

GESTION DE L'AFFAISSEMENT DES ROUTES SUITE À UN FORT TREMBLEMENT DE TERRE PAR UNE TECHNOLOGIE DE RELEVÉ DES CAVITÉS DU SOUS-SOL

T. ABE, M. SAIKA & T. KUSAKABE

Road Management Technology Center, Japon

saika-m@hozen.or.jp

S. KICHIKAWA

Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, Japon

K. FUJII

Geo Search co., Ltd.

k-fujii@geosearch.co.jp

RÉSUMÉ

Un relevé des cavités du sous-sol des routes nationales a été effectué juste après le tremblement de terre qui a frappé la préfecture de Niigata, au Japon, le 23 octobre 2004, pour gérer les risques d'affaissements, sources d'éventuels désastres secondaires. Le relevé effectué sur un total de 814 km de voies avec la technologie de radar à pénétration de sol, a permis de détecter plus de 400 cavités.

L'étude de telles données réelles rarement disponibles a permis d'acquérir les connaissances suivantes utiles pour la gestion des désastres secondaires pouvant survenir après de forts tremblements de terre.

- Pour minimiser les risques d'affaissement, le relevé des cavités du sous-sol doit être effectué aussi tôt que possible après le tremblement de terre.
- Toute la zone où l'intensité sismique a été supérieure ou égale à 5 doit faire l'objet d'un relevé.
- Les emplacements proches des structures souterraines doivent être étudiés avec soin.
- Le relevé est nécessaire dans les zones où l'état du sol n'est pas très bon, même si l'intensité est inférieure à 5.
- Des cartes de dangers indiquant le niveau de risque d'affaissement peuvent servir d'outil de gestion des risques et pour établir un plan de réhabilitation efficace.

1. INTRODUCTION

Le tremblement de terre qui a frappé la préfecture de Niigata au Japon, le 23 octobre 2004 a provoqué des dommages importants surtout dans le district de Niigata Chuetsu. Selon le rapport de l'Agence japonaise de Gestion des Incendies et des Désastres, le nombre de morts a été de 65 et celui des blessés de 4800. La chaussée a été fortement endommagée et la circulation interrompue en plus de 2300 endroits. Comme le réseau de routes nationales est l'élément central permettant de porter secours aux victimes du tremblement de terre et de remettre en état les zones affectées, la sécurisation des routes pour la logistique d'urgence a été l'une des principales priorités.

Les cavités du sous-sol qui peuvent être créées par un tremblement de terre provoquent des affaissements, ce qui entrave les activités de secours et de remise en état. C'est pourquoi le Ministère japonais du Territoire, des Infrastructures et du Transport a effectué un relevé des cavités du sous-sol sur le réseau des routes nationales peu de temps après le tremblement de terre pour pouvoir gérer le risque d'affaissement. La technologie principale qui a été utilisée dans ce cas pour le relevé a été celle du radar à pénétration de sol (GPR).

De plus, un relevé de surveillance a été effectué dans une zone représentative, environ un an plus tard, pour évaluer les effets des fortes répliques qui ont eu lieu après le premier relevé effectué en urgence ainsi que ceux de la montée de la nappe phréatique causée par la fonte des neiges dans cette zone.

2. RÉSULTATS DES RELEVÉS

2.1. Méthode de mesure

Au Japon, la technique du GPR est devenue une technologie standard pour détecter efficacement les cavités du sous-sol. Dans les cas où il a fallu effectuer des relevés sur une grande étendue dans un temps très court, on n'a pas pu utiliser la méthode habituelle avec un GPR portable. Le relevé est donc effectué en deux phases, un relevé principal et un relevé secondaire. [1] [2]

Pour le relevé principal on a utilisé un véhicule conçu pour détecter des cavités jusqu'à 1,5 m sous la surface. Ce véhicule, équipé de sept canaux GPR se déplace à une vitesse maximum de 45 km/h et couvre une bande de 2,45 m de large par passage (Photographie 1). Il permet donc d'obtenir un relevé rapidement et de minimiser ainsi l'impact sur les activités de mises en état.

Il est aussi équipé de trois caméras vidéo CCD installées sur les côtés gauche et droit et à l'avant du véhicule pour enregistrer des informations sur la localisation en plus des données du GPS. Ces informations supplémentaires facilitent le travail lors du relevé secondaire. Les données recueillies par GPR et les informations sur la localisation sont analysées et les zones ayant un caractère anormal pouvant correspondre à des cavités sont obtenues à partir de ces données.

