

REVÊTEMENTS ANTIGEL ACTUELS AU JAPON ET MÉTHODES D'ÉVALUATION

Tomio Hara, Koichi Sakata et Takashi Kano

Groupe de recherches sur le revêtement antigél

Immeuble Sankoh (Fukuda Road Construction Co., Ltd. (Construction Routière Fukuda S.A.))

28, Saka-machi, Shinjuku-ku, Tokyo

1. Abrégé

A partir des années 70 et 80 où de nouvelles technologies de revêtements antigél avaient été importées de l'étranger, le Japon a fait un progrès technique remarquable dans le domaine du revêtement antigél. Le revêtement antigél étant considéré comme utile à l'entretien des chaussées en hiver, il a été mis en œuvre à une grande échelle sur une superficie de quelque 5 millions de mètre carrés. Étant donné que le revêtement antigél peut prévenir à la fois le gel de la surface de la chaussée et la formation des plaques de glace formées par l'amas de neige sous l'effet de la pression, il est censé d'une part assurer la sécurité routière en hiver et, d'autre part alléger la tâche de déneiger les routes.

Les revêtements antigél utilisés au Japon peuvent être divisés en deux groupes selon leur principe de fonctionnement pouvant être physique ou chimique. Les revêtements fonctionnant sur un principe chimique sont ceux qui tirent profit du phénomène de l'abaissement du point de congélation grâce à la libération d'un ou plusieurs produits chimiques préalablement mélangés dans les matériaux du revêtement. Au total, il existe quelque 4 procédés chimiques utilisant des produits chimiques différents. Avec des revêtements antigél fonctionnant sur un principe physique, les plaques de glace formées sur la couche du revêtement sont brisées en petites pièces et disparaissent facilement sous la charge du trafic à cause de la déformation des particules élastiques incorporées dans le revêtement antigél et présentes également sur sa surface. De tels procédés physiques comprennent une dizaine de variétés selon le type des matériaux élastiques utilisés et la méthode de mise en place. Pour évaluer leur efficacité, différentes méthodes sont proposées, mais force est de constater qu'il n'existe pas encore de méthodes qui permettent une évaluation quantitative fiables.

Dans de telles circonstances, le Groupe de recherches sur le revêtement antigél a entrepris de réaliser une évaluation quantitative simple de la propriété antigél des revêtements, à l'aide d'un appareil hydraulique pour essais d'adhérence. Suite à cette évaluation, il a été établi les points suivants:

- (i) Un revêtement antigél peut être contrôlé avec une même méthode aussi bien au laboratoire que sur le terrain;
- (ii) L'évaluation de la propriété antigél peut être faite non seulement en hiver, mais à toutes les saisons de l'année;
- (iii) La méthode d'évaluation de la propriété antigél peut être utile pour la sélection des méthodes d'exécution des travaux, en fonction des conditions du terrain.

Le présent exposé a été rédigé pour présenter le développement des revêtements antigél au Japon et faire le point des résultats de l'étude sur la possibilité de la mise en œuvre des revêtements antigél et de l'analyse des méthodes d'évaluation des revêtements antigél.

2. Introduction

Le territoire du Japon, archipel étiré tout en longueur du nord au sud, comprend une série de montagnes d'environ 2.000 m d'altitude en son centre. Les zones froides et enneigées du Japon peuvent se diviser comme l'indique la Fig. 1 par région, et s'étendent de Hokkaido au Nord à la région de Chugoku au Sud. Elles correspondent à environ 60% du territoire, où vivent quelque 30% de la population. Les conditions climatiques sont très variables d'une région à l'autre, et l'état des routes en hiver également.

C'est pourquoi des mesures pour la sécurité routière, telles que déneigement efficace et épandage de matériaux antigel, et mise en place un système d'information sur l'état des routes et les conditions météorologiques sont prises par les administrateurs des routes. Dans le cadre de ces mesures, divers revêtements antigel ont été développés et appliqués. Bien que des effets qualitatifs aient été reconnus pour ces revêtements antigel, aucune méthode d'évaluation quantitative n'est établie, et la période d'évaluation sur place est pratiquement limitée à l'hiver.

Vu cette situation, notre groupe de recherches a commencé à étudier un essai de résistance au gel en améliorant la méthode de résistance à l'adhérence à l'aide d'un testeur à traction hydraulique, afin de trouver une méthode quantitative simple de mesure de l'effet antigel permettant l'évaluation sur place sans limitations saisonnières.

