

11. 路面下空洞上での繰返し載荷実験

Cyclic Loading Test on Road Surface above Cavity

技術支援課 住吉卓、橋原正周、大石雅登

1. 目的

空洞がある道路に交通荷重が作用して陥没が発生する状況を想定した実験を行った。

屋外試験ヤードに実験用の路面下空洞を作製し、地上から繰返し載荷を施し、各種観測により空洞の進展や周辺地盤の変化を確認した。

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、実験対象の空気空洞を作製する。

② 繰返し載荷

空洞上方の路面で、FWD (Falling Weight Deflectometer、重錘落下式たわみ測定装置) による繰返し載荷を行う。通常FWDは、舗装表面に重錘を落下させた際のたわみ形状を計測し、舗装の支持力等を判断するための装置である。本実験ではFWDを、空洞を進展させる荷重源として用い、下記③に示す観測の一環として、たわみ計測も実施する。

③ 観測

繰返し載荷の過程では、FWDたわみ計測、地表面変位計測、物理探査、ボアホールカメラ調査により、地上・地下の変化を観測する。載荷終了後にはサウンディングによる状況把握を試みる。また、別途実施の充てん試験¹⁾にて、空洞に充てん材を注入し、後日の試掘で固化した充てん材の形状から空洞の

形状を確認する。

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²⁾³⁾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、寸法口1.0m×厚0.5m) を実験対象とした。

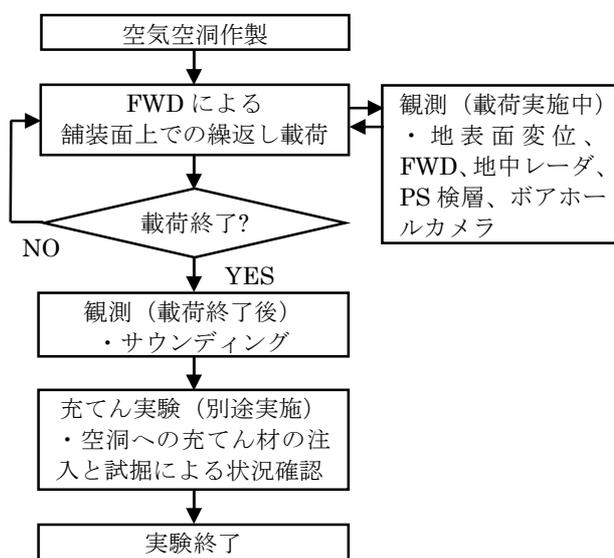


図-1 実験フロー

模擬空洞 H 周辺には、**図-3** に示すように、観測等に用いる調査孔を設置した。調査孔 A-1・A-2 は、リモネン注入やボアホールカメラ調査等に用いるものであり、サウンディング装置 (NSWS、スクリーポイント最大外径 25 mm) により削孔した。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 (**図-4**) である。調査孔 B-1~B-4 は PS 検層用であり、ボーリングマシンにより削孔した径 86 mm、深さ 4.0 m の孔に、保護管 (塩ビ管 VP65) を建て込んだ。

2) 発泡スチロールブロックの溶解

サウンディング装置 (NSWS) 用の中空ロッドの先端にスプレーノズルを取り付けた噴射装置により、調査孔 A-1・A-2 (**図-3**) から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 (以下、単に空洞と呼ぶことがある) を作製した。

(2) 繰返し載荷

1) 載荷装置

荷重源とした FWD の概略を **図-5** に示す。

2) 載荷重

載荷重は、空洞進展の促進を意図した 147 kN (15 tf) を主とし、計測値の判断のため、道路調査で一般的な 98 kN (10 tf) も補助的に用いた。

3) 載荷位置

載荷位置は **図-6** に示すように、空洞の中心点直

上 (CL)、CL から 0.3 m 北側 (CL-0.3 m)、及び CL から 0.3 m 南側 (CL+0.3 m) の 3 箇所であり、たわみセンサーは載荷板から北方向に展開した。これら 3 箇所を、10 回や 100 回など、実験の進行過程で適宜定めた載荷回数毎に巡回した。

4) 載荷回数

載荷位置と載荷回数の一覧を表-1 に示す。147 kN 及び 98 kN の載荷数は、4 乗則⁴⁾を用いて設計 49 kN 載荷輪数に換算すると 290,889 回であり、交通量区分 N4 (旧 A 交通、150,000 回/10 年) を超えている。なお、これ以外に CL から 0.6 m 及び 1.2 m 位置でのたわみ計測も適宜実施したが、これらが空洞進展に与えた影響は小さいとみなし、表-1 の載荷回数には数えていない。

(3) 観測

載荷及び観測の時期と内容を表-2 に一覧する。

10 月 20 日からの繰返し載荷を実施する以前に、空気空洞の作製前 (9 月 25 日) や作製途中 (10 月 1 日) に FWD、そして 10 月 20 日には T-25 相当のダンプトラックによる予備載荷を実施している。また FWD 予備載荷の過程で空洞内に発泡スチロールの溶け残りが多いたことが判明したため、10 月 13 日にリモネンの再注入を行い、空気空洞作製を終了している。これら予備載荷やリモネン再注入による空洞や周辺地盤への影響は、本文では考慮しない。

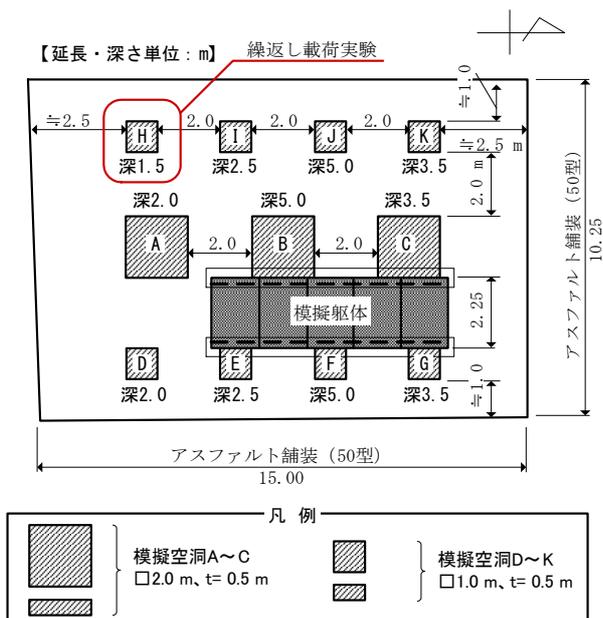


図-2 試験ヤードの概略

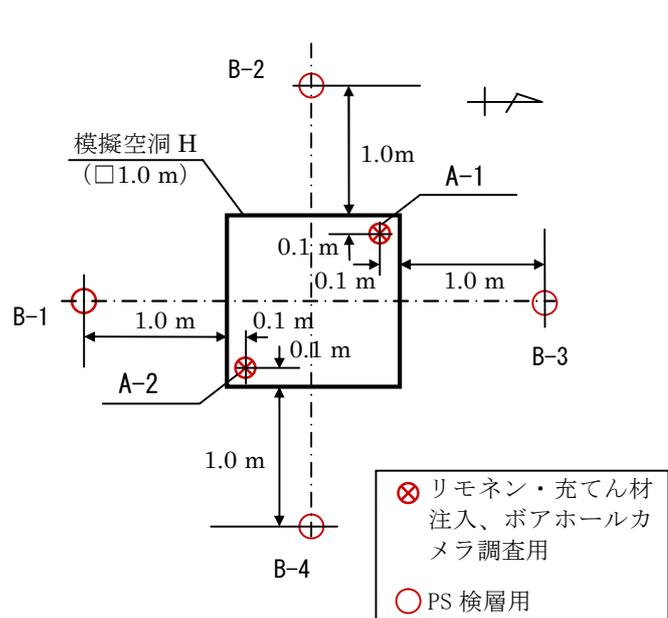


図-3 調査孔位置

1) FWD たわみ計測

上記(2)の繰返し載荷を行う際、同時にたわみ計測も実施した。

2) 地表面変位計測

小型プロファイルメータ (DAM、縦横断形状測定装置) により、載荷に伴う地表面の変位を測定した。また、プロファイルメータの誤差を補正するため、各測線の両端の標高をオートレベルにより測量した。地表面変位の測定位置を図-7に示す。

