



2008年岩手・宮城内陸地震のKiK-net 一関西における 大加速度記録の成因の推定

大町達夫¹⁾, 井上修作²⁾, 水野剣一³⁾, 山田雅人⁴⁾

- 1) 正会員 東京工業大学 大学院人間環境システム専攻, 教授 工学博士
e-mail : ohmachi@enveng.titech.ac.jp
- 2) 正会員 東京工業大学 大学院人間環境システム専攻, 教務職員, 修士 (工学)
e-mail : shusaku@enveng.titech.ac.jp
- 3) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 大学院学生 (研究当時), 修士 (工学)
e-mail : Kenichi.Mizuno@mail.penta-ocean.co.jp
- 4) 東京工業大学 工学部土木工学科 学生 (研究当時), 学士 (工学)
e-mail : yamada.m.aa@m.titech.ac.jp

要 約

2008年岩手・宮城内陸地震の際, KiK-net一関西観測点では上下動の最大加速度が4G (Gは重力加速度) に近い驚異的な強震記録が得られた. この加速度時刻歴には自由地盤表面での強震記録とは思えない特徴が認められることから, 強震観測点の現地調査や振動台模型実験, 数値解析などによって, この驚異的な上下動加速度の成因を調べた. その結果, この強震記録には強大な地震動入力によって地震観測小屋がロッキング振動で浮き上がり, 地面と再接触した際の衝撃力の影響が強く反映している可能性が高いことが見出された. またこの影響がなければ, 本震時の4Gに近い上下動最大加速度は1.6G程度であることも導かれた.

キーワード: 2008年岩手・宮城内陸地震, KiK-net一関西, 強震記録, ロッキング振動, 非線形地震応答

1. はじめに

2008年6月14日, 岩手・宮城の県境付近の山間地で浅い震源をもつ岩手・宮城内陸地震 ($M_j7.2$) が発生した. この地震では, 岩手県奥州市と宮城県栗原市において最大震度6強を観測し, 死者17名, 行方不明者6名の犠牲者が出た. また震源域では, 祭時(まつるべ)大橋が落橋・倒壊し, 土砂崩れや道路の盛土の崩壊などの被害が多数発生したほか, 荒砥沢ダム上流域では大規模地すべりが起きた.

本震の震源域で多数の強震観測記録が得られたなかで, 震央に近いKiK-net一関西観測点 (IWTH25) (以下, 一関西観測点と略称) の観測小屋内で観測された記録 (以下, 地表記録と略称) は, 上下動の最大加速度が 3866 cm/s^2 , 三成分合成では 4022 cm/s^2 という器械観測史上最大と思われる加速度値を示し, 多数の関係者の驚きと議論を呼んだ. とりわけ, 4G ($G=980 \text{ cm/s}^2$ は重力加速度) 近い最大加速度を示した上下動記録に関連して, 自由地盤の地震時挙動に言及した議論には関心が集まった. この

上下動記録は一見すると、物体が空中に跳ね上がった場合の片揺れ状加速度波形に類似していることから、Aoi et al.(2009)¹⁾は本震時に表層地盤全体が跳び上がって粒子状に挙動したと指摘し、これを表層地盤のトランポリン効果と呼んだ²⁾。同様の趣旨から Yamada et al.(2009)³⁾は地表から 30~60m の地盤表層が 1~12mm 浮きあがったと指摘し、西島ら⁴⁾は地表から 1~5m までは 3 回、6~11m までは 2 回跳び上がったと指摘した。一方、この片揺れ状強震記録の成因に疑問を抱き、地震計の設置条件に関して数多くの問い合わせがあったことが報告されている²⁾が、現在までに地盤の跳び上がり説に対する異論はほとんど見当たらず、この地表記録に関する議論は沈静化している様相である。しかし、この大加速度を示す強震記録が本震時の自由地盤における強震動を実際に記録しているとすれば、重要構造物の耐震設計やレベル 2 地震動に対する耐震性能照査を進める上で極めて重要であると思われる。そのため、本強震記録に見られる大加速度の真の意味や成因の解明が遅れば地震工学あるいは地震防災に関わるさまざまな分野で多くの混乱を引き起こしかねないと懸念されることから、それらの早期の解明が望まれる。

ところで上記の既往研究では、地表記録の上下動成分に特に着目して議論が展開されている点に共通した特徴がある。しかし水平動成分も含めて当該の強震記録を詳細にみれば、後述のようにこれらには自由地盤の強震記録と考えにくい特徴が幾つか認められることから、観測小屋の地震応答の影響が強震記録に反映していることが疑われる。かつて日比野ら⁵⁾は、KiK-net日野観測点の強震記録に観測小屋の影響が含まれていることを微動計測結果に基づき指摘している。また芳村ら⁶⁾も、この観測小屋の影響としては、建屋-地盤連成系のロッキング振動が卓越していることを現地加振実験と微動計測により確認している。したがって、強震観測点の地質や観測小屋の構造などは異なるが、上記の一関西観測点における地表記録にも地震観測小屋の影響が混入していることは十分考えられる。さらに、この地表記録によれば水平動の最大加速度も 1.5G 程度に達していたことから、強大な水平入力地震動によって観測小屋自体がロッキング振動中に浮き上がった可能性が考えられる。

以上を踏まえ、本論文では強震時における観測小屋の浮き上がりを伴うロッキング振動の観点から、一関西観測点の地表記録に見られる極めて大きな上下動加速度の成因の解明を目的とする。

2. 一関西観測点での強震記録の特徴と地震計設置状況

2.1 震源域における最大加速度値

本震の震央と推定断層の位置、および一関西観測点とその周辺における水平・上下成分の最大加速度値を図1に示す。水平成分の数値は南北・東西の2成分の大きい方であり、KiK-net観測点に関しては

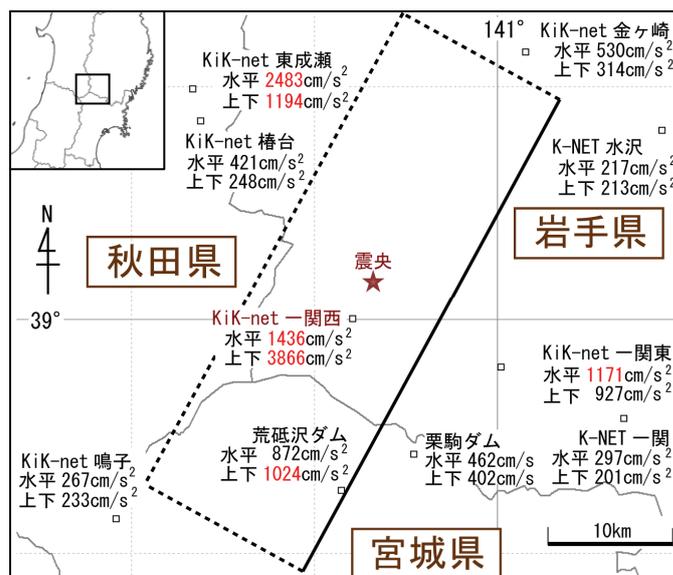


図1 本震の震央と断層の位置⁷⁾、および最大加速度の観測値

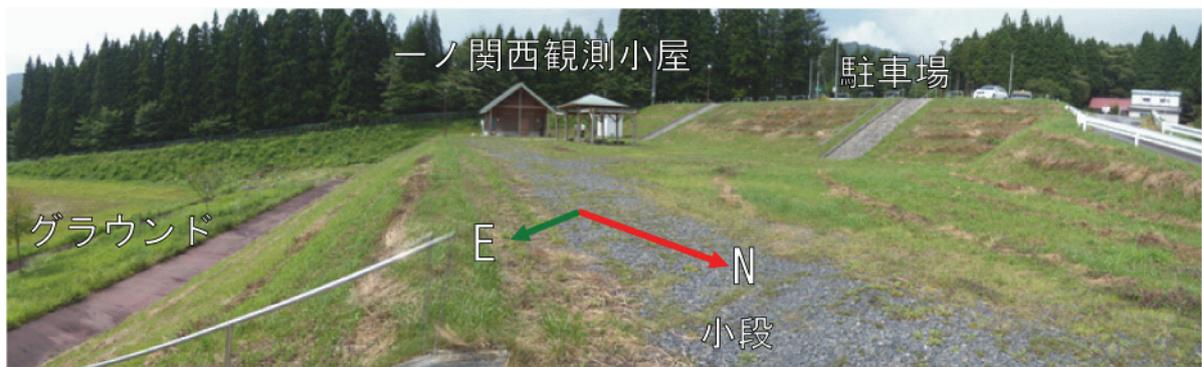
地表での観測値を、荒砥沢ダムに関しては底部監査廊での観測値を示している。図中に示した10ヶ所の観測点のうち、最大加速度が1Gを超えた観測点は全部で4ヶ所あり、一関西と東成瀬では水平・上下の両成分が、一関東では水平成分だけが、荒砥沢ダムでは上下成分だけが超えている。上下/水平の最大加速度比が1よりも大きいのは一関西と荒砥沢ダムの2ヶ所だけで、前者では2.7、後者では1.2である。なお一関西観測点は、震源断層の上盤に位置し、震央に最も近接した観測点である。

