

12. 小型装置による路面下空洞の充てん実験

Cavity Grouting Test with Small Equipment under Road Surface

技術支援課 住吉卓、橋原正周、大石雅登

1. 目的

路面下空洞を簡便に復旧することを想定し、屋外試験ヤードで小型装置による地上からの注入復旧を試み、作業性や充てん材の固化状況を確認したので報告する。

2. 概要

実験の概要を図-1のフロー、及び次に示す。

① 空気空洞作製

屋外試験ヤードに埋設された発泡スチロールブロックを、柑橘類から抽出される D-リモネンを用いて溶解させることにより、充てん対象の空気空洞を作製する。

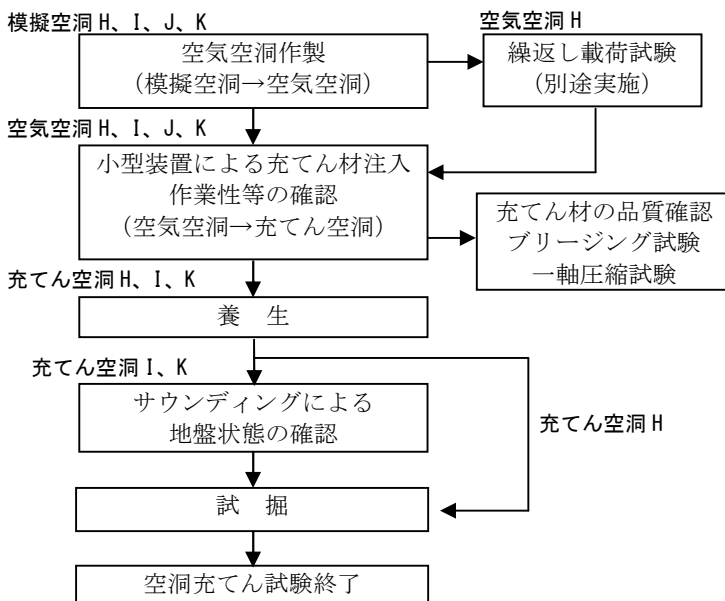


図-1 実験フロー

② 充てん材の注入

現場で簡便に施工できることを想定して用意した小型装置により、空気空洞に充てん材を注入し、作業性等を確認する。

③ 充てん材の品質確認

注入時に採取した充てん材の一軸圧縮試験、及びブリージング試験を行う。

④ 充てん効果の確認

養生期間を経た後、サウンディング、及び試掘により、充てん効果を確認する。

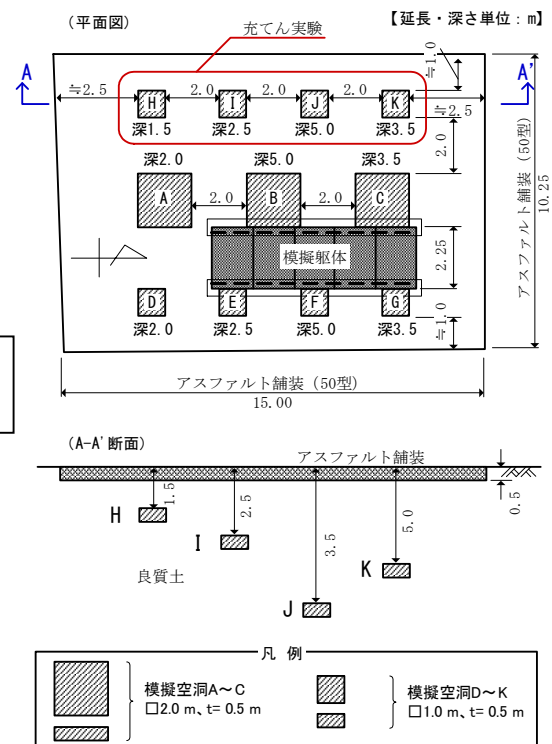


図-2 試験ヤードの概略

3. 方法

(1) 空気空洞作製

1) 試験ヤード

試験ヤードの概略を図-2に示す。図のアスファルト舗装面は高さ1.5mの盛土上にある。本ヤードは先行する別途実験¹⁾²⁾で用いたものであり、舗装下には、発泡スチロールブロックの「模擬空洞 A~K」などを埋設してあった。埋戻し・盛土に用いた「良質土」は、最大粒径9.5mm、礫分34%、砂分53%、シルト分6%、粘土分7%の細粒分まじり礫質砂である。