3) 地中レーダ探査

図-8に示すように、空洞の周囲に格子状に測線を設定した。南北方向の測線は0.25m間隔、東西方

向の測線は0.5m間隔とした。

測線上を人力によりレーダ装置を移動させ、探査を実施した(図-8)。レーダ装置は、深度2.5mまで探査可能な中心周波数200MHzのものを用いた。繰返し載荷中に適宜定めた時期に、まず空洞中心を通る測線H-7とH-19を測定(十字測定:R+)した。前回データから変化が認められない場合は、この2測線で測定を終了した。変化があった場合は、残りの22測線を測定(メッシュ測定:Rm)した。

十字測定の結果は、通常の測線縦断面の解析を行った。またメッシュ測定の結果には擬似3D解析を施し、深度別の平面スライスを作成した。

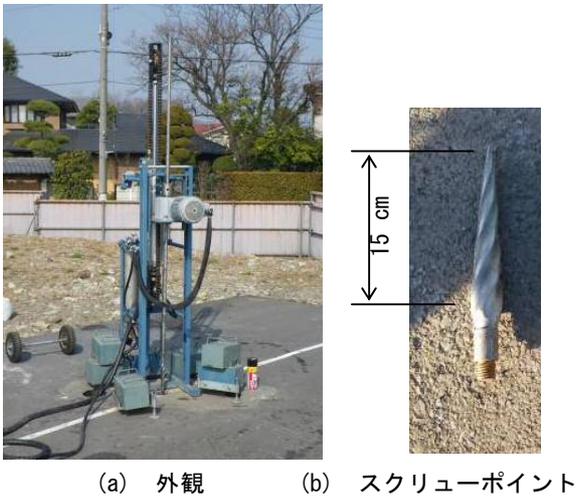


図-4 サウンディング (NSWS) 装置の概略

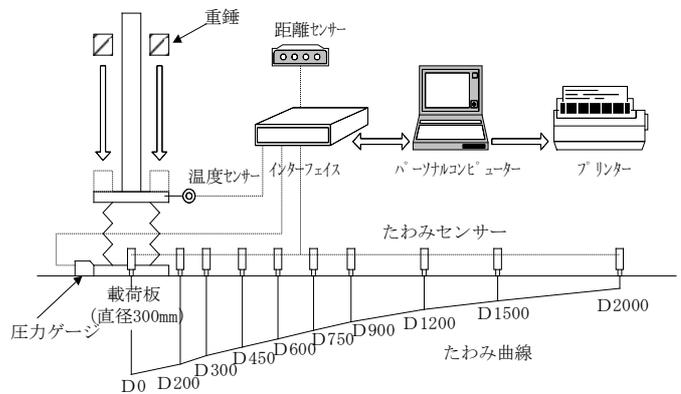
| 測定日 | 位置 | 回数 | 合計 |
|--------|----------|-------|-------|
| 10月20日 | CL | 63 | 63 |
| 10月21日 | CL-0.3 m | 48 | 138 |
| | CL+0.3 m | 45 | |
| 10月22日 | CL-0.3 m | 101 | 300 |
| | CL+0.3 m | 99 | |
| 10月24日 | CL-0.3 m | 243 | 733 |
| | CL | 237 | |
| | CL+0.3 m | 253 | |
| 11月2日 | CL-0.3 m | 397 | 1,156 |
| | CL | 373 | |
| | CL+0.3 m | 386 | |
| 11月3日 | CL-0.3 m | 380 | 1,171 |
| | CL | 391 | |
| | CL+0.3 m | 400 | |
| 累積値 | CL-0.3 m | 1,068 | 3,561 |
| | CL | 1,109 | |
| | CL+0.3 m | 1,084 | |

(*) 98 kN載荷については、上記の期間中、合計152回実施した。

表-1 147 kN 載荷の位置と載荷回数一覧



(a) 外観



(b) 概要図

図-5 FWDの概略

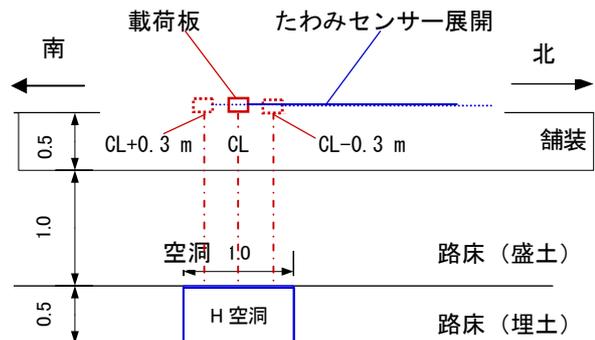


図-6 FWD 載荷位置とたわみセンサーの配置断面

4) PS 検層

図-3 に示した B-1~B-4 の 4 箇所を観測孔において、次に示す時期に計測を実施した。

- ① 空気空洞作製前 (9 月 28 日)
- ② 空気空洞作製過程 (10 月 1 日)
- ③ 空気空洞初期 (10 月 20 日)
- ④ 最終測定 (11 月 3 日)

測定方法の概要を図-9 に示す。各受振孔における発震は、空洞を挟んで対向する観測孔の、孔口付近の地表で行った。受振器は間隔 1m の 3 連ボアホールピックを用い、最初の測定で深度-1.0m、-2.0m、-3.0m の 3 深度 (図-9 の●印)、次に深度を 0.5m 下げて-1.5m、-2.5m、-3.5m (図-9 の○印) の合計 6 深度を測定した。

5) ボアホールカメラ調査

繰返し载荷によって生じた空洞内部の変状をボアホールカメラ装置により確認した。装置の概略を図-10 に示す。本装置は、平成 20 年度東京都職員提案制度で優秀賞を受賞した「CCD 手鏡」⁵⁾を参考に、今回の実験用に製作したものである。小型の CCD カメラモジュール及び光源となる白色 LED を取り付けた基板を調査孔から挿入し、空洞内部の状況を地上のディスプレイで確認したり、ビデオカメラで撮影したりする装置である。塩ビ管ロッドの挿入深度・向きや、つまみによる仰俯角の調整が可能である。空洞内部の確認手順は、次の①~⑦に示すとおりである (図-11 参照)。

表-2 载荷及び観測の時期と内容一覧

| 月 | 日 | 実施内容 | 当日初期値 | 1サイクル | 2サイクル | 3サイクル | 4サイクル | 5サイクル |
|-----|-----|-----------------------------|----------------|----------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| 9月 | 25日 | 予備载荷 (FWD) 観測 | 予備FWD、DAM | - | - | - | - | - |
| | 28日 | 観測孔削孔 予備载荷 (FWD) | Rm、PS | - | - | - | - | - |
| | 30日 | 空気空洞作製1 | - | - | - | - | - | - |
| 10月 | 1日 | 空気空洞作製2 (解け残り多い) 予備载荷 (FWD) | 予備FWD[6] Rm、PS | 予備FWD[28] R+ | - | - | - | - |
| | 13日 | 空気空洞作製3 (リモネン再注入) | C | - | - | - | - | - |
| | 20日 | 繰返し载荷 予備载荷 (DP) | Rm | FWD[30] DP[10] Rm、PS | FWD[40] DP[30] Rm | FWD[60] DP[段差5] R+ | FWD[63] R+ | - |
| | 21日 | 繰返し载荷 | C、R+ | FWD[66] Rm、C | FWD[81] R+ | FWD[111] R+、C | FWD[141] R+、C | FWD[201] R+ DAM |
| | 22日 | 繰返し载荷 | Rm | FWD[262] R+ | FWD[352] R+ | FWD[501] R+、C DAM | - | - |
| 11月 | 24日 | 繰返し载荷 | R+ | FWD[510] R+ | FWD[634] Rm、C | FWD[924] R+、C | FWD[1, 224] Rm、C DAM | - |
| | 2日 | 繰返し载荷 | Rm、C | FWD[1, 515] R+、C | FWD[1, 791] R+ | FWD[2, 090] R+ | FWD[2, 390] R+、C DAM | - |
| 1月 | 3日 | 繰返し载荷 | Rm | FWD[2, 661] R+ | FWD[2, 961] R+、C | FWD[3, 261] R+、C | FWD[3, 561] Rm、C、PS DAM | - |
| | 26日 | サウンディング (NSWS) | - | - | - | - | - | - |
| 3月 | 27日 | 充てん材注入 (別途実験) | - | - | - | - | - | - |
| | 10日 | 試掘 (別途実験) 空気空洞の形状推定 | - | - | - | - | - | - |