2.2 地震計の設置状況

一関西観測点の周辺状況や外観などを、図 2(a)～(c)に示す。同図(a)に示すように、観測点周辺は緩傾斜地盤の表層を最大 5m 程度の深さまで三角形に切って造成された階段状の地盤であり、下から順にグラウンド、観測小屋のある小段、駐車場となっている。観測小屋はこの小段の最奥部にあり、東側の脇にはトイレ用建物が、北側に数m離れてコンクリート製階段が、さらに北側へ少し離れて休憩所がある。

本観測点のボーリング柱状図によれば¹⁾、地表を覆う表土（後述の表 1 および図 12 に示す地層 A）の下には段丘堆積物（同 B）があり、その下には凝灰岩・角礫凝灰岩・砂・砂質粘土・砂の薄層（同 C）、泥岩（同 D）があり、以下は角礫凝灰岩・砂岩などが互層をなしている（同 E～G）。図 2 に示した写真を 2009 年 8 月に撮影した時、休憩所はやや傾斜していたが、観測小屋やトイレ建物を含む地物に異常はなく、背後の杉木立や周辺の下草類の根が表層地盤の浮き上がりで切断されたような様子は全くなかった。また観測小屋や小段・切り土の表面にも滑りや浮き上がり、あるいは地盤表面の細粒化などの形跡はなく、コンクリート階段にも地震被害の形跡は特に認められなかった。

観測小屋の平面図と同図中の A-A'断面を、図 3 に示す。観測小屋の外形寸法は、高さが 3m、長軸（長辺）が 3m、短軸（短辺）が 2m であり、内部の軽量棚に記録計などの収納物が所蔵されている。小屋の床には、現場打ちの厚さ約 40cm のコンクリート基礎と一体化した大小二つのピットが設置され、そ



(a) 観測小屋周辺の地盤状況



(b) 観測小屋周辺の地物



(c) 観測小屋の外観

図 2 観測小屋の周辺状況と外観 (2009 年 8 月 19 日撮影)

れぞれ鉄蓋とコンクリート蓋が装備されて落下物等の侵入防止が図られている。KiK-netの地表加速度計は、小ピットの床にアンカー止めされた厚さ10mmのステンレス製プレートにボルトで固定されている。各部分のおおよその質量は、コンクリート基礎が5t、小屋上部が2.7t、収納物が数百kgであり、観測小屋全体では合計8t前後と考えられる。地震後の現地調査では、ピットや地表加速度計の固定状況を含め、特に異常は認められなかったと報告されている⁸⁾。なお観測小屋の長軸は、図2(a)と図3に示すようにN35°Eの方向を向いている。

2.3 地表記録の特徴

一関西観測点の観測小屋内部で観測された本震の地表記録を図4(a)に示す。また、同観測点の地下260mの硬質凝灰岩中で観測された本震の強震記録(以下、地中記録と略称)を同図(b)に示す。水平方向の時刻歴はもともと南北(NS)方向・東西(EW)で観測されているが、本論文では強震記録に見られる観測小屋の影響を検討する観点から、小屋の長軸と短軸の方向(図3参照)に座標変換した時刻歴を用いる。座標変換した後の長軸、短軸方向の水平最大加速度は、それぞれ地中で807, 773 cm/s²、地表で1382, 1377 cm/s²であり、地中、地表とも長軸方向の方が短軸方向よりも若干大きい。図5は、図4に示した2ヶ所の加速度時刻歴の3~6秒の部分拡大し、3成分を重ね合わせた図である。図4(a)と図5(a)に示した地表記録の4秒過ぎのピークが、上下成分の最大加速度を記録している。地表記録の上下成分については、次のような特徴が指摘できる。

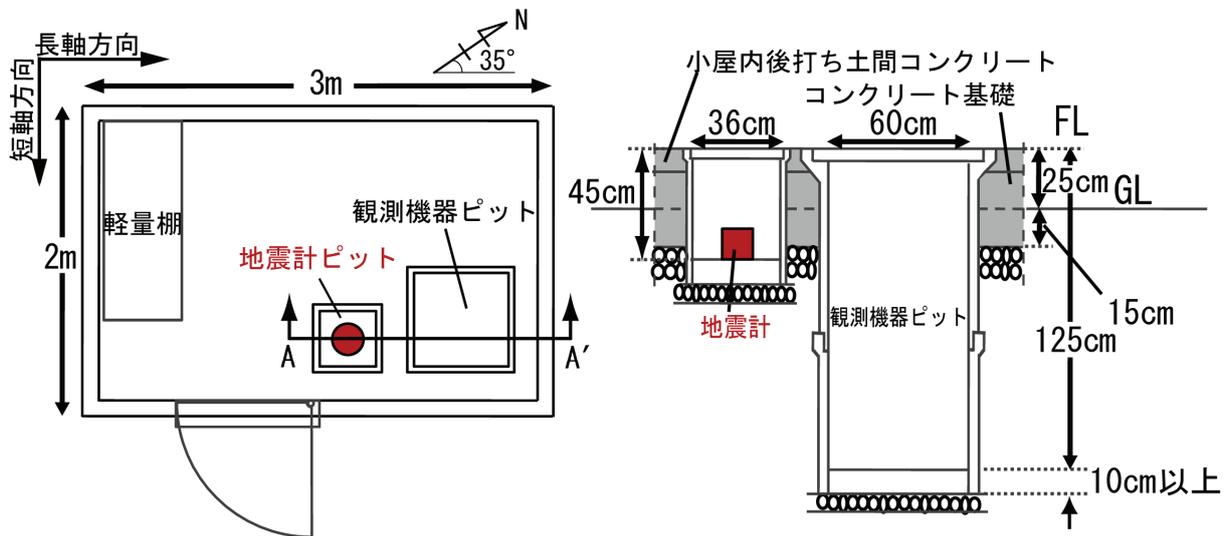


図3 観測小屋の平面図とA-A'断面図^{8),9)}

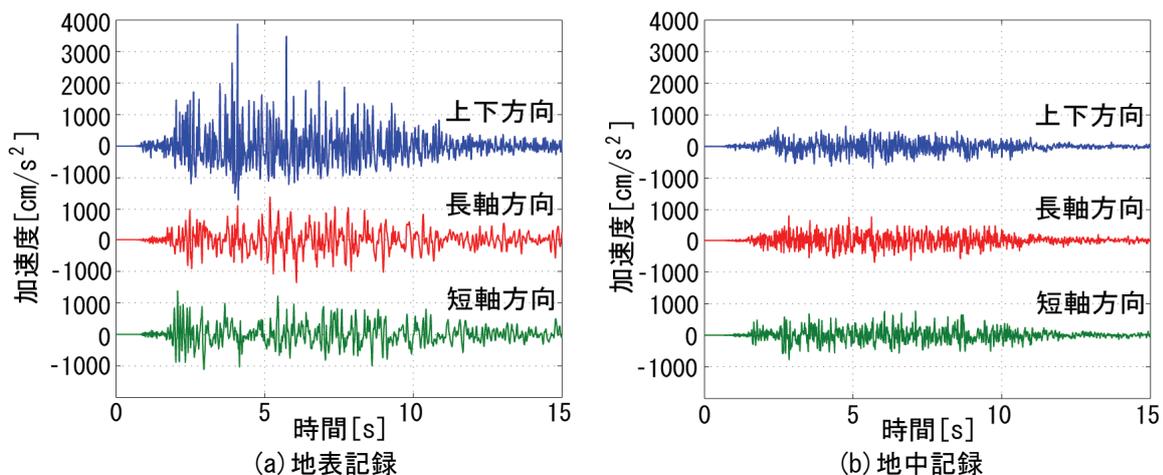


図4 一関西観測地点で観測された本震の加速度時刻歴

- 1) 地表記録の上向き最大加速度は 3866cm/s^2 、すなわち 3.94G と非常に大きい。なお3成分合成の最大加速度値は 4022cm/s^2 と 4G を超え、これまでに観測された地震記録の中で最大である⁷⁾。
- 2) 一方、下向き加速度の絶対値は最大で 1703cm/s^2 であり、上向き最大加速度の半分以下である。
- 3) 全体的に、正側の加速度振幅が大きく負側の振幅が小さいという非対称性（以下、正負非対称性と略称）が著しい。
- 4) 加速度波形の継続時間に着目すると、上向き振幅は下向き振幅よりも継続時間が短い。特に、大きな上向き波形はパルス状である。
- 5) パルス状の上向き加速度が記録された時刻には、水平動にも山や谷が見られることが多い(図5の矢印参照)。

地表記録とは対照的に、地中記録の上下成分には正負非対称性はほとんど見えず、上下動と水平動の山や谷が重なる時刻も比較的少ない(図5参照)。したがって、地下260m以浅の表層部分において、上記1)~5)の特徴が生成されたと考えられる。自由地盤を含め物体が単に跳び上がったのであれば下向き加速度の絶対値は 1G (=一定) を示すと考えられるが、 1G を大きく超えて変動していることは単なる跳び上がりではないことを示唆している。さらに地表記録の上下・水平両成分に多数の山や谷

