



地盤情報を活用したサンフランシスコ湾南部での液状化危険度評価

田中, 泰雄
永田, 悟士
Kundsen, Keith
Kayen, Robert

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 10:67-75

(Issue Date)

2006-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD01)

<https://doi.org/10.24546/00518464>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00518464>



地盤情報を活用したサンフランシスコ湾南部での 液状化危険度評価

Assessment of Liquefaction Potential at Southern Parts of the San Francisco Bay Using Geotechnical Information & Analysis Tools

田中 泰雄¹⁾

Yasuo Tanaka

永田 悟士²⁾

Satoshi Nagata

Keith Knudsen³⁾

Robert Kayen⁴⁾

概要：サンフランシスコ湾南部には低平地が広がり、地下水位が比較的地表面に近く、軟弱土が堆積しているため、地震時の液状化被害が予想される。歴史的には、1906年に発生したサンフランシスコ大地震では、震源地が遠いにもかかわらずSan Jose市北部のCoyote谷で大きな液状化被害が発生しているが、1989年のロマブリエタ地震では、震源地が近いにもかかわらず、当該地では液状化被害はほとんど発生していない。本研究は、このように地震の違いにより液状化発生程度が大きく異なるサンフランシスコ湾南岸に着目し、最新の地盤・地形情報と液状化解析手法を用いて、当該地の液状化危険度を評価したもので、最近特に進展が著しい地盤情報データベースと地盤解析手法の地震地盤災害危険度評価への適用性を検討したものである。

キーワード：地盤情報データベース、液状化解析、サンフランシスコ湾、側方流動

1. はじめに

地震による地盤災害をGISや地盤情報データベースを活用して研究する例は従来から報告されていたが、阪神・淡路大震災を契機に、神戸市及び神戸大学では、広範囲の機関が地震災害情報と地盤情報を共有するためのシステムを開発することを目的に「KOBE-JIBANKUN 神戸地盤君」を構築し、これまで研究活動を行ってきた。研究成果としては、阪神・淡路大震災の災害原因究明や、将来地震についての被害予測研究などである。

地震災害研究の目的は、来るべき地震に対して被害を最小限にするための事前耐震対策等を検討することはい言うまでもないが、その研究活動を通じて社会全般の地震防災に対する意識高揚に通じることが非常に重要である。社会での認識を得るためには、研究素材である地形・地盤・地質並びに社会基盤施設等のデータが広く公開され、市民各自がそれぞれの住む自然環境・社会環境と災害リスクとの関係を、インターネットを通じて容易に認知することができる情報基盤の整理が重要である。

本研究は、地震による液状化災害の予測手法について研究したものであるが、上記の防災意識の社会認知の必要性を考慮し、インターネット上で公開されている地形・地盤情報を可能な限り利用して、最新の液状化解析手法による地盤災害(側方流動)の検討を行おうとするものである。ここで、地形・地盤情報等の情報公開の進展について、日本と海外との比較を行うと、米国における進展の高さが際立つことが分かる。例えばカルフォルニア州においては、1971年のSan Fernando地震での被害を教訓に、「Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act (地震断層位置特定法)」が1972年に州法として発効され、州政府が認定する活断層近傍の約400m幅では建築物の建設が規制することとし、断層の位置が公開されている。その後、州内の地震災害危険地域を特定するために、Loma Prieta地震後の1990年に発効された「Seismic Hazards Mapping Act (地震災害危険度地図法)」、さらには1998年に発効された「Natural Hazards Disclosure Act (自然災害公開法)」により、州政府により地震時の液状化災害・斜面災害危険地域の位置が公開され、さらに不動産売買に際しても地震災害危険度地域と売買物件との関係を明示する義務が課されこととなった。これに対し、

我が国でも阪神・淡路大震災後に地震災害危険度評価が各種自治体において実施され、インターネットを通じて公開され始めているが、情報公開のレベルはカルフォルニア州の例にはまだ程遠い。

本研究の著者等は、神戸市域の地盤情報データベース「KOBE-JIBANKUN」の構築や、カリフォルニア州地震災害危険度評価の研究に深く関係しており、現在公開されている各種情報を用いて、地震による液状化被害のうち側方流動被害予測の手法について検討しようとするものである。

2. 研究対象地点及び地盤災害の状況

本研究で対象とした地盤災害はサンフランシスコ湾南端の San Jose(サンノゼ)市北部約 10km に位置する Coyote Creek(コヨーテ谷)での護岸の側方流動であり、過去の地震の違いで生じた被害程度の差に対して検討を加えたものである。同地点での被害については、Egan et al. (1992)が詳細な検討を加えており、以下に述べるように異なる地震に対して規模の側方流動が発生している。

図 - 1 に Coyote Creek の位置を示す。同護岸では、1906 年のサンフランシスコ大地震により非常に大きな規模の側方流動を生じたにもかかわらず、1989 年の Loma Prieta(ロマプリエタ)地震では、震源地からの距離が近いにもかかわらず、側方流動がほとんど生じていない。Loma Prieta 地震の震源地と当該地点との位置関係を示すと、図 - 2 のようであるが、サンアンドレアス断層の南端で発生した地震により、震源地より 100km 以上離れたオークランド市やサンフランシスコ市で、高速道路高架橋の崩壊や、沿岸部埋立地での液状化被害など、非常に甚大な被害が発生した。一方、検討地点は震源地より約 40km と近距離であるにもかかわらず、当該地の護岸ではほとんど側方流動が生じなかったが、震源地がサンフランシスコ市街近傍と Loma Prieta 地震よりはるかに遠方で発生した 1906 年のサンフランシスコ大地震において、大規模な側方流動が生じていた。