载荷及び観測

FWD[N] : FWD载荷 [147 kN累積载荷回数] (予備载荷含まず)

予備载荷

予備FWD[n] : FWD载荷 [147 kN累積载荷回数]

DP[n] : ダンプ走行 (T-25相当、2 km/h) [累積往復回数]

観測

DAM : 路面形状測定

R+ : 地中レーダ探査 (十字測定)

Rm : 地中レーダ探査 (メッシュ測定)

PS : PS検層

C : CCDカメラ撮影

- ①北西孔 1.5 m の深度に CCD カメラを固定し、南東孔に挿入した電球を上下させ、カメラで視認できる最上点及び最下点の深度 (Du[SE]-L 及び Dd[SE]-L) を計測する (図-11(a))。
- ②南東孔の電球を 1.5 m の深度に固定し、北西孔の CCD カメラを上下させ、カメラで視認できる最上点及び最下点の深度 (Du[NW]-C 及び Dd[NW]-C) を計測する (図-11(b))。
- ③上記①の電球と CCD カメラを入れ替え、Du[NW]-L 及び Dd[NW]-L を計測する (図-11(a))。
- ④上記②の電球と CCD カメラを入れ替え、Du[SE]-C 及び Dd[SE]-C を計測する (図-11(b))。
- ⑤片方の孔に CCD カメラ、もう一方に電球を挿入し、CCD カメラと電球を同じ深度で上下させてカメラで視認できる最上点及び最下点の深度 (Du 及び Dd) を計測する (図-11(c))。
- ⑥北西孔および南東孔に電球を挿入し、それぞれ空洞の底面または崩落土砂の上面に接触した深度 (D[NW]、D[SE]) を計測する (図-11(d))。
- ⑦片方の孔に CCD カメラを深度 1.6m まで挿入し、右回りに回転させて空洞内部の状況を撮影した。カメラに搭載されている LED 照明が光量不足の場合には、もう一方の孔に電球を挿入し天井付近または崩落土砂の上面に固定し、補助照明とした (図-11(e))。

6) サウンディング

繰返し載荷の終了後、NSWS によるサウンディングを実施した。実施位置は図-12 に示す 6 箇所である。H-1~H-5 の 5 点の配置は、FWD の計測点 (D0・D200・D450・D750・D2000) に合わせており、H-5 (D2000 位置) 及び近傍の H-5' は、繰返し載荷の影響が小さい位置と想定して設けている。

計測深度は、原則として地表面から空洞の下端より 0.5m 下、すなわち深度 2.5 m までとしたが、貫入が困難な場合には貫入できる深度までとした。

7) 試掘

別途実施の充てん実験により、空洞に注入され、固化した充てん材を試掘し、空洞の形状を推定する。

4. 結果と考察

繰返し載荷実施中における観測のうち、FWD たわみ計測・地中レーダ探査・ボアホールカメラ調査の主な観測経過及び代表図を、それぞれ表-3 及び図-13 に示す。図-13 では、地中レーダ探査の結果、すなわち十字測定による測線縦断面図(電磁波の反射パターン)、及びメッシュ測定 of 擬似 3D 解析による深度スライス図、そしてボアホールカメラ調査による空洞内の写真を示している。以下、これら図表を適宜参照されたい。

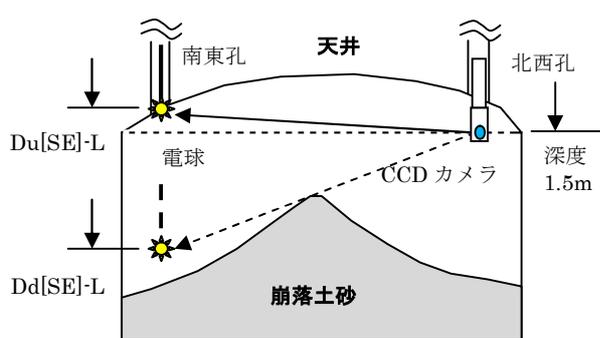
載荷位置 CL における、たわみ計測結果を図-14 に示す。ここに載荷回数は、荷重 147 kN、載荷位置 3 箇所 (CL・CL+0.3 m・CL-0.3 m) の合計数であり、グラフプロットは載荷位置 CL の結果のみを抜粋表示している。

1) FWD たわみの計測結果

空洞中心のたわみ量 (D0) は、載荷回数 30 回程度まで急激に増大し、その後も 200 回程度まで増大は顕著であるが、徐々に緩やかになっている。60 回、及び 66 回にはステップ状に増大している。以降 1,000~1,200 回程度まで、途中 322 回に単発的なピーク (1.6 mm 弱) はあるが、平均的には緩やかに約 1.45 mm まで増大している。以降たわみ量は減少傾向となり、1,400 回程度では平均的に約 1.35 mm となっている。その後は横ばいに近く、3,400~3,500 回程度で約 1.4 mm に至っている。

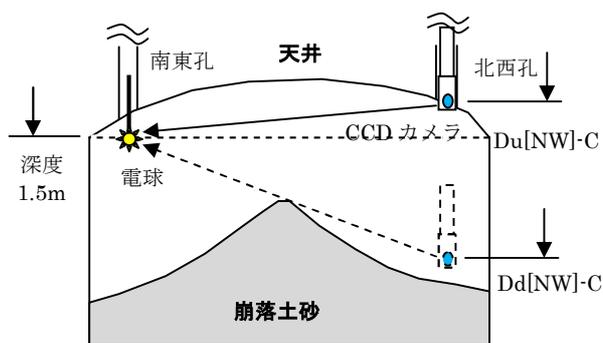
また、1,300~2,300 回程度ではたわみ量のバラツキが大きく、平均的な値よりも大きな値が散在する。例えば 1,600~1,700 回程度のたわみ量のプロットは約 1.35~1.4 mm の間に集中しているが、一部のプロットは、その上方約 1.4~1.5 mm の間に分布していることが見て取れる。

以上より、載荷回数 1,200~1,300 回程度に、空洞直上の緩んだ層の上で、盛土材の砂が土粒子の噛み合わせによるアーチ効果を発揮してよく締まり、以降、舗装や盛土の強度を示すたわみ量の変化が小さくなったことが想定される。



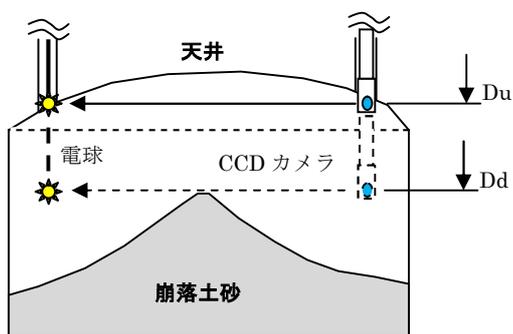
(*) 電球と CCD カメラを入れ替えて、北西孔での電球の深度 $Du[NW]-L$ 及び $Dd[NW]-L$ も計測する。

