

SYSTEMES DE FONTE DE LA NEIGE ET DE DEGIVRAGE SUR LES ROUTES, UTILISANT DES SOURCES NATURELLES D'ENERGIE THERMIQUE

Shigenobu Miyamoto* et Masanori Takeuchi**

***Préfecture de Fukui.**
Centre de Recherche sur la Gestion de la Neige
et la Technologie de la Construction.
3-303 Kasuga, Fukui-shi, Fukui-ken
TEL. +81-776-35-2412/FAX +81-776-35-2445
E-mail : miyasnowmelt@hotmail.com

****Université de Fukui.**
Département de Génie mécanique,
Faculté de Génie
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui-ken,
TEL.+81-776-27-8531/FAX+81-776-27-8748
E-mail : takeuchi@mech.fukui-u.ac.jp

1. Introduction

Les districts de Hokuriku et de Tohoku, au Japon, emploient régulièrement les systèmes de fonte de la neige utilisant de l'eau souterraine et leur usage excessif est à l'origine d'un affaissement du sol. A des fins d'économie d'énergie ou de préservation de l'environnement, les nouveaux systèmes de fonte de la neige utilisant moins d'eau souterraine et les systèmes de remplacement à base de sources naturelles d'énergie thermique autres que l'eau souterraine sont très demandés.

2. Economiser l'eau souterraine utilisée pour la fonte de la neige ¹⁾

Nous avons fait fondre de la neige, à titre expérimental, à l'aide de différents types d'équipement, notamment des tuyaux de dissipation thermique en métal ou en polyéthylène. Nous avons utilisé la conductivité du revêtement du sol (forte ou élevée), en modifiant la température et la vitesse de l'eau dans les tuyaux en question. Dans chaque cas, la température de l'eau mesurée à la sortie du conduit de dissipation thermique était de 1 °C inférieure à celle calculée en considérant la résistance thermique entre la couche de neige et l'eau en mouvement. Les deux résultats indiquent que l'eau à 8 °C circulant dans un tuyau de métal enfoui à une profondeur de 3 cm avec un espacement de 10 cm, tel qu'illustré à la figure 1, dans un revêtement de béton fait d'agrégats de silice dont la conductivité est de 6 W/mK – soit trois fois celle de l'agrégat habituel – parvient à faire fondre la neige à une vitesse de 200 W/m².

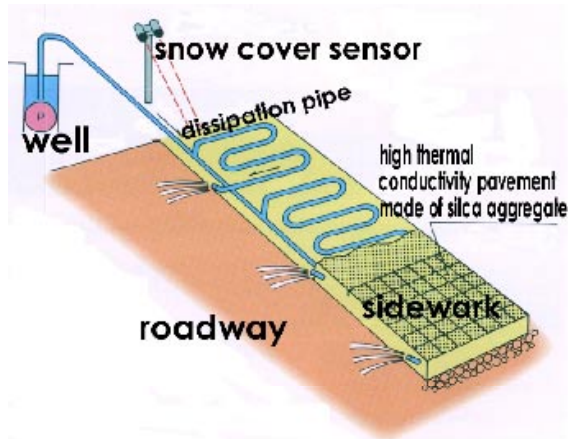


Fig. 1 Représentation d'un système de fonte de la neige en cascade, utilisant de l'eau souterraine



Fig. 2 Détecteur de neige commandant le système de fonte de la neige



Fig. 3 Vue d'un système de fonte de la neige en cascade, utilisant de l'eau souterraine, dans la ville de Fukui

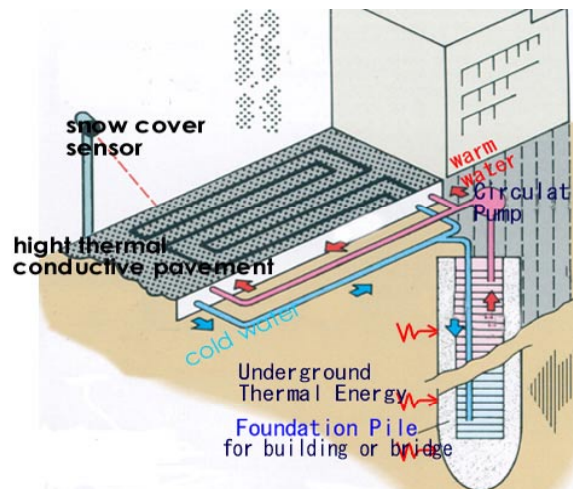


Fig. 4 Représentation d'un système de fonte de la neige utilisant l'énergie thermique souterraine recueillie par un pieu de fondation