3. 当該地域の地盤・地形情報

当該地域の地盤情報については、カルフォルニア州地質調査所(California Geological Survey (CGS))により

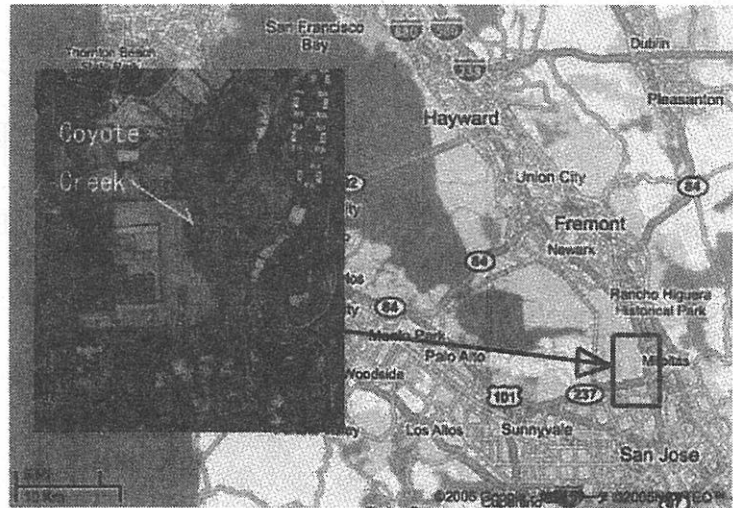


図 - 1 Coyote Creek の位置

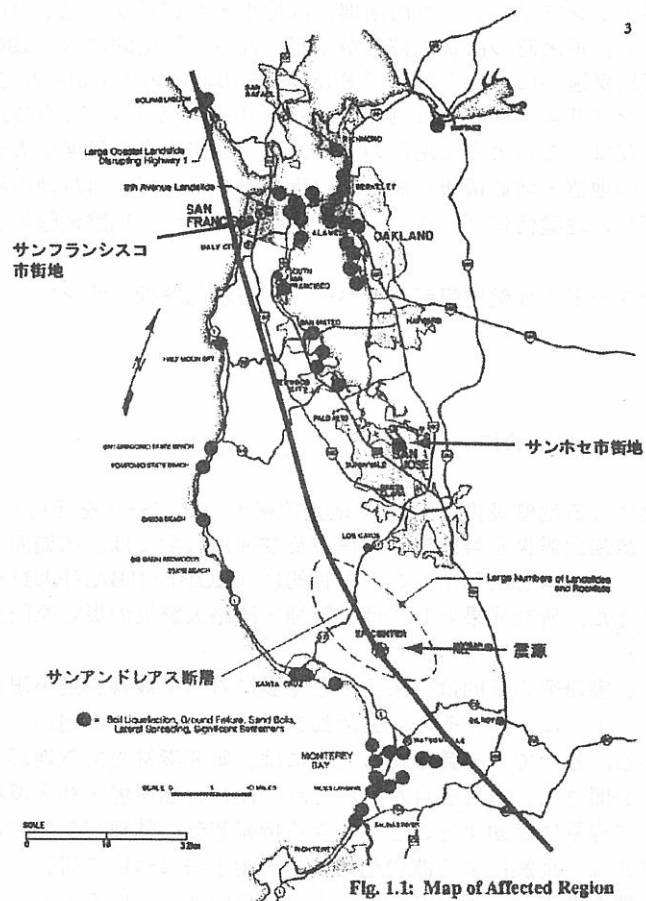


図 - 2 ロメプリエタ地震の震源及び断層位置

震源地がサンフランシスコ市街近傍と Loma Prieta 地震よりはるかに遠方で発生した 1906 年のサンフランシスコ大地震において、大規模な側方流動が生じていた。

約 600 本のボーリング調査資料が収集されており、その情報の一部はインターネット上で公開されている (<http://www.conservation.ca.gov/cgs/shzp/>)。これらのボーリングデータを基に当該地域の地盤構造を検討するため、CGS よりボーリング詳細データの提供を受けて簡易な GIS を構築した。図 - 3 は作成した GIS 上でこれらのボーリング位置を示したものである。検討対象の Coyote Creek では数本のボーリング調査が行われているが、Egan et al. (1992) はこれに加えて三成分コーン貫入試験を含む数種類の原位置試験を実施し、護岸の地盤特性と構造を明らかにしている。一方、地形情報については、米国地質調査所(USGS)がサンフランシスコ湾付付近の標高データについては BARD(San Francisco Bay Area Regional Database)プロジェクトとして、10m メッシュで構成される数値標高図を公開している (http://bard.wr.usgs.gov/html/dir/dem_html/dems10m.html)。図 - 4 は BARD で公開されている 10m メッシュデータを基に、Coyote Creek 付近の 3 次元地形を現したものであり、図右下端には同地点護岸を東西に横切る断面を示している。Egan et al. (1992) は、同断面位置で詳細な土質調査を行い、異なる地震に対する液状化危険度評価を行っている。なお図 - 4 の地表面標高の変化は、西方(左方向)に上昇しているが、後述するように、Egan 等の現地調査では、西方に下降していた。BARD による DEM データの精度は非常に高いと考えられるが、本文では比較検討を目的に、Egan 等の用いた断面形状を用いることとする。

