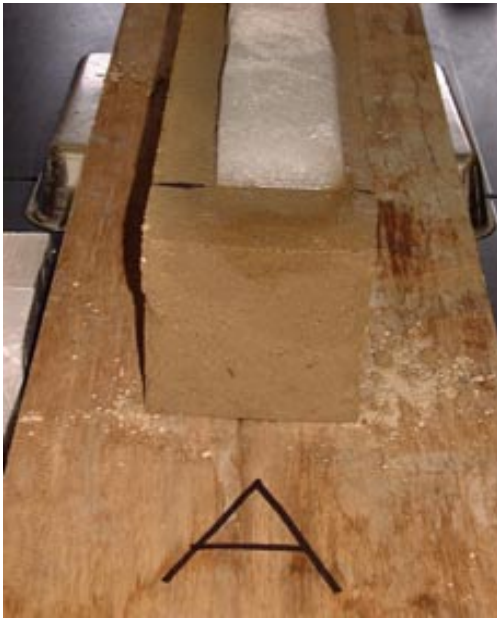


Figure 11 Test A (après 10 minutes de test)



Figure 12 Test A (après 2 h 30 de test)



Figure 13 Drainage de l'eau de fonte

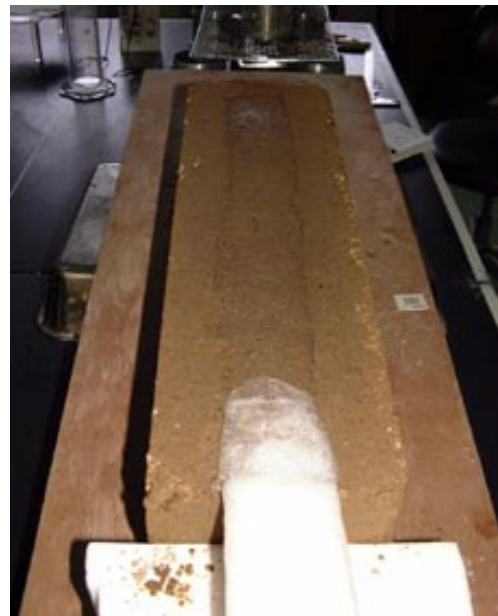


Figure 14 Test B (après 3 h 30 de test)

Dans le test B, l'eau de fonte s'est écoulée par l'extrémité avant de la couche de neige, et le spécimen de test est resté en bon état même à la fin du processus de fonte nivale (Figures 13 et 14). La mesure du poids des spécimens de test a montré que l'infiltration dans le spécimen de test était de 40 cc, ce qui correspond à environ 3% du volume total de l'eau de fonte (Tableau 2). Dans les cas où de l'encre rouge a été introduite dans l'extrémité supérieure de la couche de blocs de neige, l'eau de fonte s'est écoulée vers le bas de la pente le long de la couche de neige et est sortie par l'extrémité inférieure. Après la disparition de la neige sur le spécimen de test dans le test B, une couche de neige deux fois plus épaisse que la première a été placée dessus, et le test de fonte nivale a continué. Dans ce test, le spécimen de test est resté en bon état, et le soulèvement des faces latérales n'a pas eu lieu. Le poids des spécimens de test n'a pas changé, indiquant que l'infiltration dans les spécimens de test n'a pas eu lieu même quand le volume de neige a doublé.

Tableau 1 Processus de glissement

Temps	Description (spécimen de type A)
10	Commencement de l'écoulement
25	Soulèvement de face latérale et glissement localisé
50	Glissement localisé de la face avant
80	Saturation de toute la zone périphérique (zone avant)
2h25	Glissement complet commençant dans la zone de glissement de la face latérale (près de l'extrémité de la couche de neige)

Tableau 2 Poids des spécimens de test utilisés

	Initial (kg)	Après la fonte nivale (kg)	Infiltration (kg)	Taux d'infiltration (%)
Spécimen de type A	19,34	Glissement	-	-
Spécimen de type B (1 couche de neige)	19,91	19,95	0,04	2,7
Spécimen de type B (1 couche de neige)	19,95	19,95	0	0

3.3.2 Sol cohésif

Deux spécimens de test de sol cohésif ont été préparés, et le test B a été réalisé en utilisant deux angles de pente différents: 5° et 10°. Le but de ce test était de voir si l'angle de la pente affecte l'écoulement d'eau de fonte.

