

地震動による海底地滑りの発生メカニズムに関する 地盤工学的検討

研究代表者 研 究 員 國生 剛治 (理工学研究科土木工学専攻教授)
 共同研究者 研 究 員 堤 千花 (土木工学専攻博士課程前期)
 共同研究者 研 究 員 池原 研 (地質調査総合センター研究員)

1 まえがき

現在確認されている海底地すべりは、そのほとんどが有史以前に沿岸から隔たった沖合で起きたものであり、水中音波探査機を用いた調査研究の進展とともに、その多くの痕跡が発見されるようになった。しかし中には、比較的最近、沿岸域もしくは海岸近くの陸地を含んで起きたものがある。それらは、海底ケーブルや人口の多い海岸線、海洋構造物などを破壊したり、津波を引き起したりした。海の沿岸域の利用・開発が進んだ昨今、沿岸域での海底地すべりまでも防災対策上考慮することが必要となる場合が考えられる。

ここでは、特に海岸付近で地震を引き金として発生した海底地すべり事例を文献により調査し、被害や発生要因についてまとめることにより、防災対策上必要となる海底地すべりの特徴をつかむとともに、その発生メカニズムについて、筆者らの最近の研究に基づいて考察する。なお、参考文献は表-2 にまとめている。

2 海底地すべりの特徴 [1][2]

海底地すべりの特徴は、まず、その規模が非常に大きいことである。例えば、陸上での地すべりでは、大きいものでも地すべり土塊の体積が数 10km^3 であるのに対し、確認されている最もすべり土塊の大きな海底地すべりは $20,000\text{km}^3$ であり、他の事例から考えてみても、海底地すべりにおける地すべり土塊の体積は数千 km^3 に及んでいることが多い。また、移動距離も数十キロメートルにおよぶものがある。

次に、海底地すべりの起きる斜面は、必ずしも急斜面であるとは限らず、緩傾斜でも地すべりが発生し得ることである。たとえば、アラスカ湾の Malaspina 氷河沖にある傾斜 0.5° の大陸棚における 1080km^3 に及ぶ海底地すべり、地震により発生した北カリフォルニアの傾斜 0.25° の Klamath River デルタにおける海底地すべり、 0.01° の傾斜ですべりが発生した Mississippi River デルタなどが、その代表的な例である。

また、海底地すべりを引き起こす原因としては、a) 地震、b) 波浪、c) 潮汐変化、d) 堆積土の自重、e) 土中の溶

表 1 地震により海岸近くで起きた海底地滑りの諸条件

海底地すべり発生箇所	発生地	発生年月日	地すべり発生原因	震源からの距離	水深	勾配	地すべり土塊の規模	移動量	岸をどのくらい含んで滑ったか	地形	土質と層構造	人的・構造物被害
Helice	ギリシャ	紀元前373年	大地震									
瓜生島(沖ノ浜)	大分県別府湾	慶長元年閏7月12日(西暦1596年9月4日)	M=7.5と推定される大地震と、それに伴った津波		—	局部的には $6\sim 15^\circ$ 内外の急傾斜			東西約3.9km、南北約2.2kmと言われている瓜生島(沖ノ浜)全体	大分川により堆積した沖積砂層	表層から順に、沖積層上部砂層、沖積層上部粘層、沖積層下部砂層、沖積層火山灰、洪積層	家屋・神社などの流出、人的被害は数知れず
Valdez	アラスカ	1964年3月27日	アラスカ地震(M=8.3)	約64km	—	$14\sim 20^\circ$	7000万 m^3 深さ60m	数100m	奥行150m。(海岸から約1km以上の陸地が海に向かって移動)	デルタ地形	粗砂、礫層の間にシルトおよび細砂層を挟む	2つの船着場150mとそこに建てられていた建物や倉庫、いた人30人
Seward	アラスカ	1964年3月27日	アラスカ地震(M=8.3)	約140km	—	$15\sim 20^\circ$	最大深さ約35m		約1.2kmに渡る海岸線。海岸から内陸へ最大約150m	デルタ地形	砂及び礫	船着場一帯(船渠、倉庫、燃料タンク)
Klamath川デルタ	カリフォルニア州北部	1980年11月8日	地震(M=6.5)	約50km	30~70m	0.25°	20km \times 2km 深さ5~15m	不明	なし	デルタ地形	砂およびシルト粘土	なし
Eratini湾	ギリシャ	1995年6月15日	Aegion地震(Ms=6.2)	震源域			深さ6~10m	不明	海岸が5~15m 流失		緩い沖積層(シルト質砂および粘土の互層)	護岸破壊
Degirmendere	トルコ	1999年8月17日	トルコ・コジヤエリ地震(M=7.8)	約10km	海岸線から約240mで-40m	約 9°			奥行100m程度、間口250~300m程度	扇状地性堆積物	(10mm程度の礫を多く含む)砂礫。	4階建てホテル、レストラン、そこにいた多くの人