今回、模擬空洞のうち、H(深度1.5m)、I(深度2.5m)、J(深度5.0m)、K(深度3.5m)の4つを実験対象とした。これら模擬空洞の寸法はいずれも□1.0m×厚0.5mである。なお模擬空洞Hについては、先行して空気空洞化し、別途実施の繰返し載荷実験³⁾に供した後、充てん材注入を行っている(図-1)。

模擬空洞H~Kは、図-3に示すように2隅を地表から削孔し、リモネンや充てん材の注入孔、エア抜き孔等として用いた。

削孔にはサウンディング装置(NSWS、スクリーポイント最大外径25mm、図-4)を用い、口径66mmまたは86mmのボーリングも併用した。ここにNSWSは、載荷重装置を空油圧システムとしたスウェーデン式サウンディング試験機の改良機である。

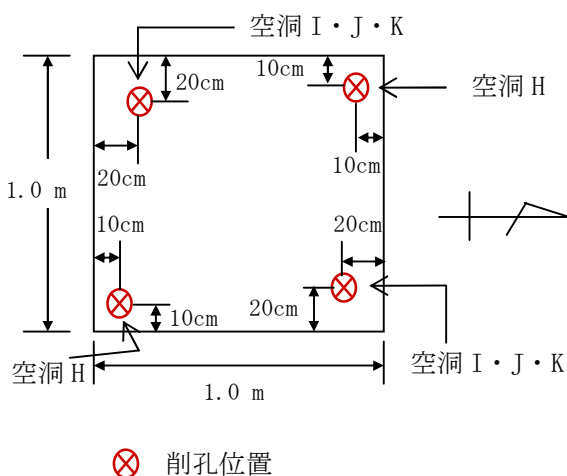


図-3 リモネン・充てん材の注入孔

2) 発泡スチロールブロックの溶解

NSWS用の中空ロッド(外径19mm・内径12mm)の先端にスプレーノズルを取り付けた噴射装置により、リモネンを注入して発泡スチロールブロックを溶解させ、空気空洞H~Kを作製した。

(2) 充てん材の注入

1) 材料

以下の条件に適合するものを検討した。

- ①現場でサウンディング(NSWS)を行った孔のまま注入孔として用いることを想定し、NSWS用の中空ロッドで注入できる。
- ②路上での充てんの際、配合管理が容易にできる。
- ③埋土と同等以上の強度を確保できる。
- ⑤流動性があり、ブリージングが少ない。
- ⑥入手し易い。

今回、水と混合するだけで作液できるセメント系の充てん材をA及びBの2種類選定した。

2) 各空洞の充てん材料と確認項目

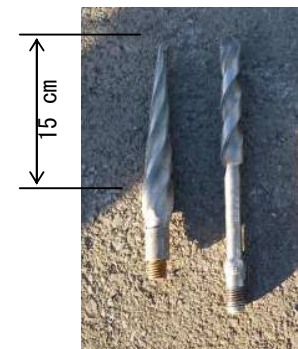
空気空洞H~Kと充てん材の組合せ、及び充てんの主な確認項目を表-1に示す。

3) 注入装置

注入装置の概略を図-5に示す。バケツ内の充てん材(粉体)及び水を、ハンドミキサーにより攪拌・作液し、ポンプを用いて中空ロッドを通じて、空気空洞内に注入する。



(a) 外観



(b) スクリーポイント(左)とドリルビット(右)