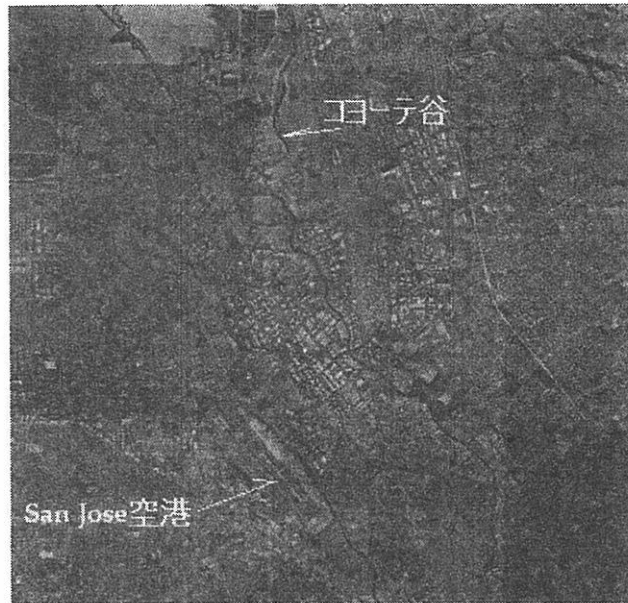


図-3 検討対象地域のボーリング位置図

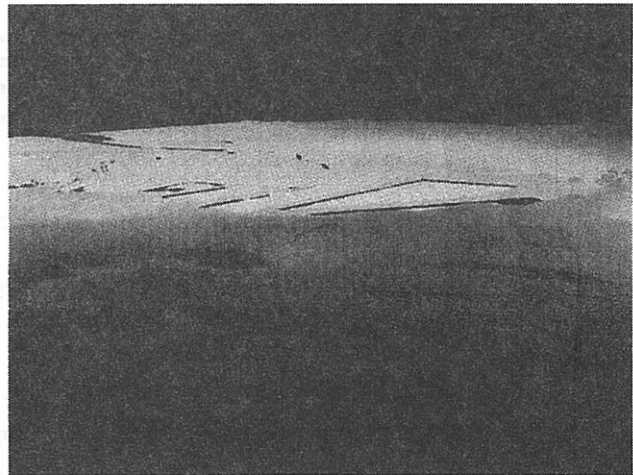


図-4 Coyote Creek 付近の数値標高地図 (DEM)

4. Coyote Creek の液状化危険度評価

先述のように、Egan et al. (1992) は、Loma Prieta 地震とサンフランシスコ大地震とで、液状化による側方流動の被害程度が大きな違いを生じた Coyote Creek での液状化危険度評価を検討している。

図-5 は Egan 等が現地測量で得た護岸の地表面変化と地質断面である。地盤調査としては、4 箇所でのコーン貫入試験と、2 箇所での間隙水圧測定などを実施している。図-5 のように、現地測量で求めた地表面