La présente thèse présente les revêtements antigel actuellement utilisés au Japon et compile les résultats des études effectuées jusqu'à présent sur l'applicabilité des revêtements antigel et des méthodes d'estimation de leurs effets.

3. Climat japonais

La relation entre les températures moyennes hivernales dans les principales villes du pays et l'enneigement cumulé indiqué par la Fig. 2 montre que les conditions climatiques hivernales au Japon varient largement d'une région à l'autre, avec des températures moyennes de -4 à $+7^{\circ}\text{C}$ et un enneigement cumulé de 0,5 à 8 m. La Fig. 3 montre la relation entre les températures moyennes de janvier des principales villes du monde et l'enneigement hivernal cumulé. Cela permet de comprendre les conditions climatiques spéciales japonaises qui sont des températures relativement élevées, mais une neige abondante.

Les mesures contre les plaques de glace tenant compte des particularités régionales sont un sujet à étudier dans le contexte de ces conditions climatiques.

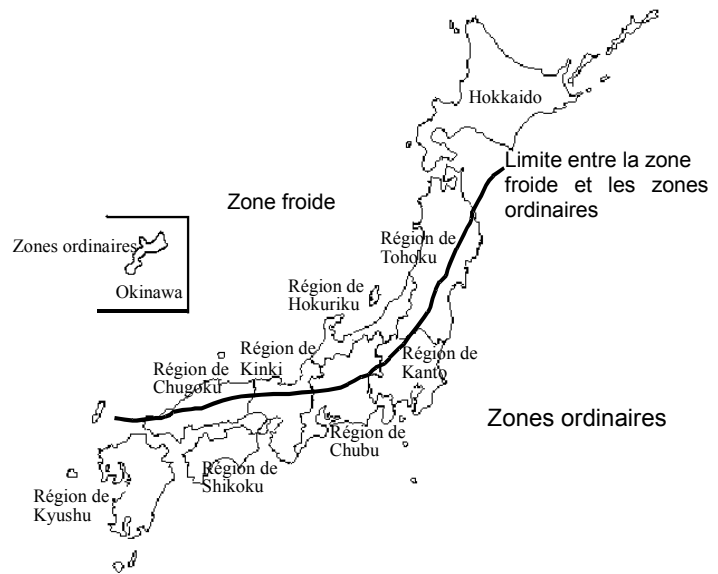


Fig. 1 Répartition des zones froides enneigées du Japon ¹⁾

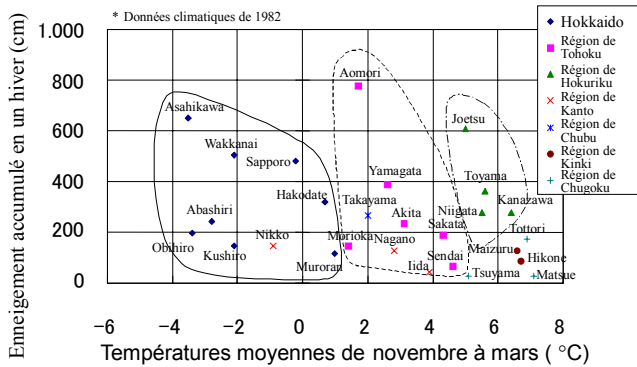


Fig.2 Exemple de climat hivernal des principales villes du Japon

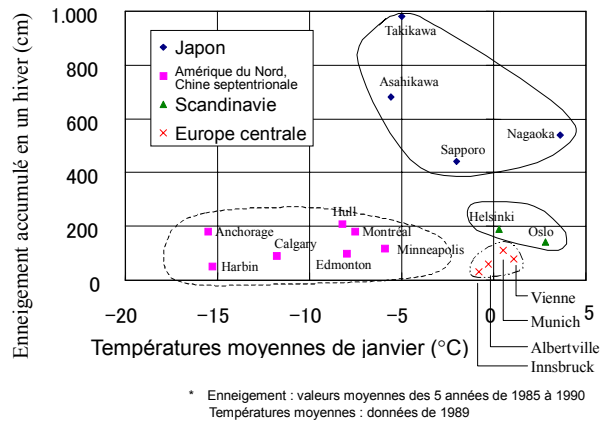


Fig. 3 Exemple de climat hivernal de villes dans le monde

4. Revêtements antigel actuels

4.1 Types de revêtements antigel

Des revêtements antigel de types chimique et physique sont utilisés au Japon. L'effet de ces deux types est considéré remarquable jusqu'à des températures de -5°C environ. ²⁾

- Type chimique

Les revêtements chimiques éliminent les plaques de glace en utilisant l'abaissement du point de congélation des chlorures élués à partir du revêtement. Il y a deux types selon la méthode d'addition des chlorures. Dans la mélangeuse d'asphalte, de la poudre ou des granulés sont mélangés à des chlorures traités, ou bien les interstices entre les particules de béton asphaltique ouvertes sont garnies des chlorures après exécution. La Fig. 4 donne un aperçu des revêtements antigel de type chimique.

