自由地盤の強震観測に及ぼす地震計設置台座の影響

Seismic instrumentation for the observation of strong motion in the free-field

三神厚*,神山眞**,澤田勉***,松田敏和****

Atsushi Mikami, Makoto Kamiyama, Tsutomu Sawada and Toshikazu Matsuda

* 博(工), 徳島大学助手, 工学部建設工学科(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)
** 工博 東北工業大学教授, 工学部環境情報工学科(〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1)
*** 工博 徳島大学教授, 工学部建設工学科(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)
**** 徳島大学大学院博士前期課程学生(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

This paper discusses the seismic instrumentation for the strong motion observation in the free-field. A seismometer for the free-field observation is usually mounted on a concrete block whose motion deviates from that of the free-field ground since the block has a different level of stiffness and mass from the soil. Thus, the seismometer mounted on the concrete block may not correctly observe the free-field motion. We computed the concrete block / free-field motion transfer function in the frequency domain for various possible configurations of the block. The results indicate that the instrumentation on the concrete block provides reasonable free-field motion as long as the block is totally embedded and the embedment depth is less than 1 meter. If a portion of the concrete block projects above the ground surface, the portion will contribute to the rocking motion of the block, thus, the portion should be small in dimension and as light-weight as possible.

Key Words: Instrumentation of seismometer, free-field motion observation キーワード: 地震計の設置,自由地盤震動の観測

1.はじめに

強震観測は、その目的に応じ、構造物、自由地盤地表、 地中など様々な箇所で行われている.このうち、自由地 盤で観測された地震動は、計測震度を算定するのに用い られたり、あるいは距離減衰式を算出するためのデータ ベースを構成するなど、非常に重要なものである.その ため、できるだけ正確に当該地点における地盤の揺れを 捉える必要がある.ところが、強震計や震度計が建物の 1 階あるいは地階に設置されているような場合もあり、 いわゆる「自由地盤」の条件を満たしていないケースも 多く見られる.地震動の入力損失の影響で、建物1階に おける地震動が自由地盤のそれに比べ低減されたもの になっていることについては、実地震観測記録に基づい て示されている^{例氏ば、1,2)}.

こうした中,土木学会地震工学委員会の震度計の設置 促進と震度データの利用高度化に関する研究小委員会 (委員長=神山眞,東北工業大学教授)では,平成16年か ら震度計の設置法,計器の維持管理,取得データの高度 利用化など,様々な検討が行われている.また,気象庁 からも正確な震度観測を行うための指針が出されてお り³⁾, これまでの地震観測の問題点を整理し,より正確 に震度を計測しようとする動きがある.震度計による震 度情報は,地震災害の軽減のための様々な初期活動を進 める上で極めて重要な一次情報となる.そのためにも, 正確な震度を算定することが喫緊の課題となっている.

ところで,屋外の地表に置かれ,自由地盤の地震動を 観測しようとする強震計は,通常,コンクリート製の台 座の上に置かれることが多い.普通コンクリートは,そ の重量や剛性が地盤に比べて大きいため,地盤中に埋設 された場合,地震時において地盤と異なる動きをする. いわゆる,地盤との相互作用が生じる.そのため,自由 地盤の地震時挙動を正確に捉えていない可能性がある. 著者が国内の大手強震計メーカー数社に問い合わせた ところ,メーカーとして特に設置マニュアルを用意して 設置方法を指導しているというようなことはなく,設置 者側にその方法が委ねられているのが現状である.その ため,自由地盤における強震観測記録には地震計設置方 法の違いによる顕著な誤差が含まれている可能性があ る.



図 - 1 地震計の設置台座

| | Density | Shear wave vel. Vs | Poisson's | Damp. |
|----------|----------------------|--|-----------|-------|
| | (kg/m ³) | Stiffness E | ratio | ratio |
| Normal | 2300 | Ec=30 (kN/mm ²) | 0.2 | 0.0 |
| concrete | | | | |
| Light | 1700 | Ec=15 (kN/mm ²) | 0.2 | 0.0 |
| weight | | | | |
| concrete | | | | |
| Soil 1 | 1800 | Vs=100 (m/s) | 0.4375 | 0.05 |
| | | <i>E</i> =0.05175(kN/mm ²) | | |
| Soil 2 | 1800 | Vs=200 (m/s) | 0.4375 | 0.05 |
| | | <i>E</i> =0.207(kN/mm ²) | | |
| | | | | |