Les systèmes de fonte de la neige étaient commandés par des détecteurs de neige. Afin de gagner du temps et d'économiser de l'énergie, un nouveau détecteur de neige au sol a été mis au point en 1987. Le détecteur présenté à la figure 2, qui pivote pour scruter la surface de la route depuis le centre jusqu'aux côtés, commande l'équipement de fonte de la neige qui pulvérise l'eau souterraine directement sur la route. Ces systèmes surveillés par le détecteur de neige fonctionnent généralement de façon intermittente, mais continuent de fonctionner après une importante chute de neige. Par conséquent, le détecteur de neige a réduit d'un tiers le temps de fonctionnement sans occasionner de problème pendant tout un hiver. Durant le jour, il a réduit le temps de fonctionnement d'un septième. De tels détecteurs de neige ont été utilisés afin « d'économiser l'eau » dans plusieurs préfectures dont celles de Fukui, de Niigata et d'Ishikawa.

Afin d'économiser l'eau souterraine, un système de fonte de la neige a été mis au point en associant les trois éléments décrits préalablement : (1) Des tuyaux de dissipation thermique dans le revêtement du sol ont permis de faire fondre la neige sur un trottoir, après quoi l'eau de ces mêmes tuyaux a été utilisée pour arroser la route et y faire fondre également la neige. Cette méthode est appelée « cascade de chaleur ». (2) Des panneaux en béton préfabriqué contenant un tuyau de dissipation thermique et bénéficiant de la haute conductivité thermique des agrégats de silice ont été installés dans le trottoir. Ces panneaux étaient conçus de manière à ce qu'on puisse les retirer facilement afin de permettre de creuser le sol davantage sous ces mêmes panneaux. (3) Ce système de fonte était commandé par le détecteur de neige qui commande également les panneaux de fonte de la neige.

Malgré un retard occasionnel au démarrage, les nouveaux détecteurs ont commandé le système sans problème, la couche de béton étant plus fine.

Depuis Fukui, les éléments de ce système sont utilisés dans les préfectures d'Ishikawa, de Toyama et de Yamagata.

3.Système de fonte de la neige utilisant l'énergie thermique souterraine recueillie par des pieux de fondation

Un nouveau système de fonte de la neige à circulation d'eau (voir figure 4) visant à recueillir l'énergie thermique souterraine à l'aide de pieux de fondation, a été mis au point^{2,3)}. A l'aide d'une pompe de circulation, l'eau froide provenant des tuyaux de dissipation coule au pied de chaque pieu grâce à un conduit de polyéthylène à l'intérieur de ces mêmes pieux de fondation. L'eau coule ensuite à travers la cavité du pieu pour atteindre le haut de ce dernier, tout en absorbant l'énergie thermique souterraine. Après quoi, cette eau réchauffée circule dans le tuyau de dissipation, faisant fondre la neige sur le revêtement du sol.



Fig. 5 Etat de la fonte de la neige dans la zone d'expérimentation

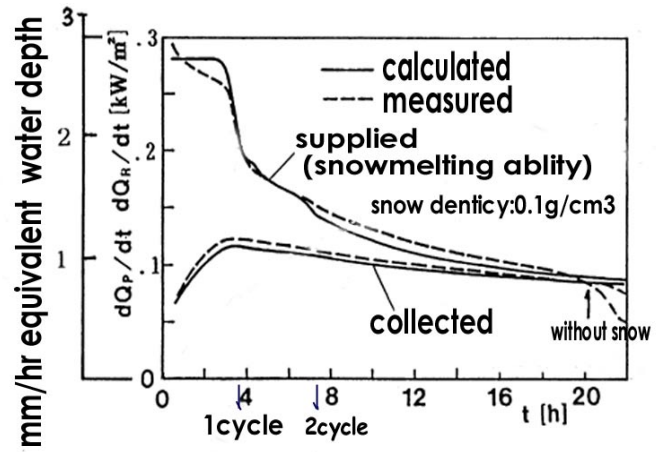


Fig. 6 Modification de la capacité de fonte de la neige



Fig. 7 Effet de la résistance thermique entre l'eau en mouvement et la surface de la route