(a) カメラ固定、電球移動

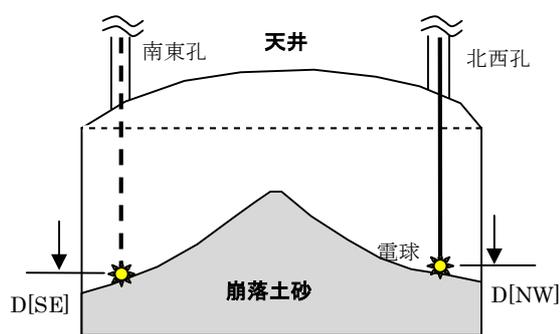


(*) 電球と CCD カメラを入れ替え、南東孔での電球の深度 $Du[SE]-C$ 及び $Dd[SE]-C$ も計測する。

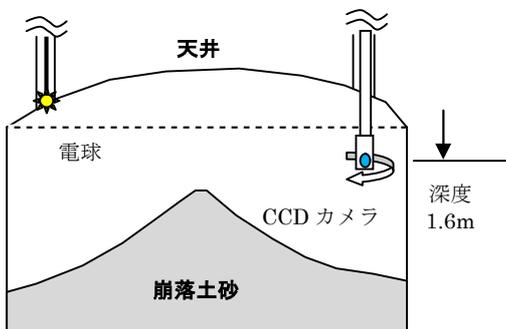
(b) 電球固定、カメラ移動



(c) カメラと電球を平行移動



(d) 電球のみ降下



(e) 空洞内撮影

図-11 ボアホールカメラ調査手順

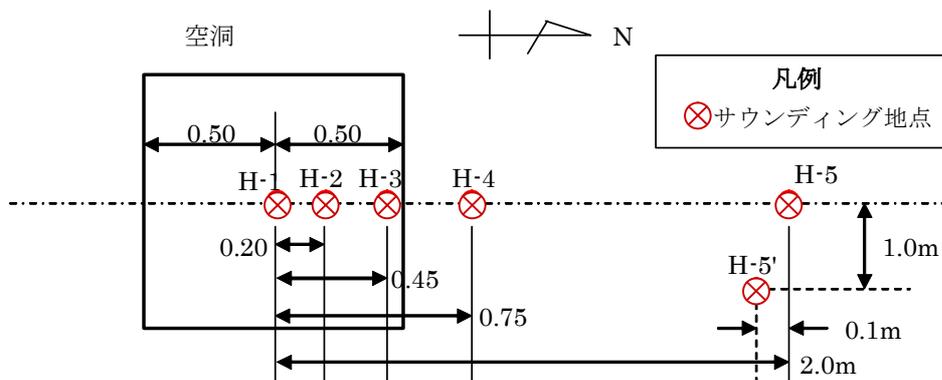


図-12 サウンディング実施位置

表-3 主な観測経過一覧

| 日付 | 当該日のサイクル数 | FWD147kN載荷 | | 地中レーダ探査 | | | | ボアホールカメラ調査 | | 想定される状況 | | |
|--------|-----------|------------|---|---------|-------------------------------|-------------------|--------------------------------------|------------|--|---|--|------------------------------------|
| | | 累積載荷回数 | たわみ量の傾向 | 十字測定 | | メッシュ測定 | | 実施 | 観察結果 | | | |
| | | | | 実施 | 反射パターンの特徴 | 実施 | 深度1.25 m・1.5 mのスライスの特徴 | | | | | |
| 10月20日 | 初期 | 0 | 急激に増大 | ○ A 1 | 当初の空洞上面と見られる反応が明瞭 | ○ B 1 | 深度1.5 mには当初の空洞上面と見られる反射パターンがある | ○ C 1 | (この日は調査を実施しておらず、代替えに10月13日の画像をC 1に示した) | この時点(10月13日)で崩落土砂が確認されているが、天井の崩壊は小さい 天井の崩壊が大きく進行 | | |
| | 1 | 30 | | ○ | | ○ | 深度1.25 mに崩壊中の空洞上面と見られる反射パターンが出現 | | | | | |
| | 2 | 40 | | ○ | 次第に不明瞭化 | ○ | 深度1.25 mの反射パターンの面積がわずかに大きくなる | | | | | |
| | 3 | 60 | | ○ | | | | | | | | |
| | 4 | 63 | | ○ | | | | | | | | |
| 10月21日 | 初期 | 63 | ・引き続き顕著に増大するが、徐々に緩やかになる ・10月20日4サイクル時、及び10月21日1サイクル時にはステップ状に増大 | ○ | 大きな変化なし | | | ○ C 2 1 | ・天井からの崩落土砂が底面の中央付近に山形に堆積している ・天井には凹凸が生じているが、ドーム形成には至っていない ・1サイクル時には天井の南東隅角部の崩壊が認められる | 崩壊が徐々に進行 | | |
| | 1 | 66 | | ○ | | | ○ | 大きな変化なし | ○ | | | |
| | 2 | 81 | | ○ | | | | | | | | |
| | 3 | 111 | | ○ | | | | | | | | |
| | 4 | 141 | | ○ | | | | | | | | |
| | 5 | 201 | | ○ | | 反射振幅がやや大きくなる | | | | | | |
| 10月22日 | 初期 | 201 | | ○ | 大きな変化なし | ○ | 深度1.25 m・1.5 mの反射パターンが明瞭になり、振幅も大きくなる | | | 崩壊が徐々に進行 | | |
| | 1 | 262 | | ○ | | | | | | | | |
| | 2 | 352 | | ○ | | | | | | | | |
| | 3 | 501 | | ○ | | | | | ○ C 2 2 | | ・崩落土砂の量が増えている ・北西孔より撮影した南東方向の画像では、「魚の頭」のような特徴的形状の土塊が見える ・西側の天井は側壁から斜め上方に高くなっており、ドームの形成が示唆される | |
| 10月24日 | 初期 | 501 | 緩やかに増大 | ○ | 大きな変化なし | ○ | 大きな変化なし | ○ B 2 | | ・10月24日以降、天候の変化等により崩壊が進行 ・天井にドーム形成 | | |
| | 1 | 510 | | ○ | | | | | | | | |
| | 2 | 634 | | ○ A 2 | | | | | | | | |
| | 3 | 924 | | ○ | | 東西測線の反射振幅がやや大きくなる | | | | | ○ C 2 3 | ・天井の崩落が進行していると思われる、「魚の頭」形の土塊が崩れていく |
| | 4 | 1,224 | | ○ | | 大きな変化なし | | ○ | 大きな変化なし | | ○ C 2 4 | |
| 11月2日 | 初期 | 1,224 | バラツキが大きく、平均的な値よりも大きな値が散在する | ○ | 前夜の雨の影響か(?), 前後のサイクルとは異質なパターン | ○ | 深度1.25 m・1.5 mの反射パターンが北方向にやや広がる | ○ | ・崩落土砂の量が増えており、対向する側面の状況が見えにくい ・北側・西側の天井が中央方向に向かって高くなっており、ドームが形成されたと判断される | 崩壊が若干進行した可能性はあるが、概ね安定した状態 | | |
| | 1 | 1,515 | | ○ | | | | | | | | |
| | 2 | 1,791 | | ○ | | 南北測線の反射振幅がやや大きくなる | | | | | | |
| | 3 | 2,090 | | ○ | | | | | | | | |
| | 4 | 2,390 | | ○ | | | | | | | | |
| 11月3日 | 初期 | 2,390 | ほぼ横ばい | ○ | 大きな変化なし | ○ | 大きな変化なし | ○ C 3 | ・大きな変化なし ・天井の中央付近が高いドーム形が明瞭に認められる ・側壁の変状は少なく、天井の北西隅角部には崩壊が見られない | | | |
| | 1 | 2,661 | | ○ | | | | | | | | |
| | 2 | 2,961 | | ○ | | | | | | | | |
| | 3 | 3,261 | | ○ | | | | | | | | |
| | 4 | 3,561 | | ○ A 3 | | | ○ B 3 | 大きな変化なし | ○ | | | |