図-4 サウンディング(NSWS)装置の概略

(3) 充てん材の品質確認

1) 一軸圧縮試験

地盤工学会基準 (JGS 0511-2000) に基づき実施した。

2) ブリージング試験

充てん材 0.5 ℓ を直径約 50 mm、長さ約 50 cm の細長いポリエチレン袋の中に入れ、水分が蒸発しないように封をしたうえで日陰に吊るし、分離した上

澄み (ブリージング水) の厚さを定規で測定した。

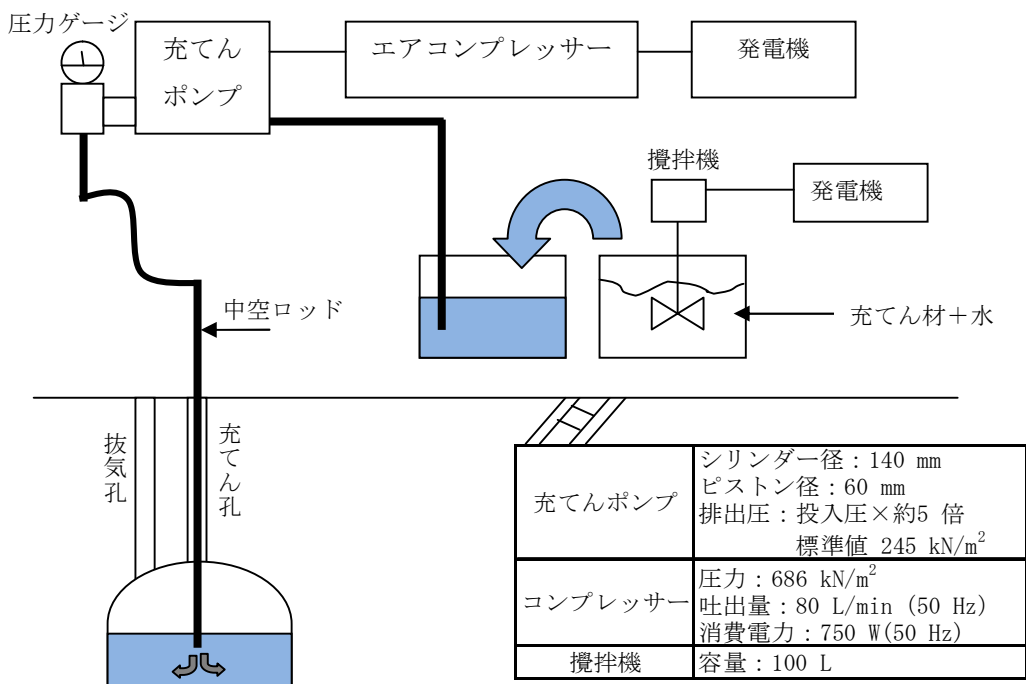
(4) 充てん効果の確認

養生後、充てん空洞 I・K では、空洞中央位置の直上から NSWS によるサウンディングを行い、得られた換算 N 値などによる、充てん状況や周辺地盤状況の把握を試みた。

また充てん空洞 H・I・K は丁寧に試掘して取り出し、充てん材の形状や固化状況を確認した。

表-1 各空洞の充てん材料と確認項目

空気空洞	充てん材	主な目的
H (深度1.5 m)	A	・削孔から充てん完了までの作業性を確認する。 ・充てん後の試掘により、別途実施した繰返し載荷実験を経た空洞の形状を確認する。
I (深度2.5 m)	A	・削孔から充てん完了までの作業性を確認する。 ・充てん後のサウンディングや試掘により、充てん効果を確認する (I・K)。
J (深度5.0 m)	B	
K (深度3.5 m)	B	



(a) 概要図



(c) 作液状況



(b) ポンプ本体



(d) 注入孔付近

図-5 注入装置の概略

4. 結果と考察

(1) 注入時の作業性等

注入孔・エア抜き孔の削孔（図-3）は、まず模擬空洞 H では NSWS のみにより削孔したが、舗装部で相当の時間を要した。そこで模擬空洞 I・K では、舗装をボーリング、路床を NSWS により削孔した。最も深い模擬空洞 J は、孔壁の安定に配慮し、舗装・路床ともにボーリングにより削孔した。

NSWS による路床の削孔では、何らかの要因により掘削困難な区間があり、ドリルビット交換や、削孔位置の変更を行うこともあった。

充てん材の配合は容易で、2～3 名の少人数でも十分作業可能であった。注入時の状況を表-2 に示す。注入速度は注入時間と注入量から算出した。空気空洞 1 箇所（0.5 m³）の注入に要した時間は 1 時間 45 分～約 2 時間程度であり、充てん材の別や充てん深度（経路長）にかかわらず、注入速度は概ね 4.7～4.8 l/min 程度であった。充てん材の流動性は大きく、中空ロッド通過時の抵抗は小さかったと考えられる。

注入孔の孔口付近まで充てん材が上昇してきた時点、あるいは注入孔から横溢した時点で注入完了とした。その直後から、充てん材液面の沈下が生じた。注入完了方法や沈下の計測時間は統一していないが、注入深度が深いほど沈下量が大きくなる傾向が認められる。