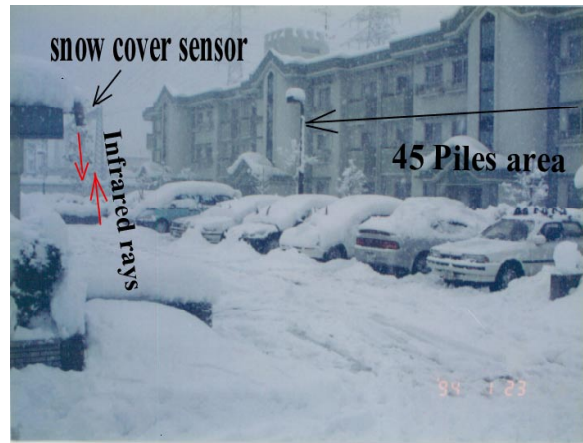


Fig. 8 Etat de la fonte de la neige lors de la plus grande tempête de neige en 5 ans

Au cours de l'expérimentation, la production de chaleur de deux pieux de béton d'un diamètre interne de 0,31 m et d'une longueur de 22 m a fait fondre la neige recouvrant une surface de béton de 20,8 m². Les tuyaux de dissipation thermique avaient été noyés dans 3 cm de béton d'agrégats de silice. L'efficacité de ce système de fonte de la neige a été démontrée, dans la ville de Fukui, lors de chutes de neiges intermittentes. La zone d'expérimentation est restée dégagée pendant toute la durée de l'essai, soit de janvier à mars 1991, alors que Fukui avait accumulé 187 cm de neige, la couche maximale ayant atteint 60 cm. La figure 5 illustre l'excellente capacité de fonte de ce système.