(*)実施： 当該サイクル後に調査を実施している場合は”○”。下段の”A 1”等の記号は図-13に示す画像に対応している

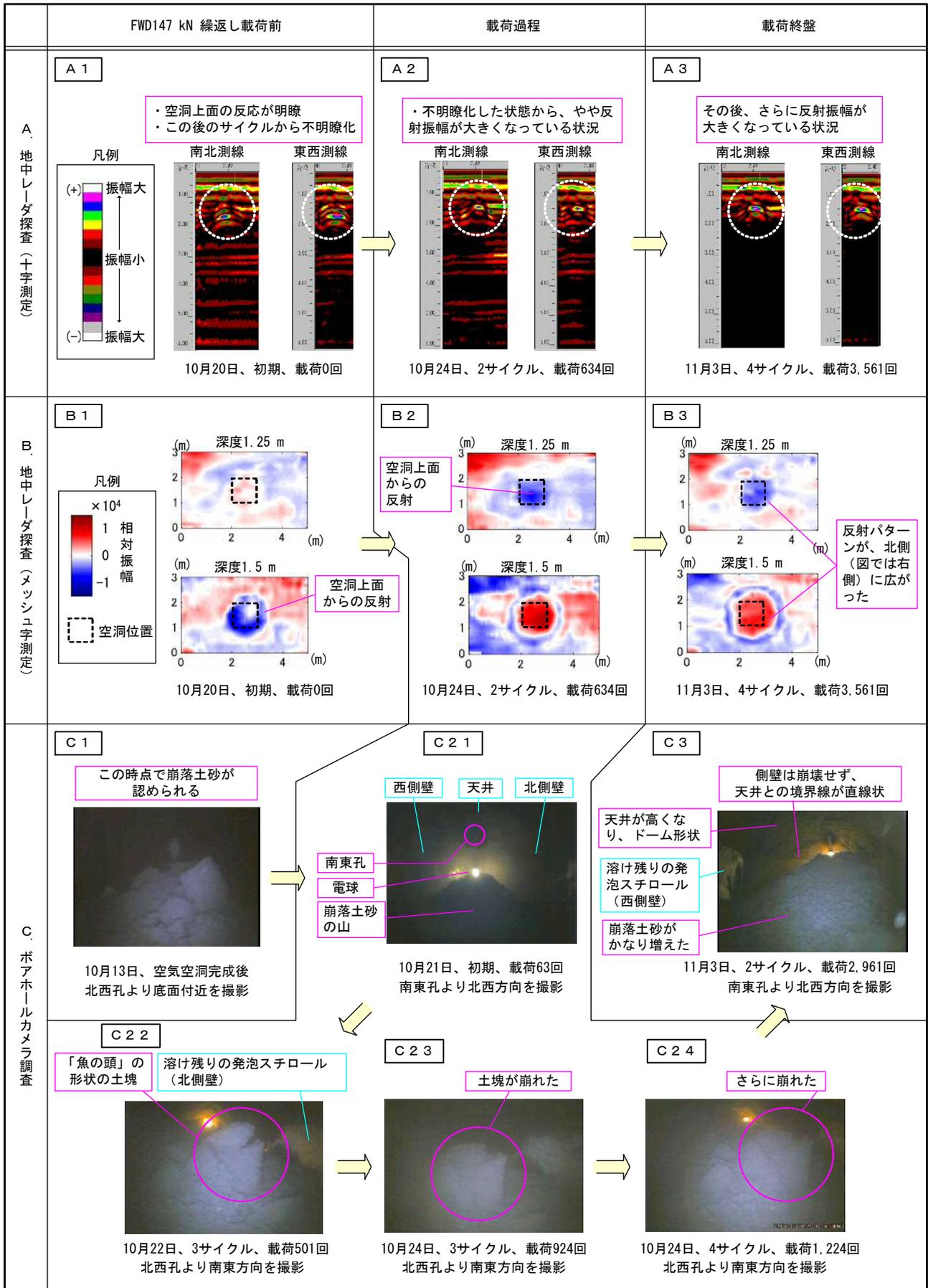


図-13 載荷及び観測の時期と内容一覧

2) 地表面変位の計測結果

各実施日における地表面変位の測定結果を図-15に示す。

対象空洞範囲において全測定で5~8mmの標高差が認められるが、経時的な沈下の進行は生じていない。したがって、これらの差異は測定時における計測位置のずれや測定誤差であり、舗装表面の変位はほとんど生じていないと判断される。

3) 地中レーダ探査の結果

FWD たわみ量の傾向やボアホールカメラによる観察結果と対比しながら、地中レーダ探査の結果を述べる。

① 10月20日(載荷初期~63回)

FWD たわみ量が急増した段階である。

載荷回数の増大と共に反射パターンは次第に不明瞭となった。これは、載荷により天井の崩落が進行し、天井形状の凹凸が大きくなり、反射波が散乱されたことが原因であると推定される。

載荷回数30回の深度スライスでは、深度1.25mに反射パターンが認められる。したがって、繰返し載荷により天井の崩落が進行し、天端深度が浅くなったと推定される。

② 10月21日(載荷64~201回)

FWD たわみ量は、上記①よりは緩やかになりつつも、顕著に増大していた段階である。ボアホールカメラ調査では天井に凹凸が認められたが、ドーム形成には至っていなかった。

1サイクル目(載荷66回)では、FWD たわみ量がステップ状に増大し、カメラでは空洞の南東角天井付近に崩壊の跡が認められたが、地中レーダでは顕著な変化は認められなかった。

5サイクル目(載荷201回)後の反射振幅がやや大きくなったが、それ以外には載荷に伴う記録の変化はほとんど認められない。

③ 10月22日(載荷202~501回)

FWD たわみ量が緩やかに増大していた段階である。載荷322回目にはたわみ量の単発的な最大値(1.6mm弱)が生じた。

反射パターンには載荷に伴う記録の変化はほとんど認められないが、深度スライスでは10月21

日の載荷66回の記録と比較して、深度1.25mおよび1.50mの反射パターンが明瞭になり、振幅も大きくなった。

ボアホールカメラ調査では、「魚の頭」のような形状の大きな崩落土塊が認められた。

④ 10月24日(載荷502~1,224回)

FWD たわみ量が緩やかに増大し、1.45mm程度に至る段階である。ボアホールカメラ調査では、「魚の頭」形状の土塊が崩壊していき、天井から新たな土砂が崩落していると考えられた。

3サイクル目(載荷924回)後の東西測線の反射振幅がやや大きくなったが、それ以外には載荷に伴う記録の変化は認められない。

⑤ 11月2日(載荷1,225~2,390回)

FWD たわみ量に減少傾向が生じ(1,400回程度で約1.35mm)、その後横ばいに近い段階。ただし、平均的なたわみ量よりも大きな値が散在しており、空洞の進展とアーチ効果の影響が拮抗していた可能性がある。

前夜の降雨による影響か1サイクル目(載荷1,515回)までは路面の多重反射が卓越し、空洞の反射記録が不鮮明であった。10月24日の記録と比較すると、2サイクル目(載荷1,791回)以降、南北方向測線の反射振幅がやや大きくなっている。

深度スライスでは、10月24日の載荷1,224回の記録と比較して、深度1.25mおよび1.50mの反射パターンが北方向にやや広がった。

ボアホールカメラ調査によっても崩落土砂の堆積状況に変化が認められており、天井の崩落が進行したと推定される。天井はドーム状を呈しており、レーダ記録と整合している。

⑥ 11月3日(載荷2,391回~3,561回)

載荷に伴う記録の変化はほとんど認められない。この段階で繰返し載荷を終了した。

4) PS 検層の結果

P波・S波とも繰返し載荷中に初動振幅の明瞭な変化が得られなかったため、本文では報告を割愛する。なおP波については、予備載荷またはリモネン再注入に伴う地盤の崩落や緩みによると見られる初動振幅の減衰が認められた。

