

液状化領域—非液状化領域間における 動的相対変位の解析

DYNAMIC RELATIVE DISPLACEMENT BETWEEN LIQUEFIED AREA AND NON-LIQUEFIED AREA

片田 敏行^{*} 富山 哲次^{**} 東山 晃^{**}

By Toshiyuki KATADA, Tetsuji TOYAMA and Akira HIGASHIYAMA

In Niigata Earthquake (1964.6.6., M=7.5) and 1983 Nipponkai-Chubu Earthquake (1983.5.26., M=7.7), the saturated sandy ground liquefied owing to a strong ground motion. As a result, the damage to the buried pipes that are used for city water and drainage, gas and etc., is reported.

Notwithstanding the fact that a liquefaction of surface ground damages the buried pipes, the dynamic behavior of the ground in a liquefaction process is not so clear. Especially, in the case of the buried pipes, it is important to reveal the dynamic relative displacement between the two points on the surface ground.

Therefore, by use of on-line experimental method, we analyzed the dynamic relative displacement between liquefied area and non-liquefied area of sandy ground. As the results of the analysis, we obtained the characteristics of the dynamic relative displacement of the liquefying sandy ground.

1. はじめに

ライフライン施設は、都市機能を維持する上で大変重要な役割をはたしている。ライフライン施設である上下水道管、ガス管、通信ケーブルなどは、構造物として地中埋設管の形をとっていることが多い。その埋設管路は、一般に平面的な広がりを持つ網状の構造物と考えることができ、そのうえ埋設される場所によって地盤状態、埋設環境などは異なった様相を示している。また、地中埋設管は管路全体が周辺の地盤に支持されている。それゆえ、地中埋設管の耐震性を検討する際には、地盤の振動特性が最も重要な事項の一つであると考えられる。

そこで、地中埋設管の被害に及ぼす地盤の影響を明らかにするために、過去の地震における地中埋設管の震害調査報告をもとに、地盤状態に着目して震害原因を調査してみると次のようなことが言える。それは、管路の埋設されている地盤が軟弱である沖積層、埋立地などといった地域では、地盤変状による埋設管の被害が多く、逆に地盤が良好な洪積層、地山などといった地域では、地盤変状が発生しにくいために地中埋設管の被害は比較的軽い。また、沖積層と洪積層、埋立地と地山といった地盤の剛性の変化している境界付近では、埋設管の被害が大きい。さらに、砂層地盤では液状化現象が発生することにより埋設管の被害が大きくなる。すなわち、地盤の剛性が大きく変化し、地震時に液状化現象が起こった地域あるいはその付近で埋設管の被害が生じている。

* 工博 武蔵工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒158 世田谷区玉堤1-28-1)

** 武蔵工業大学大学院生 大学院工学研究科 (〒158 世田谷区玉堤1-28-1)

したがって、地盤の液状化による埋設管の被害が大きかった日本海中部地震を例に挙げる。図-1は日本海中部地震の時の能代市内における地盤の液状化発生地域、ガス導管の敷設状況とガス導管被害箇所である^{1)、2)、3)}。これを見ても分かるように液状化現象は市内一面に生じたのではなく、地形、地質に影響を受けて、局部的に発生している。このような地盤状態の中に埋設されているガス管、上水道管、下水道管には亀裂、屈曲、破断などの被害が生じている。その被害箇所を見ると、液状化した地域あるいは液状化した地域と液状化しない地域との境界付近に埋設管の被害が見られる。この埋設管被害の原因としては次の2つが考えられる。その1つは、最近取り上げられている、液状化した砂層地盤のすべりによる永久変位である。もう1つは、液状化した地域と液状化していない地域の間で起こる動的相対変位である。1つめに挙げた永久変位については、久保・浜田によって新潟地震と日本海中部地震における埋設管被害と地盤の永久変位との関係を明らかにしている^{4)、5)、6)}。また、北浦⁷⁾によっても検討され、地盤の永久変位が埋設管被害の原因として指摘されている。もう1つの動的相対変位については、次章で述べるが、砂箱を用いた模型実験により埋設管被害の原因となりうる可能性が指摘されている¹⁸⁾。