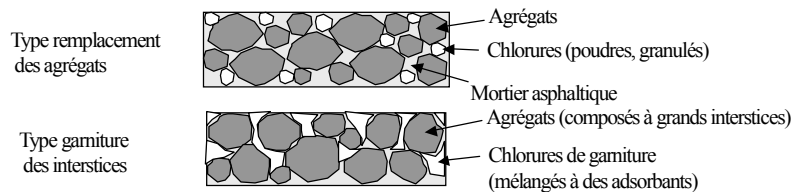


Fig. 4 Aperçu des revêtements antigel de type chimique

- Type physique

Dans le type physique, le corps élastique, caoutchouc ou uréthane, incorporé au revêtement, brise et élimine la plaque de glace en utilisant le ploiement sous la charge des véhicules circulant. Des matériaux élastiques, tels que particules de caoutchouc, sont

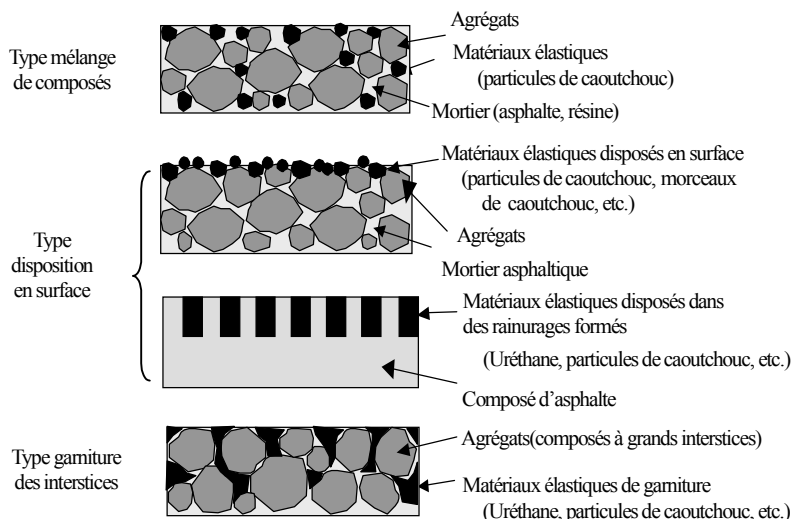


Fig. 5 Aperçu des revêtements antigel de type physique

incorporés au mélange dans la mélangeuse d'asphalte, ou bien sont pressés ou introduits par rainurage à la surface du revêtement après exécution; ou bien encore, les interstices entre les particules de béton asphaltique ouvertes sont garnis de matériaux élastiques après exécution. La Fig. 5 donne un aperçu des revêtements antigél de type physique.

4.2 Emplacements convenables

Le revêtement antigél ne permet pas directement le contrôle de l'exposition de la chaussée, c'est un complément aux opérations de gestion des routes en hiver comme le déneigement et l'épandage de matériaux anti-verglas. Les zones adaptées aux traitements chimiques et physiques ne sont pas clairement définies, mais le principe de leur effet antigél montre que les types physiques sont adaptés aux routes à circulation relativement importante, et que les types chimiques sont aussi applicables aux routes à circulation relativement limitée.

Les emplacements applicables sont les routes en pente exigeant une décélération-arrêt et les environs des croisements, les environs des entrées-sorties de tunnel où l'état de la route varie considérablement; en particulier, les emplacements où l'on souhaite réduire le volume de matériaux épandus comme les zones à l'ombre, le tablier des ponts, les zones adjacentes aux terres agricoles, etc. qui gèlent facilement, les emplacements où les opérations de déneigement prennent du retard comme les zones entre les montagnes, etc. ³⁾

4.3 Résultats obtenus avec les revêtements antigél

La Fig. 6 montre la surface d'application cumulée des revêtements antigél. L'application des revêtements antigél a commencé vers 1985, mais leur surface a considérablement augmenté à partir de 1991, quand les pneus cloutés ont été interdits. La surface totale a atteint environ 5 millions de m² en 1999.