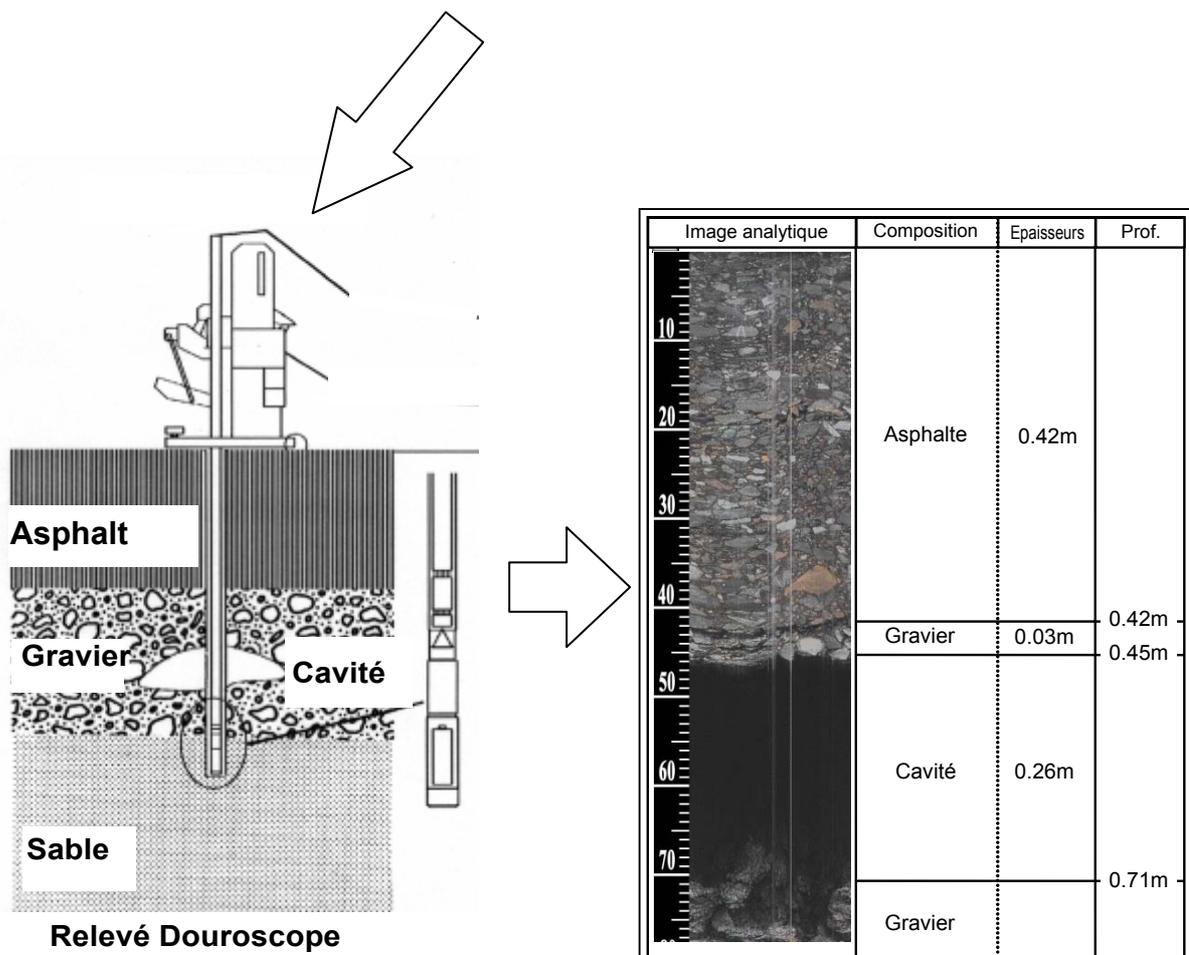


Photographie 1 – Relevé principal (Prise de données par le véhicule de relevés)

On effectue ensuite un relevé secondaire aux endroits présentant un caractère anormal. On utilise d'abord un GPR portable à simple canal pour préciser la position de ces zones. Dans le même temps, les données recueillies sont analysées pour déterminer plus précisément la présence de cavités et leurs dimensions latérales. On perce ensuite une ouverture de 40 mm de diamètre et une caméra de trou de sonde est insérée dans l'ouverture pour obtenir une image photographique du sous-sol, appelée "Relevé Douroscope". On peut ainsi confirmer ou non la présence d'une cavité et déterminer l'état du sous-sol. (Figure 2)



Prise de données avec le GPR portable



Résultat de relevé Douroscope

Figure 2 – Déroulement du Relevé Secondaire

2.2. Résultats des relevés

2.2.1. Relevé d'urgence

La zone de relevé d'urgence a été déterminée en fonction des paramètres suivants:

- Zone où une intensité sismique shindo, (Note1) supérieure ou égale à 5- a été enregistrée.
- Zone où l'état du sol n'est pas bon. Par exemple, la zone de liquéfaction due au tremblement de terre avait une bonne chance d'être sélectionnée.