しかし、ガス管や水道管などの地中埋設管は埋設距離が極めて長く、そのため地盤状態は管軸方向において変化する。それゆえ、液状化現象が起こるとしても管軸方向で液状化程度の違いが予想され、この液状化程度の差異により生じる繰り返しの動的相対変位も埋設管被害の原因の1つになる可能性がある。すなわち、この液状化程度の異なる付近で地盤に大きな相対変位が生じ埋設管に悪影響を与えるかもしれないからである(図-2)。

そこで本研究では、液状化領域-非液状化領域の境界付近においてどの程度の動的相対変位が生じるかを明らかにしようとしたものである。

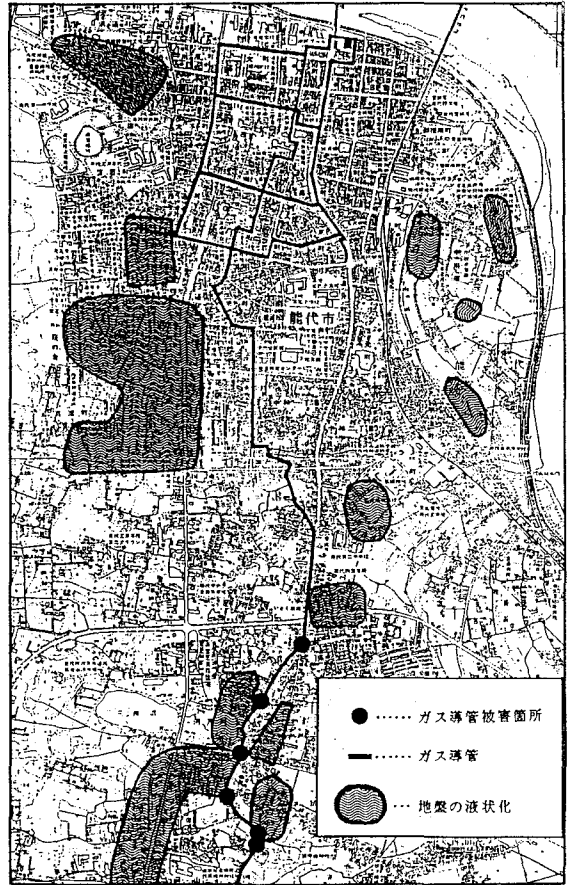


図-1 日本海中部地震における能代市の液状化分布とガス導管被害箇所^{1)、2)、3)}

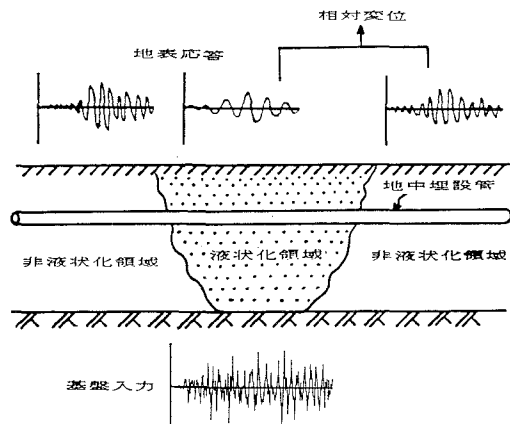


図-2 液状化-非液状化領域間における振動特性の違い

2. 表層地盤における動的相対変位および埋設管に与える影響の解析例

2-1. 弾性波動論に基づく解析例

地中埋設管は管長が長いので、波動として表面波を考えることが多い。例えば、川上ら^{11)、12)}は Love 波の分散曲線および振動数スペクトルを与え、2地点の応答変位を算出し、それから相対変位を求めている。これに対して、山田ら¹³⁾は断層モデルを導入し、これと表面波動起理論から地盤振動を求め、それから相対変位あるいはひずみを算出している。