Dans l'ensemble, la surface à revêtement chimique est importante, mais les applications expérimentales de revêtement physique effectuées au centre de Sapporo en 1993-1994 ont attiré l'attention sur les revêtements physiques, dont la surface d'application augmente depuis 1994, et représente depuis 1997 30 à 40% de la surface d'application annuelle.

Les surfaces d'application par région jusqu'à l'exercice 1999 sont importantes, de plus d'1 million de m² dans les régions de Tohoku et de Chubu, suivies des régions de Hokkaido, Kanto, Hokuriku, Kinki et Chugogu.

Bien que les applications soient limitées à Kyushu et Shikoku, les surfaces d'application augmentent après étude des emplacements appropriés.

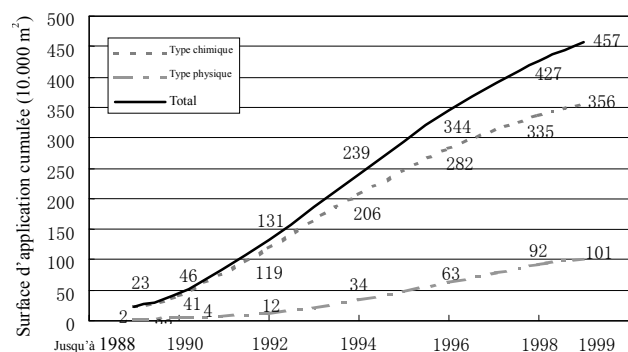


Fig. 6 Surfaces d'application cumulées des revêtements antigél

5. Evaluation des revêtements antigél

5.1 Méthode d'évaluation ordinaire

5.1.1 Exemples d'évaluation en laboratoire et problèmes

La mesure du sel élué est une méthode d'évaluation en laboratoire représentative du type chimique. Il existe également des exemples de méthode de mesure de la capacité d'adhérence de la glace entre le revêtement et la glace tassée, et de mesure de la résistance au dérapage à basse température.

L'évaluation pour le type physique se fait souvent par essai d'évaluation statique ou dynamique sous charge tenant compte de la déformation des matériaux élastiques. Il y a également des cas de mesure du couple du pneu à basse température avec un dispositif d'essai à étiquetage du couple.

Diverses études sont réalisées pour l'évaluation en laboratoire, mais aucune méthode uniformisée n'a encore été mise au point, et l'évaluation quantitative n'est pas encore possible. Le manque de clarté de la relation avec l'effet antigel sur la route même fait aussi problème.

5.1.2 Exemples d'évaluation sur route et problèmes

La Fig. 7 donne un aperçu de la mesure du taux de dégagement de la chaussée pendant la période hivernale enneigée, qui est la plus largement utilisée au Japon pour l'évaluation des revêtements antigel sur route.

La procédure de calcul du taux de dégagement de la chaussée consiste à définir des points de mesure à des emplacements arbitraires dans une section, à mesurer la largeur de la partie dégagée aux heures fixées, à calculer le pourcentage par rapport à la largeur de la voie, et à obtenir le taux de dégagement de la chaussée par la moyenne du pourcentage obtenu pour chaque point. L'évaluation par cette méthode se fait encore par comparaison relative, et présente aussi le problème de la difficulté de distinguer la glace noire de la surface dégagée.

L'évaluation sur route doit souvent se faire pendant la saison froide enneigée, et les conditions géographiques et climatiques influant sur les résultats, aucune évaluation quantitative uniforme n'a encore été mise au point.

5.2 Etude de nouvelles méthodes d'évaluation

Vu la situation, notre groupe de recherches, qui poursuit l'étude de méthodes expérimentales permettant d'évaluer quantitativement les effets des revêtements antigel tout au long de l'année en laboratoire et sur route, s'est attaché à l'adhérence entre la surface de la chaussée et la glace pour son évaluation.

Nous donnons ici pour les essais de résistance au gel, qui peuvent être indiqués par l'adhérence de la glace, les résultats de nos études sur l'extraction des conditions des essais, l'évaluation complémentaire en laboratoire en cas d'adaptation au revêtement antigel, et donnons également des exemples d'évaluation sur route.