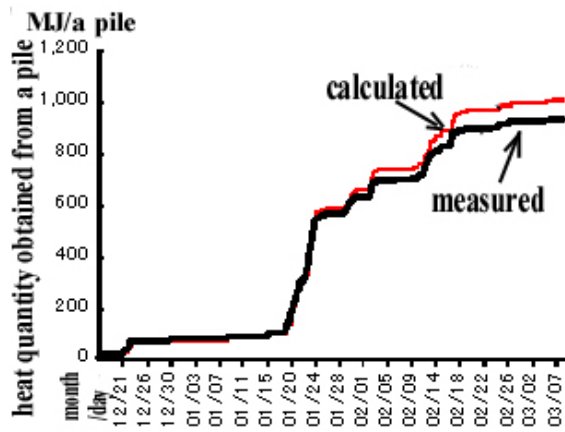


Fig. 9 Quantité de chaleur obtenue à partir d'un pieu

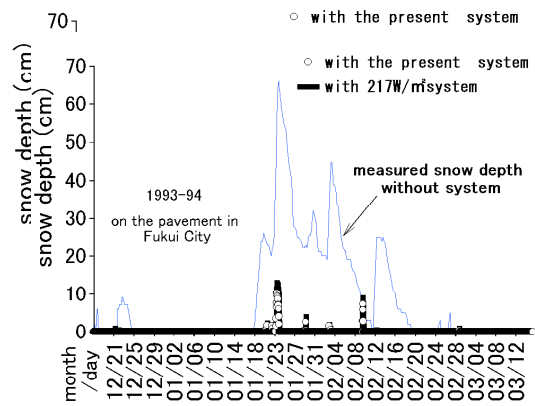


Fig. 10 Résultat de la simulation de fonte de la neige



Fig. 11 Vue d'un parking sans système de fonte de la neige



Fig. 12 Travaux près d'un pieu de fondation

Une simulation numérique a également été prévue afin d'évaluer le système, au cours de laquelle les pieux et les tuyaux de dissipation thermique enfouis sous une surface de béton étaient traités comme un système connexe. La chaleur émanant du pieu et la chaleur absorbée par le sol environnant ont été calculées. La figure 6 démontre que la capacité de fonte a diminué après le premier cycle de circulation de l'eau, pour ensuite décroître très légèrement en raison de l'équilibre créé avec la quantité de chaleur emmagasinée par le sol environnant. L'efficacité du système dépend du rapport entre la surface et le nombre de pieux, la longueur et le diamètre des pieux, le matériau et le diamètre des tuyaux de dissipation, la conductivité thermique du revêtement du sol, la profondeur à laquelle sont enfouis les tuyaux de dissipation, la température souterraine et ainsi de suite. De plus, les résultats calculés correspondaient aux résultats expérimentaux (figure 6). Dans la zone indiquée par une flèche à la figure 7, la neige n'a pas fondu parce que les tuyaux de dissipation avaient été posés à 8 cm en dessous du

revêtement du sol, dont la conductivité, de surcroît, était mauvaise. Il faut faire en sorte d'obtenir une résistance thermique faible entre l'eau en mouvement et la surface de la route.

Lorsque la capacité de fonte était plus élevée, le détecteur illustré à la figure 8 actionnait la pompe de circulation de façon intermittente. Lorsqu'elle était plus basse, le détecteur faisait fonctionner la pompe de circulation en permanence après les chutes de neige, jusqu'à ce que la couche de neige sur le sol ait complètement fondu. Le système a donc fonctionné sans difficultés, bien que sa capacité ait changé en cours de fonctionnement.

Ce système a été mis à profit dans plusieurs endroits comme des parkings. Dans une zone de 400 m², par exemple, grâce à 45 pieux de 0,27 m de diamètre interne et 35 m de longueur et à une pompe de circulation de 2,2 kW, l'épaisseur de la couche de neige est restée inférieure à 6 cm durant 5 saisons, malgré une couche de neige de 66 cm dans les zones environnantes.

La figure 9 montre que la quantité de chaleur provenant de l'un des pieux de fondation correspond tout à fait au résultat calculé pour une saison dans la simulation numérique. La figure 10 présente l'enneigement de la saison avec le nouveau système, avec un système de 217 W/m² et sans aucun système. Sur cette dernière figure, l'épaisseur de neige maximale calculée avec le nouveau système est de 9 cm et inférieure à celle obtenue avec un système de 217 W/m². La figure 8, quant à elle, propose une image de l'épaisseur de neige maximale dans un parking, avec le nouveau système, tandis que la figure 11 offre une image de l'épaisseur maximale, au même moment, sans aucun système.



Fig. 13 Travaux auprès de pieux de fondation



Fig. 14 Installation de tuyaux de dissipation



Fig. 15 Etat de la fonte de la neige



Fig.16 Travaux sous une butée

Les travaux de tuyauterie n'ont pas créé de difficultés, comme l'illustrent les figures 12, 13 et 14, puisque la communication entre le plombier et les ouvriers de la construction était excellente.

Le coût initial était d'environ un tiers du coût des autres systèmes à base d'énergie thermique utilisés au Japon, en raison du coût élevé du forage vertical des trous. Le coût initial du nouveau système utilisant des pieux de fondation était égal à celui du système traditionnel à base d'énergie primaire. L'électricité utilisée par la pompe de circulation représente environ 1/40 de celle utilisée par un système de chauffage électrique. Un système de fonte de la neige équipé d'une grande chaudière à mazout ainsi que le nouveau système ont été installés dans la salle de concert de la préfecture de Fukui. Selon l'opérateur, « le système avec chaudière à mazout ne pouvait pas fonctionner sans opérateur à cause des risques d'incendie. Au matin, la neige confiée au nouveau système (voir figure 15) avait fondu, contrairement à la neige confiée au système avec chaudière à mazout. »

A l'heure actuelle, une zone de fonte de la neige et de dégivrage de 1 300 m² sur un pont et sur la route avoisinante est en construction (voir figure 16). Pour cette aire, 36 pieux en acier de 0,5 à 0,8 m de diamètre interne et de 45 m de longueur seront placés sous les deux butées du pont. Dans ce cas précis, les pieux ont été munis, à leur base, de forets, afin de tourillonner dans le sol. Le volume de chaleur stockée est alors supérieur à celui des pieux de fondation en béton car le diamètre interne des pieux d'acier pour les ponts est plus large. En plus de l'énergie thermique souterraine, on pourra donc utiliser l'énergie solaire absorbée en faisant fonctionner la pompe de circulation durant les journées chaudes de l'hiver. Ainsi, ce système sera plus rentable.