存ガスなどさまざま考えられているが、以下では地震が原因となった地滑りに注目する。海底地すべりのおきやすい地形環境条件としては、a) フィヨルド、b) 大陸縁の河川デルタ、c) 海底谷、d) 大陸縁斜面、e) 海底火山諸島があげられる。海底地すべりのほとんどは未固結の堆積層でおきているが、中には大量の岩石の滑りが関わっている場合がある。未固結堆積層の土質は、海岸近くでは砂やレキからなる場合が多いが、沖合に離れるにしたがってシルトや粘土が主体となる。

3 地震により発生した沿岸での海底地すべりの事例調査

沿岸で発生し、社会に影響を及ぼしたと思われる海底地すべりの事例について、そのうち特に地震により発生した事例のいくつかを文献 [1]-[13] により調査し、地盤工学上重要と思われる項目について表 1 のように整理した。以下に、代表的なものについて概要を述べる。

古代ギリシャの都市ヘリスの滅亡 [8]

地震時の液状化による海底地すべりが海岸に被害を及ぼしたと推定される例としては、古くギリシャ時代にまでさかのぼることができる。

紀元前 373 年の冬の夜、ギリシャ中部のペロポネサス島の北岸にある繁栄した都市ヘリスは大地震に襲われ、激しい揺れで倒れたあと逆巻く波に呑み込まれた。誰一人として助かったものはいなかったと言われている。この出来事を研究者が詳しく調べたところ、建物の倒壊と地盤沈下に加え、土地全体が半マイル (0.8 キロメートル) も海に向かって滑ったことが原因との結論が出された。これを裏付けたのは 2200 年ほどあとの 1861 年 12 月 26 日に同じ場所で起きた地震である。これによって小規模ながら以前と同じ現象が再現され、地面はふたたび海の方に向かって滑りだしたのである。そして海岸に平行に幅 1.8 メートルの地割れができ、付近には噴砂口が現われ、液状化の発生を証拠付けた。100 ~ 130 メートルの帯状の地面が 13 キロメートルの海岸線に沿って海中にゆっくりと移動し、陸地に残された土地は 1.8 メートルほど沈下し、亀裂やひび割れが多数できた。紀元前 373 年の地震がこれよりも十倍もの大きさであったと推定されるので、古代都市ヘリスの滅亡は液状化によって起きた地滑りによるものであることがほぼ結論付けられるのである。

瓜生島沈没伝説

地震による海底地すべりによると思われるわが国で語り次がられている伝説がある [3]-[4]。古文書を総合的に評価して瓜生島の存在したと考えられる場所を推定し、その地域

で地質調査が行われた [5],[6],[7]。この調査では、海中地盤の水中音波探査と柱状採泥、陸域のボーリング調査により、地層構造の把握や地盤変動の有無等を調査することが目的とされた。

その結果、瓜生島推定域の海底地盤最表層 (沖積層上部砂層) の分布と堆積の状況は、陸上の地すべり地の構造と類似しており、地震による陸地 (海底地盤) の崩壊と沖側への土砂流出が推定された。すなわち、海岸近くの砂州で結ばれた瓜生島は、慶長元年閏 7 月 12 日、 $M=6.9$ 、津波の高さ 4 ~ 6m 程度、震央は別府湾湾口寄伊予灘 ($131.7^{\circ}E$, $33.3^{\circ}N$) 付近と推定される大地震とそれによって発生した津波により、崩壊、液状化、地すべりなどの地変が起き、島とそこにあった家屋は流出して海底に没したと推論された。