地盤が良好な場合には地盤振動は弾性的であり、伝播する波動により生じる地盤ひずみによって埋設管被害が生じる可能性がある。しかし、実際の地盤をみると深さ方向にも水平方向にも地盤剛性や飽和度は不均一である。しかも、軟弱な地盤や液状化現象が生じている地盤の場合には土の非線形性が大きく、とても弾性波動の範囲のみで解析し得ないものと思われる。

2-2. 砂箱実験による解析例

液状化時の砂層地盤の挙動は過剰間隙水圧上昇の非定常性と土の非線形性のために非常に複雑である。また、観測例も数少ない。そこに敷設された埋設管にいたっては、結果である被害状況から地震時の挙動が推定されているにすぎない。そこで、埋設管模型を埋めた模型地盤の加振実験^{8)、9)}によりその挙動が推定されることが多い。塩ビパイプを埋設した砂箱実験によれば液状化の過渡状態において大きな曲げひずみがみられる。さらに、乾燥砂と飽和砂にまたがって埋設した場合にも大きな曲げひずみが生じるという実験結果も出ている¹⁸⁾。

3. 解析手法

従来、地盤の動的相対変位の解析手法としては、2章で述べた①波動論を用いた解析手法と②砂箱を用いた模型振動実験による手法がある。しかし、①では本研究の目的である液状化する表層地盤の非線形な振動解析に適用しにくい。また、②では砂箱の大きさという制約条件が伴う。これに対して、オンライン地盤応答解析法には次のような特長がある。それは、復元力のモデル化を行わないので地盤の液状化という複雑な土の非線形性や地盤の破壊までの過程を精度良く解析できる、さらに、液状化という土の急激な変化に追従できる、というような点である。これらの点より、本研究では解析手法としてオンライン地盤応答解析法が有効的であると考えた。

したがって、本研究ではオンライン地盤応答解析法を用いて埋設管に沿った2地点間の地盤挙動を独立に振動解析する。その応答解析結果である2地点の応答変位から2地点間の動的相対変位を算出する。このとき、用いる入力加速度波が同一なので2地点間に液状化程度に差がなければ相対変位が生じない。しかし、液状化程度に差があれば相対変位が生じるから、液状化程度に基づいて生じる相対変位特性が明らかにできる。

また、2地点間が離れていればその間の波動伝播により相対変位が生じることになるが、本研究では液状化→非液状化間という2地点間の距離がさほど大きくなく、さらに液状化による非線形性の影響度の方がはるかに大きいという前提より、波動伝播に伴う相対変位を考えないとする。

4. 液状化する地盤の動的相対変位の実験解析

4-1. 地盤モデル

ガス管や水道管は地下数メートルまでの比較的浅いところに埋設されることが多い。このような浅い地盤

を多自由度系にモデル化することは、力学的に意味がないと思われる。それゆえ、地表付近の表層地盤を1自由度系でモデル化する(図-3)。また、2地点間の相対変位を解析するのであるから、地表面を伝わる2次元波動として解析することが考えられる。しかし、本研究の場合液化化現象を対象としており2次元波動による解析を行うのは極めて困難である。そこで豊浦標準砂を用いて様々な状態の供試体を作成し、オンライン地盤応答解析を行い応答変位を求める。そしてその差を取り、2地点間の動的相対応答変位を求めることにする。

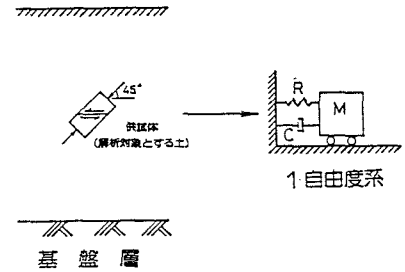


図-3 表層地盤のモデル化

4-2. 解析装置および解析条件

液化化する地盤は非線形性が大きいと考えられる。非線形振動の解析方法としてはオンライン地盤応答解析法がある。本研究ではオンライン地盤応答解析法を用いて液化化地盤の動的相対変位を解析する。その解析装置と解析条件について以下に述べる。