La Figure 3 montre les routes où un relevé a été effectué.

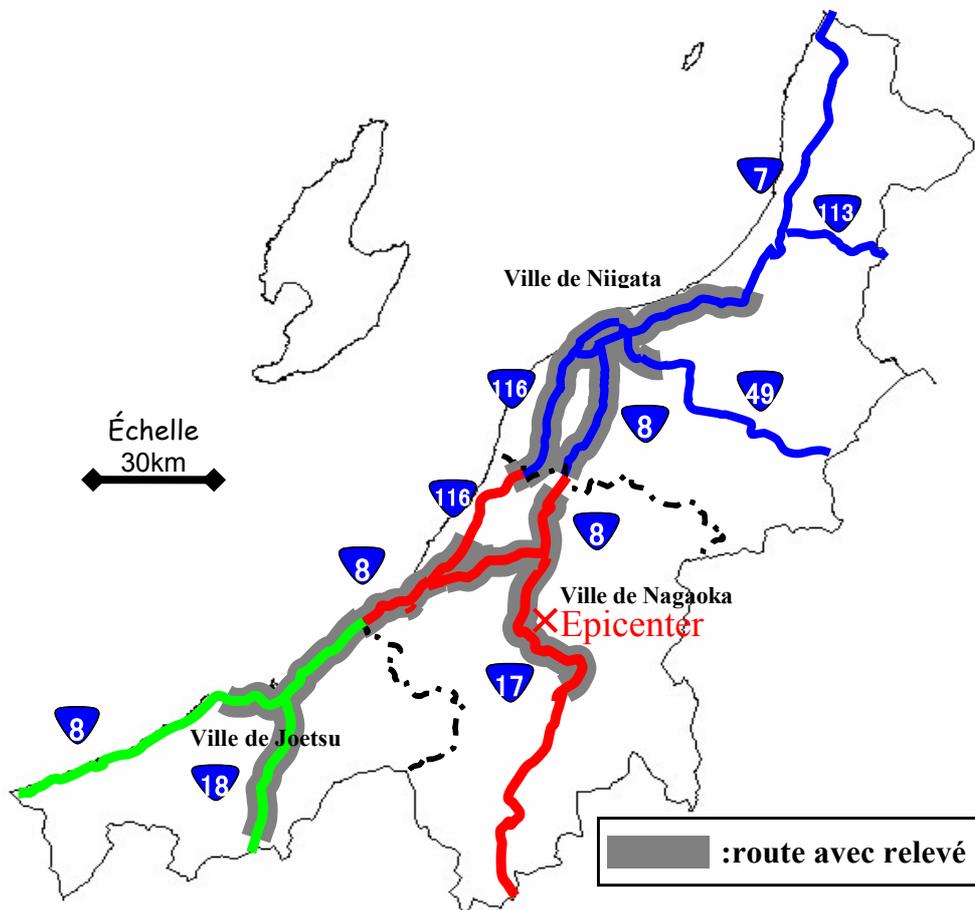


Figure 3 – Zone des relevés

(Note1) L'échelle d'intensité sismique (shindo) de l'Agence Météorologique du Japon (JMA) est utilisée au Japon et à Taiwan pour mesurer la force des tremblements de terre. L'échelle JMA mesure le niveau de tremblement en un point de la surface de la Terre. L'intensité du tremblement de terre varie donc d'un point à l'autre. L'échelle JMA a 10 niveaux : 0, 1, 2, 3, 4, 5-, 5+, 6-, 6+ et 7; 7 étant le plus haut. On calcule l'intensité sismique (shindo) automatiquement à partir de mesures de l'accélération du sol en de nombreux endroits. Par exemple le shindo 5+ correspond à une intensité sismique que la plupart des gens trouvent effrayante et qui rend tout déplacement difficile.