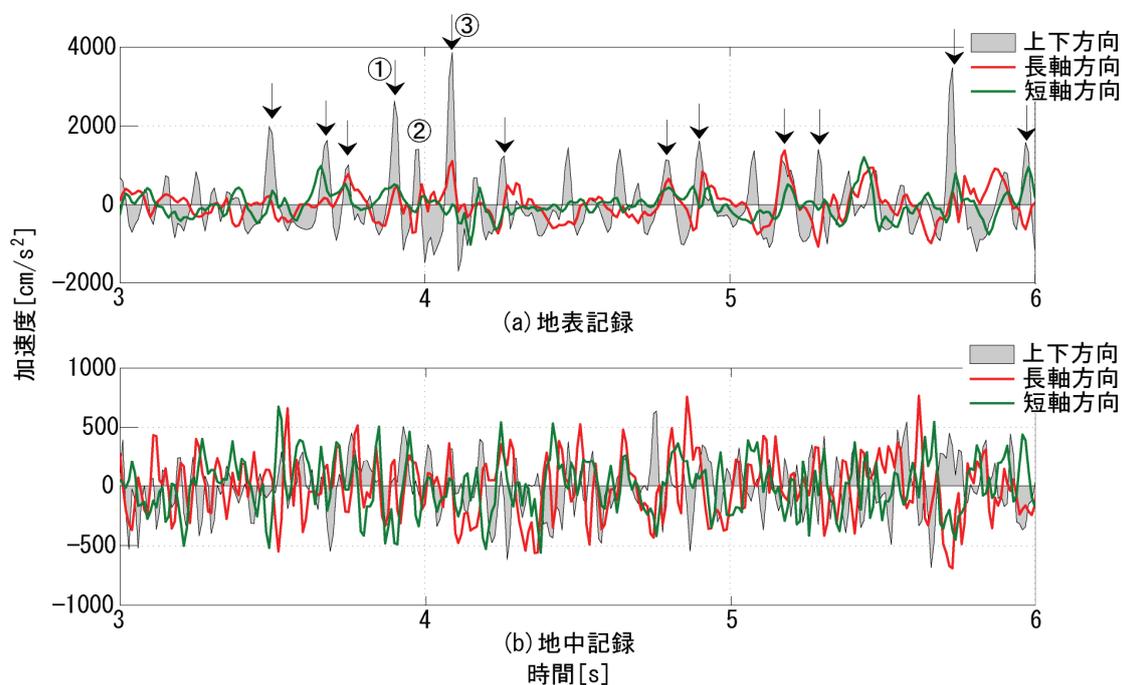


図5 加速度時刻歴の拡大図

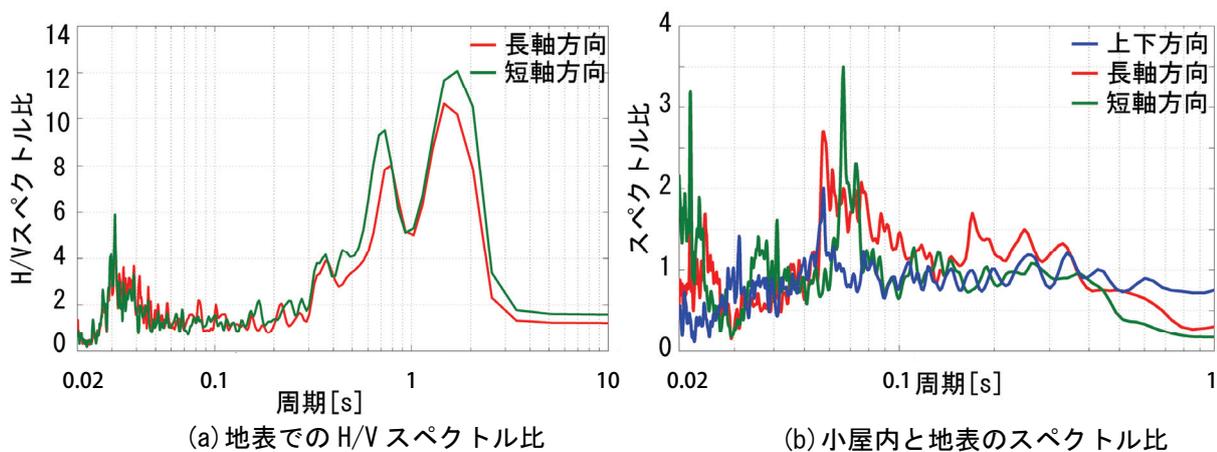
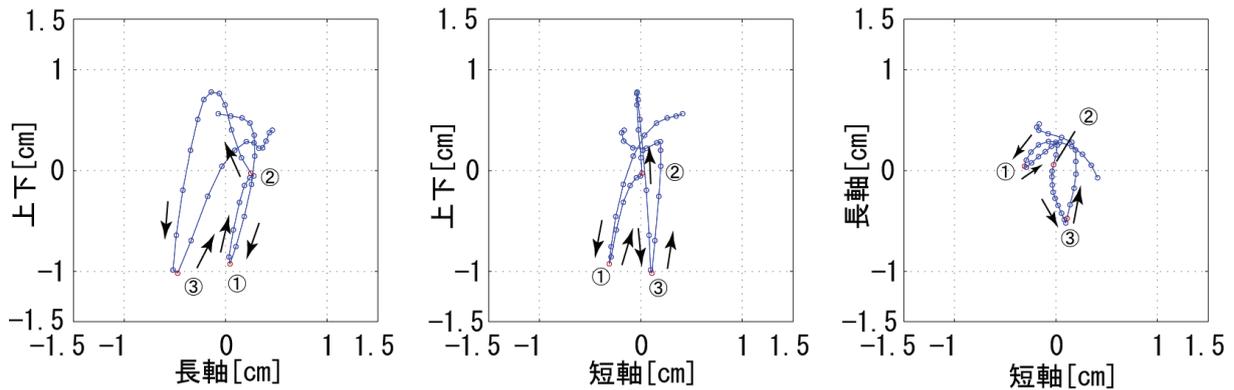


図6 常時微動測定結果



(a) 長軸・上下の鉛直面内 (b) 短軸・上下の鉛直面内 (c) 長軸・短軸の水平面内
 図7 鉛直面内(左, 中央)と平面内(右)の粒子軌跡(○は図5中の①~③のピーク発生時刻)

が同時に見られることから、上下動と水平動が連成振動をしている可能性が推察される。

2.4 観測小屋と周辺地盤での常時微動計測

2009年8月に物探サービス社製 GEODAS (固有周期1秒) を用いて、常時微動計測を行った。この計器は、水平2成分と上下成分の3成分微動計を2台同時に使用して計測可能である。そこで1台を観測小屋内の強震計の脇に、他の1台を観測小屋から北へ約3.5m離れたコンクリート階段前の地表に設置し、100Hz サンプリングで3分間計測した。地表での水平動と上下動のフーリエ振幅スペクトル比 (H/V スペクトル) を図6(a)に、小屋内(強震計脇)と地表の3成分スペクトル比を図6(b)に示す。

図6(a)のH/V スペクトルには、1.6秒付近と0.7~0.8秒付近にピークがある。これらのピーク周期は地盤の速度構造(後述の図12参照)から、観測小屋の周辺地盤に固有の振動周期と考えられる。一方、図6(b)には、長軸、短軸、上下の各方向とも0.06~0.07秒付近にピーク周期がある。これらのピーク周期は観測小屋単独の、あるいは観測小屋と地盤との連成した振動モードに関わる周期と考えられる。特に、長軸方向と上下方向のピーク周期が一致していることが注目される。

2.5 鉛直面内及び、水平面内の粒子軌跡

図5に示した地表記録に、断層運動に伴う永久変位などの長周期成分⁸⁾や地盤震動成分のほか観測小屋の地震応答も含まれているとすれば、後者は地表記録の短周期成分から検出できると考えられる。そこで上述の微動観測結果をもとに、0.3秒以上の長周期成分を除去して地表記録の加速度時刻歴を時間に関して2回積分して変位時刻歴を求めた。図7は、図5に示した①~③のピークが出現する時刻前後での小屋の長軸方向と鉛直方向の面内(a)、短軸方向と鉛直方向の面内(b)、および水平面内(c)における変位粒子軌跡であり、矢印は軌跡の移動方向を示している。これらから、次の点が指摘できる。

- 1) ①と③のピーク発生時刻に、上下方向と長軸方向の水平変位が同時に反転している。
- 2) ②のピークでは、長軸・上下面内で水平変位の反転と上下変位の急増が同時発生している。
- 3) 4G近い加速度となった③のピーク時刻前後では、長軸・上下面内の変位が卓越している。

要するに図7には、上下動と水平動が連成し変位軌跡が「へ」の字を描くという、既往研究^{10),11)}によるロッキング振動の特徴との共通性が認められる。

3. 浮き上がりを伴うロッキングの水平振動台実験

3.1 実験目的

本論文で扱うロッキング振動とは、建物と地盤の連成振動であり、地盤の復元力により建物が水平回転軸を中心として回転振動する現象である。入力地震動が弱小な時には建物-地盤系は一定の固有周期で振動するが、入力地震動が強大になると建物基礎は地面から浮き上がり、基礎と地面は分離と接触(衝突)を反復する非線形応答を示すと予想される。