1964 年アラスカ地震での海底地すべり [8],[9],[10],[11]

1964 年 3 月 27 日、 $M=9.2$ のアラスカ地震が発生し、震源から約 64km 離れた石油パイプラインの基地 Valdez (バルディーズ) の沿岸が大規模な海底地すべり被害に遭った。この地盤はデルタ堆積層からなり、粗砂及び礫層の間に、シルトおよび細砂層がある。標準貫入試験による N 値は 7 ~ 25 であった。

地震発生時、このデルタ堆積層で液状化が発生し、約 7500 万もの土塊が、奥行 150m の陸地もるとも数 100m 流出し、それに伴い沿岸の港湾施設も破壊され流失した。地すべりを起こした海底の勾配は、図 1 に示すとおり、平均 10% 程度がそれ以下で通常海底勾配よりはかなり急であり、海岸近くは局所的に 30% 程度の所もあった。地滑りにより、海岸線は最大百数十メートル陸側に後退した。その背後の陸上の土地にも、奥行数百メートルにわたり、海岸に平行に幾重もの亀裂が生じた。地すべりを起こした地盤は、氷河が削った礫・砂・シルトが川によって運ばれ、フィヨルドとよばれる急峻な湾に堆積して三角州を形成したものである。密度は緩く、前面の海底勾配はかなり急勾

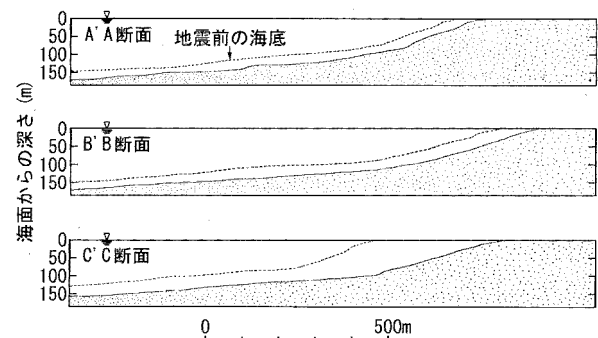


図 1 アラスカ地震前後の Valdez 沿岸海底面の変化 (文献 8)

配であり、液状化による地滑りを起こす条件は整っていたと考えられる。

また、天然の不凍港で内陸への物資補給基地であった Seward（スワード）も海底地すべりの大きな被害を受けた。Seward では激しい揺れの開始から 30 ~ 45 秒たったころに、スタンダード石油やドック・防波堤を含んだ長さ 2 キロメートル以上の海岸線が海の中に滑り出した。揺れが続いているあいだ中、次から次へ地面が切れ切れに海に滑り出し、結局、奥行最大 150 メートルにわたって海岸沿いの土地が失われた。この地盤も氷河が削り取った砂礫やシルトからなるフィヨルドに形成されたデルタであった。海岸線を走っていたスワードとアンカレッジを結ぶアラスカ鉄道の線路はガタガタに段差がつき、一部は海中に流失した。海岸地すべりの背後百数十メートルにわたっては沢山の地割れが現われ、揺れと共に幅が広がっていった。他にも、近くにあるアラスカ最大の湖 Kenai 湖の類似の土質条件からなるデルタが液状化し、大規模な地滑りを起こした。

カリフォルニア州北部沖での海底地滑り [12]

1980 年にカリフォルニア州北部のオレゴン州に近い太平洋岸から 60 キロメートル沖合で、マグニチュード 7.0 の地震が起きた。この沿岸で日ごろから漁を行っていた漁師が、地震から数日後に以前は滑らかだった海底面に明瞭な段差ができていたことを発見した。そこで米国地質調査所の専門家は音波探査による精密な海底の調査を行った。たまたま、この海域では地震が起きる 1 年前に同様な調査が行われていたために、両者の比較により地震前後での海底地形の詳細比較が可能になった。