Le relevé d'urgence a démarré quatre jours après le tremblement de terre et 318 km de routes du réseau national ont fait l'objet d'un relevé. Comme le but de l'opération est de s'assurer que la route est sûre, les relevés doivent être effectués sur les deux voies. La longueur totale de voies où un relevé a été effectué lors de ce relevé principal est de 814 km. Grâce à l'utilisation simultanée de trois véhicules de relevés, la prise de données n'a duré que trois jours.

L'analyse a débuté aussitôt que les données ont été enregistrées. Cette analyse a permis de déceler 546 emplacements à caractère anormal où l'on pouvait suspecter la présence de cavités.

Comme le nombre d'emplacements anormaux était très grand, on a estimé que le relevé secondaire et la remise en état prendraient un temps assez long. On a donc préparé une carte des dangers indiquant les emplacements d'éventuelles cavités et le niveau de risque d'affaissement. (Figure 4) On a établi le niveau de risque à partir du relevé principal.

Le niveau a été défini de la façon suivante :

- Niveau I : Zone d'éventuelles cavités de 2,25 m² ou plus et distantes de la surface de 0,3 m ou moins.
- Niveau II : Zone d'éventuelles cavités de 2,25 m² ou distantes de la surface de 0,3 m, à l'exception de celles du « Niveau 1 ».
- Niveau III : Zone d'éventuelles cavités inférieures à 2,25 m² et distantes de la surface de plus de 0,3m.

On a utilisé les cartes des dangers non seulement pour les patrouilles routières journalières mais aussi pour établir un plan de remise en état efficace.