5.2.1 Essais de résistance au gel

L'un des effets du revêtement antigel est considéré comme la facilité de décoller la glace de la chaussée. Les

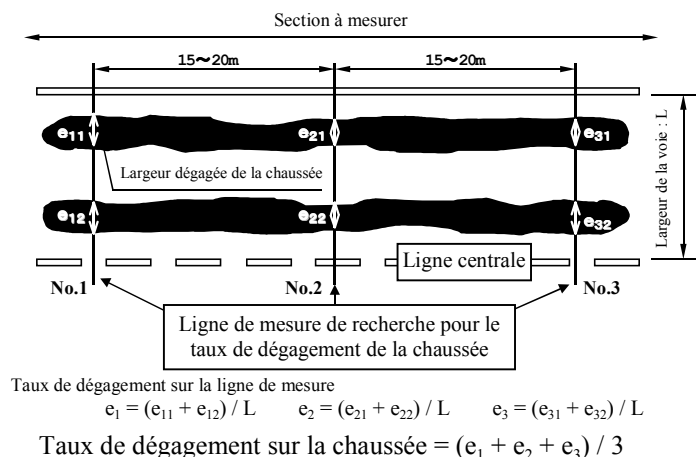


Fig. 7 Aperçu de la mesure du taux de dégagement de la chaussée ⁵⁾

essais de résistance au gel servent à mesurer la capacité d'adhérence de la glace à la chaussée en tant que résistance au gel, avec des dispositifs gelés. Notre groupe de recherches pense que la mesure de la résistance au gel à des dimensions variées devrait permettre l'estimation quantitative de l'effet antigel.

La Fig. 8 montre la procédure d'installation de l'équipement de test à traction hydraulique et du dispositif d'essai. Le dispositif en acier, auquel adhèrent des fibres non-tissées imprégnées d'eau, est placé sur la route et gelé à la température prescrite.

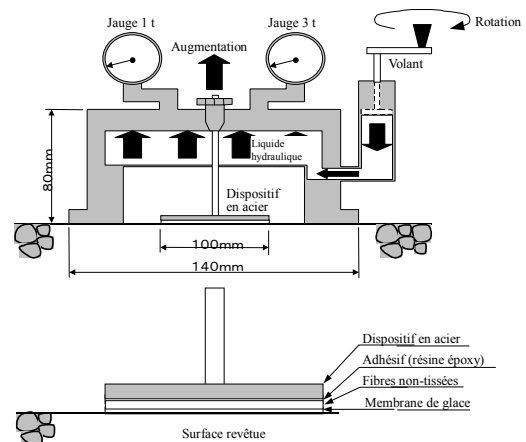


Fig. 8 Aperçu de la méthode d'essai de résistance au gel ⁶⁾

5.2.2 Essai de base

L'essai de base ci-dessous a été réalisé en laboratoire pour définir un essai de résistance au gel permettant l'évaluation des effets du revêtement antigel sur la route.

(1) Relation entre la température d'essai et la résistance au gel

Il est souhaitable que la température de l'essai de résistance au gel soit fixée sur une plage de températures permettant de saisir précisément l'effet du revêtement antigel. La relation entre la température d'essai et la résistance au gel a été étudiée pour définir la température pour l'essai de résistance au gel.

Pour cela, nous avons mis en place un spécimen pour essais de poursuite de roue fabriqué en utilisant un composé d'asphalte à densité granulométrique 13 mm TOP (ci-dessous appelée "densité granulométrique élevée") dans une salle à température constante réglée à la température de l'essai. Après confirmation de la mise à la température d'essai du spécimen dans sa totalité, un dispositif saturé d'eau a été mis à adhérer pendant environ 4 heures, et la résistance au gel mesurée en installant l'équipement d'essai à traction hydraulique. La Fig. 9 indique les résultats de mesure de la résistance au gel obtenus à température d'essai de -3, -6 et -10°C.

La résistance au gel augmente avec la baisse de la température d'essai, et la tendance à une différence de résistance plus grande entre -6 et -10°C qu'entre -3 et -6°C a aussi été observée. Ainsi, si la différence de résistance au gel sur un certaine plage de températures

d'essai est dite thermosensibilité, on peut dire que la thermosensibilité de -3 à -6°C est plus faible que celle de -6 à -10°C. Autrement dit, le contrôle des erreurs des valeurs d'essai et la relaxation des conditions d'essai sont jugés possibles si la température des essais de résistance au gel est fixée à -3 et -6°C.