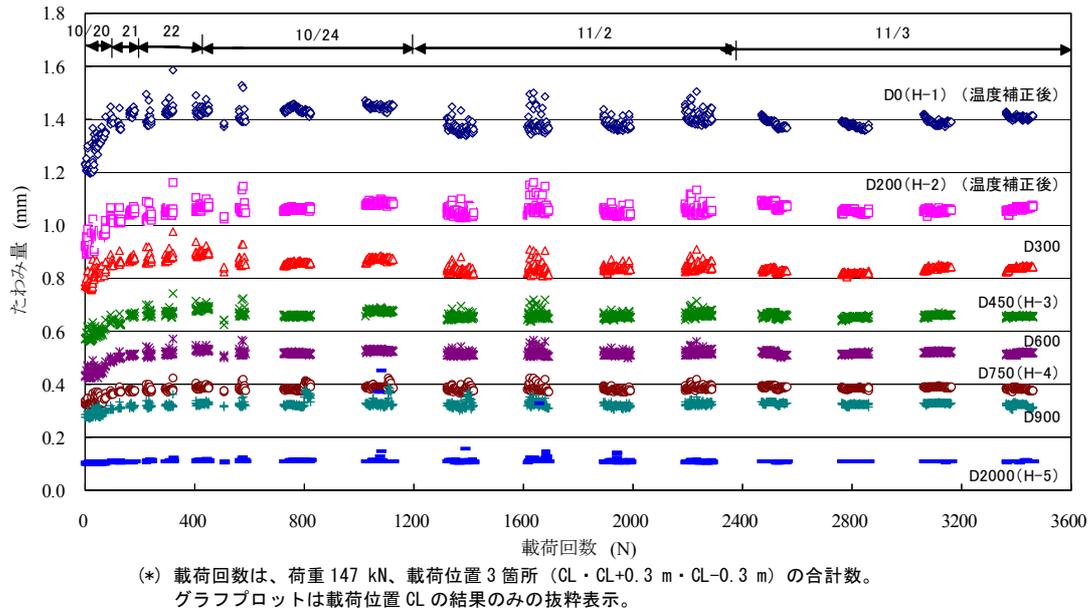
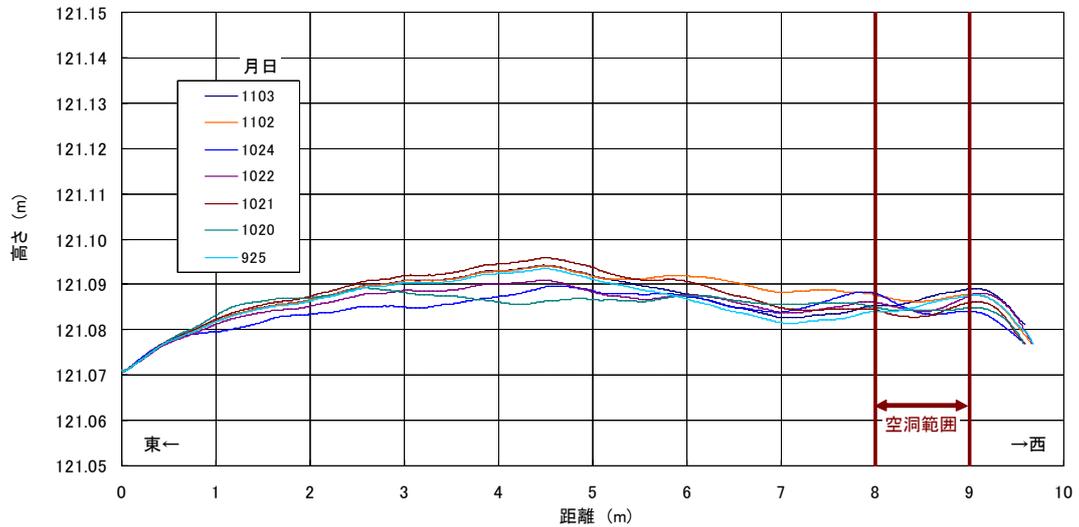
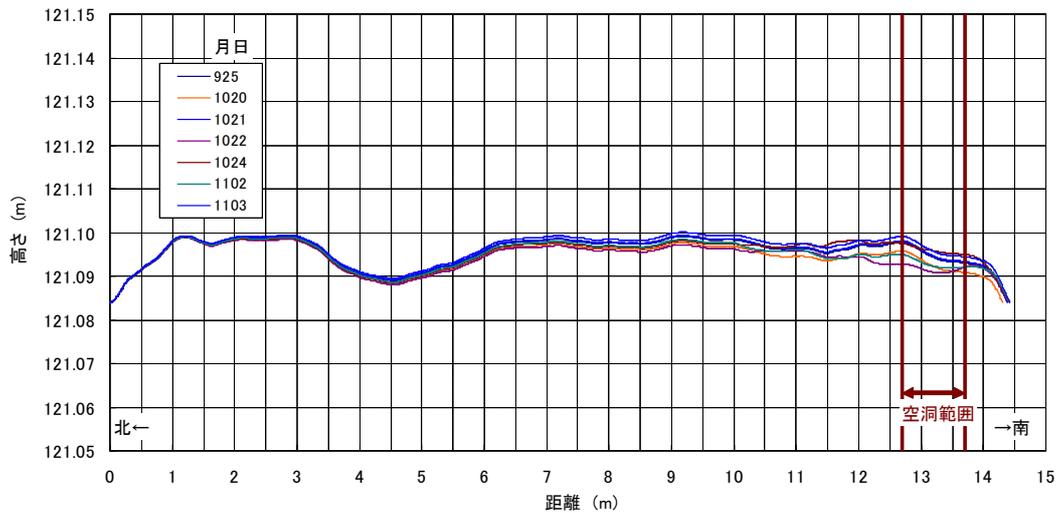


図-14 FWD によるたわみ計測結果



(a) 測線 1



(b) 測線 2

図-15 各実施日における地表面変位

5) ボアホールカメラ調査の結果

繰返し載荷過程の目視観察については、上記 3) で述べた。

上記 3. (3) 5) に示した方法 (図-11) による測定結果から、幾何学的検討により崩落土砂の堆積状況等を推定した断面図を図-16(a) に示す。最終的に天井の深度は北西側が南東側よりも 8 cm 高く ($\{Du[SE]-L\} - \{Du[NW]-L\}$)、空洞底面は 4 cm 高かった ($\{Dd[SE]-L\} - \{Dd[NW]-L\}$) ことから、北西側の天井崩落が南東側より大きかったと推定された。

繰返し載荷終了後の空洞内状況の見取り図及び写真を図-16(b)・(c) に示す。これより、天井がドーム形状になっていること、側壁や天井隅角部の変状は小さいことなどが確認できる。

6) サウンディングの結果

上記 3. (3) 6) に示した 6 箇所 (図-11) で NSWS を実施したうち、H-1・H-3・H-4 の 3 箇所の結果を図-17 に示す。以下、空洞・崩積土の範囲推定のほか、繰返し載荷による空洞直上や側方の緩み状況、そして、上記 1) で想定されたアーチ効果の確認のため、緩み区間上方の締めり状況に着目して述べる。

① H-1 (空洞の中央)

貫入荷重が減少して回転が止まる深度約 1.1 m から 0.15 m (スクリーポイントの長さ分) 浅部、すなわち深度 0.95 m 付近より緩みが始まり、深度 1.5 m 付近の「当初の空洞範囲」の上端を経て、荷重が再び掛かり始める深度約 1.66 m までが「ゆるみ～空洞」、これ以下、空洞域の底 (深度 2 m) までが天井が崩落して堆積した崩積土と推定される。

また、「ゆるみ～空洞」の直上区間はよく締まっており、深度 0.72～0.85 m では換算 N 値が 50 以上である。

② H-3 (空洞中央から 0.45 m 北)

深度 0.8 m 付近から緩みが始まり、深度約 1.55 m までが「ゆるみ～空洞」、これ以下、深度 2 m までが、上記①と同様に崩積土と推定される。

また、「ゆるみ～空洞」の直上区間はよく締まっており、スクリーポイントの寸法も考慮すると路盤の影響も重なっているが、深度 0.43～0.58 m では換算 N 値が 50 以上である。

③ H-4 (空洞中央から 0.75 m 北)

深度 1.3 m 付近から緩みが始まり、深度約 2.0 m までが「ややゆるい」と推定される。この「ややゆるい」区間 (換算 N 値 5～12 程度) は、上記①・②に示した H-1・H-3 の「ゆるみ～空洞」区間 (換算 N 値 0～5 程度) よりも締まっており、開始深度 (1.3 m) も深いことから、空洞範囲内の H-1・H-3 とは明らかに状況が異なっている。

また、「ゆるみ～空洞」の直上区間はよく締まっており、深度 1.05～1.15 m では換算 N 値が 50 以上である。

④ 繰返し載荷の影響

今回図示していないが、H-5 では深度約 1.35～1.85 m に、区間長はやや短い H-4 と同程度の「ややゆるい」区間があった。また H-5' では深度約 1.35～1.8 m に、換算 N 値 12～17 程度で、その上下よりも緩い区間があった。これら区間の直上区間は、やはりよく締まっており、H-5 では深度 0.63～0.81 m、H-5' では深度 1.05～1.17 m において換算 N 値が 50 以上であった。