Fig.17 Etat du givre sur un pont



Fig.18 Accident de la route dû à des surfaces de routes différentes

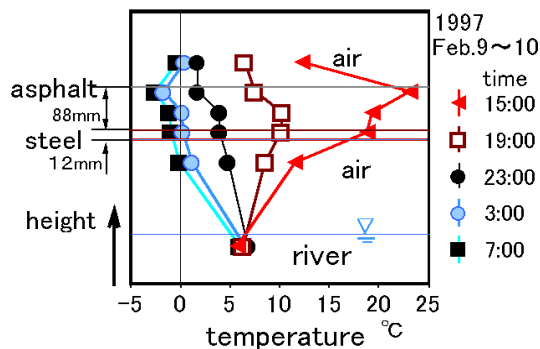


Fig.19 Changements de température à divers endroits d'un pont à platelage métallique

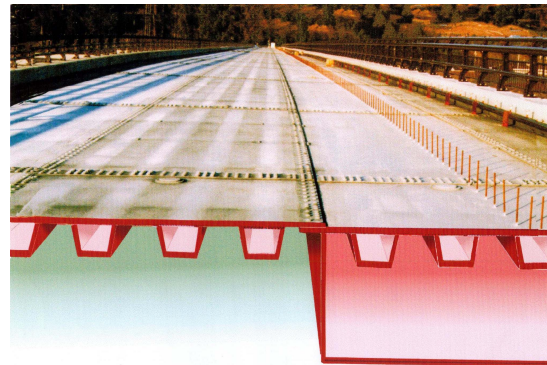


Fig.20 Givre sur un pont à platelage métallique

4. Système de dégivrage à base d'un matériau à changement de phase sur un pont routier^{4,5,6)}

A basse température, la surface de la route se couvre de givre et devient glissante plus souvent sur les ponts à platelage métallique que sur les ponts à tablier de béton (figure 17). Ces conditions sont à l'origine d'accidents, comme le montre la figure 18. L'impact, sur ce phénomène, des détails structurels sous le tablier du pont a fait l'objet d'une enquête, au cours de laquelle on a mesuré les températures à divers endroits du platelage métallique. Les conclusions de cette enquête sont les suivantes :

(1) La figure 19 présente les températures du pont, de l'air et de la rivière, toutes les 4 heures, par une journée glaciale, à Fukui. D'après cette figure, par un temps froid, entre minuit et l'aube, la température de la surface de la route sur le pont à platelage métallique est inférieure à celle de la rivière et de l'air environnant. La chaleur par rayonnement de la surface de la rivière et la convection de chaleur provenant de l'air ont donc réchauffé le platelage, rendant ainsi la route plus résistante au gel.

(2) Par un matin froid, la température quotidienne minimale de la surface de la route sur un platelage avec garnitures isolantes ou nervures fermées (appelées « nervures en U ») était inférieure à celle des platelages à nervures ouvertes (appelées « nervures en I »). La

figure 20, où l'on aperçoit une photographie et une section, nous fait découvrir qu'à la surface du platelage, seules les nervures en U et les poutres en caisson étaient fortement couvertes de givre.

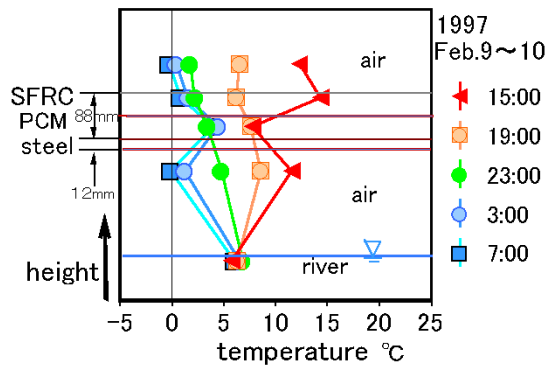


Fig. 21 Changement de température à différents endroits du pont à platelage métallique avec un matériau à changement de phase



