

東京湾岸における液状化被害

Liquefaction-induced damage in the reclaimed lands along Tokyo Bay

安田 進 (やすだ すずむ)
東京電機大学 教授原田 健二 (はらだ けんじ)
不動産テトラ (株) 担当部長

1. まえがき

2011年東北地方太平洋沖地震は宮城県のはるか沖合で発生した。東京湾岸の北部は震央から約380kmも離れているにもかかわらず、大変広い範囲で液状化が発生し、家屋やライフラインなどに甚大な被害を与えた。地震発生後、関東在住の方々を中心に多くの方々によりこの液状化に関して現地調査が行われた。ただし、液状化した範囲が非常に広範囲にわたったこと、地震発生後にガソリンが不足し車で調査しづらかったこと、さらに計画停電により電車も止まったことなどにより、なかなか全域を調査することが難しかった。筆者達もその状況にあったが、地震翌日から約10日間かけて、東京から千葉まで学生に手伝ってもらって調査して回ったので、ここに報告させていただく。ただし、今回の報告は筆者達が大まかに見て回った状況だけの報告であり、上述したように、他の方々によって行われた詳細な調査結果までを含めるまでは至っていないことをお断りしたい。

2. 調査範囲と調査方法

東京湾岸は江戸時代から埋立てが始まり、特に第2次世界大戦以降に多くの埋立てが行われてきている。ただし、明治以来これらの埋立地で液状化が発生するような強い地震動に襲われたのは、1923年関東地震および1987年千葉県東方沖地震のみである。関東地震の際にはまだ埋立地の多くは造られておらず、月島などで液状化が発生したのみである。これに対し、千葉県東方沖地震の時にはすでに千葉県側も広い範囲で埋立地が造られていて、千葉市から木更津市にかけて広い範囲で液状化が発生した。ただし、この地域は工場用地であり、液状化発生箇所や液状化による被害は明らかにされていない。また、浦安市の一部で液状化が発生したとの報告もある。

このような過去の履歴があることを考慮し、筆者達は地震の翌日まず浦安市の調査に出かけた。行ってみると予想とおり液状化していたが、さらに浦安市内を回ってみると広い範囲で液状化し、被害も甚大であることに驚かされた。翌日埼玉県河川堤防の調査に出かけていると、千葉市でも液状化で被害が出ているとの連絡があり、急遽千葉市へ向かった。さらに、千葉県東方沖地震の経験から木更津方面でさらに液状化しているのではないかと

と考え、五井、姉ヶ崎と調査してまわった。ただし、こちら側ではほとんど液状化は発生していなかった。

これらをもとに、液状化したのは東京から千葉市の間ではないかと考えた。そして地震の3日後からは東京のお台場から千葉市まで、学生とともに地区を割り当てて調査することを計画した。ただし、この日からガソリンが手にはいらなくなったこともあり、電車で出かけ、徒歩で調査して回ることにした。ところがこれも計画停電のため、電車が止まって現地へ行けない状態となった。このようなことで、液状化の調査に必要な迅速な調査が十分には行えたとは言えないが、それでも東京のお台場から千葉市の千葉港まで、延長にして約35km、幅1~3kmの範囲を約10日かけて何とか調査して回った。

さて、このように複数の人数で広範囲にわたって調査するので、調査者によって差が無くまた迅速に広範囲に調査する方法を決めなければならない。そこで参考にしたのが、2月にニュージーランドで発生した地震に対して調査した方法である。この時も約8km×7kmの広い範囲で液状化が発生したため、車で道路を走りながら、①道路や宅地に噴砂が見られて激しい液状化を生じていた場合に赤の実線、②噴砂は見られるが液状化の被害は軽い場合に赤の破線、③噴砂が見られず液状化の被害を受けていない場合には青の実線、と記入する方法でCanterbury大学のCubrinovski准教授らが調査された。日本から派遣された調査団員もこれに従って現地調査を行った¹⁾ところ有効であったため、今回の調査にあたってこの方法をとってみた。ただし、後述するように今回の地震による噴砂の量が大変多く噴砂を片付けないと生活できないこともあり、地震発生当日から噴砂を片付けられる作業が始まっていた。したがって地震の数日後には噴砂の発生が不明な所も出てきたため、②の判断はなかなか出来にくく、ほとんど①と③の判断だけで調査した。