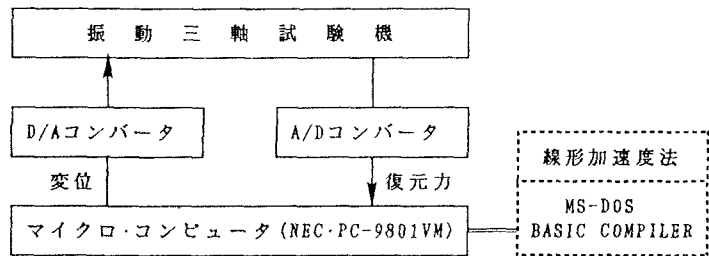


図-4 解析装置の概略

まず、解析装置について概略を説明する。本研究で用いた解析装置は、復元力を取り出す振動三軸試験機(誠研舎製)と応答計算を行うマイクロ・コンピュータ(NEC-PC-9801VM)から成り立っている(図-4)。また、1自由度系の非線形振動方程式の応答計算には線形加速度法を用いている。そのプログラムにおいてはMS-DOS上でBASIC・COMPILERを行うことにより計算速度の高速化をはかり解析精度を向上させている。また、操作も簡便となっている。

表-1 試料砂の物理状態

試料砂	豊浦標準砂
比重: G_s	2.63
均等係数	1.59
曲率係数	1.12
D_{10} (mm)	0.18

次に解析条件について述べる。オンライン地盤応答解析法で非線形復元力を明らかにするために振動三軸試験機にセットされた砂の供試体の拘束圧 p は 1.5kgf/cm^2 とした。その試料砂としては、豊浦標準砂を用いた。その物理状態を表-1に示す。さらに、1自由度系の固有振動数は供試体が密詰めの場合 $f=2\text{Hz}$ 、ゆる詰めの場合は $f=1.5\text{Hz}$ 、減衰定数は $h=0.1$ と仮定し、この動的特性の環境のもとにおける非線形復元力特性を解析する。これらの特性値は特定の地盤から求めたわけではない。しかし、実地盤の値とさほど違わないと思われる。また、入力地震波としては、1983年に起きた日本海中部地震(1983.5.26; $M=7.7$)において秋田港で記録された実地震波観測データ(S1567-EW; $\text{MAX}=205\text{gal}$)を用い

表-2 供試体の物理状態

供試体状態	間隙比: e	相対密度: D_r [%]
乾燥密詰め	0.670 ~ 0.715	82.7 ~ 86.4
乾燥ゆる詰め	0.842 ~ 0.912	21.7 ~ 31.3
飽和密詰め	0.688 ~ 0.710	75.8 ~ 81.5
飽和ゆる詰め	0.876 ~ 0.920	19.6 ~ 31.3

表-3 相対変位算出のための供試体状態の組合せ

No.	供試体状態の組合せ
No. 1	(乾燥密詰め) - (乾燥ゆる詰め)
No. 2	(乾燥密詰め) - (飽和密詰め)
No. 3	(乾燥密詰め) - (飽和ゆる詰め)
No. 4	(乾燥ゆる詰め) - (飽和密詰め)
No. 5	(乾燥ゆる詰め) - (飽和ゆる詰め)
No. 6	(飽和密詰め) - (飽和ゆる詰め)

た。

また、本研究の目的である液化化程度の差異により起こる管軸方向にある水平2地点間における砂層地盤の動的相対変位を算出するために、供試体の状態を乾燥密詰め、乾燥ゆる詰め、飽和密詰め、飽和ゆる詰め状態の4種類とした。各々の供試体の物理状態（間隙比、相対密度）を表-2に示す。この4種類の供試体状態を用いてオンライン地盤応答解析を行い、各々の応答変位を求めてその4種類を組合せ、表-3に示す6種類の動的相対変位を算出する。さらに、動的相対変位と入力最大加速度の関係性を明らかにするために、入力最大加速度を100、200、300、400、500galと変えて4種類の供試体状態において実験を行い、前に述べたように各々について6種類の動的相対変位を算出する。