それによれば、水深 30 ~ 70 メートル、勾配わずか 0.25 度の海底で海岸に平行に 20 キロメートル、幅 2 キロメートルの海底地盤が沖の方向に流動したことが分かった。この海域はクラマス川と呼ばれる中規模の河川が太平洋に流れ込む河口デルタにあたり、海底土質は細砂や中粒砂が最大 50 メートルの厚さで堆積していた。さらにその沖には細粒の泥が堆積した範囲が広がっていた。地すべりは砂と泥の堆積範囲の境界に近いところで起き、平面積 20 × 2 キロメートル、厚さ 5 ~ 15 メートル程度の表層が下流側に滑った。このため、図 2 のように、もともと 0.25° とわずかであった勾配がほぼ 0° になった。そのため下流側境界に明瞭な段差があらわれ、さらに下流側の泥層の表面に幾筋もの圧縮された高まりができた。

この海底地すべりでは、サイドスキャンソナーと呼ばれる特殊な音波探査や、水中カメラでの海底撮影さらに海底

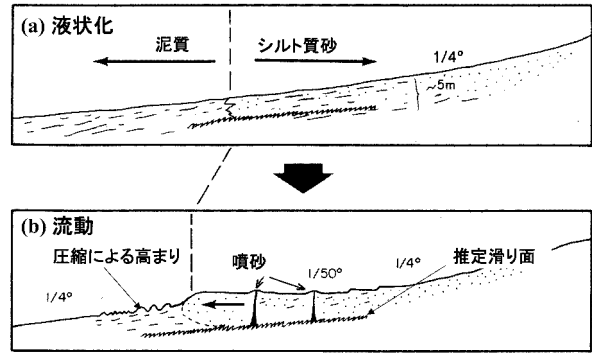


図 2 カリフォルニア州北部の 1980 年の地震による海底面の変化 (文献 12)

地盤にボーリング孔を掘っての土の採取など、かなり詳しい調査も行われた。その結果、海底に直径 1 メートルから 12 メートルにおよぶ無数の噴砂口や陥没の後などが見つかり、液状化の発生が裏付けられた。さらに、ボーリング孔から採取したサンプルから、土は均質ではなくシルト質の砂や粘土質のシルトが層状になっていることが分かった。この例から、地震による液状化が 1 度以下のきわめて緩い勾配の海底地すべりを引き起こすことが実証された。

トルコイズミット湾沿岸の地滑り [13]

最近の記憶に生々しい出来事としては 1999 年におきたトルコのコジャエリ地震による海底地すべりがある。地すべりが起きたのはイズミット湾とよばれるイスタンブールから 100 キロメートルほど東にある幅数キロメートル奥行き数十キロメートルの東西にのびる波静かな湾で、この地震で動いた北アナトリア断層が湾の中を東西に横切っている。湾の水深は幅が狭い割には 200 メートルと深く、そのため特に南側の海底勾配は平均 10 パーセント程度と急になっている。

地震によってデールメンデレの海岸は奥行き 100 メートル、間口数百メートルの土地が海中に流失した。その範囲にはいくつかの店やホテルがあったが 40 人あまりの人もろとも海中深く連れ去られた。ちょうど滑った面にかかった建物は地震後には海岸にしがみついた形になり、半分海水につかりながらからうじて踏みとどまっている様子が写真 1 からよく分かる。この敷地の前面の海で地震後に海底の深さの変化を調査し、地震前と比べた結果が図 3 に示されている。以前のなだらかな海底が大きくえぐられ、沖に流失したことがよく分かる。これから、海底地すべりが起き、その滑り面が陸地にまでおよんでこの災害を引き起こしたことがよく判る。デールメンデレ以外にもイズミット湾南岸沿いに何ヶ所かの海岸で同様の災害が起き、建物や