表 - 1 コンクリートと地盤の物性 (標準値)

K-NETの地震計基礎については,観測記録や詳細モデ ルを用いて,その影響を検討した安達ら⁴⁰の研究がある. 本研究では,地震計を設置するためのコンクリート台座 の剛性,質量,サイズ,設置位置,地盤の剛性やポアソ ン比などが自由地盤表面での強震観測に与える影響に ついて,特に,コンクリート台座と地盤の動的相互作用 という観点から検討を行い,今後,強震観測の精度向上 のための有益な情報提供を行うものである.

2. 検討方法

2.1 解析モデル

図 - 1 に示すように,直方体の台座ブロックが地盤の 地表付近に埋設されている状態を考える.埋設が浅い場 合には,台座が地盤と剥離する場合も考えられるが,こ こでは地盤との剥離の影響は考えない.

コンクリートでできた地震計の台座は,その剛性や質 量が地盤と異なるため,地震時において地盤と異なる挙 動を呈する.剛性の違いによってコンクリート台座と地 盤が異なって揺れる現象をキネマティック相互作用,質 量の違いによる現象を慣性力相互作用と呼ぶ.本論文で は,これら剛性,質量の違いによるコンクリート台座と 地盤との相互作用に加え,台座サイズや設置位置による 影響についても検討し,強震観測に与える台座設置環境 の影響について考察を行う.コンクリートと地盤に対し て用いた物性の標準値を表-1にまとめる.

2.2 解析方法

解析にあたっては,有限要素解析汎用プログラム SASSI⁵⁾を用いた.台座は8節点ソリッド要素でモデル化 した.メッシュサイズは25cmである.地盤は均質半無 限一様地盤とし,層厚25cm,10層モデルとした.入射 波は,SH波の鉛直入射とした.メッシュサイズは入射波 の波長に比べて十分小さい.検討結果は,台座の強震計 設置面における震動と自由地盤震動の比をとった台座/ 地盤の伝達関数で表現する.したがって,この値が1に 近いほど自由地盤における地震動を精度良く観測でき ることになる.

3. 検討結果

3.1 台座の剛性の違いによる影響

まず,基礎的検討として,台座の剛性が地盤のそれと 異なることによる影響を調べる.ここでは,台座上面の 高さが地表面と等しく, B=D=H=1(m), T=0(m)の場合を 考える.台座の密度とポアソン比が一様で,かつ地盤の 密度,ポアソン比に等しいものとし,台座の剛性のみを 変化させ,伝達関数の変化を考察する.

結果を図 - 2(a), (b)に示す.縦軸は台座/地盤の伝達関数 で,横軸は周波数(Hz)である(以下,同様である).(a)と(b) では地盤条件が異なり,(a)に比べ(b)の方に硬質地盤を設 定している.図より台座の剛性が地盤に比べて十分大き いことにより,台座/地盤の伝達関数を押し下げる効果が あることがわかる.この効果は,台座の剛性が土に比べ てある程度大きくなると頭打ちになる.台座/地盤の伝達 関数が1より小さくなることは,地震動を過小評価する ことに相当する.台座にコンクリート相当の剛性を仮定 した場合,Soil1では,20Hzで約15%,自由地盤震動を 過小評価する効果がある.台座の剛性が地盤と等しい場



図 - 2 剛性の影響

合には, 伝達関数はすべての周波数帯で1になる.地盤 条件を Soil 2とし, 硬質地盤を仮定した場合, 20(Hz)で約4%程度, 自由地盤地震動を過小評価している.

3.2 台座の質量の違いによる影響

次に,台座の質量が地盤のそれと異なることが台座/ 地盤の伝達関数に与える影響について検討する.3.1 で 行った検討と同様,台座上面が地表面と等しく(T=0m), B=D=H=1(m)の場合を考える.ここでは,台座の剛性, ポアソン比を地盤と等しくし,質量のみ変化させて,台 座の質量が自由地盤地震動観測に与える影響を考察す る.