Fig. 22 Tuyaux d'acier remplis de matériau à changement de phase

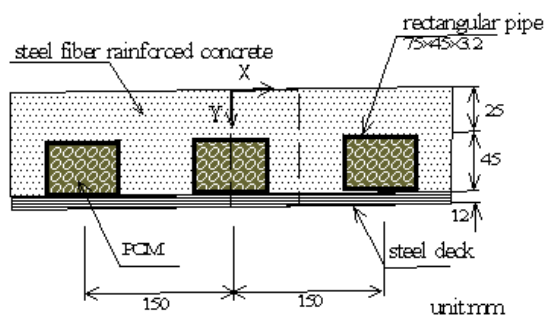


Fig. 23 Section d'un platelage métallique avec un matériau à changement de phase

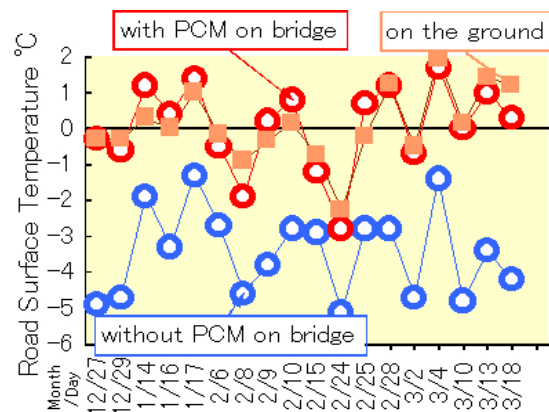


Fig. 24 Températures quotidiennes minimales de la surface de la route

(3) Les tabliers de pont en béton armé sont plus épais et ont, par conséquent, une capacité thermique supérieure à celle des platelages métalliques. Le flux de chaleur en provenance de la rivière ou de l'air et à destination du tablier de béton est donc négligeable.

Ces observations ont permis de confirmer que si les ponts à platelage métallique avaient une plus grande capacité thermique à une température juste au-dessus du point de congélation de l'eau, leur surface serait tout aussi valable que d'autres. A Fukui, dans le but d'augmenter la capacité thermique du revêtement d'un pont à platelage métallique avec nervures ouvertes, on a installé des tuyaux d'acier rectangulaires avec matériau à

changement de phase (paraffine à fausse solidité) à raison de 18 litres/m² de revêtement et ayant une capacité thermique latente de 130 joules/cm³ à 3,1 °C. La figure 21 montre le résultat de l'expérience. D'après cette figure, la température du matériau à changement de phase est restée stable à 3 °C pendant un long moment. Ainsi, au point le plus froid, la surface de la route avec un matériau à changement de phase était de 2,5 °C supérieure à la surface sans matériau à changement de phase, si l'on compare à la mesure de la figure 19, prise le même jour. Le matériau à changement de phase a emmagasiné l'énergie solaire durant la journée, évitant ainsi le gel de la surface.



Fig. 25 Fonte de la neige sur un platelage métallique avec et sans matériau à changement de phase

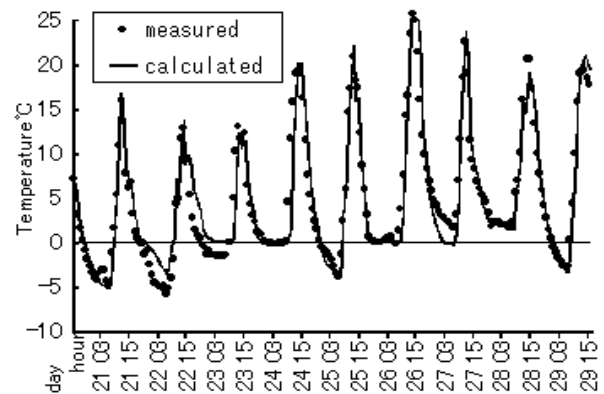


Fig. 26 Températures de la surface de la route sur un pont à platelage métallique sans matériau à changement de phase