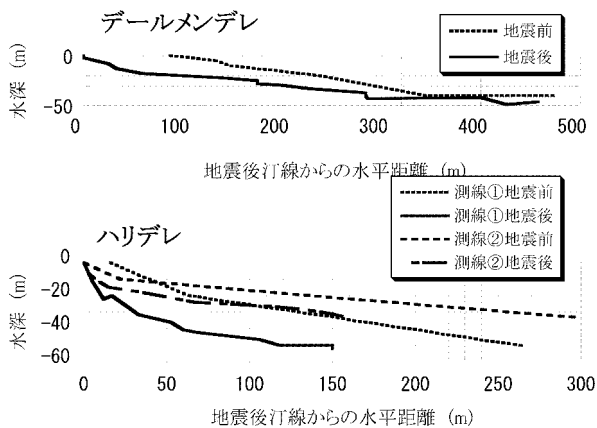


図3 トルココジャエリ地震前後でのイズミット湾南岸海底面の変化(文献12)



図4 トルコデールメンデレでの海底地滑りによる海岸流出

道路が海中に没した。このうち、ハリデレという地点での海底勾配の変化は図3に示されている。

この海底地すべりがどのようにして起きたかはまだ調査が十分進んでいない。液状化が起きたことを示す噴砂の跡も海底地すべりの発生地点では見つかっていない。ただ、これらのイズミット湾南岸沿いの町は断層がすぐ海の沖を通っていて、街中の建物の震動被害もかなり大きかったことからみて海岸でも地震の揺れが大きかったことが考えられる。また、海岸沿いの地盤は後背の丘陵地からの小さな川によって運ばれた砂や礫からなり、波静かな内湾で緩く堆積していたため大きな地震動が加わって液状化した可能性は高い。平均勾配10～10数パーセントと海底としてはかなり急勾配の砂礫層の斜面が液状化によって不安定になり、沖に向かって地滑りを起こした可能性は高い。

4 陸域の液状化地盤の流動メカニズムと海底地すべりメカニズムの関係

比較的傾斜の緩い海底が広い面積にわたって流動する海底地すべりの力学的メカニズムはまだほとんど解明されて

いない。海岸を巻き込んだ地滑りの場合、その勾配は10度前後で比較的大きいが、それでも地盤の安息角よりはかなり緩く、その破壊メカニズムには地盤の液状化が関わっている可能性が考えられる。実際、アラスカのValdezやSewardでは地滑りの背後の地盤で液状化現象が確認されている。

一方、岸から離れた海底地盤の地滑りでは勾配が1度以下の緩い場合がほとんどである。このような緩い地盤が滑るためには地盤のせん断強度が極端に低下する必要があるが、そのメカニズムはまったく解明されていない。筆者らは、このような海底地滑りの発生メカニズムに近いと思われる陸域での傾斜の緩い砂地盤の地震時の側方流動メカニズムについて、ここ数年にわたり系統的研究を進めてきた。

陸域での地震時の液状化による地盤の側方流動は震動中ばかりでなく、震動終了後にも生じたことが明らかにされている[14][15]。最近の例ではニュージーランドの橋が地震1時間後に側方流動による地盤変状で通行不能となった例[16]や、ギリシャでの地震後の海底地滑りによる海岸沿いの地盤の流失事例が紹介されている[17]。これらの例は、流動破壊の駆動力として、地震の慣性力よりむしろ地盤の高低差によるせん断力の方が本質的であることを示唆している。しかしながら、既往の1G場あるいは遠心場での均一な砂層を対象とした模型実験では振動が終了すると、液状化が継続していても側方流動はほぼ停止してしまう。一方、これらの流動は地盤の傾斜が1度以下の非常に小さな場合でも数メートルの大きさで生じた場合があり[18]、砂のせん断強度が極めて小さくなり得るメカニズムによらないと説明できないと思われる。

実際の砂層は堆積環境によっても異なるが、一般には不均質であり、粒径の異なるシルト質砂や礫質砂を含む複数の薄層を挟んだ成層構造から成り立っている。このような砂層が液状化すると過剰間隙水は地表に向かって上昇するが、その途中にある低透水層の直下に貯留され水膜が形成されると考えられる。これは低透水薄層直下の土粒子間隙の再配分が生じる現象とも解釈できる。