3. 調査結果と液状化範囲の推定

道路ごとに上記のように噴砂の有無および液状化被災状況を調査した結果例として、浦安市の一部を口絵図-1に示す。上述したように住民の方々により噴砂はすぐ片付けられたので、青の区域でも噴砂があった可能性はある。ただし、現地調査をしてみた感じでは、液状化が

発生した地区では砂が片付けられたといえども道路際にやはり少し砂が残っていたりしたので、かなりの精度はあるのではないかとと思われる。

さて、最近の地震では地震発生後に航空写真が撮られ、それを見ると噴砂が判読できることが多いが、今回の場合は調査範囲では空域制限にかかって飛びにくいとのことであった。3月20日になって(株)八州で撮影されたので、その航空写真の情報を加え、液状化したと判断される地区を1/50,000地形図上でおおまかに囲ってみると口絵図-2のようになった。ただし、道路での噴砂の有無をもとに液状化地区の推定を行っているため、道路で囲まれた中に地盤改良を行ってあって液状化していないケースも囲んでいることをお断りしたい。

口絵図-1を見ると、東京都のお台場から千葉市の千葉港付近までの広い範囲で液状化が発生したと言える。ただし、浦安～船橋付近では全面的に液状化したのに対し、西側のお台場や東側の千葉港付近になると、一部で液状化した程度になっていた。ここに囲った範囲の総面積を求めてみると42km²にもなった。なお、この範囲外でも、横浜市や川崎市の一部で液状化が発生したことが報告されている。また、お台場以外の臨海副都心は調査を行っていないし、また、千葉港より南東側でも一部液状化している可能性がある。この図以上に液状化した地区がある可能性がある。これらの情報は今後付け加えていき、また、口絵図-2に示した範囲内でも他の方々の調査結果をもとに修正していく必要がある。

4. 液状化発生地区の被災概況

液状化が発生した地区の被災概況を示すと以下のようになる。

4.1 東京都のお台場から葛西

お台場では広場で噴砂が発生した程度で構造物への被害は見あたらなかった。辰巳や豊洲では住宅地の一部で液状化は発生した。ただし辰巳では液状化が発生した区域にはアパートしかなく杭の抜け上がりが発生した程度であり、豊洲では住宅に被害が及ぶほどの液状化ではなかったようである。また、東雲では倉庫が主体の地区でありその中は分からないが、被害もあまり無かったのではないかとと思われる。これに対し、葛西では10数軒建っている戸建て住宅で沈下による被害が発生した。

一方、新木場では激しい液状化が発生した。この地区は倉庫などに使われており、住宅はほとんどないので建物の被害は目立たなかったが、厚さ30cm程度にも及ぶ噴砂が発生し、道路は砂で埋まっていた。

4.2 浦安市

浦安市の面積は16.98km²であり、そのうち74%が昭和40年以降に埋め立てられた所である。そのほとんどの地区が液状化した。そしてこれらの多くは住宅地として利用されていたため、戸建て住宅やライフラインに膨大かつ甚大な被害が発生した。特に今川、入船、弁天、横浜地区で多くの戸建て住宅が沈下・傾斜した。口絵写

真-1, 2に沈下および傾斜した戸建て住宅の例を示す。沈下量の詳細は分からないが、口絵写真-1付近では30cm程度も沈下したように推定される家がいくつか見られた。また、口絵写真-2の所には4軒が建っていたがその中心に向かって4軒とも沈下・傾斜していた。手前の家は40/1000ほども傾いたとのことである。

一方、中層のアパートやホテル、高架橋の沈下は見られなかった。これは、これらが杭基礎で支持されていたためではないかと思われる。また、護岸の被害も軽微であった。ただし、液状化による地盤の沈下が広い範囲で発生したため、構造物は被災していなくても口絵写真-3に示すように50cm程度にも及ぶ大きな段差や杭の抜け上がりが発生した。

道路も液状化によって激しい変状を生じた。まず、地盤の沈下などに伴って凹凸が多く発生した。それだけでなく、口絵写真-4に見られるように水平方向に押されて座屈したように突き上げられていた箇所もあった。ここは口絵写真-1の近くの旧護岸のそばの道路であるが、その他に口絵写真-5に見られるように多くの歩道で同様な現象が生じていた。このような現象は浦安市だけでなく他の地区でも発生した。

液状化に伴って地中埋設管やマンホールも各地で被災した。口絵写真-6には浮き上がったマンホールの例を示す。下水管の被災状況はまだ調査中で明らかでないが、砂が管路の中にはいり込んで調査の妨げになっているとのことであった。