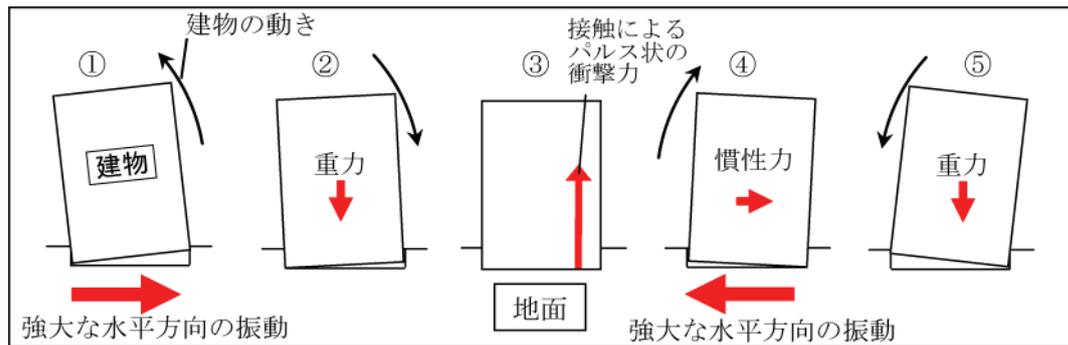


図8 強大な水平入力地震動による浮き上がりを伴うロッキング振動の模式図

簡単のため入力地震動として水平動だけを考えると、図8の模式図に示すように、強大な水平地震動が入力すると建物基礎の片側が浮き上がり、入力方向が逆転すると基礎の浮き上がり量は減少に転じ、やがて基礎底面と地面とが再接触する。この再接触の際に基礎は地盤から衝撃力を受けるので、建物では上向きのパルス状加速度が観測される。さらに入力振幅が増大すると建物基礎の反対側が浮き上がり、以後同様の運動を繰り返す。この一連の過程を水平振動台上で実現させ、本震の地表記録に見られたような正負非対称性の強い加速度時刻歴が生成されることを確認すること、および浮き上がりを伴うロッキング振動の基本的性質を解明することが本実験の目的である。このため実物と模型との相似則には、特に配慮しないで振動台実験を行った。

3.2 実験概要

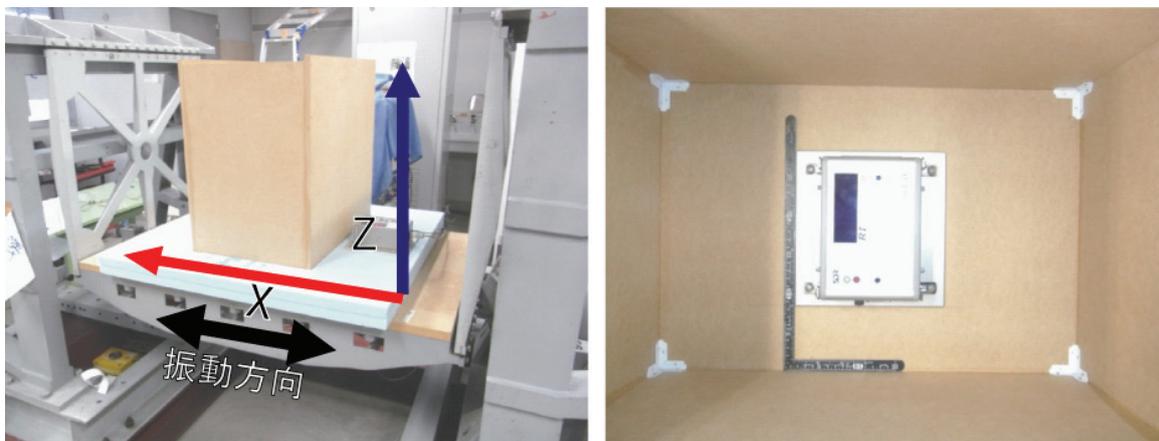
図9に示すように、振動台上に作成した地盤模型の上に箱形建物の模型を乗せ、水平一方向に正弦加振して建物-地盤系のロッキング振動を発生させた。加振振動数は、3~10Hzの範囲で1Hzごとに変化させ、建物模型の底部中央に小型地震計を設置して加速度時刻歴を観測・記録した。

建物模型の素材は厚さ1.5cmの木質ボードであり、寸法は幅60cm、高さ60cm、奥行き40cm、質量は約12kgであった。地盤模型の素材には、幅90cm、奥行き90cm、厚さ3cmのスタイロフォームを二枚重ねて使用し、上の一枚には深さ3cmの長方形の切り込みを作って建物模型の下端を埋め込んだ。

使用した小型地震計はSystem and Data Research社のAcCo-100で、水平加振(X)方向と上下(Z)方向の2成分の加速度を100Hzサンプリングで記録した。

3.3 実験結果

振動台の加振加速度が弱小なとき建物模型は地盤模型と一体となってロッキング応答を示すが、加



(a) 水平振動台上の建物-地盤の模型

(b) 建物模型内部と地震計

図9 振動台実験に使用した建物-地盤系の模型と地震計

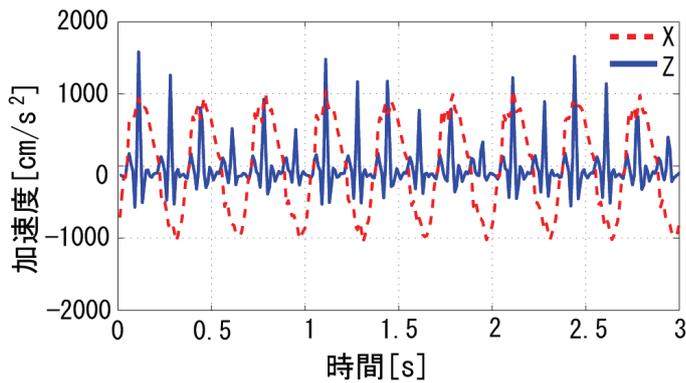


図10 最大加速度 900gal 入力時の水平方向 (X) と上下方向 (Z) の応答加速度

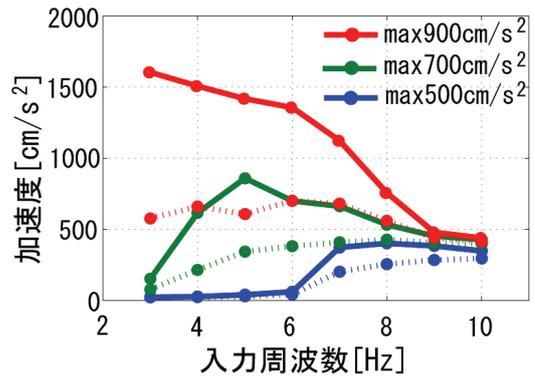


図11 上下方向の最大加速度 (太線) と最小加速度 (点線)

振加速度が増加すると建物模型は浮き上がりを伴うロッキング応答を始める。その段階では、次のような3種類のロッキング応答が観測される。すなわち、ある特定の振動数範囲では、建物模型は浮き上がりを伴うロッキング応答を示し、上下方向の加速度時刻歴には明確な正負非対称性が見られる。一方、この特定の振動数範囲よりも低振動波側では建物模型は浮き上がりを伴うロッキング応答をせず、逆に高振動数側では浮き上がりを伴うロッキング応答をするが上下方向の加速度時刻歴には明確な正負非対称性が見られない。

建物模型が浮き上がりを伴うロッキング応答をして、明確な正負非対称性が見られる場合の加速度時刻歴を図10に示す。同図中、破線は水平加速度を示し、ほぼ正弦的に振動している。実線は上下加速度を示し、水平加速度が最大 (正) か最低 (負) となった直後から続く比較的平坦な負の波形部分が建物模型の底面が浮き上がった状態 (図8の模式図の①～②および④～⑤) を、上向きのパルス状波形は建物模型と地盤模型とが接触 (衝突) した状態 (同図の③) に対応する。このような定常的なロッキング応答で上下加速度に明確な正負非対称性が表れる場合には、水平加速度波形の山と谷で上下加速度に上向き (正) のパルス状波形が見られるという特徴がある。

振動台の水平加振振幅を500, 700, 900 cm/s^2 の3段階で変化させると、建物模型の上下応答加速度の最大 (正) と最小 (負) の絶対値は、それぞれ図11の実線と破線のように変化した。同図は、実線と破線の開きが大きいほど、正負非対称性が著しいことを示している。したがって同図から、水平加振加速度が大きいほど、上下応答加速度は顕著な正負非対称性を示す振動数範囲が広がるとともに、上下応答加速度が最大となる振動数が低振動数側に移動することなどが指摘できる。

3.4 振動台実験のまとめ

水平振動台上で建物-地盤系のロッキング振動を発生させる模型実験によって、水平加振だけで建物が大きな上下応答加速度を示す場合があること、換言すれば地震観測記録の上下加速度が極めて大きくても必ずしも上下方向の入力加速度が大きいとは限らないことが検証できた。この点に関しては、既存の技術規定¹²⁾にも、基礎の浮き上がりに伴って鉛直動が誘発されることが指摘され誘発上下動と呼ばれている。