陸域の地盤の液状化による流動現象について、これまでの研究に基づき、以下の知見が得られている[19]-[37]。

- 1) 2箇所の砂地盤の露頭において粒度の深度分布を調査した結果、浚渫埋立地盤においては1～2mで細粒分を多く含んだ層が出現すること、大河川下流域の沖積砂地盤においても、粒度分布は深度方向に周期的変化を示し、複数の細粒層が挟まれていることが分かった[32][36]。
- 2) 緩い飽和砂の液状化時には、砂層に含まれる細粒層

の直下で間隙水が貯留されて、水膜が形成されるが、その厚さや存続時間は下部砂層の相対密度が小さくなるほど急激に増大する [21][23][25][26][28]。

- 3) 下部の高透水層と上部の低透水層からなる 2 層系砂層では層境界に安定的な水膜は生じない。一方高透水層の間に低透水層を挟んだ 3 層系砂層では水膜は生成する。両者の対比により、水膜の生成は、下部からの浸透水の浸透力が低透水中間層をさらに上にある反力層に押しつけることにより可能となると解釈できる。3 層系での水膜の生成過程は簡単な 1 次元圧密・沈降解析によりかなり再現できる [27][29][32][35][36]。
- 4) 水膜の発生しない均一砂層の流動破壊はほぼ振動中にのみ生じ、連続的なモードで生ずる。これに対し、砂層で水膜が発生すると、地盤の流動破壊は振動終了後も継続し、非常に勾配が小さな水膜に沿っても不連続的に生じる。水膜の浸透力により低透水層が破られると、上部層は局所的に再液状化し不安定化する。しかし、せん断応力場での水膜の生成・存続メカニズムの厳密な検討は残された課題である [24][27] ~ [30]。
- 5) 新潟地震時の新潟市の流動のケーススタディーにより、1%以下のわずかな地表面勾配と流動変位との間に明瞭な相関があることが分かった。勾配 0.5%程度で 4m 程度の流動が生じるメカニズムの説明にはせん断抵抗がほぼゼロの水膜の役割が不可欠であると思われる [31][37]。

この水膜に関わる流動メカニズムは海岸付近での海底地滑りにほぼそのまま当てはまる可能性が考えられる。ただし、沖合で生じる地滑りについてはその土質が粘土・シルトが主体であり、砂質土の液状化とはだいぶ現象が異なってくると思われる。粘土やシルトの海底地盤が地震やその他の攪乱を受けると、間隙水圧の上昇とその逸散による緩慢な地盤沈下が起きることは十分考えられる。その際、透水性の異なる層境界で水膜のような間隙の大きな面が連続的に形成され、そこが滑り面となって海底地滑りが起きうる可能性が考えられる。ただし、この場合、地震と海底地滑りの発生にある程度の時間差が生じることが考えられる。いずれにしても、今後さらに海底地盤の土質条件などの収集に基づいた精緻な検討が必要である。

5 まとめ

本調査研究では、まず過去の海底地すべり事例を文献により調査し、特に海岸付近で地震時の液状化により発生し

た被害や発生要因についてまとめた。次に海底地すべりが緩い海底勾配で起きていることに注目し、それを説明できる可能性のあるメカニズムについて、既往の研究に基づいて考察した。得られた主要な知見は以下の通りである。

- 1) 海底地すべりは、陸域での地滑りに比べて規模が大きいが、1 度前後のきわめて緩やかな海底勾配でも起きている。その土質は砂質ではなく粘土やシルトからなる場合も多い。
- 2) 海岸付近で地震時の液状化により発生する海底地すべりは、その地域の地盤がデルタ地形、扇状地性堆積物などいずれも密度の低い沖積砂層または砂礫層である。その傾斜は通常の斜面の安定条件である安息角（均一な緩い砂で 30 度程度）よりはるかに緩やかであるが、一般の海底勾配よりは急な場合が多い。
- 3) 陸域での傾斜の緩い砂地盤の地震時の側方流動メカニズムについて、筆者のグループによる最近の研究の概要をまとめた。この水膜に関わる流動メカニズムは海岸付近での海底地滑りに当てはまる可能性が高いものと思われる。
- 4) 一方、沖合で生じる地滑りについてはその土質が粘土・シルトが主体であり、砂質土の液状化とはだいぶ現象が異なってくると思われる。今後、このような場合を含めた、メカニズムの定量的検討が必要である。