沈下の原因は本実験からは明らかでないが、①注入時に充てん材に混合された空気が抜けたことによる体積の減少、②地盤中への浸透、③ブリージン

グ、などが考えられる。

(2) 充てん材の品質確認結果

1) 一軸圧縮試験の結果

表-3 に示すとおり、充てん材 A・B いずれも、28 日強度はカタログ値を満たしている。なお、試験値は 3 試料の平均値である。

2) ブリージング試験の結果

試験結果を図-6 に示す。充てん材 A・B のブリージング量は、それぞれ 8.0%・6.0% に収束した。これは、充てん材 A のブリージング量の方がやや大きいという、メーカー聞き取り情報と合致する。最大値に達する時間は、いずれの充てん材も 8 時間以内であると推定される。なお、1 時間値はいずれも 1.2% であり、カタログ値の 5% 以内である。

(3) 充てん効果の確認結果

1) サウンディングの結果

充てん空洞 I・K で実施したサウンディング（NSWS）の結果を図-7 に示す。「当初の空洞範囲」と示した範囲は、溶解前に発泡スチロールブロックが埋設されていた範囲である。

充てん空洞 I では、図-7(a) で、「当初の空洞範囲」の上端付近及び直上の換算 N 値が急減する区間（深度-2.08 m～-2.58 m の 50 cm）が、「空洞または緩み域」と推定された。

充てん空洞 K では、図-7(b) で、「当初の空洞範囲」の上端付近及び直上区間（深度-3.45 m～-3.64 m の 19 cm）でロッドが自沈し、「空洞」と推定された。その直上の換算 N 値急減区間（深度-3.05 m～-3.45 m の 40 cm）は「空洞または緩み域」であ

表-2 注入時の状況

空気空洞	H (深度1.5 m)	I (深度2.5 m)	J (深度5.0 m)	K (深度3.5 m)
空気空洞の作製時期	9月30日～10月1日	1月29日～2月3日	2月3日～2月4日	1月27日～1月28日
充てん日	1月27日	2月3日	2月4日	1月28日
充てん材	A	A	B	B
注入時間	2時間4分	1時間37分	1時間45分	1時間45分
注入量	597 L	467 L	495 L	500 L
注入速度	4.81 L/min	4.81 L/min	4.71 L/min	4.76 L/min
注入完了方法	地表から-10～-13 cm下まで充てん	注入孔-4 cm、空気孔-8 cmまで充てん。3分後に注入孔あふれるまで、空気孔-7 cmまで再注入。	注入孔あふれるまで充てん。空気孔から、空気空洞作製時のリモネン噴出。	注入孔天端（地表）まで充てん。空気孔は-10 cmまで。
注入後の充てん材沈下（注入孔内）	3時間後、地表から-1.33 mまで沈下	30分後、地表から-1.22 mまで沈下	15分後、地表から-2.20 mまで沈下	10分後、地表から-1.55 mまで沈下

ると推定された。

充てん空洞 I・K いずれも、固化した充てん材と推定される部分以深は、通常のスクリーポイントでは貫入できず、ドリルビット (図-4) に交換しても貫入不能であった。

2) 試掘の結果

充てん空洞 H・I・K の試掘結果を図-8 に示す。

① 充てん空洞 H (図-8(a))

別途の繰返し載荷実験³⁾を経た空洞であったため、不規則な形状となっている。充てん材の底部には、崩落土砂が溜まっており、土砂内に充てん材が浸潤した形跡は認められなかった。

充てん材には亀裂が多く、スコップを当てるとポロポロと崩れる状態であった。この原因として、空気空洞作製から注入まで日数が経っていたため、周囲の土が乾燥状態にあり、他の2箇所よりも多くの水分が失われたことが考えられる。

注入箇所周辺の土砂には柑橘系の芳香があり、空気空洞作製時に浸透したリモネンが残存していたと考えられる。

② 充てん空洞 I (図-8(b))

概ね空気空洞の形状で固化していた。底面は、リモネン噴射時の崩落土砂があったと考えられる部分がドーム状の隙間となっていた。

充てん材の上面はほぼ平坦で、溶け残りの発泡スチロールの上面(「当初の空洞範囲」の上端)から7cm下がった深度にあった。この隙間の一因はブリージングと考えられる。ただし、厚さ50cmの充てん材Aに8%のブリージングが生じたとすると、隙

間は4cmである。空気空洞作製終了から注入完了まで、2時間半程度しか時間経過がなかったことから、注入完了後の発泡スチロールの溶解進行によって生じた分などもあると考えられる。