4-3. 解析結果及び考察

最大入力加速度が200galの時の応答変位波の一例を図-5に示す。図-5を見てもわかるように、応答変位は飽和砂を用いたゆる詰めの場合が最も大きかった（最大13.42cm）。また、他の3つの供試体の場合（乾燥密詰め、乾燥ゆる詰め、飽和密詰め）では、飽和ゆる詰めの場合の応答変位の値の約1/2倍（最大約6cm）であった。これは供試体状態が飽和ゆる詰めの場合のみにおいて、液化化状態になったためである。図-5に示す4種類の応答変位を組合せた6種類の相対変位波を図-6に示す。その図-6に示す過剰間隙水圧は、飽和ゆる詰め状態の供試体の解析によって得られたものである。図-6を見てもわかるように供試体状態の組合せに液化化した飽和ゆる詰め供試体を含む場合には、その他の場合の約4倍になっている。このとき、その最大値は約9~11cmとかなり大きい値を示している。

これらは同じ種類、同じ強さの波形を用いているので応答特性の違いは供試体の違いによると思われる。したがって、図-6の結果を見る限り液化化地点と非液化化地点の応答は互いに独立と見なしてもよいと思われる。

この解析結果を見る限り、浜田らが指摘しているように液化化による永久変位の方がはるかに大

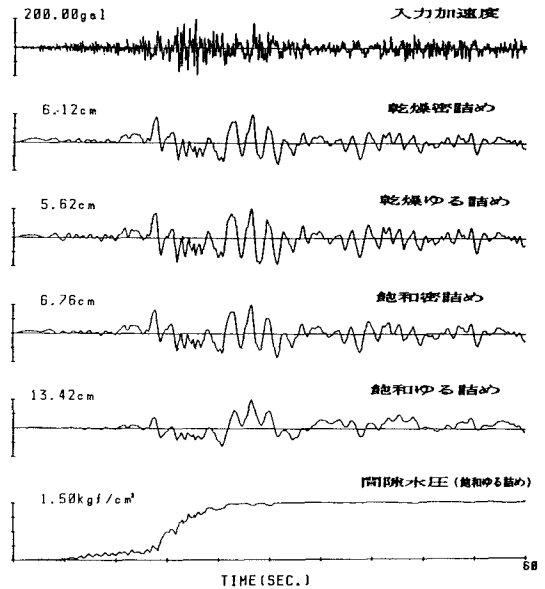


図-5 応答変位波形及び間隙水圧の変化（飽和ゆる詰め供試体）—最大入力加速度200gal—

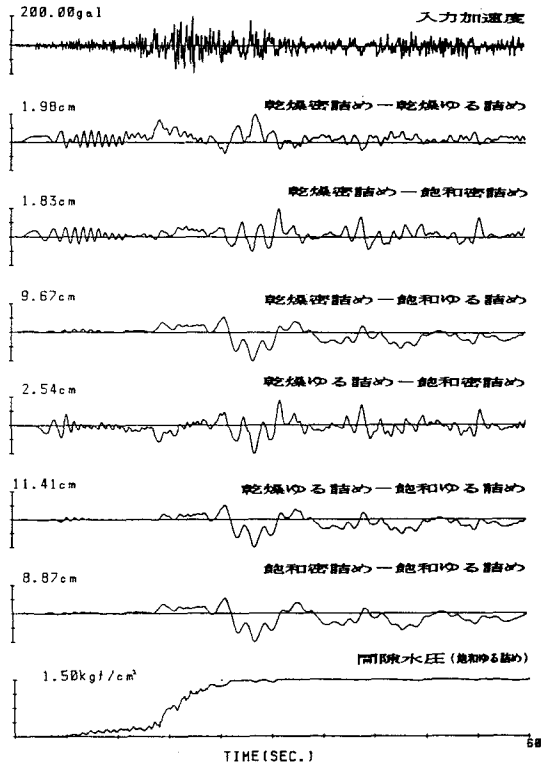


図-6 動的相対変位波形及び間隙水圧の変化（飽和ゆる詰め供試体）—最大入力加速度200gal—

きな値（新潟地震では最大永久変位量は8.9mと測定されている⁴⁾。）を示す。したがって、液状化による埋設管の被害において、永久変位が主原因であることが言える。だが、動的相対変位も10数cmと大きな値である。永久変位を伴わない場合、液状化した地盤において地盤ひずみの管路への伝達率が低くなると思われる。しかし、この点を考慮しても液状化-非液状化地点間の距離によっては地盤ひずみが大きくなり、地中埋設管が破壊に至る可能性も否定できない。