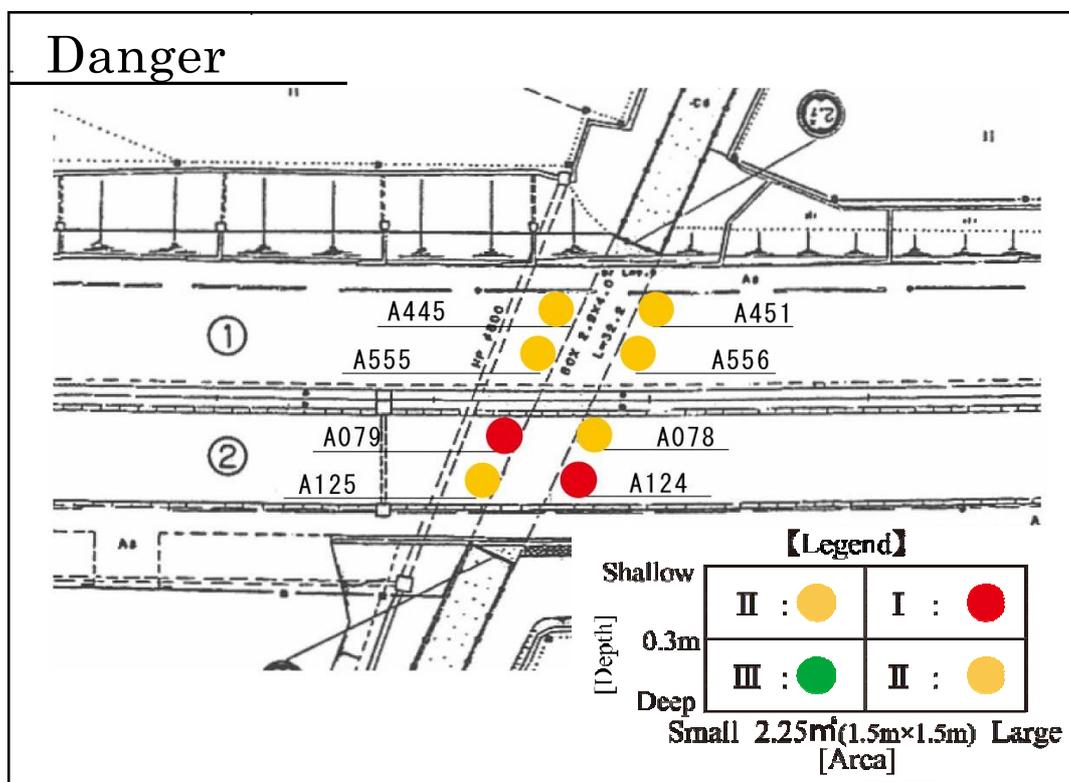


Figure 4 – Exemple de carte des dangers

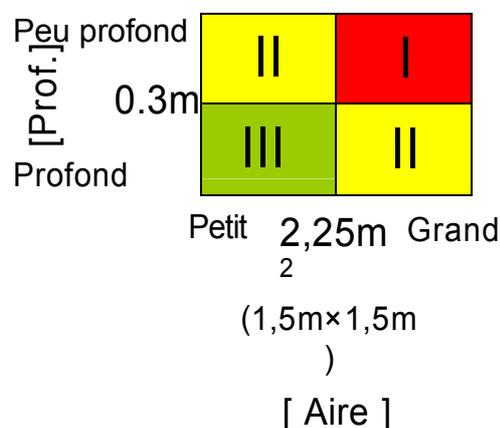


Figure 5 – Niveaux de risque

On a effectué un relevé secondaire à 393 emplacements anormaux sur 546. Les endroits restants ont été réparés directement lors des travaux de remise en état sans avoir recours à un relevé secondaire. Le relevé secondaire a permis de confirmer la présence de 310 emplacements où se trouvaient des cavités. On a donc confirmé la présence de cavités dans 80% des cas. En utilisant ce taux pour l'ensemble des emplacements anormaux on obtient un nombre de 438 cavités au total. C'est ce nombre qui a été utilisé dans les études ultérieures.

Les résultats du relevé principal peuvent être résumés comme suit :

- Les dimensions latérales de la plus grande cavité étaient de 10,4 m de long et 2,0 m de large.
- La cavité la plus creuse était de 1,4 m. (Figure 6)
- L'une des cavités n'était qu'à 0,12 m sous la surface.
- Les cavités typiques étaient proches des structures souterraines.

Image photographique	Composition	Épaisseur	Prof.
	Mélange Asphalte	0.40m	0.40m
	Cavité	1.40m	
	Sable		1.80m

Figure 6 – Résultat du relevé “Douroscope” (Cavité la plus profonde)

2.2.2. Relevé de vérification

Un relevé de vérification a été effectué parce qu'il était possible que de nouvelles cavités soient apparues suite aux fortes répliques survenues après le relevé d'urgence et à la montée de la nappe phréatique dans cette zone au printemps. L'objectif principal de ce relevé de surveillance étant d'établir la tendance des effets en questions, celui-ci n'a été effectué que sur une partie des zones où le relevé d'urgence avait été effectué. Contrairement au cas du relevé d'urgence où l'on avait effectué des relevés sur chaque voie, les relevés n'ont été effectués que sur une seule voie de 48 km pour ce relevé de surveillance. Cette étude a détecté huit cavités.

