

地震被災道路での路面下空洞調査の活用

岡本 順平¹・徳永 珠未²・弘中 靖志³

¹正会員 ジオ・サーチ株式会社 (〒144-0051 東京都大田区西蒲田七丁目 37-10)
E-mail: j-okamoto@geosearch.co.jp

²正会員 ジオ・サーチ株式会社 (〒144-0051 東京都大田区西蒲田七丁目 37-10)
E-mail: t-tokunaga@geosearch.co.jp

³非会員 ジオ・サーチ株式会社 (〒144-0051 東京都大田区西蒲田七丁目 37-10)
E-mail: y-hironaka@geosearch.co.jp

規模の大きな地震後の道路では、目視確認できる表面化した被災箇所だけではなく、見えない箇所もかなりのダメージを受けており、陥没現象を引き起こす路面下空洞が多発する。そして、地震を誘因とする空洞は、相対的に広くて薄い状態となり、地震後の時間経過により、拡大・浅層化することがわかっている。本論文は、計測震度計で震度 7 を観測した、新潟県中越地震、東北地方太平洋沖地震、熊本地震、北海道胆振東部地震後に実施した路面下空洞調査の活用事例について、既往文献を基にとりまとめたものである。

Key Words: large-scale earthquake, subsurface cavities, non-destructive survey, monitoring survey

1. まえがき

突然発生する“陥没現象”は、社会に与える影響も大きく、2016 年博多駅前通り陥没など大規模掘削工事に伴う道路陥没が発生し、広く社会的に認知されるようになった。道路陥没は、大小様々で不規則に発生する現象であり、道路管理上、経年的に発生する空洞を検知し対策に資することで、陥没事故を未然に防止するための平常時の取組みとして、路面下空洞調査を実施している。

規模の大きな地震後の道路被害は、目視確認できる表面化した被災箇所だけではなく、路面下の見えない箇所もかなりのダメージを受けている。道路陥没を引き起こす路面下空洞が地震直後に多発するとともに、経年的にも発生していくことが確認されており、長期にわたる事後対応が必要となる。このため、路面下空洞へ進展する可能性のあるゆるみ領域も含めた速やかな初期対応を実施し、その後の効率的な維持管理に移行していくことが肝要となる。

本文は、計測震度計で震度 7 を観測した、新潟県中越地震・東北地方太平洋沖地震・熊本地震・北海道胆振東部地震後に実施した路面下空洞調査の結果について、既往文献の知見をとりまとめたものであり、非破壊技術を

活用した路面下の被災状況の把握が、安全・安心を確保するための効果的かつ効率的な耐震技術向上の一助となることを目的としている。

2. 路面下空洞と道路陥没現象について

(1) 道路陥没現象

路面下の空洞は、舗装の構成材料が崩落することで発生し¹⁾、最終的には、上部にある舗装体が破壊し陥没に至る。路面下空洞の発生原因については、土砂流出や転圧不足によるゆるみの発生などが挙げられているが、“原因不明”とされている箇所の割合が多い²⁾。例えば、埋設物が損傷していなくても、埋設物周辺に空洞が発生しているケースは多く見られる。

路面下に空洞が形成される背景には、空洞が形成されやすい地域特有の素因と、そのきっかけや成長を促す誘因があり、それらは階層性をもって組み合わせられている。例えば、埋設物の破損による土砂の流出は、埋設物が破損しやすい条件や細粒分が流出しやすい地盤環境などの素因があり、豪雨に伴う冠水のような誘因が作用して空洞の形成を進展させる。道路陥没現象につながる路面下

空洞を発生させる主な誘因としては、地震動等の「振動による作用」、越波等の「水による作用」、地下工事等の「掘削による作用」がある³⁾。発生時間軸としては、経年的にゆるみ部等から形成する空洞や、博多駅前通りの陥没のように一気に発生する空洞がある。