Le temps requis pour la fonte de la neige a été légèrement différent, mais l'angle de la pente n'a pas affecté le drainage; presque toute l'eau de fonte s'est écoulée hors du spécimen de test après passage dans la couche de neige (Figure 15). La faible perméabilité du sol cohésif a sans doute affecté les résultats du test.



Figure 15 Test B avec angles de pente différents (premier plan: 10°, arrière-plan: 5°)

3.3.3 Sable

Un coffrage de béton a été rempli de sable, et l'angle de pente réglé à 10°. Puis le test B a été effectué (Figure 16). Dans le test de neige sur le sable, presque toute l'eau de fonte a été absorbée par le sable, et le drainage via la couche de neige n'a pas été observé. Dans le test suivant dans lequel l'angle de la pente a été augmenté à 30°, l'eau ne s'est pas écoulée à travers la neige même après un arrosage important sur la couche de neige.

Ces résultats de test semblent indiquer que l'inclinaison de la pente n'est pas le seul facteur affectant le drainage de l'eau de fonte, et que la capacité d'absorption d'eau due à une action capillaire du sols sous-jacent est un facteur majeur. Autrement dit, la capacité d'absorption d'eau ou de conservation d'eau due à une action capillaire de la neige est jugée être le facteur majeur contribuant à l'infiltration dans la couche sous-jacente.



Figure 16 Test de fonte nivale sur le sable

4. Phénomène de fonte nivale naturel

Dans les tests en laboratoire, l'eau de fonte a suinté à travers la couche de neige et s'est finalement écoulée de l'extrémité inférieure de la couche de neige. Un phénomène similaire se produit-il dans le monde naturel?

La manière dont la neige sur les toits fond dans le monde réel nous donne une hypothèse concernant le phénomène d'eau de fonte ou d'eau de pluie s'écoulant à travers une couche de neige. Sur la Figure 17, l'extrémité inférieure de la couche de neige est gelée. Mon hypothèse est que



Figure 17 Neige fondant sur le toit

quand l'eau de fonte suinte vers le bas de

la pente à travers la couche de neige et est regelée dans l'extrémité inférieure de la couche de neige, la glace formée le long de l'extrémité inférieure de la couche de neige devient plus épaisse au fil du temps. Est-ce une erreur de supposer que si l'eau de fonte suinte de la couche de neige avant d'atteindre son extrémité inférieure, le phénomène précité ne survient pas et la neige sur le toit tombe sur le sol plus tôt parce que l'eau de fonte s'écoule vers le bas de la pente sur la surface du toit.

Un test à l'extérieur a été réalisé sur du gazon tondu sous des conditions similaires à celles du test en laboratoire. Le test à l'extérieur a révélé que l'eau de fonte s'infiltrait dans le sol à partir du dessous de la couche de neige, mais qu'il y a un écoulement considérable de l'extrémité inférieure de la couche de neige. Après le test, l'écoulement d'eau de la couche de neige superposée sur la couche naturelle sur une pente naturelle a été observé. La couche de neige avait 4 m de long, et l'épaisseur maximale de la couverture de neige était d'environ 20 cm. Quatre litres d'eau de couleur noire ont été répandus sur la plus grande partie de la couche de neige pour voir si l'eau s'écoule de l'extrémité inférieure de la couche de neige. L'eau de couleur noire a ainsi été observée s'écouler de l'extrémité inférieure de la couche de neige, comme dans les tests en laboratoire et les tests à l'extérieur réalisés sur du terrain tondu, bien que les résultats n'aient pas été quantitatifs.

Ces résultats de ces observations permettent de conclure qu'un phénomène de fonte de neige à petite échelle similaire à ceux observés dans les tests en laboratoire se produit dans les conditions naturelles.