以上より、H-1・H-3・H-4 箇所の結果には繰返し載荷の影響、すなわち空洞直近の地盤の緩みや、その上方に想定されたアーチ効果による締めり (上記 1)) などが反映された可能性がある。しかし、H-4 箇所の結果には、当初載荷の影響が小さいと想定した H-5・H-5' 箇所、特に前者との共通点もあり、載荷の影響範囲や程度は明らかでない。

⑤ NSWS による空洞・地盤状況推定について

NSWS によるサウンディングは、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。

ただし NSWS 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平均的な貫入抵抗を計測する機構である。したがって、図-18 に例示するように、空洞の有無や、空洞と土の境界の厳密に検出することを求めた場合、空洞厚が薄いケースや、空洞直近の土が非常に緩いケース、土の締めり程度が薄層内で変化するケースなどには、困難になると考えられる。

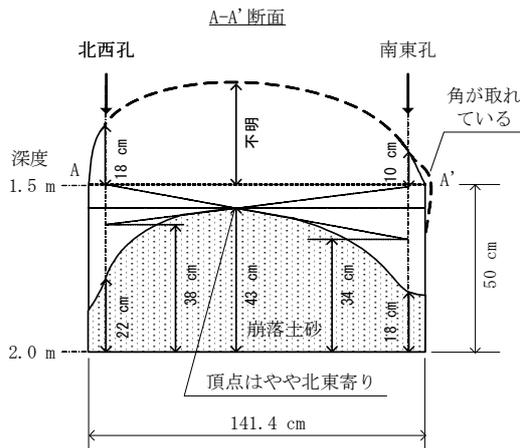
7) 試掘の結果

固化した充てん材の状況写真、及び概略形状図を 図-19 に示す。ボアホールカメラ調査では、空洞の天井はドーム形状と観察されたが、天井付近には充てん材のない隙間があったと考えられ、充てん材の上部は不規則な形状となっている。