(2) 道路陥没を予防する平常時の取組み

道路陥没を未然に防止するための平常時の取組みとして、路面下空洞調査が行われてきた⁴⁾。空洞が発生しやすい場所では、いくら空洞を補修しても再発生してしまうケースもあり、対症的な対策のみではなく、抜本的な対策を講じなければならない状況もある。近年、自然災害の多発・激甚化やインフラの老朽化が社会問題化しており、路面下の空洞を発生・拡大させる要因となっているため、陥没を予防する技術の高度化が期待されている。

最近の道路陥没の防止に向けた、藤沢市⁵⁾や福岡市⁶⁾における陥没ポテンシャルマップ作成の取組みがある。地盤状況、地下水位状況、地中の埋設物や構造物などの種類と状況などをパラメータとして対象地域をグリッドに区分して陥没ポテンシャルを定義し、調査と補修優先順位を決定するものである。

(3) 道路陥没を防止する地震災害後の取組み

地震に伴う目に見える被害としては、地震外力や地盤変状による直接被害の斜面・盛土崩落、路面亀裂・段差等があり、目に見えない被害としては、長期にわたる余震の繰返しの影響、地中構造物等の被害に起因する長期にわたる変状等がある。

そして、道路への特徴的な被害としては、道路陥没・沈下があり、揺すりこみによる地盤・埋設物の変動、または液状化等により発生する。路面下空洞は、短期的には液状化箇所や構造物脇等に、中長期的にはゆるみ領域において沈降・堆積が繰返されることで形成される。

道路陥没・沈下に対する長期にわたる事後対応は、道路利用者や管理者にとって多大な負担となるため、目に見えない被害状況の把握に努め、被災後の道路の陥没対策を予防保全へとシフトさせていくことが肝要となる。

3. 地震災害ごとの道路陥没対策の取組み

本章では、計測震度計で震度7以上の大規模地震が発生した直後に筆者らが調査を実施した4つの地震について、既往文献での知見を整理し、各地域で発生した路面下の空洞発生状況および特徴をとりまとめる。

(1) 平成16年新潟県中越地震^{7) 8)}

a) 空洞調査概要

地震発生から4日後に空洞探査車による調査を開始し、路線延長318kmの調査を約1週間でを行い、空洞の可能性のある箇所(以降、異常箇所と称す)546箇所を抽出した。さらに、546箇所から舗装復旧工事で対応する箇所を除いた310箇所について、ボーリング削孔・孔壁撮影・内部状況を調査する詳細調査を実施し、空洞を確認した。

地震直後の調査で確認した空洞は、平常時の定期調査と比べ、空洞発生状況に特徴があった。空洞形状に関しては、空洞の厚みが薄く、広がり面積(縦×横)が大きいという傾向がみられ、1kmあたりの空洞の可能性のある異常箇所数は平常時に比べ約4倍に増加した。さらに、震度5以上を記録した場所では、異常箇所数が2~8倍程度増加する傾向が得られた(図-1、図-2)。また、空洞の発生箇所は約60%が構造物の脇であり、構造物の種類別では、地下横断構造物(BOX)に集中していた(図-3)。