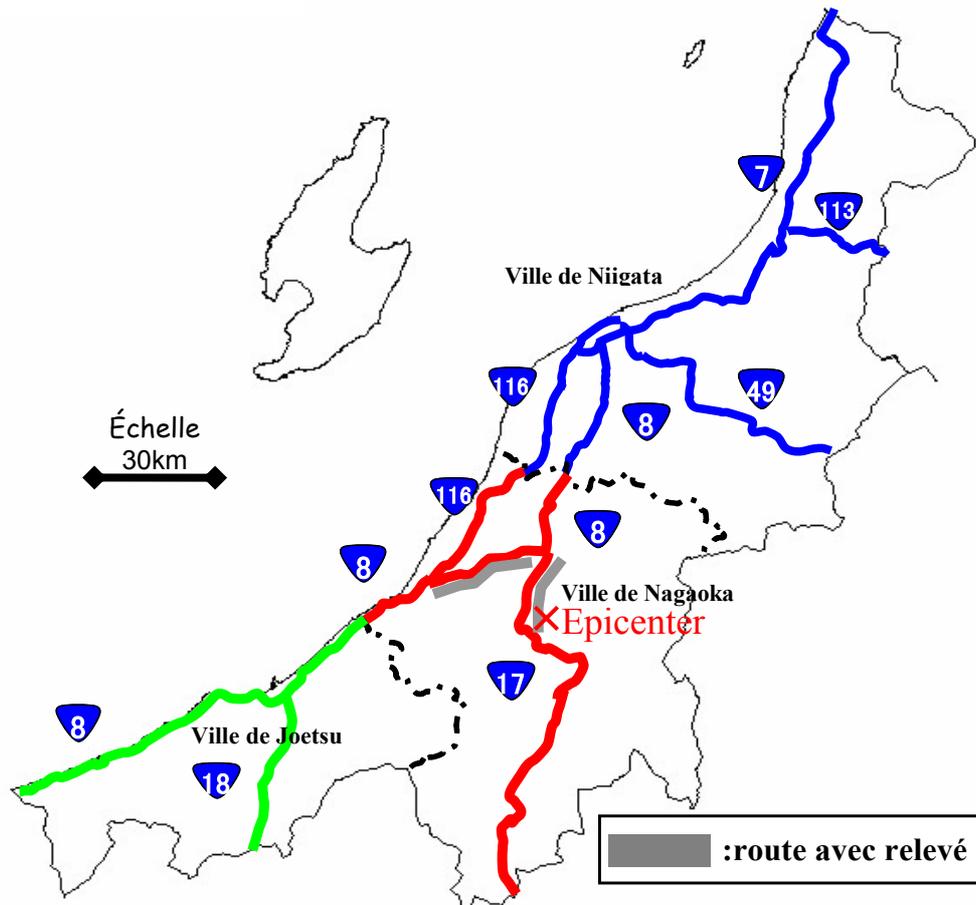


Figure 7 – Zone des relevés

3. ETUDE DES RÉSULTATS DES RELEVÉS

3.1. Intensité sismique vs. Densité de cavités

438 cavités (note 2) ont été détectées lors du relevé d'urgence. Comme la longueur de route étudiée est d'environ 318 km, le nombre de cavité pour 10 km est en moyenne de 13,8. Les résultats des relevés périodiques dans cette zone entre 1991 et 2003 indiquent une valeur de 4,6. La densité de cavités apparaissant à la suite d'un tremblement de terre est donc le triple de celle observée ordinairement. Comme l'indique la Figure 8, la densité de cavités augmente de façon générale avec l'intensité sismique. On peut observer que cette densité augmente rapidement dans les zones où on a enregistré une intensité sismique supérieure ou égale à 5-

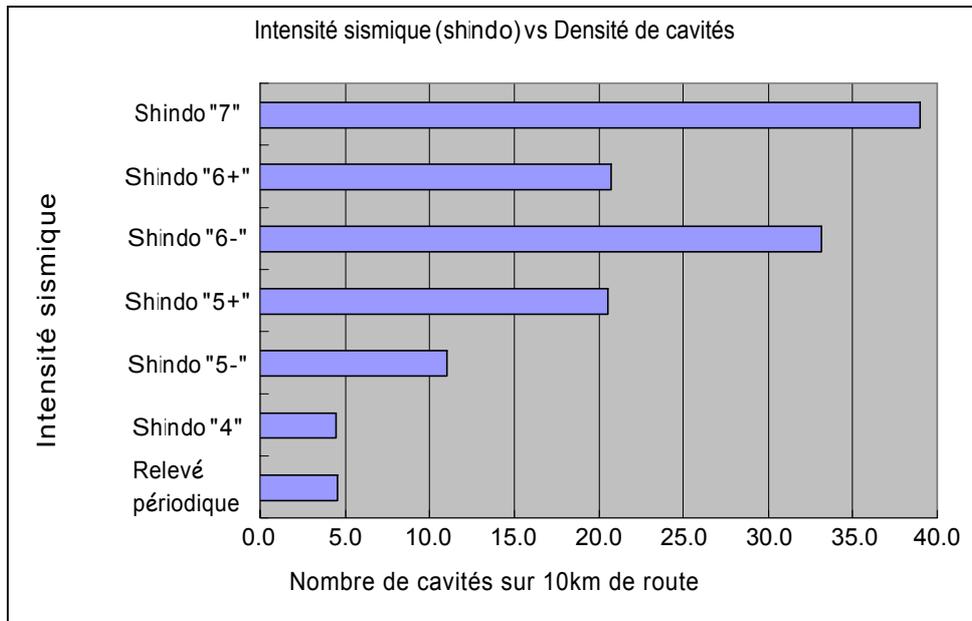


Figure 8 – Intensité sismique (shindo) vs. Densité de cavités

(Note 2) Bien que le nombre de cavités confirmées ne soit que de 310, on a considéré un nombre de 128 emplacements anormaux supplémentaires comme étant des cavités comme expliqué au paragraphe 2.2.1.