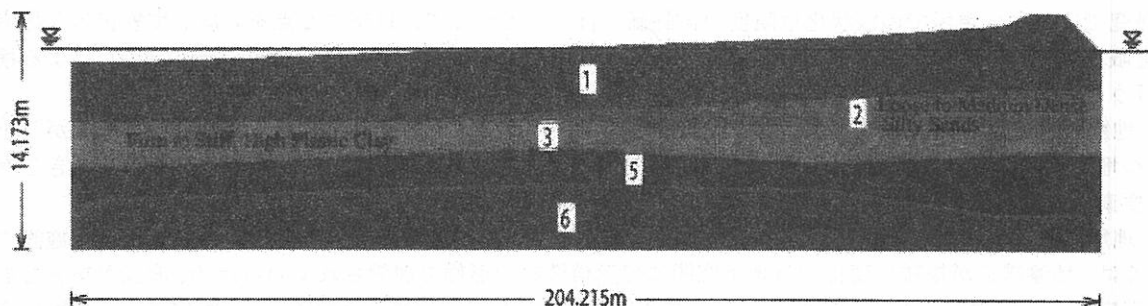
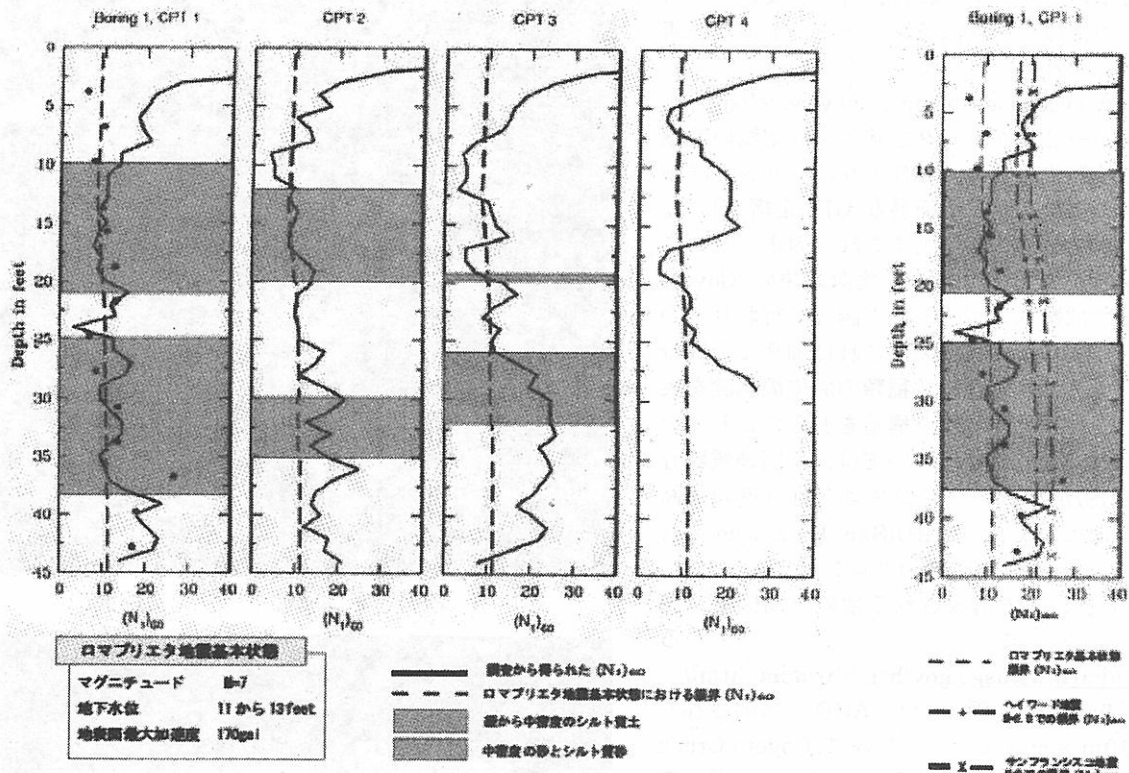


図-5 Coyote Creek の地表面変化及び地質断面



(a)ロマリエタ地震時の液状化危険度判定。

(b)その他地震との比較

図-6 Egan 等による Coyote Creek での液状化危険度判定例

はやや西方に下降しており、コーン貫入試験から求めた地層構成は、ほぼ水平なであることが分かる。ここで液状化可能な土層としては、No.2 のシルト質砂（緩い砂から中密砂）と No.5 の中密な砂・シルト質砂であるとしている。

Egan 等の研究では、4 箇所のコーン貫入試験結果について、貫入抵抗による液状化強度の判定と、地表面最大加速度に基づく地盤内せん断応力とを比較して、Loma Prieta 地震と他の地震とで液状化危険度がどのように異なったのかを検討している。図-6 はその検討例であり、Loma Prieta 地震で生じたと考えられる地表面最大加速度 0.17g のケース（図-6(a)）では、液状化対象層の 4 箇所のコーン貫入抵抗値との No.2 シルト質砂と No.5 中密砂・シルト質砂では、地震時せん断応力がほぼ原位置の液状化強度と一致する状況であり、液状化が発生したという結果となる。しかし現場では液状化被害は発生していなかった。このため、図-6(a)の結果と異なる要因として、1) 地下水位が調査時点より低下していた可能性と、2) 地震動継続時間が短く、せん断応力推定式の地震マグニチュードが過大評価されている可能性を指摘している。

一方、1906 年のサンフランシスコ大地震と 1896 年のヘイワード地震では同一現場で大きな側方流動が生じる液状化災害が発生した。この検証として、ヘイワード地震での推定地表面最大加速度 0.28g とサンフランシスコ大地震での最大加速度 0.40g を基に、同様な原位置液状化強度とせん断応力との比較を行っている。その結果は、図-6(b)のようであり、ヘイワード地震とサンフランシスコ大地震では、大規模な液状化災害が発生したと結論している。

本研究では、同一現場での液状化危険度の再評価を行うに当たって、以下の 2 点を考慮して安田等が提案する有限要素法液状化解析プログラム「ALID(analysis for Liquefaction-Induced Deformation)」による検討を行うこととした。

- 1) 地震時の地盤災害を解析するために必要な地形情報・地盤情報が公開されつつあり、空間的広がりを持つ地下空間情報の災害研究への活用は今後も進歩すると考えられる。従って、空間情報を活用できる有限要素法液状化解析の有効活用が今後も検討する必要がある。
- 2) 地震による都市災害の重要課題の 1 つに、地下ライフライン施設の被害がある。ライフライン施設の多くは、地盤構造が複雑に変化する地下空間に線形構造物の形態で埋設されているため、施設が被害を被る理由の多くは地盤の異なる変形によると考えられる。このような被害予測には、液状化による地盤変形を予測する解析が必要である。