図-3より,台座が地盤に比べて質量が大きいことで, 台座/地盤の伝達関数を押し上げる効果があることがわ かる.コンクリート相当の質量を仮定した場合には,Soil 1,20Hz で約5%,自由地盤震動を過大評価している. 地盤が硬い場合(Soil2),台座と地盤の質量差が台座/地盤





図-3 質量の影響

の伝達関数に与える影響が 20Hz で約 2%と小さくなっている.

3.3 実際のコンクリート台座に近い物性を用いた場合

ここまでの検討から,地震計の台座が地盤に比べて硬 い場合,台座/地盤の伝達関数は右下がりのカーブとなり, また,台座が地盤に比べて重い場合,台座/地盤の伝達関 数は右上がりのカーブとなることがわかった.本節では, 実際の普通コンクリートに相当する剛性,質量を仮定し た場合の伝達関数について検討する.あわせて,1つの 可能性として,軽量コンクリートを用いることを仮定し, 剛性,質量を設定した場合について,その伝達関数を検 討する.

図 - 4 に結果を示す. 普通コンクリートでできた台座 が Soil 1 に埋設されている場合, 20Hz で約13%程度,自 由地盤震動を過小評価する結果となった. 一方, Soil 2 に埋設されている場合には, 20Hz で2-3%程度,自由地



図 - 4 普通コンクリートと軽量コンクリートの伝達関数

盤震動を過小評価する結果となった.これは,コンクリ ートの剛性が基礎/地盤の伝達関数を押し下げる働きを し,質量が押し上げる働きをしたことにより,それらの 影響が相殺されたためである.軽量コンクリートの場合 には,剛性は普通コンクリートの約半分であるが,図-2から伝達関数を押し下げる働きは,普通コンクリート と同程度である.一方,軽量コンクリートの質量は地盤 とほぼ同じであるため,伝達関数を押し上げる働きが期 待できない.このため,Soil1を仮定した場合,20Hzで 約16%,自由地盤震動を過小評価する結果となった.こ のことは,軽量コンクリートが普通コンクリートに比べ, 剛性,質量とも地盤の物性に近いからといって必ずしも 台座に適しているわけではないことを意味している.

3.4 台座質量の違いが位相差に与える影響

ここまでの検討では,台座/地盤の振幅比(伝達関数の 絶対値)について検討を行ってきたが,台座上に置かれた 強震計が自由地盤の地震動を観測するためには,台座と 自由地盤間の位相差についても検討しておく必要があ る.

図 - 5 は,台座の質量を変化させた時の台座と自由地 盤間の位相差を示す.ここでは,台座の質量の影響を確 認するため,極端に大きな質量を設定している.

Soil 1, Soil 2 とも, 普通コンクリートの質量の2倍程 度までは, ほとんど位相差の影響はない. 仮に, コンク リートの質量を通常の5倍あるいは10倍にした場合に は, 地盤が軟弱なほど, 顕著な位相差の影響が現れるこ とがわる.

以上の検討結果から,普通コンクリートを用いる場合 には,台座と地盤間で位相差の影響はほとんどないもの と考えられるので,以降の検討では台座/自由地盤の伝達 関数の振幅比(絶対値)に注目して検討を行う.



図 - 5 台座質量が位相差に与える影響

3.5 地盤のポアソン比の違いによる影響

通常の地盤では,地下水の影響もあり,地盤のポアソン比については,表-1 で仮定したような値になるが,中には,ポアソン比の値が小さいサイトもある.ここでは,ポアソン比を0.33 及び0.4375 として,図-4の普通コンクリート台座を仮定した場合について検討を加え,ポアソン比の影響を検討する.

図 - 6 に結果を示す. Soil 1, Soil 2 とも, 地盤のポアソン比の違いによる台座/自由地盤の伝達関数への影響はほとんどない.よって,以下の検討では,ポアソン比として, 0.4375 に固定して検討する.