3.2. État du sol vs. Zone à forte densité de cavités

La Figure 9 représente la répartition des cavités, superposée à la « Carte nationale des Tremblements de terre » publiée par le Bureau du Premier Ministre japonais en 2005. La taille des barres dans la Figure indique le nombre de cavités par kilomètre de route nationale. Il est facile de prédire qu'il y a une zone à forte densité de cavités proche de l'épicentre, mais il en existe aussi qui en sont éloignées. Ces zones correspondent à celles où le sol est instable comme le montre la Figure 9. La plupart des zones instables dans la région sont faites de sable. Comme celui-ci a une forte probabilité de se liquéfier lors d'un tremblement de terre, on conclut que cette liquéfaction peut être l'un des facteurs à l'origine du grand nombre de cavités observé dans ces zones.

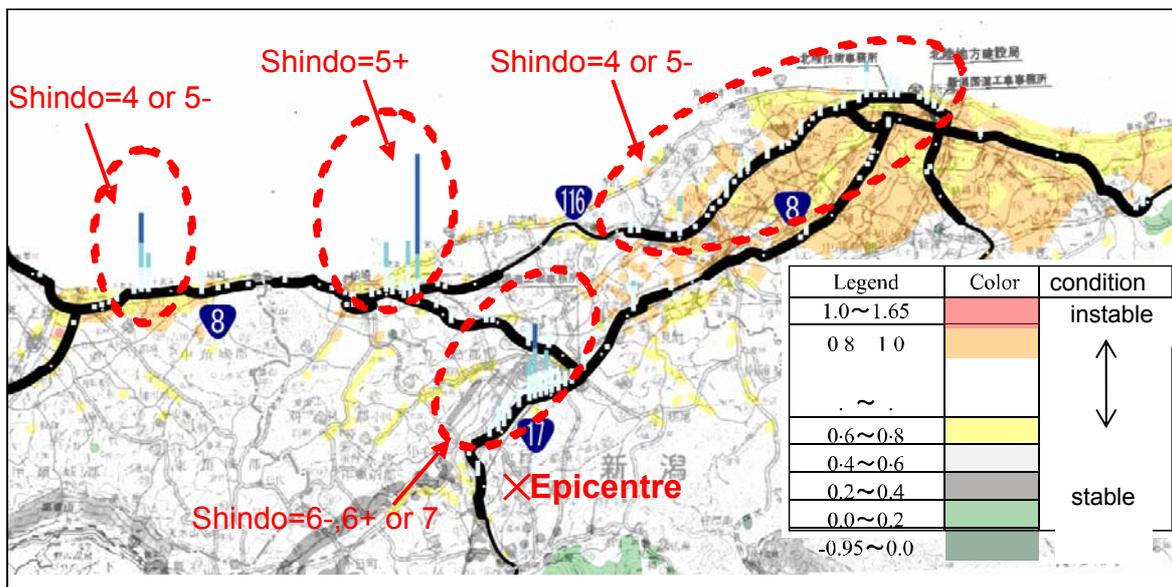


Figure 9 – Répartition des cavités superposée à la « Carte nationale des tremblements de terre »

3.3. Emplacement typique observé pour les cavités

L'emplacement typique où l'on a observé l'apparition de cavités était un emplacement adjacent à une structure souterraine dans le remblai. Environ 60% de toutes les cavités étaient situées proches de structures souterraines traversant sous la route. Des exemples de telles structures souterraines sont les conduites d'eau de pluie, les passages souterrains, les butées de ponts.

Les éléments suivants sont considérés comme étant les causes principales d'apparition de cavités.

- Comme en général les structures souterraines dans les sols meubles reposent sur des piliers, elles ne s'enfoncent pas même en cas de liquéfaction autour d'elles lors d'un tremblement de terre. En revanche, le matériau de remblai qui les entoure, lui, s'enfonce. D'autre part, la couche de béton d'asphalte ne se tasse pas comme le sol à cause de sa rigidité relativement importante. C'est pourquoi il est probable que des cavités se forment autour des structures souterraines. Il y a aussi le cas où un vide s'est déjà formé avant le tremblement de terre suite aux effets de tassement à long terme et ce vide est rempli de sable autour de la structure pendant le tremblement de terre. (Figure 10)

- On a remarqué que les joints reliant des éléments de conduites d'eau de pluie avaient été ouverts par le tremblement de terre et que le remblai était passé par les ouvertures. Ce phénomène a pu causer des cavités autour de ces conduites. (Figure 10)