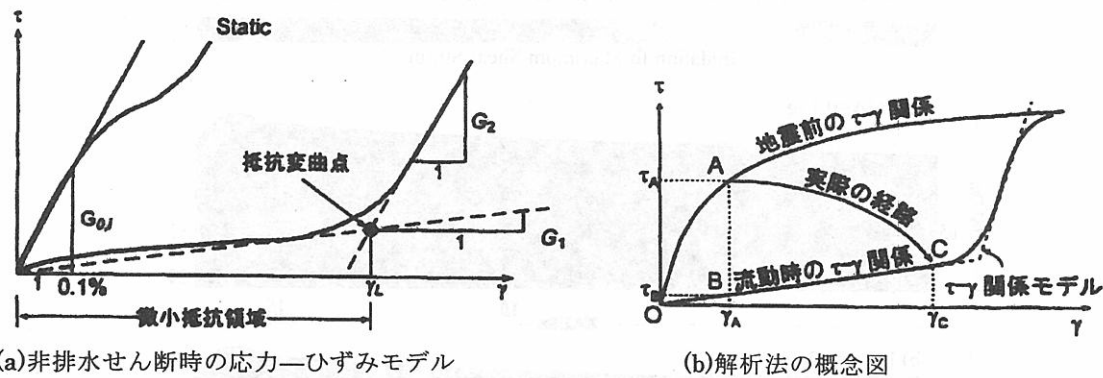


図-7 安田等による液状化流動解析プログラムの地盤モデル

安田等による液状化解析プログラムは、文献²⁾に詳述されているが、液状化解析用の地盤モデルは有効応力法でよく用いられる構成式を基礎とするものではなく、液状化後の非排水せん断変形量を要素試験等のデータ蓄積から推定式を構築して、液状化による地盤流動量を求めるものである。使用される地盤モデルの概念図は、図-7(a),(b)のようであり、液状化前の土の非排水せん断変形性を表す G_0 、液状化後の非排水せん断変形性を表す G_1, G_2, γ_L を用いて、液状化前後の変形特性の変化を表現している。これらの変形特性は土の種類や液状化時の安全率 (F_L 値) 等により変化するが、安田等はこれらを求める推定曲線を蓄積データを基に提案している。

Coyote Creek の解析に当たっては、図-5 に示した地盤構造モデルと、No.2 液状化層と No.5 液状化層の密度、コーン試験結果の違いから、それぞれ内部摩擦角 25° と 30° の強度を持つ液状化地盤としてモデル化して有限要素法解析を実施した。

解析結果は、図-8 及び 9 に示すようであるが、地表面加速度レベルを 3 段階に区別して解析を行った。図-8 は最大水平変位量の分布であり、図-9 は最大せん断ひずみ量の分布を示している。両図において、地表面