また本実験で、建物模型が浮き上がりを伴うロッキング応答をするときには、上下応答加速度の波形は上向きパルス状で正負非対称性が強く、上下と水平のピークが同時に生じるなど、本震の地表記録との類似性も確認された。

しかしこの定常的正弦波形による水平加振実験では、本震の地表記録に見られるような+4G程度の正の大加速度の再現はできなかった。さらに水平動の半周期ごとに上下動に正のパルスが発生するという本実験の特徴は、本震の地表記録に明瞭には認められない。これらの相違は、入力地震動が本実験とは異なり上下動を伴う非定常的な時刻歴であること、あるいは、実際の観測小屋の形状や支持条件が実験とは異なることなどに起因すると考えられる。そこで次に、実際の状況を再現する目的で、建物-地盤系の数値シミュレーションを行った。

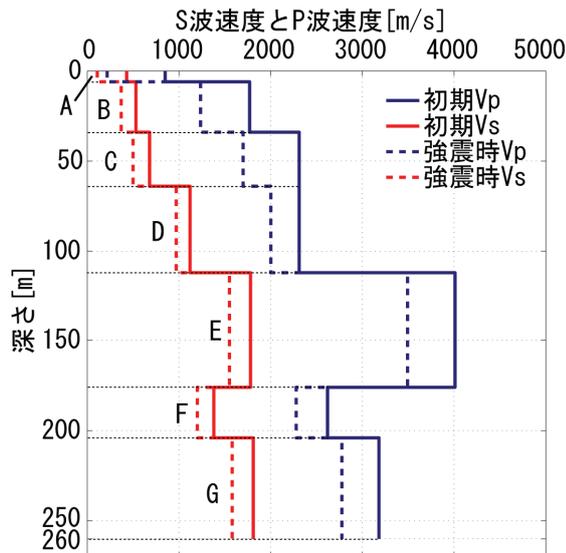


図12 表層地盤各層の伝播速度

表1 解析に使用した表層地盤各層の物性値

地層 記号	密度 (t/m ³)	深さ (m)	初期伝播速度		強震時 伝播速度	
			Vs(m/s)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Vp(m/s)
A	1.6	6	430	850	110	217
B	1.6	34	530	1770	370	1236
C	1.6	64	680	2310	500	1699
D	1.7	112	1120	2310	970	2001
E	2.0	176	1780	4010	1550	3492
F	1.8	204	1380	2620	1200	2278
G	2.1	260	1810	3180	1580	2776

4. 数値シミュレーションによる本震地表記録の再現

本章では、まず本震の地中記録から地表地震動を推定する。土質材料の動的なせん断剛性や粘性係数はひずみ依存性を示すので、本来はそれらを考慮した非線形地震応答解析によって本震の地表地震動を推定することが望ましい。しかし本研究の対象地盤に関しては非線形動的特性に関する情報は極めて限られているので、本研究では微小ひずみ時と大ひずみ時を区分し、それぞれのひずみレベルに対応する剛性を用いる線形解析で代用する。また、簡単のため表層地盤における水平動はSH波が、上下動はP波が卓越していると仮定し、地下260mで観察された地中記録を入力地震動として1次元重複反射理論により地表地震動を推定する。次に、その結果を踏まえ有限要素法を用いて観測小屋の非線形地震応答解析を行い、最終的に本震時の地表記録に見られる4G近い上下動加速度の再現を試みる。

4.1 1次元重複反射理論による地表地震動の推定

1) 初期伝播速度に基づく地表地震動の推定

一関西観測点におけるボーリングとPS検層の結果⁷⁾および現地の地形を参照し、水平成層地盤を想定して表1に記した初期伝播速度(図12の実線)を使用する。減衰特性は基本的に振動数依存型(福島・翠川, 1994)¹³⁾の散乱減衰を仮定し、AとBの地層に対しては $h = \alpha \times 0.079f^{0.46}$ 、C以深の地層に対しては $h = \alpha \times 0.12f^{0.51}$ (ただし、fは振動数であり、 α は1以上で減衰特性係数と仮称)とおいた。

全地層の減衰特性係数 α を1とした場合の地表地震動の解析結果と地表記録の比較を図13に示す。当初の小振幅部分では両者の類似性は比較的高いが、3秒以降の大振幅部分では差異が大きい。この差異は、大振幅に伴う地盤ひずみの増大により波動伝播速度が減少したことを示唆すると考えられるので、次に表層地盤の本震時における伝播速度を解析した。

2) 本震時の平均伝播速度解析

一関西観測点での地中と地表の強震記録から、2点間の平均S波速度Vs*を以下の方法(大町・田原, 2009)¹⁴⁾で推定した。この方法は、各波形のフーリエ位相から各振動数での位相差を求め最小2乗法で伝播速度を回帰するもので、次のように定式化される。

振動数fの正弦波が測点Pから測点Qへ平均速度Vで伝播するとき、QではPよりも位相が遅れる。PとQの距離をL、時間差を Δt 、位相差を $\Delta\theta$ とすると、

$$\Delta\theta = 2\pi f \Delta t, \text{ および } V = L / \Delta t \quad (1)$$

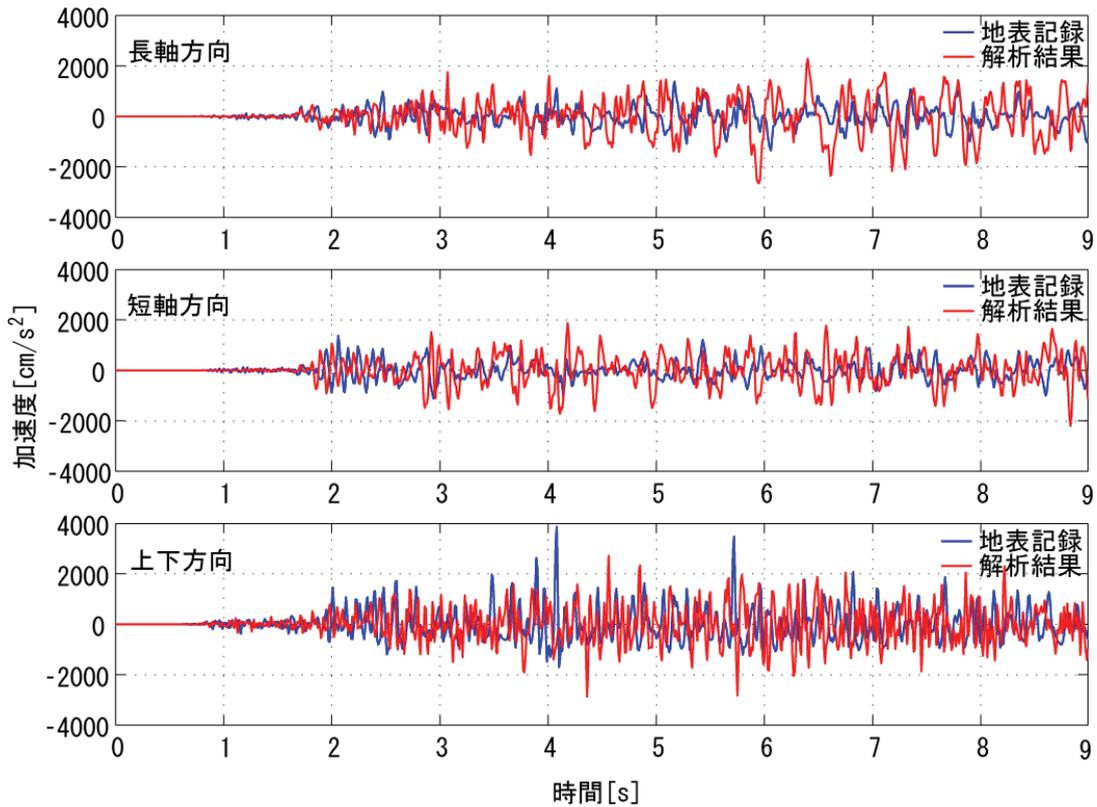


図13 初期伝播速度を用いた自由表面の解析結果と地表記録との比較

が成り立つ。したがって、PQ間の平均速度 V は次式から算定できる。

$$\Delta\theta = 2\pi fL/V \quad (2)$$

具体的には、地中と地表で観測された一対の水平加速度時刻歴のフーリエ位相スペクトルをもとに、横軸に振動数を、縦軸に位相差をとってプロットする。式(2)および既往研究¹⁴⁾によれば、原点と各点を結ぶ直線の傾きの逆数からS波の平均伝播速度 V_{s^*} が得られるが、プロットした各点はばらついてい