その他特筆すべき現象として噴砂量の多さが目立った。口絵写真-7に例を示すが、最大で30cmもの厚さの噴砂が発生したのには驚かされた。

なお、口絵図-2で囲った液状化発生範囲内でも液状化が発生していない区域がいくつか見られた。これらは地盤改良が施されていたのではないかとと思われるが、今後明らかにされてくるであろう。

4.3 市川市、船橋市、習志野市

市川市から船橋市にかけて液状化が発生した地区は、主に工場や倉庫などに利用されている。これらの地区の道路には多量の噴砂が見られたが、工場内には立ち入ることができず、被災状況は分からなかった。わずかに小型タンクが不同沈下しているのが道路から見えた程度であった。

ただし、このような地区の中にも狭いながら住宅地もあり、そこでは浦安市よりも甚大と思える家屋の被害も発生していた。口絵写真-8には船橋市栄町における被害を示す。ここでは護岸が大きくはらみだしていた。そして工場の建物は基礎が引っ張られていた。また、船橋市日の出では口絵写真-9に示すように電柱が大きく沈下し、口絵写真-10に示すように空の重油タンクが浮き上がっていた。

なお、市川漁港では傾斜護岸が滑り出し、その上に建てられた建物が傾斜していた。噴砂も見られたので液状化に起因した被害と考えられた。

4.4 習志野市および千葉市

習志野市から千葉市にかけては住宅地や商業地区などで液状化が発生した。このため、多数の戸建て住宅に沈下や傾斜の被害が発生した。特に、習志野市では袖ヶ浦で、また千葉市では美浜区の磯辺や稲毛海岸で、戸建て住宅や道路に激しい被害が発生した。これらのうち磯辺8丁目では、口絵写真-11に見られるように戸建て住宅が大きく沈下・傾斜していた。この写真は地震の2日後に撮影したものであり道路は噴砂で覆われていたが、9日後に再度訪れた時には噴砂がきれいに片付けられマンホールが20~30cm浮き上がっているのが見られた。これは2日後には分からなかったもので、噴出した砂の厚さは30cm程度以上もあったことになる。

ただし、磯辺でも8丁目より南東に位置する地区では液状化が発生してなく、その先の高浜でまた液状化が発生していた。さらに南東の千葉港になるとほとんど噴砂が見られなかった。

4.5 横浜市

横浜市では金沢区の柴町などで液状化したことが規矩大義教授（関東学院大学）や堀越研一博士（大成建設）によって報告されている。福浦では八景島前の埋立地の団地内液状化が発生し、立体地下駐車場が大きく浮き上がった。

5. 液状化発生およびそれによる被害の特徴

今回東京湾岸で発生した液状化にはいくつかの特徴がある。その特徴を挙げ、今後調査・研究が必要と思われることを述べてみる。

5.1 液状化発生地域に関して

前述したように千葉県から神奈川県にかけて大変広い範囲で液状化が発生した。さらに浦安市、市川市、船橋市などでは液状化範囲内で全面的に液状化が発生した。K-NE^Tによって観測されたこの地域の地表最大加速度は図-1に見られるように150~200cm/s²程度とそんなに大きくはなかった。また、Jishin.net³⁾によると気象庁震度階も5弱~5強程度であった。ただし、図-2に浦安のK-netで観測された地震波を示すが継続時間は2分程度と長く、主要動だけでも1分程度もあった。したがって、地盤内で生じた繰返しせん断力振幅はそんなに大きくないものの、繰返し回数が非常に多かったことが、このように激しい液状化を生じたのではないと思われる。また、約30分後に発生した余震も大きく、これにより新木場では噴水が激しくなったとの証言もある。このように、巨大地震では繰返しせん断力の回数が増えることが問題であり⁴⁾、今回の液状化の判定にあたってはこの点を考慮する必要があると思われる。

5.2 液状化による地盤変状に関して

口絵写真-5に示したように、歩道が突き上げられている箇所が多く見られた。これは地震動の継続時間が長かったため、液状化した後も揺れが継続し、地盤全体が大きく揺すられ続けて、道路と敷地の境界の歩道などで水平方向に座屈的な変形が発生したためではないかと思