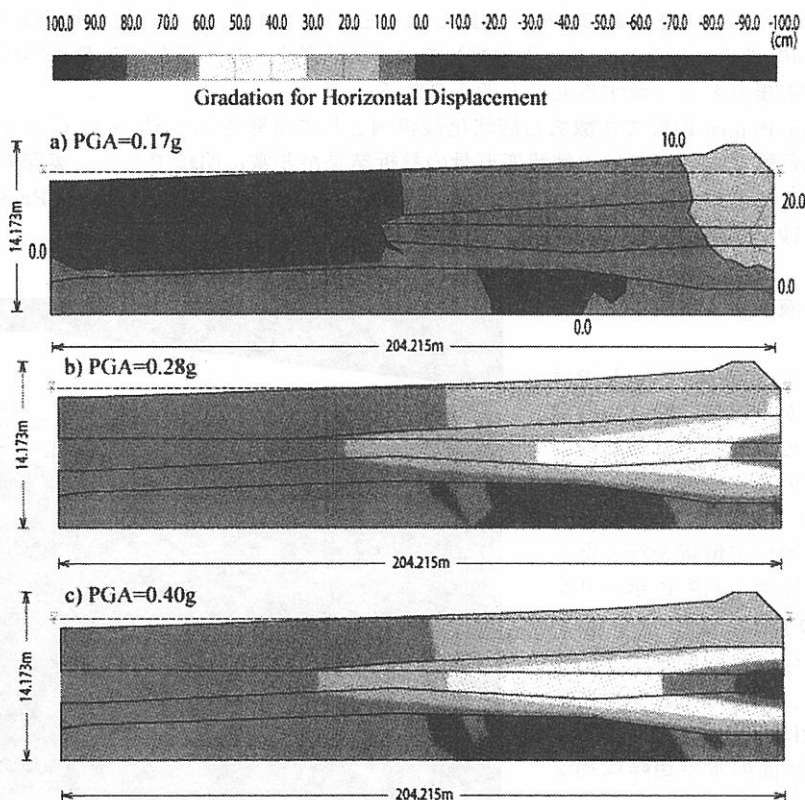


図-8 Coyote Creek での最大水平量の分布 a) 0.17g, b) 0.28g, c) 0.40g

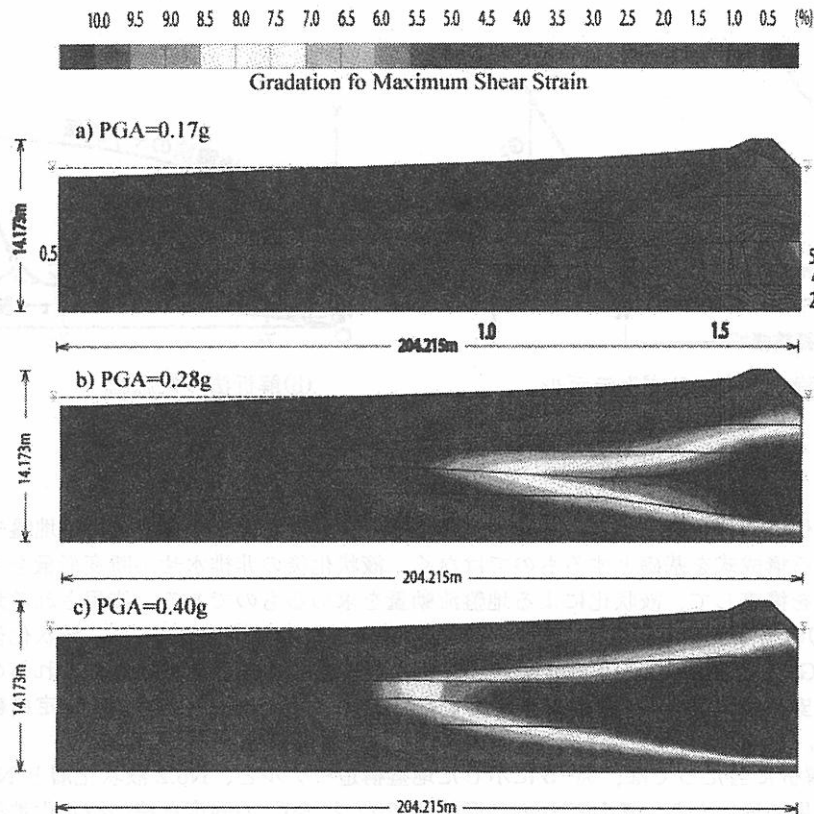


図-9 Coyote Creek での最大せん断ひずみ量の分布, a) 0.17g, b) 0.28g, c) 0.40g

最大加速度レベルの違いによる地盤変形量の相違は非常に明確である。すなわち、Loma Prieta 地震の 0.17g では水平変位量もせん断ひずみ量も小さく、またその発生位置も地表面より離れており、たとえ地盤内で局所的に液状化が発生しても、地表面まで噴砂が到達しないと判断される。一方、他の地震レベルの 0.28g (ヘイワード地震) と 0.40g (サンフランシスコ大地震) では、水平変位とせん断ひずみ量は非常に大きくなり、目撃された実際の被害規模とも一致するものと考えられる。

以上のように、Loma Prieta 地震で特徴ある液状化被害例として研究された Coyote Creek の有限要素法解析を通じて、液状化危険度評価における地盤変形量の解析結果が非常に明瞭であり、実際の被害を理解する上で有効であるということが確認される。以下では、同様な解析手法を用いて、Loma Prieta 地震である程度の液状化現象 (噴砂) が確認された地点について検討を行った。

5. その他の地点の液状化危険度評価

Loma Prieta 地震では、Coyote Creek では液状化が確認されなかったが、南方に位置する Guadalupe 川の東護岸ではある程度の噴砂が確認されている。このため、上記と同様な解析を図-10に示す Guadalupe 川の東西護岸断面について解析を行った。当解析地点では、先述の CGS のボーリングデータと USGS の DEM のデータのみがあり、地盤構造と工学特性を判定するためのデータ数は少なく、東護岸 (右側) に比べて西護岸の情報量は非常に少ない。また、図-11 に示す解析断面の水平距離は約 2 km と長大なものとなっている。このため、得られる結果の評価には慎重な判断が必要