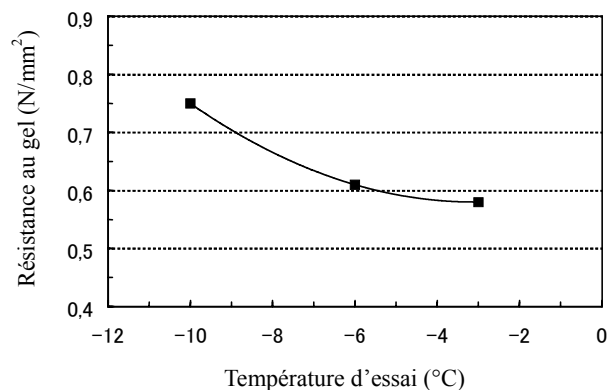


Fig. 9 Relation entre la température d'essai et la résistance au gel

De plus, ces températures d'essai coïncident avec la plage de températures estimée présenter l'effet du revêtement antigel le plus efficace. Par ailleurs, l'indice de variation de la résistance au gel de chaque température d'essai est de 8% à -3°C, de 6% à -5°C et de 11% à -10°C, le réglage de la température d'essai de -3 à -6°C devrait permettre de limiter la variation des valeurs d'essai. La température d'essai de résistance au gel a donc été réglée de -3 à -6°C sur la base de ces résultats.

(2) Influence du temps de refroidissement sur la résistance au gel

Pour confirmer l'influence du temps de refroidissement après l'installation de l'équipement de mesure, les essais de résistance au gel ont été effectués en faisant varier le temps de refroidissement entre la mise en place du dispositif sur le spécimen et le début de l'essai. Avec la même méthode d'essai qu'en (1), la température d'essai et la température de refroidissement ont été de -3°C et le temps de refroidissement de 120, 180, 240 et 300 minutes. La Fig. 10 indique les résultats des essais.

Les essais ont montré que la résistance au gel a tendance à augmenter avec le temps de refroidissement, et en particulier qu'il y a convergence à temps de refroidissement de plus de 240 minutes. Par ailleurs, l'indice de variation de la résistance au gel a tendance à diminuer avec l'allongement du temps de refroidissement, et une tendance à la convergence a été remarquée en particulier à temps de refroidissement de plus de 240 minutes. Vu ces résultats, le temps de refroidissement pour les essais de résistance au gel en laboratoire a été réglé à 240 minutes (4 heures).

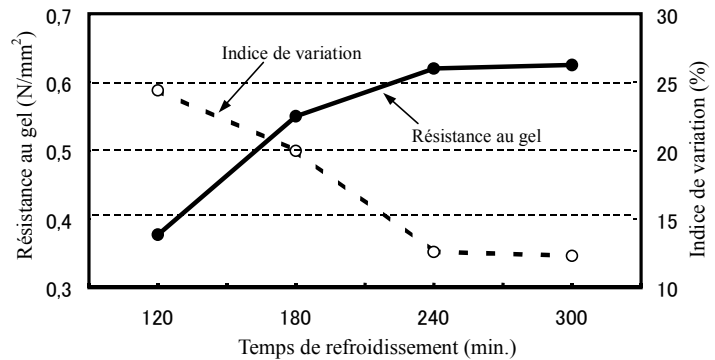


Fig. 10 Relation entre le temps de refroidissement, la résistance au gel et l'indice de variation

(3) Évaluation complémentaire de divers revêtements antigel

Sur la base des résultats d'étude ci-dessus, l'évaluation complémentaire de divers revêtements antigel a été faite aux réglages suivants : température d'essai et température de refroidissement de -3°C, temps de refroidissement de 240 minutes et vitesse de rotation du volant de 60 tr/min. (ci-dessous appelés "méthode d'essai standard"). La Fig. 11 indique les résultats des essais de résistance au gel réalisés sur divers revêtements antigel.

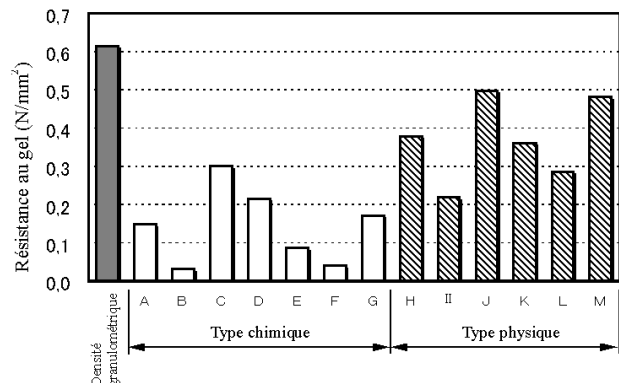


Fig. 11 Antigél résultats des essais de résistance au gel de divers revêtements antigel

Pour une densité granulométrique de 0,6 N/mm², la résistance au gel des revêtements antigel a été de 0,03 à 0,30 N/mm² pour les types chimiques et de 0,22 à 0,50 N/mm² pour les types physiques, ce qui a démontré la possibilité d'une évaluation quantitative de l'effet de

résistance au gel. La valeur devient généralement grande pour les systèmes physiques, mais si l'on considère que l'effet antigel apparaît sous l'effet d'une charge de circulation, on peut penser que les essais de résistance au gel pour les types physiques doivent être effectués en appliquant une charge sur le dispositif.