b) その後の経過

吉川ら⁷⁾、Abe et al.⁸⁾は、中越地震での路面下空洞調査で得られた知見をとりまとめ、その後の調査計画の立案等に活用されている。



図-1 新潟県中越地震における震度分布図と異常箇所の分布

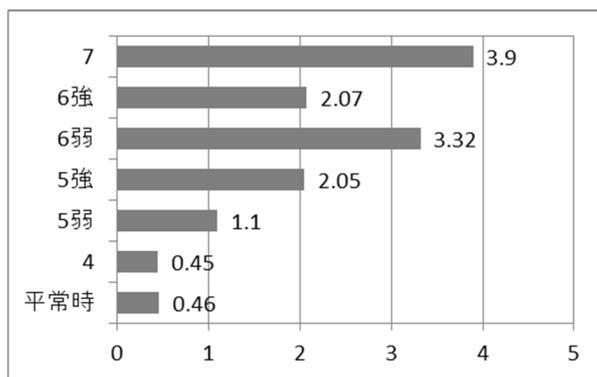


図-2 中越地震前後の道路延長1kmあたりの異常箇所数と震度階

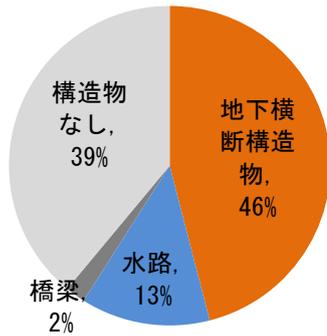


図-3 中越地震直後の調査で確認した空洞箇所の周辺埋設物⁹⁾



写真-1 液状化によって発生した空洞

(2) 平成23年東北地方太平洋沖地震（東京湾岸）^{9) 10)}

a) 空洞調査概要

地震発生直後から習志野市、浦安市、東京都江東区の液状化被害部を中心に道路延長 186km の調査を実施し、719箇所以上の空洞を確認した(写真-1)。

液状化地域の調査では、平常時に比べ空洞発生率が高く、その規模も「広がりが大きく薄く形成される」傾向にあった。これらの多くは、噴砂等の地盤の液状化現象の後に舗装と地盤の間に隙間が残った形で確認されており、液状化によって路盤を侵食し、波打つような形状が確認されている。また、空洞の周辺状況を見ると、下水管敷設部や人孔・排水枡周辺などの地下埋設物に起因したもののほか、舗装施工目地付近や舗装補修・管路等工事跡付近など舗装の切れ目に集中して発生していた。これらは、舗装内部で液状化した土砂が逃げ場を失い、人孔や舗装の隙間等の脆弱部に水圧が作用したことによるものと考えられている。

b) その後の経過

瀬良ら¹⁰⁾は、液状化地域における空洞発生状況や埋立年度との関係などの知見を報告している(図-4)。

特に、液状化空洞の発生について自治体へのヒアリング、空洞調査結果の詳細な分析および現地検証を行うとともに、土槽実験を用いた液状化再現による空洞発生および拡大メカニズムの検討を行い、「液状化空洞は広がり大きく薄い形状で、特に噴砂箇所周辺で空洞下部にゆるみを有し、埋設管の位置により地盤の乱れが異なる。いずれも空洞補修の際にはゆるみ部まで対処が必要。」という結論を得た(図-5)。

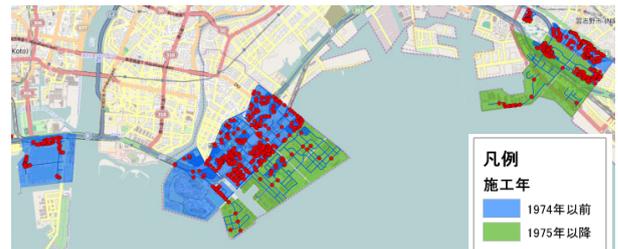


図-4 埋立時期と空洞位置

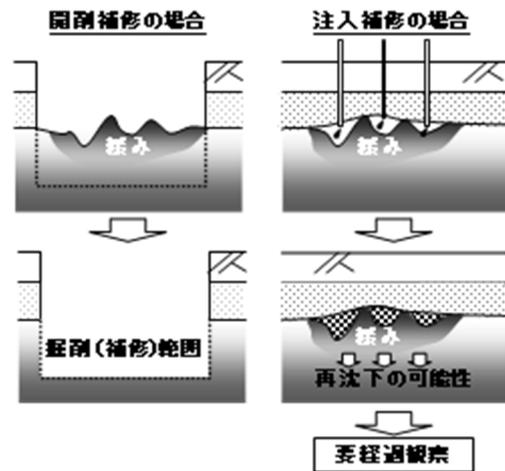


図-5 液状化空洞の補修範囲

(3) 平成28年熊本地震^{11) 12)}

a) 空洞調査概要

震災直後に熊本県宇城市で実施した路面下空洞調査(写真-2)の対象路線の抽出条件は、埋設されている下水道管路が自然流下方式で、開削工法により埋設された管



写真-2 熊本地震直後の路面下空洞調査状況

路であることとした。これは、地震発生に伴い抽出条件に合う下水道管の埋設部に沿って、路面に顕著な変状や沈下が発生したためである。選定した対象路線に対し、平成28年4月20日に適用性確認のための試験調査を行い、本計測を4月26日から実施した。これは、4月14日前震から12日後、16日本震から10日後に本計測を開始していることとなる。