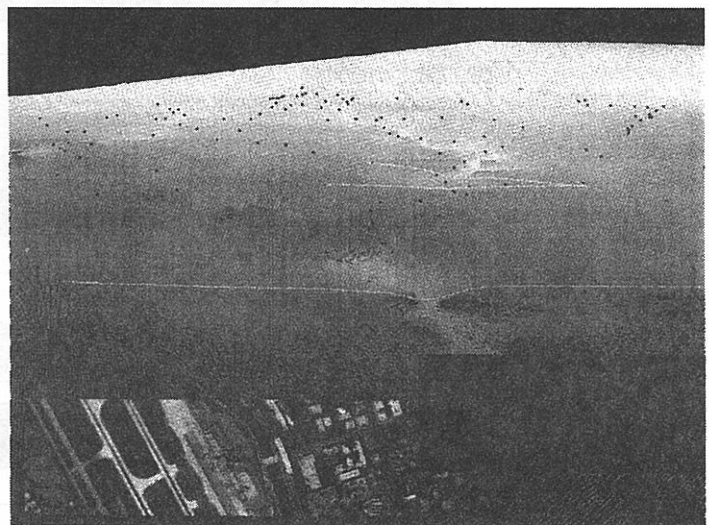


図-10 Guadalupe 川護岸での液状化解析位置

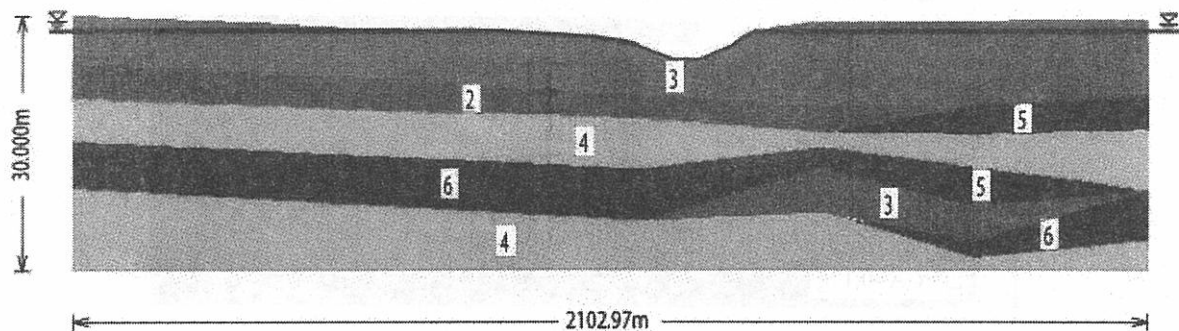


図-1 1 Guadalupe 川の解析護岸の地質断面

であるが、非常に興味深い結果が得られている。

図-1 2 は Coyote Creek と同様に 3 段階の地表面最大加速度を入力した場合の最大水平変位量の分布であり、図-1 3 は最大せん断ひずみ量の分布である。

まず、最大水平変位量の分布から、東部と西部で変位量の違いがあることが分かる。地表面最大加速度が小さい $0.17g$ の場合には、東護岸の変位の方がやや大きい。加速度が $0.28g$ 、 $0.40g$ へと増加するにしたがって変位量は西護岸で増加する傾向がある。すなわち、 $0.17g$ では東護岸で約 30cm の最大水平変位量が計算されているが、 $0.40g$ では西護岸の変位量が大きくなり、約 70cm となっている。