その他、地盤と充てん材が接触していた部分が殻状に固化していることなどが観察されたが、充てん材を中心線付近で割った断面(下段写真)の固化状況は一樣に見え、亀裂もほとんど認められなかった。

③ 充てん空洞 K (図-8(c))

概ね空気空洞の形状で固化していた。

充てん材の上面はややすり鉢状になっており平坦面の中央部付近が約1cm窪んでいる。窪みは、溶け残りの発泡スチロールの上面からは、低いところで10.5cm、高いところで4.5cm下がった深度にあった。厚さ50cmの充てん材Bに6%のブリージングが生じたとすると、隙間は3cmである。よって、充てん空洞Iと同様に、窪み・隙間の原因はブリージング及びその他であると考えられる。

その他、地盤と充てん材が接触していた部分が殻状に固化し、殻部の境界に亀裂が生じている箇所もあったが、充てん材内部には亀裂が認められず、かなり一樣と観察された。

3) 充てん効果の推定について

上記1)・2)より、充てん材や周辺地盤は次に示す状況であったと考えられる。

①注入後に生じた充てん材液面の沈下や、溶解せずに残存していた発泡スチロールの存在などにより、「当初の空洞範囲」の上端付近には、充てん材がない隙間が5~10cmあった。

表-3 一軸圧縮試験の結果

充てん材	A	B
1回目 (N/mm ²)	1.01 (10日後)	0.70 (8日後)
2回目 (N/mm ²)	3.23 (28日後)	3.63 (28日後)
4週強度 カタログ値 (N/mm ²)	2.0 以上	3.4 以上

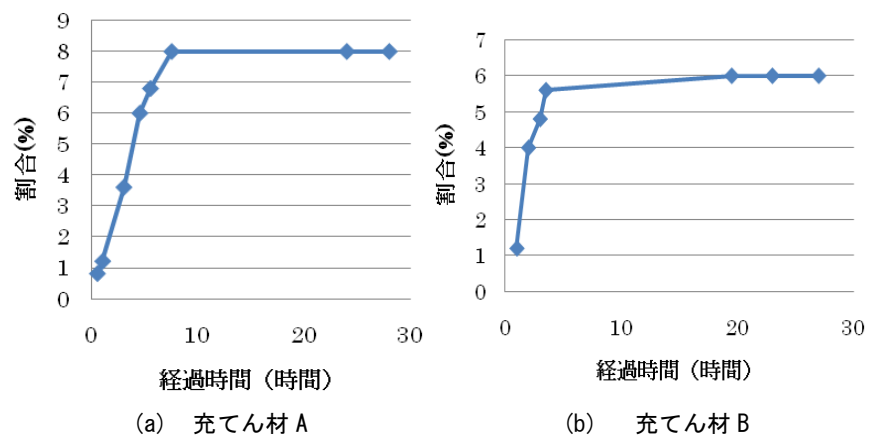


図-6 ブリージング試験の結果

- ②「当初の空洞範囲」直上の地盤の約 50 cm 区間では、一部崩落による隙間を伴いながら緩みを生じていた。その原因は明らかでないが、発泡スチロール溶解による応力開放や、溶解時に用いたリモネンの浸透などが考えられる。
- ③上記①・②の状況を深度の上位から列挙すると、
 a. 舗装→b. 通常的地盤(路床)→c. 緩んだ地盤(約 50 cm) →d. 場合により崩落による隙間→e. 「当初の空洞範囲」上部の隙間 (5~10 cm) →f. 固化した充てん材、となる。

NSWS によるサウンディングの結果(上記 1))では、上記 c. ~e. の状況が、「空洞または緩み域」や「空洞」として推定されたといえる。この結果は状況を厳密に再現するものではないが、スウェーデン式サウンディング試験や簡易動的コーン貫入試験などに比べ、相当精度が高いと考えられる。また NSWS では、先端から最大径位置までの延長 15 cm のスクリーポイントの貫入抵抗を計測する機構であるため、別途考察³⁾したように、空洞などの厚さがこれを超える場合は、より明確な推定結果が得られると考えられる。