調査では、対象延長187.13kmで616箇所の異常箇所を検出し、区間延長当たりの発生率は3.29箇所/km、平均面積は6.13m²となった。また、異常箇所の広がり短辺と発生深度から陥没危険度を、「A：陥没危険度大（浅くて広い）、B：陥没危険度中、C：陥没危険度小（深くて狭い）」の3区分として評価した結果(図-6)、陥没危険度の高いAが全体の60%を占める結果となった(図-7)。

連続空洞（発生間隔が同一計測ライン上で10m以内）を多数確認しており、全体の約75%を占めていた。

空洞調査結果に基づいて、舗装復旧範囲を決定し、早期の工事着手につなげた。復旧工事にあたっては、空洞周辺部のゆるみ領域を探深棒で確認し、確実な除去を行う(写真-3)とともに、地下水位が確認された箇所については、再液化化への対策として砕石による置換えで通水性を確保した。

b) その後の経過

地震直後に実施した路面下空洞調査の有効性を確認するためにモニタリング調査を実施したことで、応急復旧後の経過は良好であることがわかった。モニタリング調査で確認した空洞化を示す異常箇所は、いずれも当時の応急復旧対象箇所ではなく、埋設物近傍に位置しており、地形区分は低地(図-8)で、震災直後の調査による空洞発生密度が比較的少ないエリアに発生していた(図-9)。空洞化に至らない程度の潜在箇所が存在していた可能性や埋設物の損傷に伴い新規に空洞化が生じた可能性等が考えられる。応急復旧した区間においては、空洞周辺部のゆるみ箇所を含めた補修の重要性を確認することができた。震度が大きい地震の後、速やかに路面下空洞調査を実施することは、時期的にみても効果的である。