3.6 台座サイズの影響

ここまでの検討では,地震計を設置する台座の大きさを B=D=H=1(m)の立方体であると仮定してきた.本節では,縦長あるいは横長の直方体台座を考え,そのサイズの影響について検討する.ただし,断面形状は正方形と



| 乷 | - 6 | 地盤のポアソン比の影響 |
|---|-----|-------------------|
| ᅀ | - 0 | ・心帯マノハノノノノノレレマルショ |

| 表 - 2 | サイズの影響 | S |
|--------|--------|-----|
| 18 - 2 | | e . |

| パターン | B=D (m) | H (m) |
|------|---------|------------------|
| 1 | 0.5 | 0.5/0.75/1.0/1.5 |
| 2 | 1.0 | 0.5/0.75/1.0 |

する.サイズの影響を検討するにあたり,表-2のパタ ーンを考えた(T=0m).なお,台座の物性として,普通コ ンクリートに相当する値を用いた.

図 - 7 にパターン 1(縦長)の結果を示す. Soil 1, Soil 2 とも, B:H=1:2 までは伝達関数の値は1 に近い値となっ ており, 20Hz におけるずれは最大でも4%程度以内であ る.ところが, B:H=1:3 の場合, Soil 1 において,急激に 伝達関数が1からずれるようになる.これは,縦長のコ ンクリート台座がロッキングする影響である.Soil 1 と Soil 2 を比較すると,すべてのサイズにおいて硬質地盤 である Soil 2 の方が台座/地盤の伝達関数が1 に近くなっ ている.また, B:H=1:3 程度になると,ロッキングの影 響が急激に増加するので注意が必要である.

図 - 8 にパターン 2(横長)の結果を示す.この場合もや はり硬質地盤である Soil 2 を仮定した場合の方が伝達関 数は1に近くなっている.縦長の台座に見られたような 顕著なロッキングは見られない.Soil 1 については,特 に,台座の厚みを小さくすることで,伝達関数の過小評 価の程度が改善されている.しかし,横長の場合で十分 な埋設がない場合には,台座底面の剥離などが考えられ るので注意が必要である.

3.7 台座設置位置の影響

ここまでは,コンクリート台座の上面が地表面と同じ 高さであるとして検討を行ってきたが,実際には,大雨 によって地震計や震度計が浸水しないよう,台座コンク







図 - 7 台座サイズの影響(縦長)

リートの上面を地表より 20~30cm 程度高く施工して, そこに地震計を設置することが行われている.その場合, 台座の地上突出部では側方地盤の支えがなくなるため, 台座コンクリートが大きくロッキング震動する恐れが ある.本節では, *B=D=50(cm)と B=D=1(m)*の場合につい て, 台座上面を地表より 25cm 高く設置した場合の,台 座/地盤の伝達関数を検討する.

図 - 9(a), (b)にそれぞれ Soil 1, Soil 2 についての結果を 示す.図 - 9(a)を見ると,突出部がある場合とない場合 (T=0m)を比べると,周波数が高くなるほど,顕著な突出 部の影響が現れていることがわかる.埋設深さを深くす ると(E=1.25m),さらにロッキングの影響が強く現れ,逆 効果であることもわかる.

地盤条件を Soil 1 から Soil 2 に変えてみると, 突出部の影響は大幅に改善されるものの, やはり, Soil 1 の場合と同様の傾向が見られた.

図 - 10(a), (b)に B=D=1(m)の場合についての検討結果 を示す.図 - 9 との比較から,台座の幅を大きくとるこ とで地上突出部の影響は小さくなっていることがわか





る.これは台座の横幅が大きくなったことにより,ロッ キング震動の影響が小さくなったためと思われる.また, 図-10(a),(b)の比較から,図-9と同様,硬質地盤の方 が台座の影響が少ないこともわかる.

3.8 台座の地上突出部分を小さくした影響

以上見てきたように,コンクリート台座を地上に突出 させると,その慣性力の影響から台座/地盤の伝達関数へ の影響が非常に大きいことがわかった.また台座の形状 を縦長にすると,ロッキングの影響が顕著になることも わかった.そこで,図-11に示すような台座方式を考え る.地上突出部分を $B_i=D_i=50$ (cm), $H_i=25$ (cm)の軽量コ ンクリートとし,地下埋設部分を $B_i=D_i=1.0$ (m),埋設深 さH=1.0(m)またはH=75(cm)の普通コンクリートとして, これまで同様 2種類の地盤条件(Soil 1, Soil 2)について, 台座/地盤の伝達関数を考察する.