5. 最大相対変位の簡易推定

最大入力加速度と最大相対変位の関係を図-7に示す。液状化が生じる場合と生じない場合ではその相対変位は最大約4倍も違う。このことは砂層地盤の相対変位を考える際に液状化現象発生の有無が重要であることを示している。また、図-7を使えば液状化領域-非液状化領域間の相対変位が推定できる。すなわち、埋設管に沿った液状化予測により液状化が予想される地点が明らかになれば、その地点から最も近い非液状化地点までの最大動的相対変位は液状化地点の予想最大地表加速度を用いて図-7より求められる。

また、液状化予測により液状化地点と非液状化地点との距離を定められる。この定められた2地点間の距離と推定された最大動的相対変位より、地盤ひずみが求められる。その地盤ひずみを用いれば、簡易的に地中埋設管の耐震計算ができよう。その算出手順を図-8に示す。

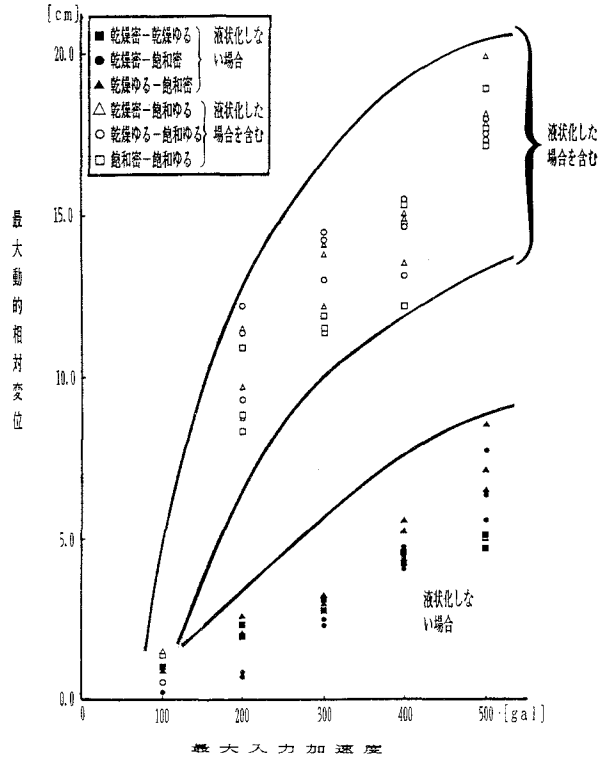


図-7 最大相対変位と最大入力加速度の関係

6. 結論

本研究は、液状化程度の差異により起こる水平2地点間における地盤の動的相対変位を明らかにするために、

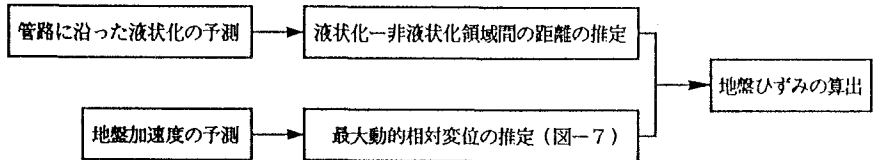


図-8 液状化-非液状化領域間の地盤ひずみ算定のための手順

かにするために、オンライン地盤応答解析から応答変位を求め、これにより種々の供試体状態間の相対変位を求めている。用いた入力加速度波は1種類であるが本研究で行った解析の結果より、飽和ゆる詰め状態と乾燥ゆる詰め状態において最大入力加速度200galの場合には、最大約11cm程度の相対変位が生じること、液状化の発生の有無により相対変位の大きさが3~4倍違うこと、最大入力加速度と最大動的相対変位の関係