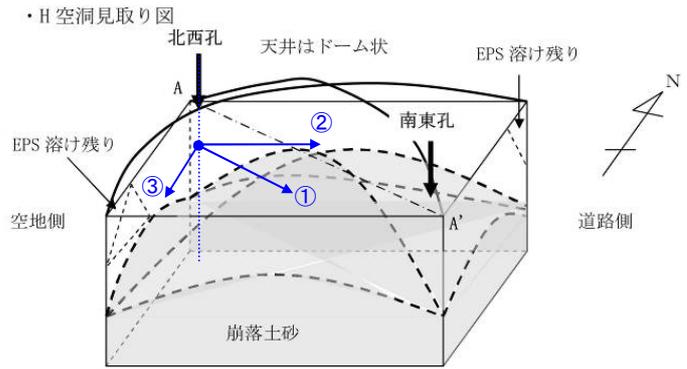
充てん材の北側には高まりがあり、北西側で最も

高く南西側より約 20cm 高くなっている。これは北西側にリモネンの注入孔があり、その周辺で繰返し載荷による天井の崩落が大きかったことを示している。

試掘結果は、北西側の天井の崩落が南東側より大きかったという推定など、ボアホールカメラ調査の結果（上記 5）、 図-16）と整合している。



(a) 推定断面図



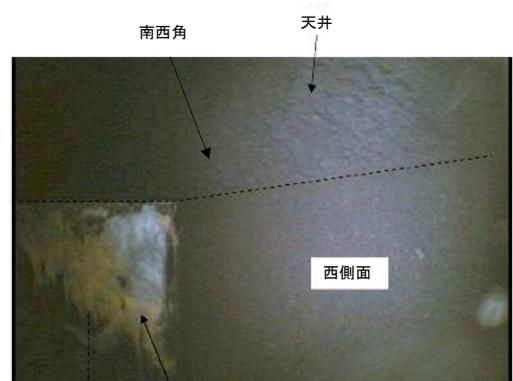
(b) 見取り図及び写真撮影位置



① 南東孔方向



② 北東角方向



③ 南西角方向

(c) 北西孔の深度約 1.7 m からの状況写真

図-16 繰返し載荷終了後の空洞内状況

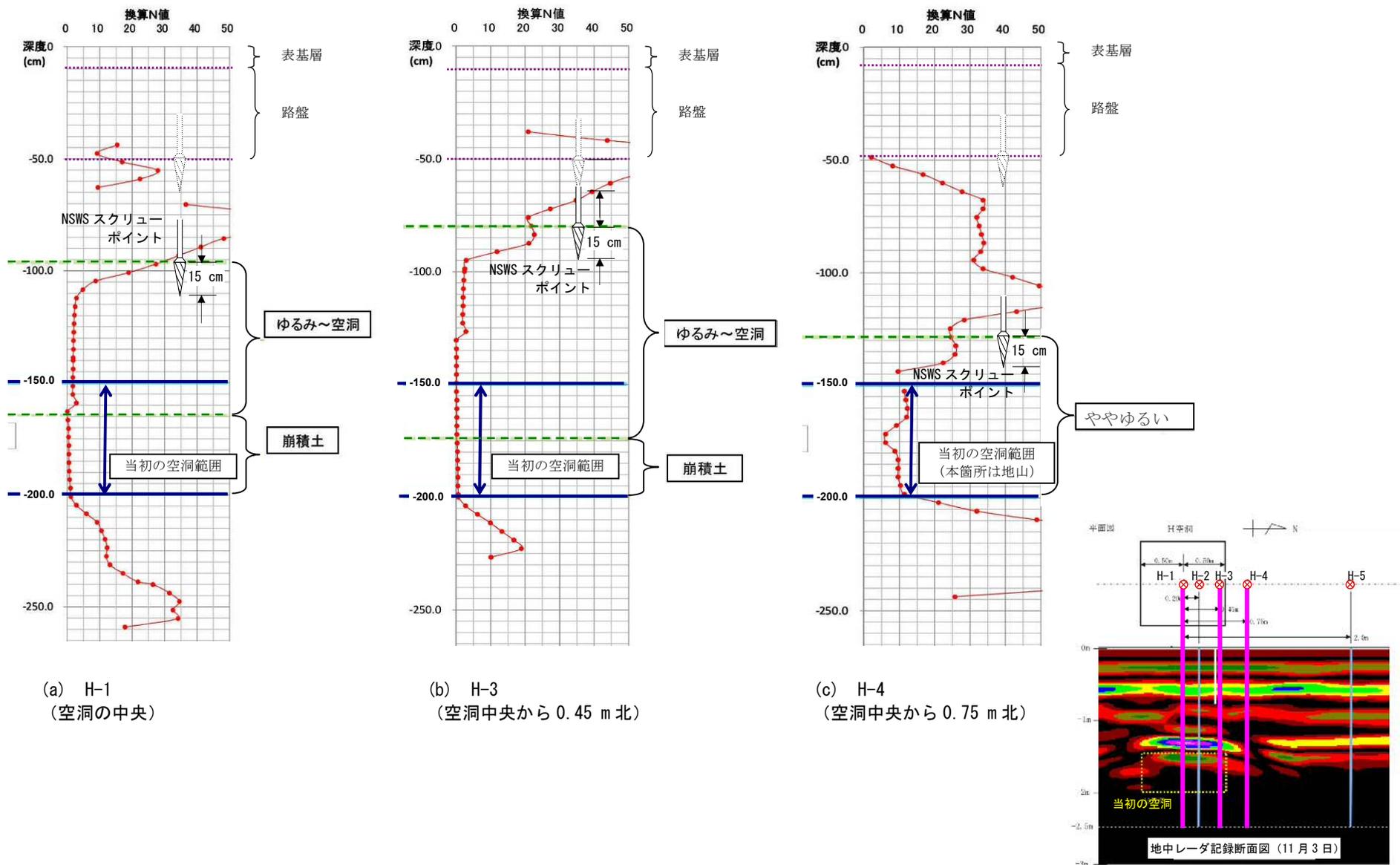


図-17 サウンディング (NSWS) の結果

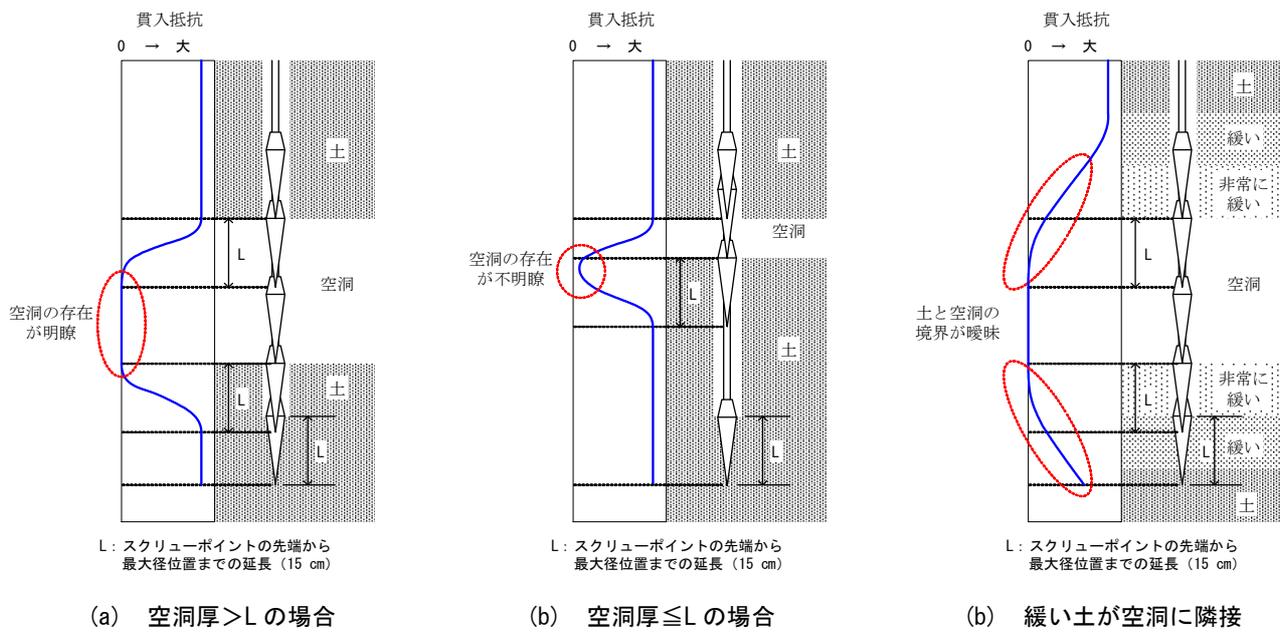
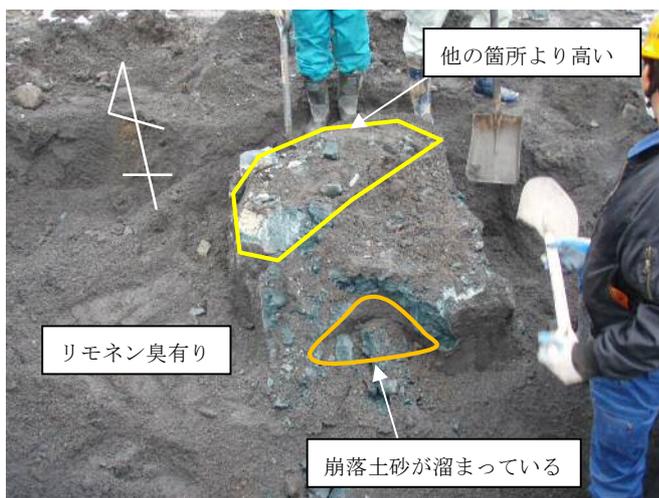
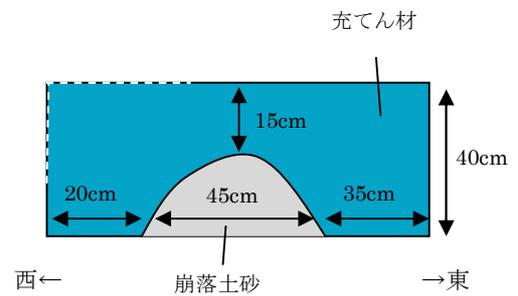


図-18 空洞厚・土の締めり状況と貫入抵抗の関係



(a) 南側断面



(b) 西側断面

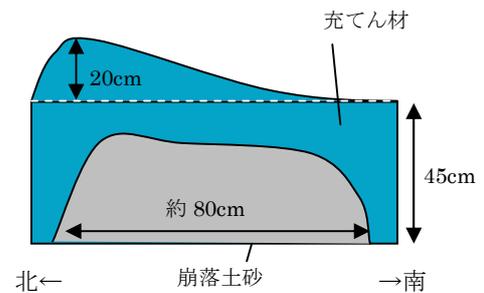


図-19 試掘の結果

5. まとめ

屋外試験ヤードに作製したアスファルト舗装下の空気空洞を対象に、地上から FWD による繰返し載荷を施し、各種観測により空洞の進展や周辺地盤の変化を確認した。主な内容は次のとおりである。

・試験ヤード

舗装構造：表基層 10 cm、路盤 40 cm、合計 50 cm

地山（盛土）：細粒分まじり礫質砂

空気空洞：□1.0 m×厚 0.5 m、深度（土被り）1.5 m

・繰返し載荷条件

荷重源：FWD

載荷重：147 kN、及び 98 kN

載荷位置：空洞の中央直上、北 0.3 m、南 0.3 m の
3 点を、適宜定めた回数ずつ巡回

繰返し数：147 kN 3,561 回、98 kN 152 回

（49 kN 換算で 290,889 回、交通量区分 N4 以上）

・観測項目

FWD たわみ計測、地表面変位計測、地中レーダ探査、
PS 検層、ボアホールカメラ調査、サウンディング
（NSWS）、充てん材注入後の試掘

実験開始前の荷重検討では、数回～十回程度の繰返し載荷で路面陥没が発生すると見込んでいた。しかし、実際には上記の回数の載荷でも陥没の兆候が

認められなかったため、実験を終了している。

実験の結果、次のことがわかった。

①空洞は全壊や上方移動には至らず、天井部の地盤が崩落してドーム形状となり、崩落土砂が底部に堆積した状態で安定した。

②空洞の直上の地盤には緩み区間が生じた。さらにその上方には、繰返し載荷に伴うアーチ効果によるものと想定される締まった区間が生じた。

③地表面変位はほとんど生じなかった。

④FWD たわみ計測値、地中レーダ探査結果には、空洞や周辺地盤の変化が反映されていた。

⑤NSWS により、繰返し載荷終了後の空洞や周辺地盤の状況を概略的に把握できた。

なお試験ヤードの地下水位は、常時 G.L. -6.0 m 以深であり、空洞の位置（深度 1.5～2.0 m）よりも相当低かった。水没を繰返すなど地下水の影響がある空洞では、土砂崩落や緩み領域の拡大が促進され、本実験よりも陥没が発生しやすいと思われる。

最後に、本実験の実施に際し多大なご協力をいただいた関係各位に感謝の意を表します。東京大学生産技術研究所 桑野玲子先生には観測方法に関し有益な助言を賜り、感謝いたします。東京都下水道局 芝浦水再生センター 岩田良平氏（現東京都建設局 河川部）には「CCD 手鏡」の丁寧な実演と解説をしていただき、ここにお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 住吉卓、橋原正周、大石雅登（2011）：小型装置による路面下空洞の充てん実験、平 23. 都土木技術支援・人材育成センター年報（掲載予定）
- 2) 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
- 3) 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）
- 4) （社）日本道路協会（2006）：舗装設計便覧、64、丸善（株）
- 5) 東京都総務局（2009）：平成 20 年度東京都職員提案制度受賞者のコメント＜第 4 回＞、「とちょう-i」ホームページ、http://www.tocho-i.metro.tokyo.jp/c_up/21/21syokuinteian/0223_gesui.htm、平成 21 年 2 月 23 日