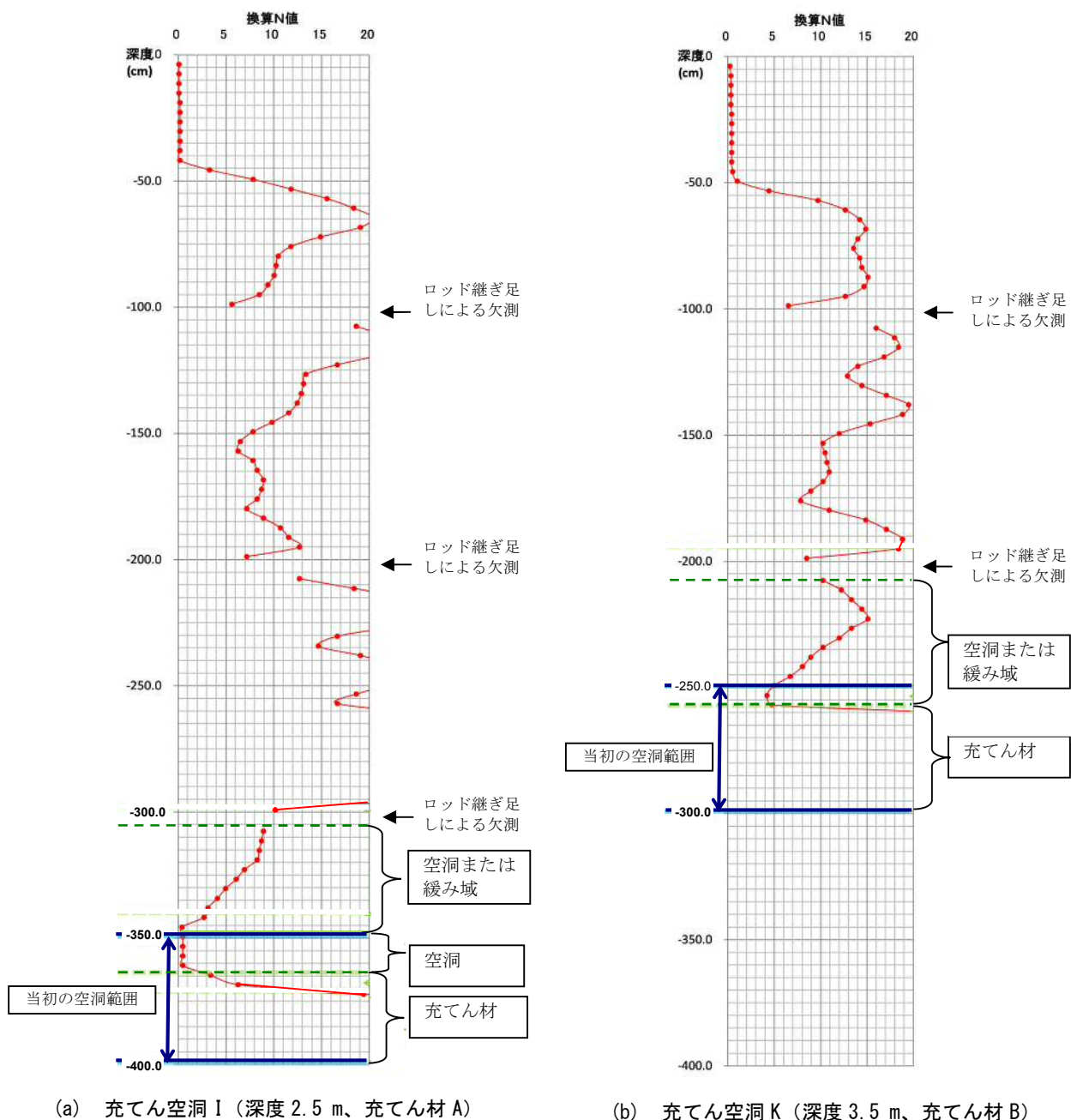
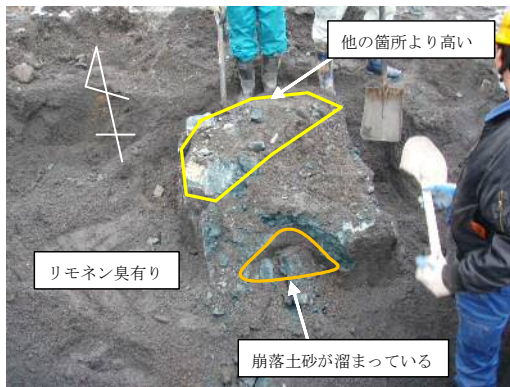
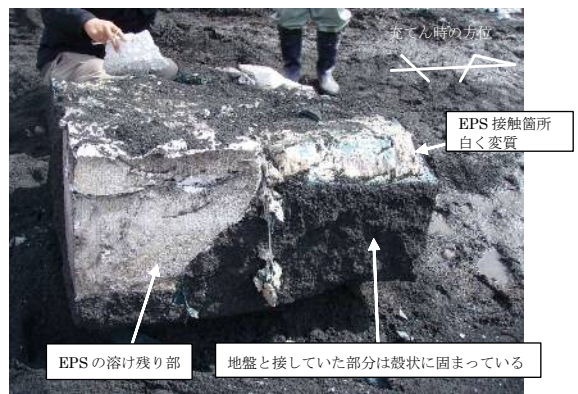
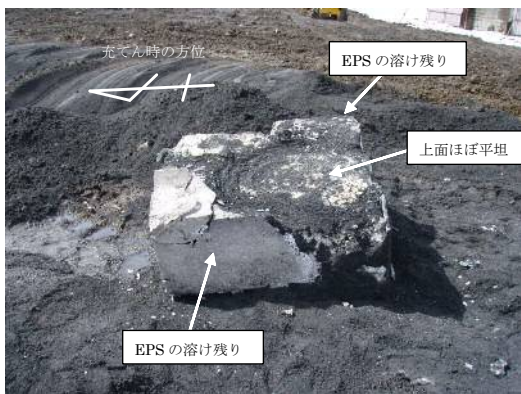