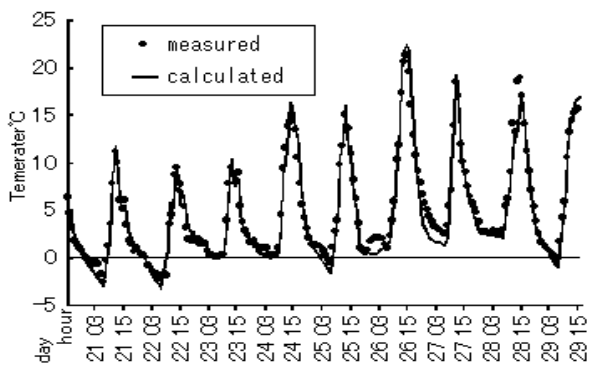


Fig. 27 Températures de la surface de la route sur un pont à platelage métallique avec matériau à changement de phase

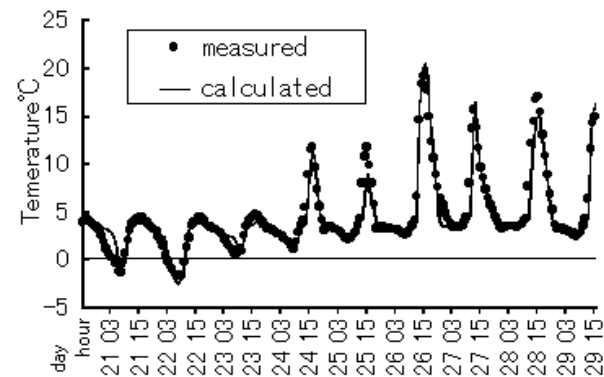


Fig. 28 Températures du matériau à changement de phase sur un pont à platelage métallique

L'année suivante, dans la ville de Fukui, le système avec matériau à changement de phase a été installé sur d'autres ponts à platelage métallique avec nervures fermées (figures 22 et 23). La figure 24 donne les températures quotidiennes minimales de la surface de la route avec et sans matériau à changement de phase et au sol, sur le site, par un matin froid d'hiver. Les températures de surface de route avec matériau à changement de phase étaient, en moyenne, supérieures aux surfaces dépourvues de ce même matériau de plus de 3 °C. Qui plus est, les températures de surface sur les ponts avec matériau à changement de phase étaient semblables aux températures au sol. Même si on ne peut faire fondre que quelques centimètres de neige, l'état de la surface du pont peut être amélioré aussi bien à l'avant qu'à l'arrière grâce au matériau à changement de phase (figure 25), ce qui a pour effet d'éliminer des conditions très dangereuses.

Les simulations des températures de la surface des routes avec ou sans matériau à changement de phase sont très utiles lorsqu'il s'agit de sensibiliser les autres régions à ce système. Des simulations numériques ont été effectuées, en tenant compte des flux de chaleur irradiée, sensible, latente et conductible estimés à l'aide des données climatiques de l'Observatoire de Météorologie. Les figures 26 à 29 font état, respectivement, des données calculées et mesurées concernant les températures de la surface de la route, les températures du matériau à changement de phase et l'épaisseur de la couche de neige pendant 10 jours consécutifs, durant lesquels les conditions météorologiques étaient un mélange de gelée et de neige. Les calculs correspondent aux résultats des mesures. Le modèle de simulation utilisant les données climatiques AMeDAS (*Automated Meteorological Data Acquisition System* ou Système d'acquisition automatique de données météorologiques) peut calculer la température de la surface de la route, l'épaisseur de la couche de neige et la quantité de givre sur n'importe quel type de pont et au sol à des endroits spécifiques de l'AMeDAS.

Ce système coûte environ ¥ 40,000/m². L'essai de la roue a confirmé qu'une structure avec des tuyaux d'acier rectangulaires et du béton armé de fibre d'acier sur le hourdis d'un tablier fixe est plus durable⁷⁾. En outre, l'épaisseur du tablier d'acier peut être réduite de 12 mm à 10 mm, puisque cette structure peut être conçue comme un hourdis composé d'un platelage métallique et de béton armé de fibre d'acier. Un tel système est utile non seulement dans les régions enneigées mais aussi dans d'autres régions où le givre est fréquent.