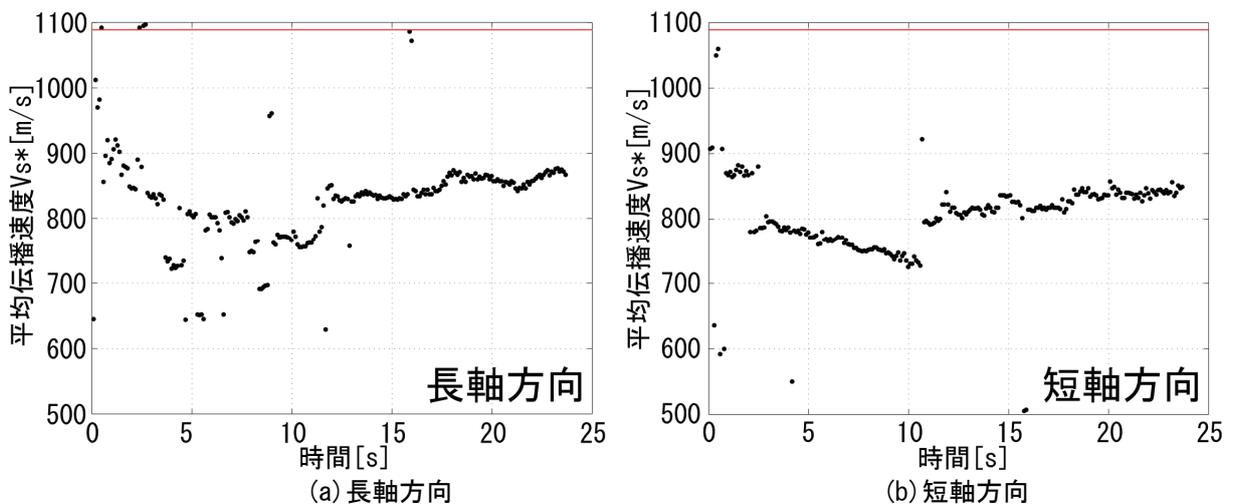


図14 本震時における平均S波速度 V_{s^*} の解析結果

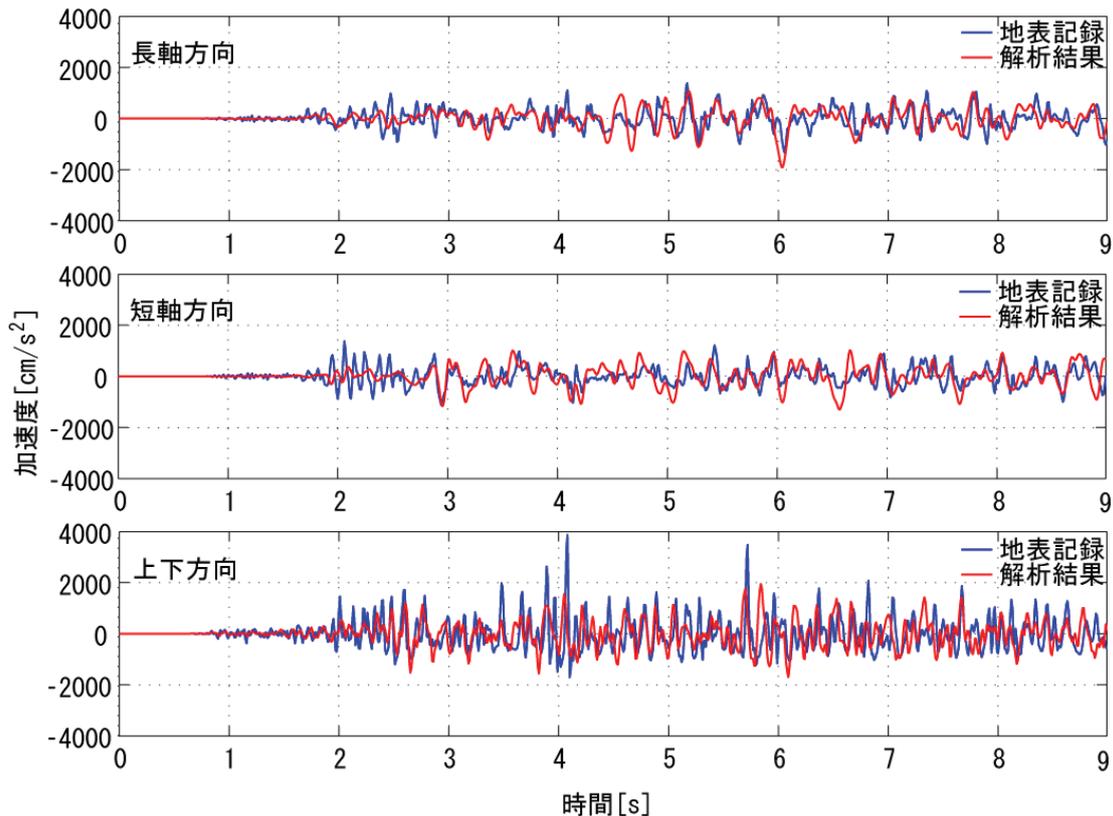


図15 強震時の物性値を用いた自由表面の解析結果と地表記録との比較

るので最小二乗法を適用して速度を算定する．時間ウィンドーを2.56秒として，本震時の非定常的な V_s^* を推定した結果を図14に示す．同図(a)は長軸方向の，(b)は短軸方向の水平動を用いて推定した結果である．本震の当初には赤線で示すPS検層結果（1080m/s）と同程度の V_s^* が得られているが，主要動時に V_s^* は顕著に低下し主要動終了後は徐々に回復している．全般に短軸方向の推定速度は比較的よくまとまっているが，長軸方向ではばらつきが大きい．特に主要動時にばらつきが大きいことは，主要動時に地盤震動以外の強いノイズが長軸方向成分に混入した可能性が高いことを示唆している．

図14において地表記録が約4G を示した4秒前後に着目すると，平均伝播速度 V_s^* は短軸方向では790m/s程度であるが，長軸方向では820～740m/sの範囲でばらついている．茂木ら(2009)¹⁵⁾は上記とは異なる方法(NIOM法)で解析し，主要動時の伝播時間として0.35秒程度を得ている．この伝播時間は， $260 \div 0.35 = 743\text{m/s}$ の平均伝播速度に対応する．これらのことから，図14に示した平均伝播速度の解析結果はおおむね妥当と考えられる．

3) 本震主要動時における自由表面加速度時刻歴の推定

本震時における各地層のS波速度は，上記の平均S波速度 V_s^* (820～740m/s) を制約条件として速度値を変化させ，地表での長軸方向水平加速度の解析波形と観測波形の相関が高くなるように最適値を推定した．地表記録の上下加速度が最大となる時刻前後，すなわち3.5～4.1秒間の長軸方向水平加速度に着目すると，周期0.3秒未満の短周期成分について最大相関を与える V_s^* は790m/sであった．この V_s^* は，図14(b)に示す短軸方向の平均S波速度 V_s^* ともよく対応する．また，P波速度は各層のS波速度とPS検層時のポアソン比から算定した．これらの手順による各地層の速度値の推定結果を強震時伝播速度として表1および図12に破線で示す．

強震時伝播速度を用いた地表地震動の解析結果と地表記録との比較を図15に示す．本解析では，各層の減衰特性係数 α は，解析対象区間での推定時刻歴の二乗和平均が観測値と等しくなるように試行的に決定した．解析対象区間を3.5～4.1秒としたときの各地層の α はAで5，Bで3，CとDで2，Eで深で1となった．着目した4秒前後に関しては，図13と比較すると両者の対応は3成分とも良好になっている．

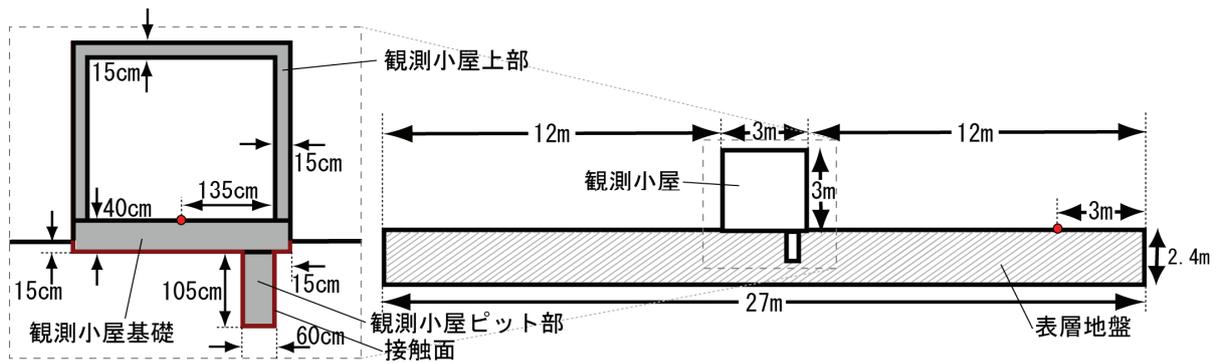


図 16 有限要素モデル概要図

表2 有限要素解析モデルの物性値

	密度 (t/m ³)	ポアソン比	ヤング率 (GPa)	粘着力	摩擦係数
観測小屋上部	0.85	0.20	6.8	—	—
観測小屋基礎	2.4	0.20	22	—	—
観測小屋ピット部	0.50	0.20	1.9	—	—
表層地盤	1.6	0.33	0.51	—	—
接触面	—	—	—	0	0.50

特に上下加速度については、解析結果と地表記録の位相はかなり良く対応しているが、解析結果の振幅は観測記録よりも明らかに小さく、3.5～4.1秒間における最大値は1550cm/s² (約1.6G) で観測記録の1/2以下である。