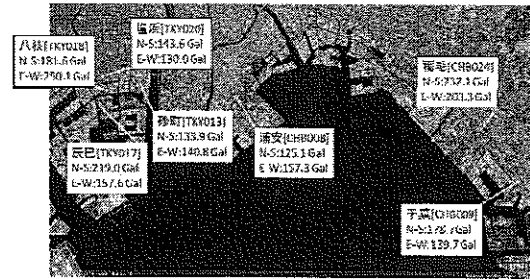


図-1 地表最大加速度分布 (K-NE^T) による

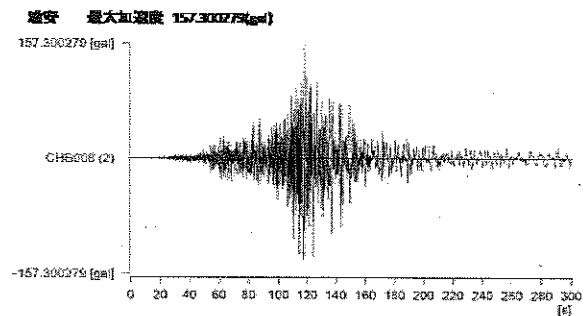


図-2 浦安のK-NE^Tで観測された地表面の加速度波形

われる。このために突き上げられた部分に埋設してあった埋設管も被害が甚大になっているのではないかと推察される。ただし、今後詳細な検討が必要である。

また、噴砂量や地盤の沈下量が非常に大きかったことも特徴として挙げられる。筆者達が見た噴砂の最大の厚さは30cm程度、地盤の沈下量は50cm程度もあった。さらにこれより激しかった所もあると思われる。我が国の過去の地震においてこれほどまでの厚さの噴砂は筆者達は見たことがないが、実は、同様の現象は昨年・今年とニュージーランドの Christchurch で発生していた¹⁾。ここではさらに厚く、昨年の本震で40cmも噴砂が発生し、今年の余震で再び50cmもの厚さの噴砂が発生した例があった。そこで今回の地震との共通点を探ってみると、両者とも液状化した砂が非常に細かいシルト質砂や砂質シルトであったことが挙げられる。図-3に今回東京湾岸で採取した噴砂の粒径加積曲線を示す。これに見られるように細粒含有率は10~90%と大変多い。このように細かい砂が液状化すると透水係数が小さいため噴水の時間が長く、また、噴水によって土粒子が地表に吹き上がりやすいので、噴砂の量が多かったのではないかと推測される。また、噴砂が舗装面上に堆積し、それを人工的に取り除いたため地盤（舗装面）の沈下量はそれだけ大きくなり、単なる液状化後の圧縮沈下量よりは大きくなってしまったのではないと思われる。

ちなみに、既往の地盤調査結果⁵⁾をもとに、浦安で液状化した今川を通る北西~南東にかけての測線の土質断面図を作成してみると図-4となる。図に見られるように液状化が発生した地区ではN値が5~10程度の緩い埋立層が7~10m程度の厚さで造成され、その下部にN値

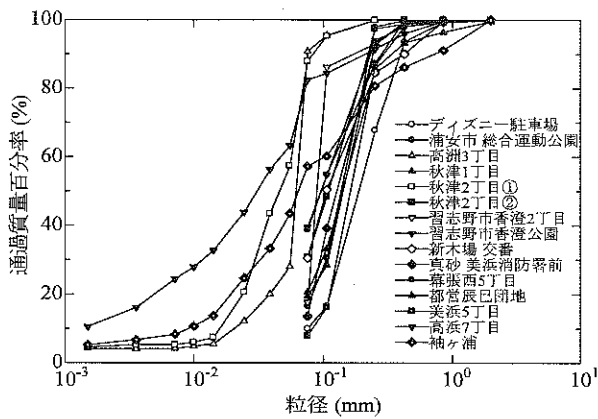


図-3 噴砂の粒径加積曲線

が 10~25 程度の沖積砂層が堆積している。地下水位は GL-1m~2m と浅い。液状化した層の判断は今後の詳細な調査を待たなければならないが、この断面から大まかに推定すると、地下水位以下の 5~7m 程度の厚さの埋立層が主に液状化したのではないかと推察される。例えば、液状化層厚の 5%ほど圧縮沈下したとしても 30cm 程度の地盤の沈下量しかならないため、上記のように噴き上がった砂の分まで加えた沈下量で考えた方が、沈下量の実態に合うのではないと思われるが、今後の検討が必要であろう。

5.3 液状化による建造物の被害

今回液状化した多くの地区は住宅地として広く利用されている。そのため非常に多数の戸建て住宅が沈下・傾斜した。まだ詳細は明らかになっていないが、上下水道、ガスの埋設管も多くの地区で甚大な被害を受けた。電柱も大きく沈下し、また家の屋根に当たるまで傾いたものもあった。今回の液状化はこれらの建造物にとっては甚大な被害を与えたことになる。