がつかめたものと思われる。さらに、この結果を用いて砂層地盤が液状化する時に生じる動的相対変位の簡易推定方法についても述べている。

本研究のオンライン地盤応答解析には、土質用振動三軸試験機を用いている。この場合、砂の復元力を取り出す供試体の寸法は直径5cm、高さ10cmであり、砂の非線形復元力特性にこの寸法効果の影響が含まれていることになる。それゆえ、他の解析方法による結果との比較も必要であろう。

今後は様々な土について、さらに様々な入力地震波に対して、オンライン地盤応答解析を行い応答変位を求め、2地点間の相対変位を算出し、埋設管に与える影響を明らかにして行きたい。

謝辞

本研究をまとめるに当たり種々のご教示を賜った地震予知総合研究振興会の関係者に謝意を表する次第です。また、実験に当たっては、本学の卒論生堀江進・高崎乙甫の両君の助力に負うところが大きく、記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 能代市総務部庶務課防災担当編：昭和58年(1983年)5月28日日本海中部地震能代市の災害記録—この教訓を後世に・・・, 1984.12.
- 2) (社)日本ガス協会：日本海中部地震と都市ガス, 1984.2.
- 3) 基礎地盤コンサルタンツ：日本海中部地震地盤震害調査報告書(日本ガス協会委託), 1983.
- 4) 浜田政則・安田 進・磯山龍二：新潟地震における地盤の永久変位量の測定, 第18回地震工学研究発表会講演概要, pp.345~348, 1985.7.
- 5) 久保慶三郎・浜田政則・磯山龍二：日本海中部地震における地盤の永久変位の測定, 第18回地震工学研究発表会講演概要, pp.353~356, 1985.7.
- 6) 浜田政則・恵本克利・磯山龍二・安田 進：地盤の永久変位と地震被害について, 第18回地震工学研究発表会講演概要, pp.349~352, 1985.7.
- 7) 北浦 勝・宮島昌克：液状化に伴う地盤の永久変形が地中埋設管に与える影響, 構造工学論文集, Vol.1.32A, pp.857~864, 1986.3.
- 8) 片田敏行・伯野元彦：液状化過程における地中構造物の動的挙動に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第306号, pp.1~10, 1981.2.
- 9) 北浦 勝・宮島昌克：不完全液状化時における地中埋設管モデルの挙動, 構造工学論文集, Vol.31A, pp.421~426, 1985.3.
- 10) 大石博：地盤沈下を受ける埋設管路の挙動に関する二、三の考察, 土木学会論文集, 第356号/I-3, pp.379~386, 1985.4.
- 11) 川上英二・佐藤靖彦：地盤の相対変位・ひずみの推定結果に及ぼす地震波形の変形の影響, 土木学会論文報告集, No.337, pp.37~46, 1983.9.
- 12) 川上英二・佐藤靖彦・辻 勝：地盤の相対変位・ひずみの推定結果に及ぼす波動の分散性の影響, 土木学会論文集, 第356号/I-3, pp.387~394, 1985.4.
- 13) 山田善一・野田 茂：表面波による相対地盤震動を推定するための理論的な試み, 土木学会論文報告集, 第335号, pp.41~50, 1983.7.
- 14) 高田至郎・J.P.Wright：ライフライン系解析のための相対地盤震動, 土木学会論文報告集, 第299号, pp.13~21, 1980.7.

- 15) 小池 武：埋設パイプラインの地震時ひずみ評価，土木学会論文報告集，第331号，pp. 13～24, 1983. 3.
- 16) 片田敏行・伯野元彦：オンライン実験による液状化地盤の非線形振動解析，土木学会論文報告集，No. 318，pp. 21～28，1982. 2.
- 17) 片田敏行・勝田博敏・板谷祐二：飽和砂層を含む多層地盤の実復元力を用いた非線形波動解析，土木学会論文集，第356号/I-3，pp. 475～481，1985. 4.
- 18) 片田敏行：液状化過程における地中構造物の挙動と地盤振動特性に関する基礎的研究，東京大学学位請求論文，1979. 12. 22.

(1986年10月17日受付)