4.2 二次元有限要素法による非線形地震応答解析

1) 解析手法と解析モデル

地表記録が約4Gを示した時刻前後における観測小屋の地震応答を数値解析するために、小屋の浮き上がりや地盤との接触などの非線形地震応答解析が可能な汎用ソフトであるABAQUS/Standardの接触解析コード¹⁶⁾を用いた。本解析コードでは、クーロンの摩擦モデルが導入され、有限要素法でモデル化した弾性体同士の有限すべりと分離・接触・回転の解析¹⁷⁾が可能である。

数値解析モデルを図16に、材料物性等を表2に示す。この二次元解析モデルは、観測小屋の長軸断面と大きなコンクリートピットを簡略化表現したものであり、現地微動観測結果 (図6参照) をもとに表層地盤のせん断波速度を430m/sとすると観測小屋の固有周期が0.06秒になるように小屋上部の物性値を調整した。また表層地盤の物性値は、伝播速度が表1に示したA層の強震時伝播速度となるように設定した。接触面の物性に関しては不明の部分が多いが、観測小屋のコンクリート基礎が捨石上にある (図3参照) ことなどから、表2に示す物性値を使用した。本解析モデルでは、摩擦に起因する以外の履歴減衰は考えていない。モデルの境界条件としては、地盤の側面を自由、底面を固定とした。地震動入力は、小屋から9m離れた地表での応答波形が前述の重複反射理論で算出した自由表面波形と一致するように、地盤底面に2成分の地震動を与えた。

2) 解析結果

観測小屋底面中央での加速度時刻歴の解析結果を地表記録と比較して図17に示す。地表記録の上下加速度が最大を示した4秒前後では、解析結果と地表記録は、上下、水平とも比較的よく類似している。上下加速度の最大値と比較すれば、解析結果は3680cm/s²、地表記録は3860cm/s²である。

観測小屋の地震応答解析結果のうち、時刻4秒前後における応答状況を図18に示す。同図(a)は変形を30倍に誇張したスナップショットであり、小屋の左側が約7mm浮き上がった後、落下して小屋と地面が接触 (衝突) した瞬間に上向きに大きな加速度が観測される状況を示している。観測小屋床面中

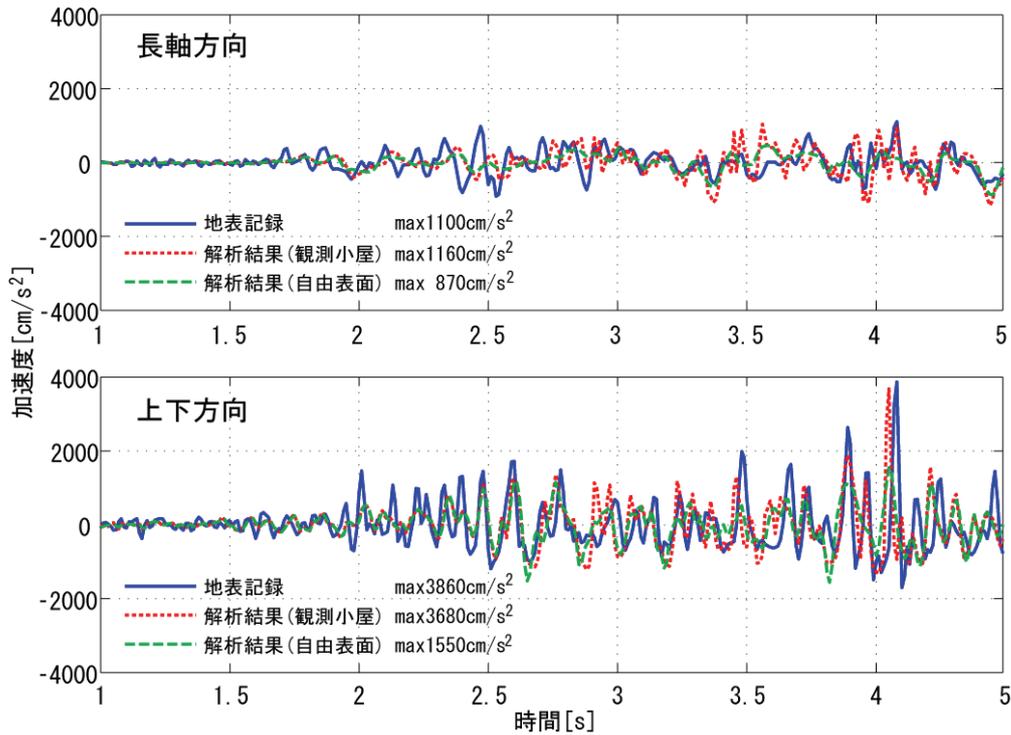
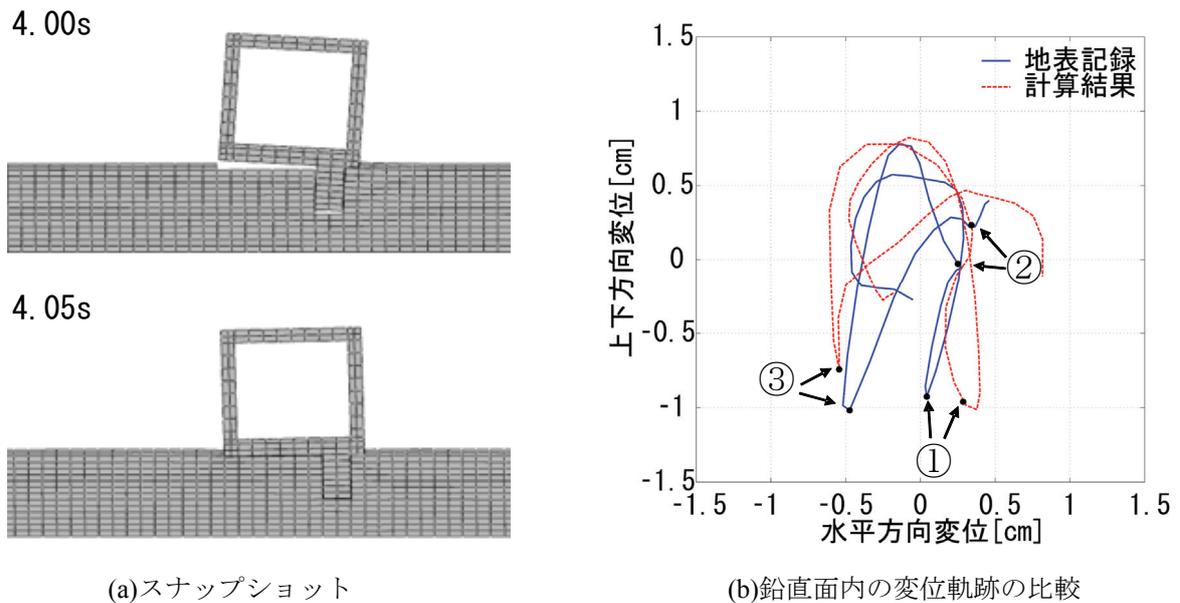


図 17 本震の強震時加速度時刻歴の比較



(a)スナップショット

(b)鉛直面内の変位軌跡の比較

図 18 2次元有限要素解析による観測小屋の地震応答

中央の鉛直面内での変位粒子軌跡と地表記録の変位粒子軌跡(図7(a)参照)の比較を、同図(b)に示す。図中①～③の時点は前掲図7と同様に、3つの上下パルスが発生した時点を表している。

図17の時刻歴で解析結果(観測小屋)と地表記録のピークに若干のずれが認められる。このずれは、解析では2次元モデルを使用し、与えた物性値の精度が十分でないなど、多くの要因によるものと考えられる。また既述(2章5節)のように、4G近い加速度となった③のピーク時刻前後では長軸・上下面内の変位が卓越していたことから、ここでは簡単のため長軸方向の2次元モデルを使用しているが、③時点で長軸・上下面内のロッキング振動が卓越したのは入力地震動の強さが同方向に偏向していたこ

とが主因と思われる(図7参照)。いずれにしても、このずれにより図18(b)の2つの変位粒子軌跡には全般に数mm程度の差が見られるが、①～③の時点で粒子軌跡が反転する状況はかなり類似している。

幅3mの観測小屋の左側が約7mm浮き上がる時、直径60cmの観測機器ピットは約1mm浮き上がる。最大でこの程度の浮き上がり量であれば、その影響が現地調査で観測小屋やピットの異常として見つからなかったことと符合すると思われる。

本研究では、有限要素モデルとして観測機器ピットが有る場合と無い場合の両方を使用した。ピットが無い場合には図17～18に示したような大きな上下動加速度が得られなかった。ピットの有無の比較解析から得られた、小屋の浮き上がり要因に関する考察を次に述べる。

観測小屋が図18(a)に示したように浮き上がるのは小屋のロッキング振動に起因しているが、観測機器ピットの有無によって浮き上がる状況は異なる。すなわち、ピットが無い場合は図8に示した模式図のような比較的単純な条件で小屋は浮き上がる。しかし、ピットが有る場合には小屋の底面が浮き上がろうとしてもピットの側面に摩擦力が作用し、側面に作用するせん断力がその摩擦力を超えた場合に初めて浮き上がりが生じる。この小屋が浮き上がる条件が満たされるのは、水平動によって小屋が左右のどちらかへ大きく変位する時であるので、水平動と上下動のピークはほぼ同時に発生する可能性が高いと考えられる。