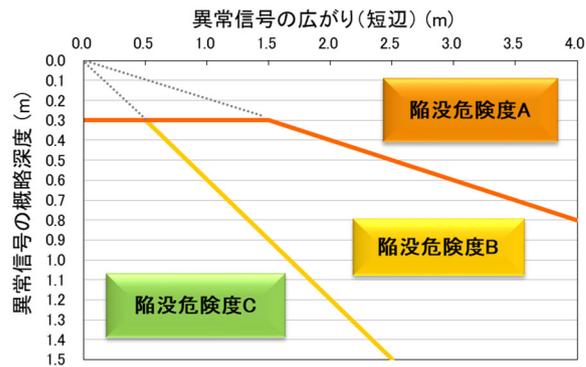


図-6 陥没危険度評価基準

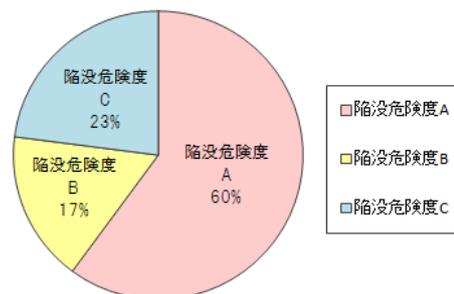


図-7 陥没危険度内訳



写真-3 空洞発生確認状況

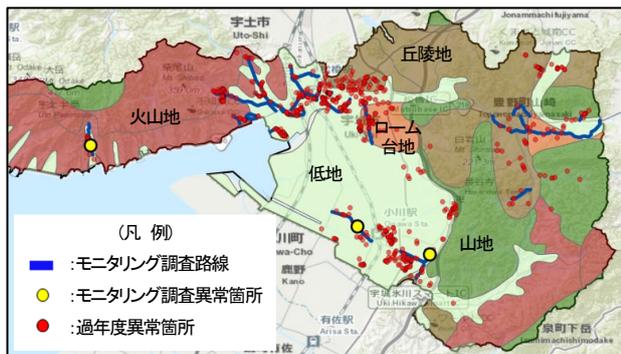


図-8 宇城市の地形区分と異常箇所位置図

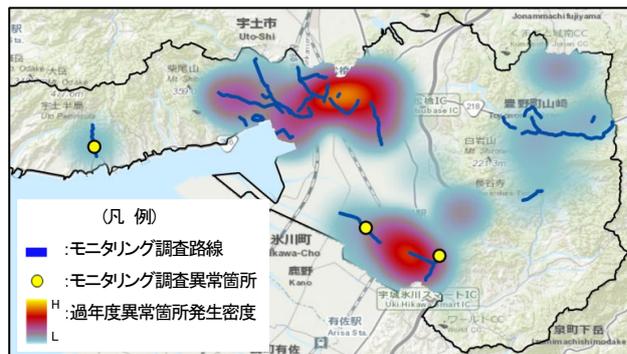


図-9 異常箇所位置図（過年度ヒートマップ）

(4) 平成30年北海道胆振東部地震¹³⁾ ¹⁴⁾

a) 空洞調査概要

空洞探査は地震発生から19日後の平成30年9月25日から28日にかけて、被災地域の直轄国道を中心に実施された。また、地震から1年後、新規空洞の発生および成長を確認する目的でモニタリング調査を実施した。

地震前の定期点検と地震後の両方で探査した区間(道路延長138km)を対象として空洞数を比較すると、地震直後は45箇所、地震1年後も11箇所増加し、地震直後だけでなく地震1年後も平常時に比べ多くの空洞が新たに発生していた(図-10)。また、前回の調査と比較すると、成長の挙動が見られた箇所が地震直後は5箇所、地震1年後は7箇所見られた。

空洞への対策優先度検討として、空洞の上端の深さと広がり(短辺長)を用いて3段階(ABC)で陥没危険度の評価(図-9)を行った結果、地震直後は陥没危険度：高(A)が7.7倍になり、地震1年後は、地震直後からさらにAが1.2倍に増加した(図-11)。震災時は空洞の陥没危険性が高くなること、その後も危険性の高い空洞が増加することがわかった。

b) その後の経過

本事例ではモニタリング調査により空洞の変化を検知して補修優先度の検討に活かすことができた。

被災地においては余震等による空洞の拡大や新たな発生の可能性があるため、空洞の成長有無や周辺埋設物などの状況より将来的な空洞の拡大可能性を評価し、実態に即した判断を行っていくことで確実に陥没事故を防止していくことが望まれる。