また、 $0.17g$ で計算される最大水平変位量は、Coyote Creek の場合と比べて大きく、またその変位分布も

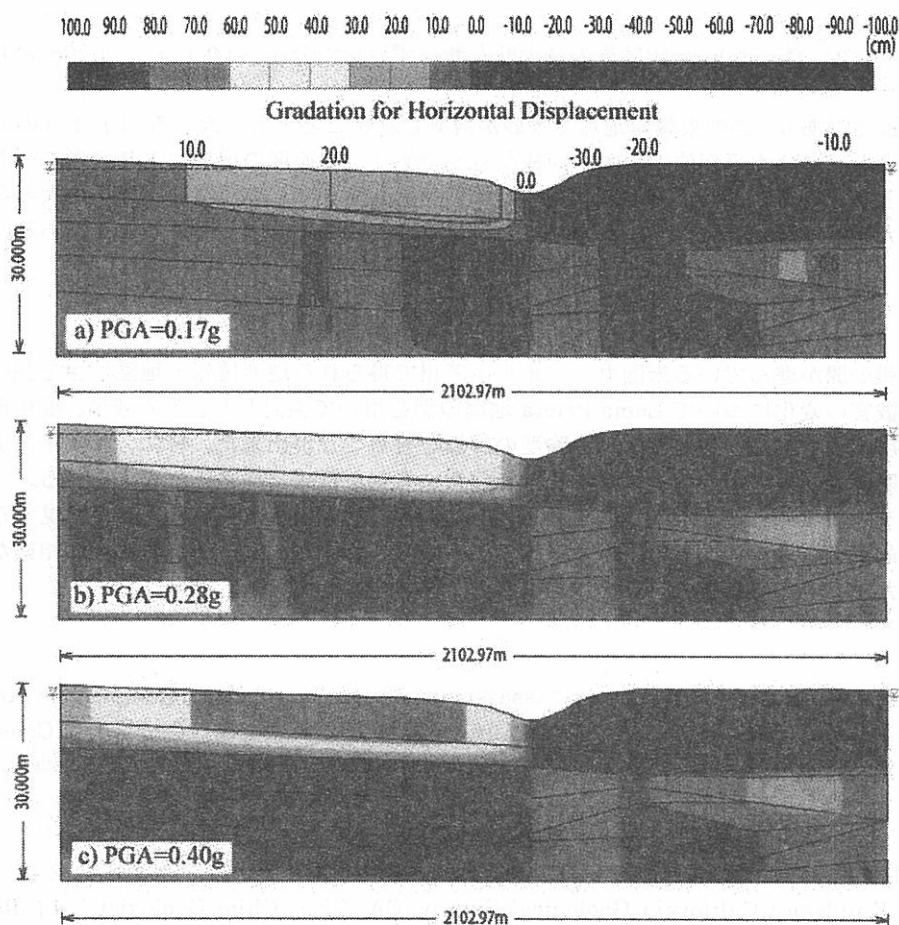


図-1 2 Guadalupe 川護岸における最大水平変位量の分布

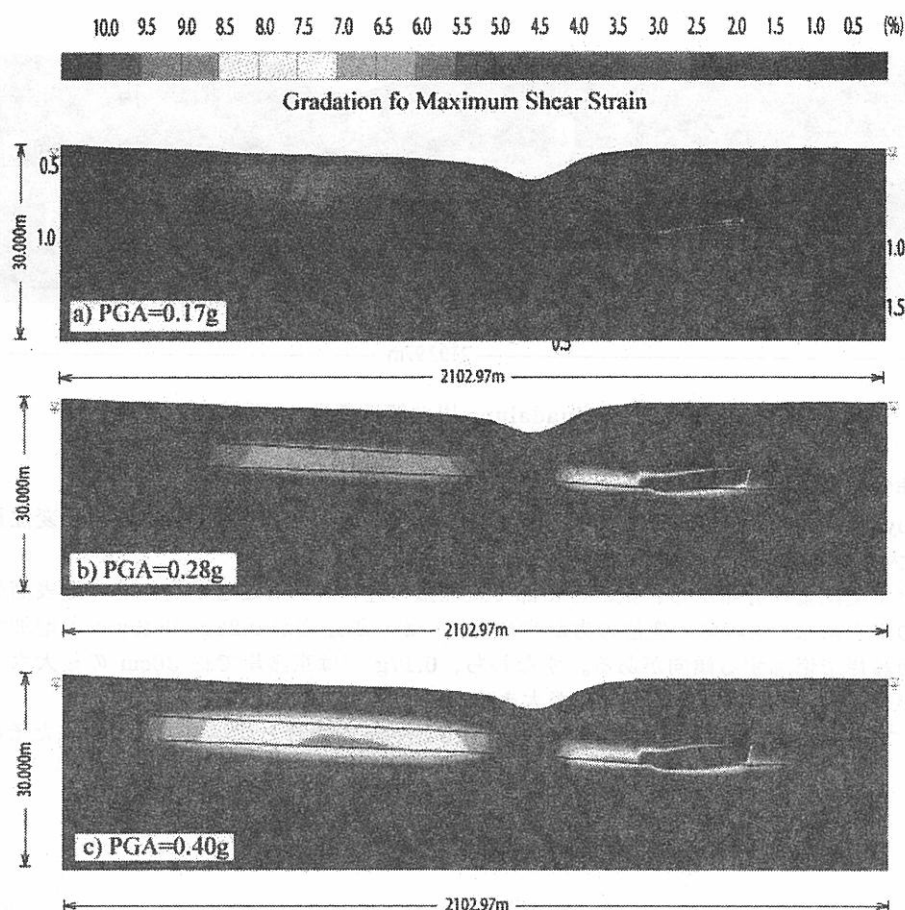


図-1 3 Guadalupe 川護岸の最大せん断ひずみ量の分布, a) 0.17g, b) 0.28g, c) 0.40g

比較的地表面近くであり、この東護岸地点で噴砂が観測されたこととも一致する。図-1 3 の最大せん断ひずみ量分布の結果も、ほぼ水平変位の分布と同様なものであり、加速度の増加により変形モードが両護岸で異なってくるのが分かる。なお、せん断ひずみは水平変位と異なり、地層間のずれが最大となる部分に集中しており、最大値は東護岸に位置し、東護岸の地層構成の複雑さに対応しているようである。

6. 結論

本文では、情報公開が進んでいる米国カリフォルニア州で得られる地形情報・地盤情報を基に、地震強度の相違と液状化被害の変化について Loma Prieta 地震の例を用いて検討した。その結果、現在得られる情報を基に、ある程度信頼性の高い地盤液状化危険度の評価を得ることが出来た。特に、液状化による地盤変形量の推定は、実際の地盤災害の程度を推定する上で非常に有効な情報を与えると考えられる。

用いた地盤モデル・解析法 (ALID) は、液状化時の地盤変形・強度特性を高精度で表現する構成式モデルに比べ、比較的簡便に地盤流動量を推定することが出来る。しかし、日米の地盤材料の相違などについては未検討であるため、今後も地盤モデルの特定について検討すべきである。

参考文献：

- J.A. Egan, R.R. Youngs, and M.S. Power. "Assessment of non-liquefaction along coyote creek during the 1989 Loma Prieta Earthquake San Jose", California. Technical report, Geomatrix Consultants, 1992.
 安田進, 吉田望, 安達建司, 増田民夫. 液状化に伴う流動の簡易評価法. 土木学会論文集, No.638, 71-89, 1999.

筆者：1) 田中泰雄、神戸大学都市安全研究センター、教授 2) 永田悟士、兵庫医科大学、事務職員
 3) Keith Knudsen : California Geological Survey, CA, USA, Chief Geologist 4) Robert Kayen :
 US Geological Survey, CA, USA, Chief Research Engineer

Assessment of Liquefaction Potential at Southern Parts of the San Francisco Bay Using Geotechnical Information & Analysis Tools

**Yasuo Tanaka
Satoshi Nagata
Keith Knudsen
Robert Kayen**

Abstract

This paper presents a study on the permanent lateral deformation and potential flow of ground due to soil liquefaction in the San Jose area of Northern California. Assessment of ground deformation by lateral flow is made through the use of a set of geotechnical Information Technologies, including GIS, LiDAR, and FEM analysis. By using a geotechnical database consisting of approximately 600 borehole logs, geological data, and topographic data such as DEM of the San Jose area, the key geotechnical and geological features were identified that indicate the locations most susceptible to lateral flow due to liquefaction. A FEM analysis of lateral flow is made to estimate the lateral flow of ground during the 1989 Loma Prieta earthquake, and earthquakes that occurred during 1868 and 1906. The results calculated for the Loma Prieta earthquake at Coyote Creek are in good agreement with the conclusion obtained by a previous study. The results of this study show the usefulness of various IT tools available for geotechnical earthquake hazard analysis.