(4) Résultats des essais de base et définition des conditions d'essai

Notre groupe de recherches a défini des conditions d'essai par le biais des essais de base de résistance au gel, et effectué une évaluation complémentaire en laboratoire des revêtements antigel. Cela a montré que les essais de résistance au gel permettaient une évaluation quantitative de l'effet de revêtements antigel. Le Tableau 1 résume les conditions pour les essais de résistance au gel en incluant encore d'autres résultats d'étude.

Le temps de refroidissement a été fixé à 4 heures, mais en cas de réduction du temps de refroidissement pour essai sur route, la température de refroidissement peut être réglée à environ

-10°C; il a aussi été confirmé qu'après cure jusqu'à une température plus basse que la température d'essai et exécution de l'essai après retour à la température

d'essai, il était possible de réduire le temps de refroidissement, et d'assurer une résistance au gel correspondant à la valeur d'essai après 4 heures d'essai d'environ 0,6 N/mm².

5.2.3 Évaluation sur route

Une étude d'applicabilité à la route des essais antigel a été faite sur la base des résultats des essais de base en laboratoire selon la méthode d'évaluation de l'effet antigel. Voici ci-dessous un aperçu des essais et les résultats de l'évaluation.

(1) Aperçu des essais

Six types de chaussées revêtues ont été utilisés pour les essais de résistance au gel: deux types chimiques (types chimiques 1 et 2), deux types physiques (types physiques 3 et 4), un revêtement sans évacuation d'eau et un revêtement à densité granulométrique élevée pour la comparaison. Les essais ont été réalisés du soir au matin suivant, la période où la température extérieure est la plus basse. De plus, des essais sur route, ayant pour objectif de vérifier l'applicabilité sur place, ont été effectués conformément au Tableau 5.1 compilant les résultats des essais de base en laboratoire.

La surface de ces routes revêtues, aménagées en octobre 1999, et parcourue par des poids lourds de test pendant environ 3 mois en vue de l'étude de base du revêtement antigel, était différente de celle du spécimen en laboratoire, des parties de la membrane d'asphalte étaient écaillées.

Tableau 1 Conditions des essais de résistance au gel

Éléments	Conditions
Épaisseur et matériaux de fibres non-tissées	t=5mm Fibres non-tissées avec liant polyéthylène
Charge sur le dispositif au moment du gel	Poids total du dispositif : 1,6 kg (2 kPa)
Eau pour le gel	Eau courante
Température d'essai (température dans les fibres non-tissées)	-3 à -6°C
Dispositif utilisé	Fibres non-tissées de 5 mm d'épaisseur collées sur le dispositif en acier de ψ 10 cm
Vitesse du rotation du volant	60 tr/min. (vitesse de traction 13 mm/min.)
Température dans la salle de refroidissement	-3 à 6°C (essai en laboratoire)
Temps de cure	4 heures

(2) Résultats de l'évaluation et observations

Les essais de résistance au gel ont été effectués en confirmant que la température de la glace était de -3 à -6°C (température dans les fibres non-tissées) en installant un équipement de mesure thermoélectrique à l'intérieur des fibres non-tissées formant la membrane de glace. La température de l'air extérieur a aussi été mesurée.

Pour ces essais, même si la température de l'air extérieur a baissé jusqu'à -4°C, la température de la glace dans les fibres non-tissées n'est pas descendue au-dessous de -3°C, et une fois la température de l'air extérieur au-dessous de -5°C, la température de la glace dans les fibres non-tissées a brutalement baissé, et atteint la température de -3 à -6°C objectif des essais. Les essais ont été réalisés pendant une heure une fois que la température de la glace dans les fibres non-tissées a atteint -3 à -6°C.

Par ailleurs, l'installation du dispositif a été de deux types : le soir avant le jour de l'essai et environ 3 heures avant le démarrage de l'essai le jour même pour vérifier la relation entre la différence de temps de formation et la résistance au gel.

La résistance au gel pour la densité granulométrique élevée a été de 0,8 à 1,0 (N/mm²), et la Fig. 12 indique la résistance au gel de chaque revêtement sous forme de pourcentage en utilisant cette valeur comme valeur 100. Par rapport au revêtement à densité granulométrique élevée, la résistance au gel des revêtements antigel a été faible, de 20 à 60% environ, et comme pour les essais de base en laboratoire, l'effet antigel a été considéré comme suffisamment évalué. Mais par rapport aux essais en laboratoire, la résistance au gel du revêtement à densité granulométrique élevée a légèrement augmenté sans doute à cause de la différence dans la membrane d'asphalte précitée.