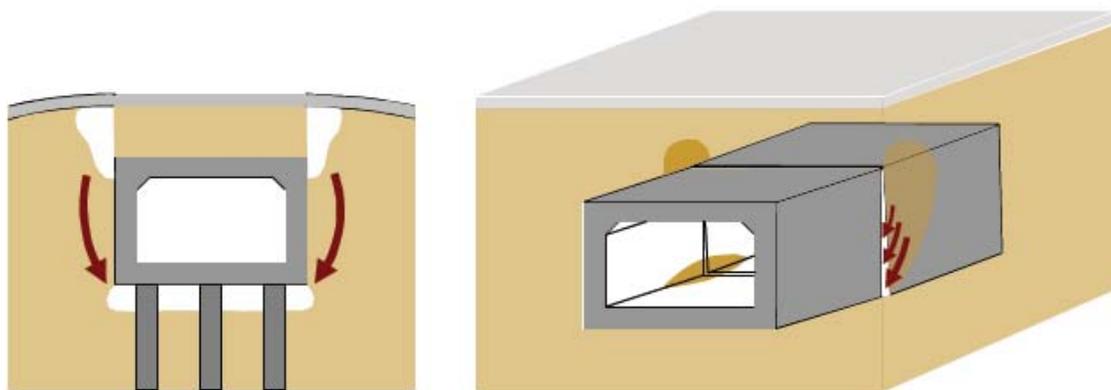


Figure 10 – Diagramme, Cavité adjacente à une structure souterraine

3.4. Relevé d'urgence vs. Relevé de surveillance

On a détecté huit cavités lors du relevé de surveillance de 48 km. La densité de cavités par tranche de 10 km est de 1,67. On ne peut pas comparer cette valeur directement avec les résultats du relevé d'urgence. En effet, le relevé de surveillance n'a concerné qu'une seule voie pour évaluer la tendance, alors le relevé d'urgence a concerné en moyenne 2,56 voies. Pour comparer correctement les deux relevés il faut ajuster la valeur du relevé de surveillance. La valeur ajustée de la densité de cavités devient 4,3 c'est à dire 1,67 fois 2,56. C'est une valeur comparable à celle des relevés périodiques..

On peut conclure que la majorité des cavités sont formées lors du tremblement de terre principal. C'est pourquoi le relevé d'urgence du sous-sol doit être effectué aussi tôt que possible après le tremblement de terre principal. Cependant la densité de cavités observée lors du relevé de surveillance n'est pas assez faible pour être négligée. Le relevé périodique est donc important lui aussi.

4. CONCLUSION

Cette étude a probablement été la première où on a récolté des données GPR du sous-sol à très grande échelle juste après un fort tremblement de terre. Cette étude basée sur des données réelles rarement disponibles a permis d'acquérir les connaissances suivantes qui sont utiles pour la gestion des risques d'affaissement qui peuvent représenter l'un des désastres secondaires faisant suite aux forts tremblements de terre.

Pour minimiser les risques d'affaissement, le relevé des cavités du sous-sol doit être effectué aussi tôt que possible après un tremblement de terre.

Pour ce qui concerne le relevé d'urgence effectué rapidement après le tremblement de terre, on a observé une moyenne de 12,9 cavités par tranche de 10 km de route. D'autre part, lors du relevé de surveillance effectué environ un an après le tremblement de terre, ce nombre était de 4, 3. Cela démontre que la majorité des cavités se forment lors de la première secousse.

La zone où l'intensité sismique est supérieure ou égale à 5 doit faire l'objet d'un relevé.

La densité de cavités augmente rapidement dans la zone où une intensité sismique supérieure ou égale à 5 a été enregistrée.

Les emplacements proches des structures souterraines doivent faire l'objet d'une attention particulière.

Des cavités typiques se sont formées proches de telles structures souterraines comme les conduites d'eau de pluie, les passages souterrains et les butées de pont où les cavités se forment facilement à cause du tremblement.

Même lorsque l'intensité sismique est inférieure à 5, le relevé doit être effectué si l'état du sol n'est pas très bon comme dans le cas du sable. Une carte des dangers indiquant les niveaux de risques d'affaissement peut servir d'outil de gestion des risques. Elle peut servir non seulement lors des patrouilles journalières sur les routes mais aussi pour établir un plan de remise en état plus efficace.

REFERENCES

1. H. Tomita, H. Tada, T. Nanbu, K. Chou, T. Nakamura and T. McGregor. (1995). Nature and Detection of Void-Induced Pavement Failures. In Transportation Research Record 1505, TRB, National Research Council, Washington, D.C. 1995.
2. N. Nakamura, H. Tomita (1995), Japan – Question IV PIARC, XIX WORLD ROAD CONGRESS, Montreal, 3-9 SEPTEMBER 1995.