一方、アパートも数多く建てられているが、筆者達が調査した範囲では沈下や傾斜したものは見あたらなかった。

た。また、高架橋も被災していなかった。今回の埋立地には埋立層と沖積砂層の下部に軟弱な沖積粘性土が堆積しており、これらの重い構造物はさらに下部の支持層まで杭を打設して支えているため沈下しなかったものと考えられる。それにしても液状化自体は激しかったのに杭基礎は被害を受けなかったのはなぜか、今後検討する必要がある。一つの要因として地表最大加速が大きくなったことが挙げられるかもしれない。

6. あとがき

東京湾岸の埋立地で発生した液状化の範囲、被害状況、特徴を述べた。今回は新興住宅地で広く液状化が発生したこともあり、地震から 2ヶ月経った今でもまだ立派な家が無残に沈下したままで、道路には凹凸や沈下が発生し、さらに風が強い日には噴砂が舞って大変な状態が続いている。ライフラインの本格的な復旧には長い時間がかかりそうである。液状化は人命にはやさしい地震被害ではあるものの、やはり生活することに対して甚大な被害を与えると、あらためて考えさせられた次第である。

なお、図-4 の土層断面図の作成にあたっては石綿しげ子氏（基礎地盤コンサルタンツ）の協力を得た。末筆ながらお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 安田進・Cubrinovski Misko・時松孝次・Orense Rolando・渦岡良介・清田隆・細野康代・山田卓：2011年ニュージーランド 2011 Christchurch 地震による被害に対する災害緊急調査団報告、地盤工学会誌、2011. (投稿中)
- 2) (独)防災科学技術研究所：強震ネットワーク K-NET
- 3) <http://demo.jishin.net/map>.
- 4) 安田進：巨大地震による液状化被害と予測手法の課題、地盤工学会誌, Vol.58, No.11, pp.1-5, 2010.
- 5) 千葉県：千葉県地質環境インフォメーションバンク。

(原稿受理 2011.5.10)

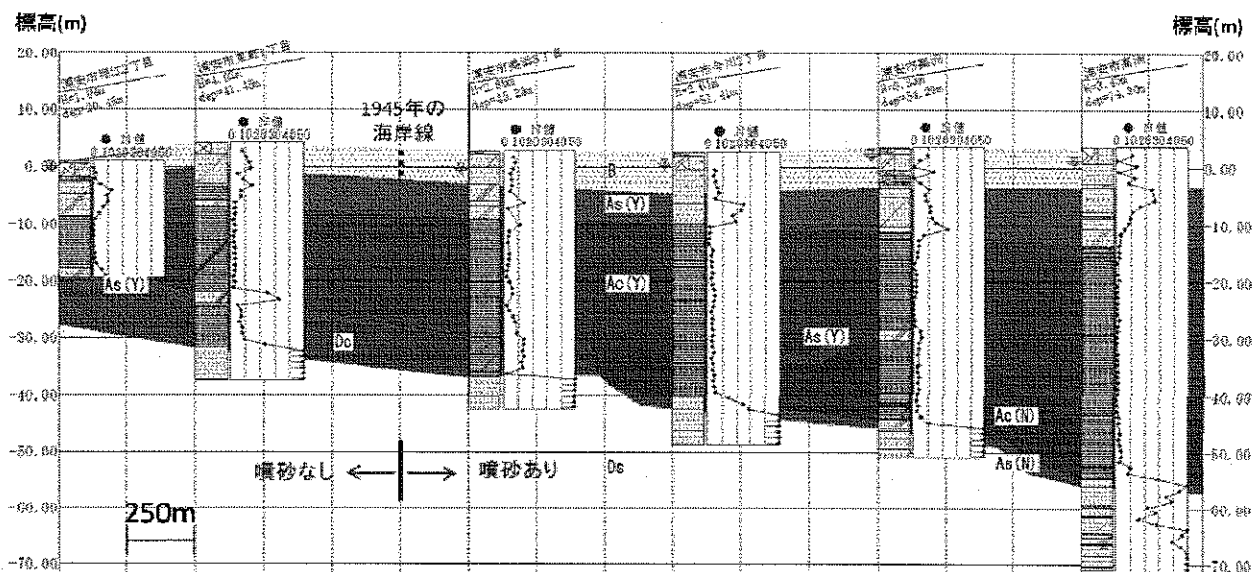
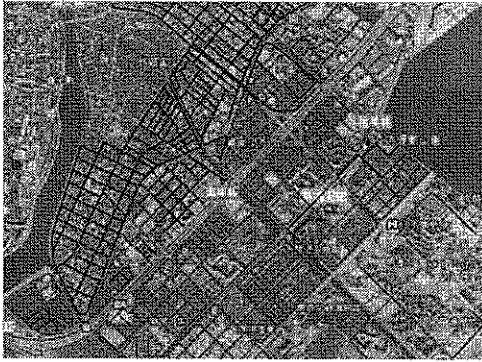