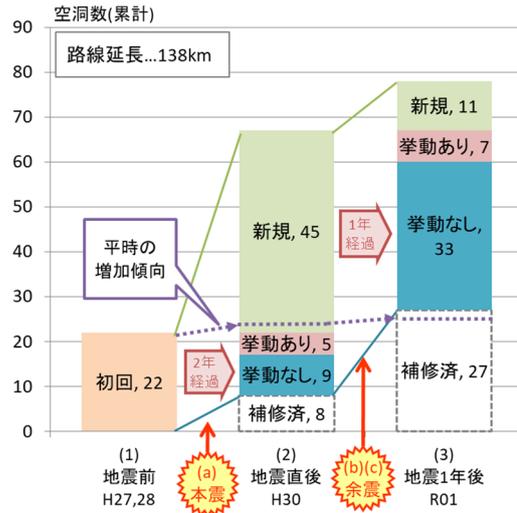


図-10 北海道胆振東部地震地域の空洞数推移

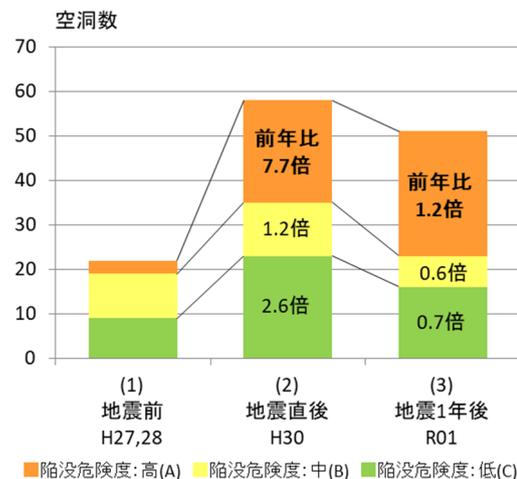


図-11 地震前後の陥没危険度推移

4. まとめ

路面下空洞は、経年的に発生・成長するものであるが、大規模地震後は、地震による揺れを誘因として、大量の路面下空洞が一気に発生することとなる。地震を誘因とする空洞は、相対的に広くて薄い状態となり、地震後の時間経過により、拡大・浅層化することがわかっている。なお、空洞下部の路床には、液状化に伴う“ふわふわ”な状態のゆるみを確認される場合もある。

これまで、地震後に数々の路面下空洞調査を実施した経験によると、震度7もしくは震度7相当の揺れが観測された地震では、調査対象も広範囲となり、総じて多くの空洞が確認されている。

計測震度が整備されて以降、初めて震度7を記録した中越地震では、国道を対象とした路面下空洞調査で、震度に応じて路面下空洞が多発する現象を発見した。例え

ば、盛土構造のバイパス道路では、横断構造物が地震動で突き動かされることで、構造物に沿った空洞が形成された。また、地方道では、震災の翌春以降、下水管を埋設した箇所でも多くの陥没が発生し、対応に苦慮した¹⁵⁾。

東日本大震災では、液状化被害が広範囲にわたり、より多くの被害が確認された。内陸型地震に比べて、海溝型地震は広範囲にわたって影響を受ける。ここでは、液状化被害地域での空洞調査結果の分析や現地検証とともに、土槽実験を用いた液状化再現による空洞発生および拡大メカニズムの検討結果から、「液状化空洞は広がり大きく薄い形状で、特に噴砂箇所周辺で空洞下部にゆるみを有し、埋設管の位置により地盤の乱れが異なる。いずれも空洞補修の際にはゆるみ部まで対処が必要。」という結論が得られた。

これまでの知見を基に、熊本地震で被災した熊本県宇城市では、路面下空洞調査の結果を災害復旧事業に係る申請のための資料として活用し、早期の工事着手につながるとともに、路面復旧に併せて路面下の空洞および空洞化にいたる潜在箇所を効率的で効果的に除去した。その後、復旧から3年経過した被災道路を対象としたモニタリング調査では、空洞補修した箇所での再発生は無く、日常的な道路管理でも新たな路面陥没や再沈下の現象はほとんど発生していないことから、空洞周辺部のゆるみ箇所を含めた補修の有効性を確認することができた。

北海道胆振東部地震では、継続的なモニタリング調査によって、路面下空洞の経時的な変化を確認することができた。変化の程度については、余震の回数や地域特性、また舗装構成等によって違いの出ることが想定されるものの、経時的な変化があるということは、路面下が大きく被災していることの証左であり、地震後の陥没予防を目的としたモニタリング調査の必要性を改めて確認することができた。

路面下空洞や陥没現象は、地盤や道路などの脆弱箇所を示すバロメータであり、その履歴については、耐震設計・診断にあたって、効果的な地盤調査や土質試験箇所の選定等に資する情報としての活用が期待される。本稿が、安全・安心を確保するための効果的かつ効率的な耐震技術向上の一助となり、今後発生する南海トラフ地震や首都直下地震の国難級災害発生時、そして日本中に存在する活断層に伴う内陸型地震発生時の被害抑制につながれば幸いである。