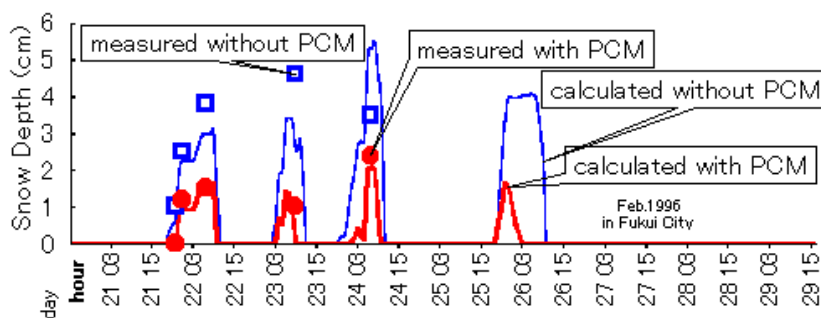


Fig. 29 Enneigement sur un pont à platelage métallique avec et sans matériau à changement de phase

5. Conclusions

Nous pouvons, en résumé, économiser l'eau souterraine pour la fonte de la neige et utiliser des systèmes de fonte de la neige et de dégivrage ayant recours à des sources naturelles d'énergie thermique autres que l'eau souterraine, si nous allions les détecteurs, la tuyauterie, les pieux, le revêtement du sol, le stockage de l'énergie, les simulations, etc., et si nous adaptons nos dispositifs aux conditions de chaque site.

REFERENCES

- 1) Shigenbu MIYAMOTO : DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES DE FONTE DE LA NEIGE POUR ECONOMISER L'EAU SOUTERRAINE, en japonais, JOURNAL DE GESTION DE LA CONSTRUCTION ET D'INGENIERIE, N° 492/VI-23, pp.77-86, 1994. 6
- 2) Masanori TAKEUCHI, Teruo KIMURA, Shigenbu MIYAMOTO et Yuji Tsubota : Développement et simulation numérique de systèmes de fonte de la neige à base de pieux de fondation, en japonais, Transactions de la Société japonaise des ingénieurs en chauffage, en climatisation et en hygiène, N° 52, 1993. 6
- 3) Shigenbu MIYAMOTO, Masanori TAKEUCHI et Teruo KIMURA : CONCEPTION, CONSTRUCTION ET UTILISATION DE SIMULATIONS NUMERIQUES UTILISANT L'ENERGIE GEOTHERMIQUE ABSORBEE PAR LES PIEUX DE FONDATION, en japonais, JOURNAL DE GESTION DE LA CONSTRUCTION ET D'INGENIERIE, N° 574/VI-36, pp.73-83, 1997. 9
- 4) Shigenbu Miyamoto, Masao Murota et Masayoshi Sugimori : Influence des détails structuraux sous les tabliers des ponts sur les surfaces givrées des routes, en japonais, Journal japonais de l'ingénierie de la neige, Vol.14 N° 1, 36-42. Jan.
- 5) Shigenbu Miyamoto et Masao Murota : ETUDE SUR LA PREVENTION DU GEL A LA SURFACE DES ROUTES DES PONTS A PLATELAGE METALLIQUE A L'AIDE DE MATERIAUX A ACCUMULATION, en japonais, JOURNAL DE GESTION DE LA CONSTRUCTION ET D'INGENIERIE, N° 609/VI-41, pp.99-110, 1998. 12
- 6) Shigenbu MIYAMOTO : EFFET PRONOSTIQUE DU SYSTEME ANTIGEL AVEC MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE SUR LES PONTS A PLATELAGE METALLIQUE, UTILISANT LA SIMULATION NUMERIQUE, en japonais, JOURNAL DE GESTION DE LA CONSTRUCTION ET D'INGENIERIE, N° 595/VI-39, pp.117-125, 1998. 6
- 7) Shigeo OKUMURA, Shigenbu MIYAMOTO, Toshio HORIKAWA, Yutaka HIGAKI, Shigeyuki MATUI : Sur les caractéristiques de fatigue du hourdis composite des platelages métalliques capables de limiter le gel des routes sous les roues des camions, en japonais, Actes du 2° Symposium sur les platelages des ponts routiers, pp.143-148, 2000.10