解析結果を図 - 12 に示す .いずれの場合も地上突出部







図 - 9 台座地上突出部の影響(B=D=0.5m)

のサイズ,質量を小さくしたことにより,台座/地盤の伝 達関数は 0~20(Hz)程度の周波数帯で1に近い値となっ た.誤差は最大 2%程度であり,自由地盤震動の観測に 十分耐える仕様であると思われる.Soil 2 では,埋設深 さをやや浅くして H=75(cm)にした場合の方がよりよい 結果となった.地盤が硬質(Soil 2)である場合の方が台座 /地盤の伝達関数が1に近くなるのは,すべてにおいて言 えることである.

4. まとめ

本研究では自由地盤震動を捉える目的で自由地盤の 地表面付近に設置される地震計の設置台座の仕様につ いて,その剛性,質量,サイズ,設置位置など,様々な 条件を考慮し,検討したものである.検討にあたっては, 台座/地盤震動の伝達関数を用い,これが1に近いほどそ の設置環境において自由地盤の地震動を精度良く観測 できるものと考えた.得られた結果は以下の通りである.



図 - 10 台座地上突出部の影響(B=D=1.0m)

- (1) 台座の剛性は、台座、地盤の伝達関数を下げる働きがあり、台座の質量は伝達関数を押し上げる働きがある・普通コンクリートでは、剛性、質量とも地盤のそれらの値より大きいことから、押し上げ、押し下げの両方が作用し、結果として、それぞれの誤差を相殺する働きがある。
- (2) 軽量コンクリートは普通コンクリートに比べ,質量, 剛性とも地盤のそれらに近いが,質量の違いによる 伝達関数の押し上げの効果が期待できないことか ら,普通コンクリートで作られた台座に比べ,軽量 コンクリートで作られた台座が精度良く自由地盤 の地震動を観測できることにはならない.
- (3) 縦長の台座では、ある埋設深さを超えると急激にロッキングの影響が生じるので、縦長の台座を用いる場合には、ロッキングに注意する必要がある。
- (4) 地盤が硬質であるほど、台座・地盤の伝達関数は1に
 近づき、精度の良い自由地盤地震動の観測が期待できる。



図 - 11 地上突出部のサイズ,質量を小さくした台座



図 - 12 台座の地上突出部を小さくした結果

(5) 台座上面を地上に突出させると、その慣性力の影響により台座/地盤の伝達関数は1から大きくずれるようになる.そこで、地上に突出させる部分のサイズを小さくし、かつ、軽量の材料を用いることにした結果、台座/地盤の伝達関数の値は考慮した周波数帯で1に近い値となり、自由地盤における地震動を精度良く観測できることを示すことができた.

本研究における以上の検討結果は,地震計設置台座の みの影響を検討したもので,理想化した解析モデルを用 いており,この範囲においては,最終的に得られた図-11のモデルの計算結果では,最大3%程度の誤差が認め られるだけであった.しかし,実際には,埋め戻し土, 台座基礎と地盤の剥離,施工精度,地震計の周波数特性, 保護カバーの影響など,本研究で検討していない要因に よる影響が強く現れる可能性がある.K-NETに限定した もので,かつ,図-11のモデルとは異なるが,前述の諸 要因が反映された安達ら⁴の観測記録からは,20Hzで約 30%程度,地震動を過大評価する結果が得られており, 本研究においても,今後,これらの諸要因を考慮した解 析が必要である.

参考文献

- 1) 神山眞,長内優也,松川忠司:地盤-建物系のアレー観 測による計測震度の変動,土木学会地震工学論文集, CD-ROM, Vol.28, pp.1-6, 2005.
- A. Mikami, J. Stewart, F. Ostadan and C. Crouse: Representation of ground motion incoherence for the analysis of kinematic soil-structure interaction, Proceedings of the 8th National Conference on Earthquake Engineering, EERI, CD-ROM, No.1071, 2006.
- 3) 気象庁:正確な震度観測を行うために (http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/leaflet/shindo/index.html), 2005.
- 4) 安達直人,池浦友則,内山正次,植竹富一,菊池政智: 地震動記録における地震計基礎の影響,日本建築学会構 造系論文集, No.544, pp.61-67, 2001.
- J. Lysmer, F. Ostadan, C. Chin: SASSI2000 User's manual, Geotechnical Engineering Division, Civil Engineering Department, University of California, Berkeley, CA, 1999. (2006年9月11日受付)