5. Relation entre le glissement de terrain de la pente coupée de l'autoroute et la fonte de la neige

La cause du glissement de terrain de la zone de Kuromatsunai a pu être déduite des observations du phénomène de fonte nivale et des tests en laboratoire comme suit:

La Figure 18 montre une projection sur carte topographique des cours avant le glissement de terrain. La surface de la pente synclinale sur le côté de la pente coupée est d'environ 1500 m², et comme indiqué, la topographie du site du glissement contribue à la concentration de l'eau de pluie et de l'eau de fonte dans la zone de drainage. La photo de la Figure 19 prise au moment du glissement de terrain montre que l'escarpement est proche de l'extrémité inférieure de la couche de neige.

La zone de drainage n'est pas très large, mais la température nocturne a été supérieure à 4°C pendant plusieurs jours avant le glissement. On peut conclure qu'un volume considérable d'eau de fonte s'est écoulé, de manière concentrée, vers l'extrémité inférieure de la couche de neige en continu et régulièrement jusqu'à ce que l'infiltration dans le sol dans la zone en position basse proche de l'épaulement de la pente résulte en un glissement de terrain.

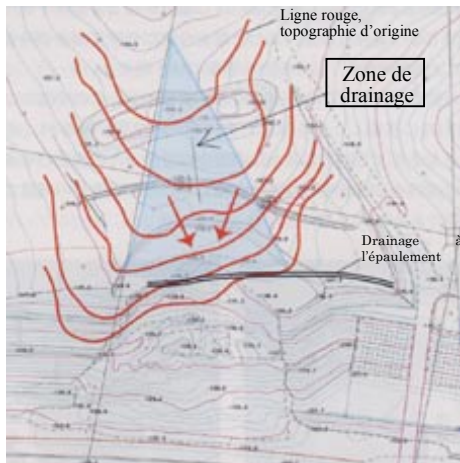


Figure 18 Site du glissement de terrain et zone de drainage



Figure 19 Site du glissement de terrain et zone de drainage

6. Bonnes pratiques d'inspection des pentes pendant la fonte nivale

L'inspection des pentes au début du printemps est importante pour éviter les glissements de terrains pendant la fonte nivale. Il est cependant possible d'inspecter une pente quand elle est couverte de neige. Quelles sont les bonnes pratiques?