以上より、地表記録に見られる上下加速度の最大パルスの発生状況はほぼ再現されたと考えられる。

5. 結論

2008年岩手・宮城内陸地震では、KiK-net 一関西観測点の地表で上下最大加速度が約4Gという極めて大きな強震記録が観測された。本論文では、この地表記録の意味や成因について、現地調査を含む情報収集や振動台実験、さらに各種数値解析などを行って検討した。その結果、以下の所見を得た。

- 1) 本観測点の地表記録には、上向きの加速度時刻歴がパルス状で正負非対称性が強いという特徴があり、本震時に地面が跳び上がったとの仮説が提唱されているが、本観測点近傍の地物にそのような形跡は確認されなかった。
- 2) この地表記録には、上記の上下加速度パルスと同時に水平加速度時刻歴に山や谷が認められることから、自由地盤での地震動とは異なるノイズ成分の混入が推測された。
- 3) 地表地震計の設置台は観測小屋と一体化され、いわゆる「縁切り」がされていないため、地震記録に観測小屋の地震応答が混入しやすい構造の観測点である。
- 4) 観測小屋は軟質の表層地盤上にあるためロッキング振動をやすく、強い水平動入力に対しては、基礎の浮き上がりを伴うロッキング応答が発生しやすい状況にある。
- 5) 観測小屋が基礎の浮き上がりを伴うロッキング応答をする時、基礎と地面とが再接触する際の衝撃力で、上向きのパルス状大加速度が発生することが振動台実験と数値解析で確認された。
- 6) 本観測点の地盤では、本震時に波動伝播速度の顕著な減少が確認された。これを踏まえて、地中記録をもとに自由地盤の地震応答解析を行った結果、地表記録に約4Gの上下加速度が見られる時刻における自由地盤の上下最大加速度は約1.6Gで、観測記録の1/2以下であった。
- 7) 上記表層地盤の地震応答解析結果をもとに、2次元FEMを用いて観測小屋の浮き上がりとの接触を含む非線形動的解析を行ったところ、地表記録と類似した地震応答解析結果が得られた。

以上、本論文ではKiK-net 一関西観測点の地表記録に見られる4G近い大きな上下加速度について、成因をさまざまな側面から実証的に解明するとともに再現を試みた。調査・解析面での制約から、地盤物性値や観測小屋の解析モデル化にかなり大胆な仮定や簡略化を導入したが、地表記録の本質部分はほぼ満足できる程度にまで再現できた。なお、地表記録の5～6秒にも上下方向にピークがある。このピークについても以上と同様なアプローチで再現可能と思われるが、所期の研究目的はほぼ達成されたと考えて本論文の対象外とした。

上記の所見や再現解析結果を総合的に勘案すれば、この地表記録は地盤震動ではなく観測小屋の非線形地震応答、具体的には地盤との分離・接触を伴うロッキング応答を記録している可能性が高いことが検証できたと考えられる。したがって、この地表記録を利用・活用するにはこれらの点を念頭において取り扱う必要があると思われる。また本地点で自由地盤の強震観測を行うためには、本論文

で指摘した観測小屋の影響を排除するような配慮，たとえば地震計の設置台と観測小屋との「縁切り」を十分確認することが望まれる．さらに，この地表記録と類似の特徴を示す強震記録が存在することが指摘されている^{3), 5)}ことから，それらに対しても本論文と同様な調査・検討がなされることが望まれる．

謝 辞

本研究に際しては，防災科学研究所のKiK-net観測記録を使わせていただいた．また同研究所の青井真氏，先名重樹氏には，KiK-net一関西観測点の観測小屋に関する種々の情報をご提供いただくとともに常時微動測定の際に便宜を図っていただいた．本論文中の有限要素解析には，東京工業大学学術国際情報センターが提供する各種サービスを利用した．末尾ながら，記して謝意を表する．

参考文献

- 1) Shin Aoi, Takashi Kunugi, and Hiroyuki Fujiwara :Trampoline Effect in extreme Ground Motion, Science, Vol. 322, October 2008, pp. 727-730
- 2)青井真，功刀卓，藤原広行，森川信之，鈴木亘：2008年岩手・宮城内陸地震の地震動の特徴—非対称性地震動とトランポリン効果—，主要災害調査 第43号，2009.12，pp.1-10.
- 3) Masumi Yamada, Jim Mori and Thomas Heaton :The Slapdown phase in High-acceleration Records of Large Earthquakes,Seismological Research Letters Volume80, No.4, July/August, 2009, pp. 559-564.
- 4)西島雅士，高島秀雄：岩手・宮城内陸地震の上下動波による地盤の跳び上りについて，日本建築学会大会学術講演概要集，2009年8月，pp.171-172.
- 5)日比野浩，前田寿朗，芳村智昭，倉内信幸，内山泰生：Kik-net日野における観測小屋の影響を考慮した鳥取県西部地震の基盤地震動評価 その1 微動観測および地震観測から評価した観測小屋の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，2003.9，pp.165-166.
- 6)芳村智昭，日比野浩，内山泰生，前田寿朗，倉内信幸，青井真：KiK-net日野観測小屋の振動特性，地球惑星科学関連学会2003年合同大会，2003.5，S046-012.
- 7) Wataru Suzuki, Shin Aoi and Haruko Sekiguchi: Rupture Process of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake Derived from Near-Source Strong-Motion Records, Bull. Seis. Soc. Am., Vo.100, No.1, 2010, pp.256-266.
- 8)青井真：2008年岩手・宮城内陸地震で4000ガル，地震ジャーナル46号，2008.12，pp.10-17.
- 9) 青井真：私信
- 10)田中英朗，前田郁生，森山健一，渡邊修二：基礎浮き上がり非線形特性の合理的評価法に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 1994，pp.1675-1682.
- 11)貫井 泰，今村 晃，宮本裕司，鈴木康嗣，柳下文雄：大地震入力に対する埋込み構造物の非線形挙動に関する研究（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，2008，pp.1049-1058.
- 12) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規程，2008，JEAC4601-2008.
- 13)福島美光，翠川三郎：周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} とそれに基づく地盤増幅率の評価，日本地震工学会論文集，第460巻，1994，pp.37-46.
- 14)大町達夫，田原徹也：直下地震の観測記録に基づくロックフィルダムの非線形地震応答特性，第54回地盤工学シンポジウム，平成21年度論文集，2009，pp.243-250.
- 15)茂木秀則，Shrestha Santa Man，川上英二，川村潤也：KiK-net一関西観測記録から推定した岩手・宮城内陸地震とその前後のS波伝播時間の経時変化と地盤の非線形挙動，日本地震工学会論文集，第9巻，第5号，2009，pp.44-56.
- 16) Simulia: Abaqusオンラインドキュメンテーション: Version 6.7, 2007.
- 17) 川面恵司，横山正明，渡邊隆之，岡本紀明，宇都宮登雄，長谷川浩志：有限要素法のモデル化技術と応用解析，養賢堂，2007.

(受理：2010年6月29日)

(掲載決定：2010年12月20日)

Estimated cause of extreme acceleration records at the KiK-net IWTH25 station during the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, Japan

OHMACHI Tatsuo ¹⁾, INOUE Shusaku ²⁾,
MIZUNO Ken-ichi ³⁾ and YAMADA Masato ⁴⁾

1) Member, Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

2) Member, Tokyo Institute of Technology,

3) Nonmember, Former Graduate student, Tokyo Institute of Technology

4) Nonmember, Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

ABSTRACT

During the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in Japan ($M_f=7.2$), extremely high accelerations were recorded at the KiK-net IWTH25 (Ichinoseki-nishi) station. The peak acceleration in the vertical component of the surface record was about 4 g where g is acceleration due to gravity, and the upward acceleration in the surface record was much larger than the downward acceleration. Some researchers have suggested that the ground surface was tossed into the air like a body on a trampoline. However, additional features found in the surface record suggest rocking motion accompanied with downward impact of the station with the ground. For example, there are many vertical peaks that can be found to occur at the same time as the horizontal peaks. After obtaining information about the station, in-situ investigations, shake-table experiments, and numerical simulations were conducted to determine the fundamental characteristics of the rocking motion and to reproduce the acceleration time histories of the surface record by using the bore-hole record at a depth of 260 m as the input motion.

Prior to the numerical simulation, the wave velocities of subsurface layers were evaluated from Fourier spectra of both records, which showed that the velocities were reduced considerably during the main shock. A 2-D FEM code capable of handling separation and impact between the elements was used for the numerical simulation. Simulation results are shown in Figs. 17 and 18 indicating the impact between the IWTH25 station and the ground at around 4 sec when the acceleration in the vertical direction was about 4 g. Three kinds of acceleration time histories are shown with fairly good agreement between the simulated and observed time histories, suggesting the influence of the station is included in the record. It is also indicated that the vertical acceleration at the free surface without the influence of the IWTH25 station is about 1.6 g.

Key Words: the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, KiK-net IWTH25 Ichinoseki-Nishi, Rocking motion with uplift, FEM