図-7 サウンディング (NSWS) の結果



(a) 充てん空洞 H (深度 1.5 m、充てん材 A) 3)再掘



(b) 充てん空洞 I (深度 2.5 m、充てん材 A)



(c) 充てん空洞 K (深度 3.5 m、充てん材 B)

図-8 試掘の結果

3. まとめ

路面下空洞が疑われる箇所ではNSWSによるサウンディングを実施し、そのボーリング孔や中空ロッドを活用して小型装置で空洞充填作業を行うことを想定し、充填実験を行った。その結果、次のことが判明した。

- ①舗装部の削孔は、NSWSでは相当の時間を要し、路盤の状態によっては貫入不能の場合があり、コアカッターあるいはボーリングマシンの使用が現実的である。また路床部でも貫入困難な区間があり得るので、本体の改良やボーリングマシン併用等により、多様な地盤に備えることが必要である。
- ②空気空洞1箇所(0.5 m³)の注入に要した時間は1時間45分～約2時間程度、注入速度は概ね4.7～4.8 l/min程度であった。現場作業を想定すると、注入ロッドの内径の拡大や、充填材配合の見直し等により、注入時間が短縮されることが望ましい。
- ③注入後のサウンディング及び試掘により、空洞の上端付近には充填材がない隙間が確認された(50 cmの空洞厚に対し5～10 cm程度)。原因は明らかでないが、注入後短期間の空気抜けによる体積減少、充填材のブリージングや地盤への浸

透、空洞内に残存していた発泡スチロールの影響などが挙げられる。当面は厚さの大きい空洞には適用しない、空洞の応急処置に限定して用いるなどの対応が考えられる。今後、充填材や施工方法の改善等により、隙間の発生を防止できることが必要である。

- ④固化した充填材の性状(脆さなど)は箇所によって異なっていたが、道路陥没防止に対しては有効と考えられる。しかし、地山より相当固いため再掘削性には向上の余地がある。また、硬軟のほか透水性等も地山程度となる材料の方が、より適切と考えられる。
- ⑤NSWSにより、サウンディングとしては精度良く空洞や地盤緩みの状況を推定できたと考えられる。しかし、5～10 cm程度の隙間(上記③)と、その直上の緩み地盤の境界を必ずしも特定できなかった。延長が短いタイプのスクリーポイント採用などにより、薄層の推定精度の向上が期待される。

最後に、本実験に当たり、資機材・労力のご提供やアドバイスをくださった関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 住吉卓、橋原正周(2009):路面下空洞(深層部)探査技術に関する屋外模型実験、平21.都土木技術支援・人材育成センター年報、159-178
- 2) 住吉卓、橋原正周、大石雅登(2011):路面下空洞(深層部)探査技術に関する屋外模型実験(その2)、平23.都土木技術支援・人材育成センター年報(掲載予定)
- 3) 住吉卓、橋原正周、大石雅登(2011):路面下空洞上での繰返し載荷実験、平23.都土木技術支援・人材育成センター年報(掲載予定)