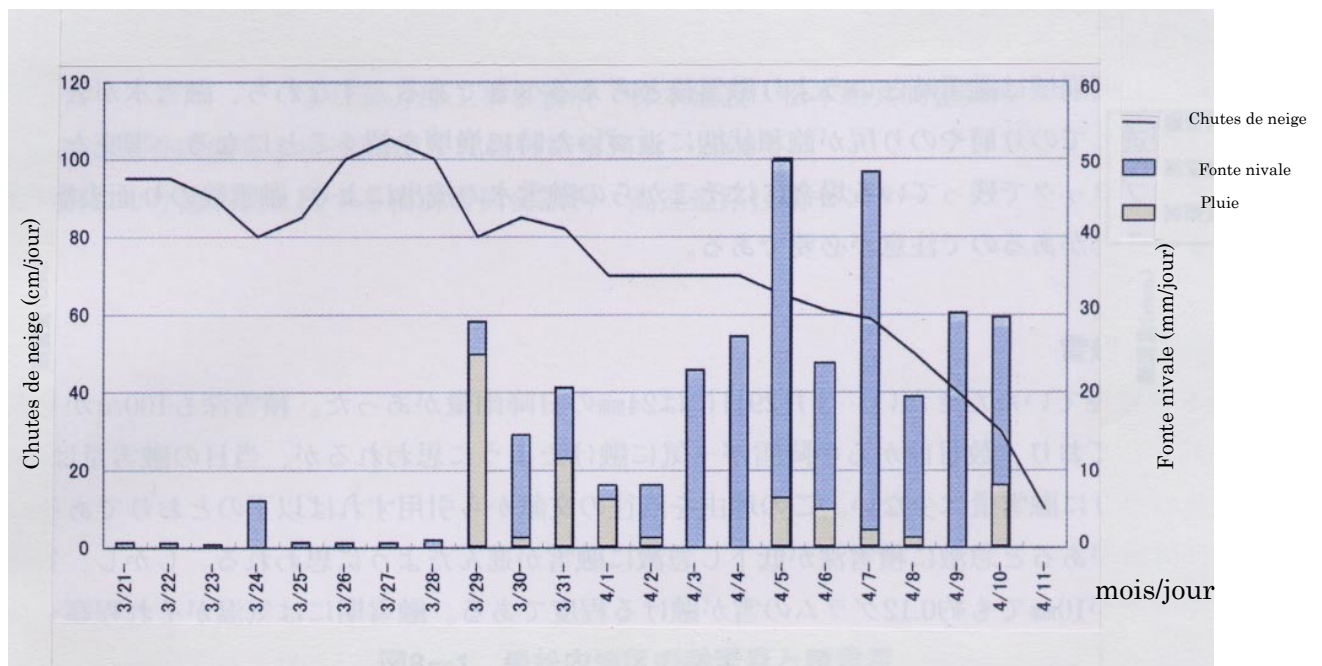


Figure 20 Fonte nivale et chutes de neige dans la zone de Kuromatsunai



Figure 21 Pente couverte de neige (4 avril)



Figure 22 Pente couverte de neige (11 avril)

6.1 Détermination du commencement de la fonte nivale

Il est inutile de s'inquiéter des catastrophes dues à la fonte nivale tant que la pente coupée et la pente supérieure ont une couverture de neige suffisante. Quand la couverture de neige est suffisante, différents phénomènes tels que granulation de la neige et flux vers le bas de la pente de l'eau de fonte à travers la couche de neige ont tendance à minimiser l'écoulement d'eau de la base de la couche de neige.

La Figure 20 montre les relevés d'eau de fonte faits avec un lysimètre à l'épaule de la pente sur le site du glissement de terrain de Kuromatsunai. Les Figures 21 et 22 indiquent le site du glissement les 4 et 11 avril. Les zones photographiées ne sont pas exactement identiques, mais ces photos permettent d'interpréter les modifications dans le temps de l'état de la couverture de neige. Le 4 avril, la pente était encore couverte d'un volume considérable de neige, mais commençait à être exposée par endroits. Les relevés d'eau de fonte basés sur les indications du lysimètre permettent de juger que le processus de fonte nivale en était encore à son début. Le 11 avril, la zone de fonte avait atteint l'épaule de la pente, et la couche de neige couvrant la pente commençait à se désintégrer. La couverture de neige était encore visible sur la pente supérieure. Les températures pendant cette période n'étaient pas particulièrement élevées.

Ces résultats permettent de considérer le moment où la partie la plus élevée de la pente coupée a commencé à être exposée comme le début de la fonte nivale. Comme le taux de fonte de la neige augmente brutalement vers ce moment-là, avec l'augmentation de la température, l'eau de fonte s'écoule de manière concentrée de la partie la plus basse de la pente supérieure vers l'épaule de la pente coupée. La gestion de l'inspection des pentes à ce moment-là dans les zones de neige doit être planifiée et réalisée selon les conditions des sites.

7. Conclusion

Cette thèse décrit comment la neige fond et comment l'eau de fonte s'infiltre dans le sol pour déstabiliser la pente coupée par simples tests en laboratoire sur la fonte nivale et observation du processus de fonte nivale dans la topographie naturelle.

Les résultats des tests en laboratoire sur la fonte nivale ont permis de tirer les conclusions suivantes concernant la pente coupée:

Si toute la pente est couverte de neige, la fonte nivale s'écoule vers le bas de la pente à travers la couche de neige et sort de l'extrémité inférieure de la pente. C'est pourquoi la pente reste stable.

Si le système de drainage au sommet de la pente est inadapté, l'écoulement de la partie inférieure de la couche de neige au sommet de la pente peut s'infiltrer dans la pente, provoquant un glissement de terrain avec la fonte de la neige.