謝辞： 引用させて頂いた既往文献に携わるとともに地震被災道路の早期復旧に向けてご尽力された皆様に敬意を表します。本文作成にあたり、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 桑野玲子：地盤の陥没-陥没のメカニズム-, 地盤工学会誌, Vol. 62-1, pp. 43-44, 2014.
- 2) 内山博文, 大石雅登：路面下空洞の開削状況調査結果, 都土木技術支援・人材育成センター年報, 資料編, pp. 227-232, 2012
- 3) 岡本順平, 澤井崇, 陰山一：総点検における路面下脆弱性評価の着眼点に関する一考察, 土木学会第69回年次学術講演会論文, pp. 945-946, 2014.
- 4) 雑賀正嗣, 太田雅彦, ウィルヘルム P. J. ヴァンデルメア：道路・港湾施設の予防保全における地中レーダ技術の活用の変遷と成果, 最新の物理探査適用事例集-物理探査学会創立60周年記念事業実行委員会, pp. 153-161, 2008

- 5) 福室進：道路陥没ポテンシャルマップを活用した下水道リスクマネジメント, 第57回下水道研究発表会, pp. 700-702, 2020
- 6) 福岡市道路下水道局道路維持課：福岡市における路面下空洞対策の取り組み（これまでとこれから）, 東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター第2回路面下空洞対策連絡会, <https://geo.iis.u-tokyo.ac.jp/wp-content/uploads/2020/12/c4db6d1b094e6f1b250482c5115c02c0.pdf> (2021年10月29日時点)
- 7) 吉川進, 日下部俊夫：地震災害後の路面下空洞調査結果の舗装維持管理への活用, 第10回北陸道路舗装会議論文集, 2006.
- 8) T. ABE, M. SAIKA, T. KUSAKABE, S. KICHIKAWA&K. FUJII : MANAGEMENT OF THE ROAD CAVE-IN RISK AFTER A LARGE EARTHQUAKE USING SUBSURFACE CAVITY SURVEY TECHNOLOGY, The proceedings of the 23rd edition of the PIARC World Road Congresses, World Road Association, 2007.
- 9) 弘中靖志, 小池豊, 瀬良良子：大規模地震で発生した路面下空洞の発生状況に関する一考察, 地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-, pp. 294-302, 2014
- 10) 瀬良良子, 桑野玲子, 桑野二郎：東日本大震災液状化箇所における路面下空洞の特徴と発生メカニズム, 地盤工学ジャーナル, Vol. 9, No. 3, pp. 323-339, 2014.
- 11) 岡本順平, 松隈努, 濱崎哲次：地震災害後の早期道路復旧に向けた路面下空洞調査の活用, 土木学会第72回年次学術講演会論文, pp. 955-956, 2017.
- 12) 岡本順平, 久間慎之, 池田真一, 坂本善隆：路面下空洞調査の活用による地震被災道路の陥没予防効果, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会論文, CS10-32, 2020.
- 13) 佐藤雅規, 徳永珠未, 雑賀正嗣, 東海林隼人, 西村拓人：平成30年北海道胆振東部地震後の路面下空洞発生傾向と陥没予防手法の提案, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会論文, CS12-32, 2019.
- 14) 徳永珠未, 佐藤雅規, 東海林隼人, 奥田みのり：大規模地震後の陥没予防手法の検討-平成30年北海道胆振東部地震の事例より-, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会論文, CS10-31, 2020.
- 15) NHK ニュース：長岡市・小千谷市の地震後の道路陥没, 2005.

UTILIZATION OF SUBSURFACE CAVITY SURVEY TECHNOLOGY ON ROADS DAMAGED BY LARGE-SCALE EARTHQUAKES

Jumpei OKAMOTO, Tamami TOKUNAGA and Yasushi HIRONAKA

Subsurface cavities under road pavement occur widely after large-scale earthquakes. However those cavities are invisible. Earthquake cavities are relatively wide and thin, expanding and becoming shallower over time. This paper reviewed past issued papers on survey results and consideration on subsurface cavities under road pavement after four major earthquakes in Japan and then summarized on findings and characteristics of subsurface cavities after earthquake disaster.