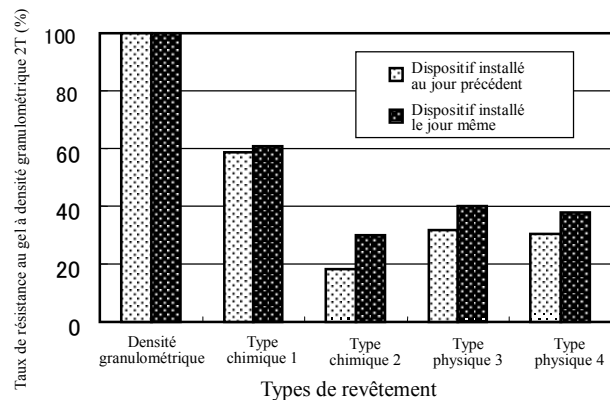


Fig. 12 Résistance au gel par rapport à la densité granulométrique de chaque revêtement

Par conséquent, cela laisse à penser qu'il est possible de confirmer la possibilité de l'évaluation des fonctions du revêtement antigel à partir de la résistance au gel obtenue par les essais de résistance au gel.

Quant à la relation entre la différence de temps de formation de la glace et la résistance au gel, la résistance au gel du dispositif installé 3 heures avant les essais a été supérieure à celle du dispositif installé le jour précédent pour augmenter le temps de formation de la glace. L'observation de l'état de la glace formée dans les fibres non-tissées après les essais a clairement montré que la glace sur la surface du dispositif installé le jour précédent était grossière, mais dense sur le dispositif installé le jour même, ce qui fait penser à l'influence de la vaporisation de la teneur en eau dans le processus de formation de longue durée. Si la formation de la glace exige beaucoup de temps, des mesures doivent donc être prises pour empêcher la vaporisation de la teneur en eau ou bien pour l'approvisionnement en eau.

6. Résumé

Le présent rapport peut se résumer comme suit.

(1) Cet essai est adapté aux conditions climatiques spécifiques de température relativement élevée et d'enneigement important du Japon, plutôt qu'aux principales villes du monde.

(2) Les revêtements antigel du Japon sont de types chimique et physique, et à la fin de l'exercice 1999, 4,57 millions de m² étaient aménagés, dont environ 80% du type chimique.

(3) L'évaluation sur route doit actuellement souvent se faire pendant la saison froide enneigée, mais elle est affectée par les conditions géographiques et climatiques, et aucune évaluation quantitative n'a encore pu être mise au point.

(4) Comme le montre le Tableau 5.1, les essais en laboratoire ont permis de définir les conditions des essais.

(5) Les essais de résistance au gel sur route ont donné des résultats pratiquement similaires à ceux des essais en laboratoire.

(6) Les essais de résistance au gel permettent l'évaluation quantitative du revêtement antigel.

L'étude sur la base de la collecte de nombreuses données, en vue de savoir si une évaluation équivalente est possible en laboratoire et sur route, reste à faire. Par ailleurs, un dispositif permettant des essais de résistance au gel tout au long de l'année par refroidissement forcé de la route sans relation avec la température extérieure est à l'étude, en supposant l'évaluation des fonctions du revêtement antigel immédiatement après son exécution. En poursuivant perfectionnements et études additionnels, nous souhaitons établir une méthode d'évaluation quantitative des fonctions du revêtement antigel.

Références

- 1) Japan Highway Public Corporation: Première édition des revêtements, portée de la conception, p. 24, juil. 1999
- 2) Snow Research Center: Documents sur les revêtements antigel, fév. 1997
- 3) Groupe de recherches sur le revêtement antigel: Revêtements antigel actuels, revêtements, pp. 14-20, sep. 2000
- 4) Suzuki & al.: Etude de la durabilité de l'effet antigel des revêtements antigel, 3^e recueil de thèses sur le génie du revêtement, pp. 201-206, déc. 1998
- 5) Hiroaki Shimizu: Explication du vocabulaire des revêtements routiers "taux d'exposition de la chaussée", revêtements, p. 39, déc. 1998
- 6) Shimazaki & al.: Idées pour des méthodes de mesure de la résistance au gel et étude de leur applicabilité, Recueil n°5 des abrégés des exposés scientifiques et techniques du 50^e Congrès de génie civil, pp. 516-517, sep. 1995