図-4 北西から南東に浦安を通る測線の推定土層断面 (ボーリングデータ⁵⁾は千葉県による)



口絵図-1 道路ごとの噴砂の有無の調査（赤線は噴砂が見られた道路、青線は噴砂が見られなかった道路）



口絵写真-1 浦安市今川における家屋の沈下状況



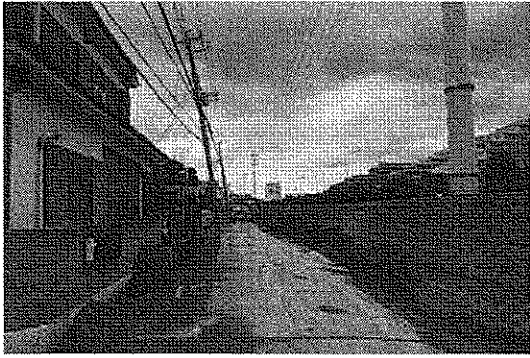
口絵図-2 推定した液状化発生範囲



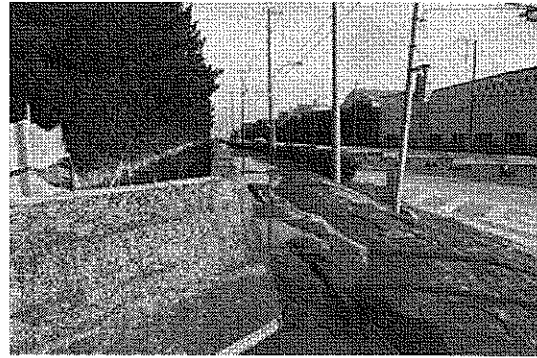
口絵写真-2 浦安市入船における家屋の沈下状況



口絵写真-3 新浦安駅前で見られた段差



口絵写真-4 浦安市今川における路面の突き上げと
電柱の沈下・傾斜



口絵写真-5 浦安市高洲における歩道の突き上げ



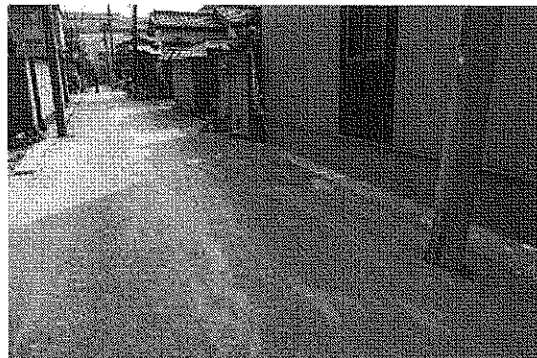
口絵写真-6 浦安市日の出で見られた浮き上
がったマンホール



口絵写真-7 浦安市今川で見られた厚く堆積した噴
砂



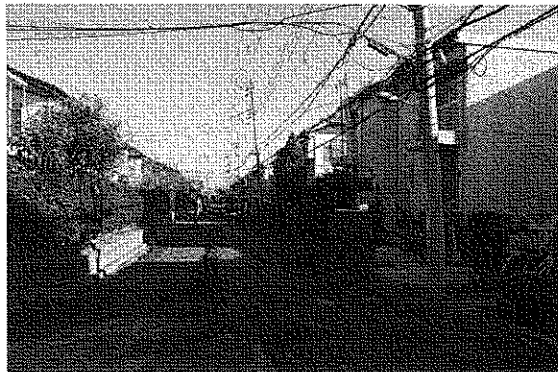
口絵写真-8 船橋市栄町で発生した護岸の孕み
出しと背後地盤での被害



口絵写真-9 船橋市日の出で見られた電柱の沈下



口絵写真-10 船橋市日の出で発生した重油タン
クの浮上がり



口絵写真-11 千葉市美浜区磯辺における家屋の被
災状況