謝辞

本研究にあたっては独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センターの池原 研 研究員から海底地滑りについての情報・文献の提供をいただいた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- [1] Hampton, M. A. and Lee, H. J. (1996) : Submarine landslides, *Reviews of Geophysics*, 34, pp.33-59
- [2] 池原 研 (2000) 地震性堆積物を用いた地震発生年代と発生間隔の解析, *地質調査所月報*, 第 51 巻, 第 2/3 号, pp.89-102.
- [3] 小橋澄治, 佐々恭二: 地すべり・斜面災害を防ぐために, pp14-15, 山海堂
- [4] 加藤知弘 (1978) : 瓜生島沈没, *ぱびるす文庫*, 葦書房, p.120
- [5] 三澤良文, 小菅晋, 濱田政則, 福江正治, 北原道弘,

- 中村隆昭 (1992) : 瓜生島の消失とその原因へのアプローチ, 月刊 海洋, Vol.24, No.3, pp.191-202
- [6] 三澤良文, 小菅晋, 濱田政則 (1993) : 別府湾と瓜生島の音響的地質構造, 東海大学海洋研究所研究報告, 第 14 号, pp.45-53
- [7] 三澤良文 (1993) : 音響でとらえた未固結堆積物の変形 瓜生島を例として, 月刊 地球, 号外 No.8, pp.197-204
- [8] H. Bolton Seed (1968) : Landslides During Earthquakes Due to Soil Liquefaction, pp.1068-1075
- [9] Coulter, H. W., and Migliaccio, R. R. (1966) : Effects of the Earthquake of March 27, 1964 at Valdez, Alaska, Geological Survey Professional Paper 542 -C, U. S. Department of the Interior, p.36
- [10] Lemke, R. W. (1967): Effects of the Earthquake of March 27, 1964 at Seward, Alaska, Geological Survey Professional Paper 542-E, US Depart of Interior.
- [11] McCulloch, D. S.(1966): Slide Induced Waves, Seiching and Ground Fracturing Caused by the of the Earthquake of March 27, 1964, at Kenai Lake, Alaska, Geological Survey Professional Paper 542-E, US Depart of Interior.
- [12] Field, M. E., Gardner, J. V., Jennings, A. E. and Edwards, B. D. (1982): Earthquake-induced sediment failures on a 0.25° slope, Klamath River delta, California, Geology, V.10, pp.542-546.
- [13] 地盤工学会地震調査団: 1999 年トルコ・コジャエリ地震, 台湾・集集地震調査報告書, 地盤工学会, 2000.
- [14] Kawakami, F. and Asada. A.: Damage to the ground and earth structures by the Niigata earthquake of June 16, 1964, Soils and Foundations, Vol. VI, No.1, pp14-30, 1966.
- [15] Seed, H.B.: Design problems in soil liquefaction Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.113, No.GT8, pp827-845, 1987.
- [16] Berrill, J.B., Christensen, R.J., Keenan, R.J., Okada, W. and Pettinga, J.R.: Lateral spreading loads on a piled bridge foundation, Seismic Behavior of Ground and Geotechnical Structures, Proc. of Special Technical Session on Earthquake Geotechnical Engineering in ICSMGE in Hamburg, pp153-183, 1997.
- [17] Bouckovalas, G.D., Gazetas G. and Padadimtriou, A.G.: Geotechnical aspects of the 1995 Aegion, Greece, earthquake, Proc. of 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol.II, pp.739-748, 1999.
- [18] 浜田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利: 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, 土木学会論文集, No.376, III-6, pp.211-220, 1986
- [19] 國生剛治・渡辺一洋: 液状化地盤の側方流動に及ぼす水膜現象 (WFE) の影響, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, pp.545-548, 1997
- [20] Kokusho, T., Watanabe, K. and Sawano, T.: Effect of water film on lateral flow failure of liquefied sand, Proc. 11th European Conference on Earthquake Engineering (Paris). CD-Rom, 1998.
- [21] 國生剛治, 澤野珠揮「砂地盤の側方流動に関わる水膜の生成に関する研究」地盤工学会, 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変位に関するシンポジウム発表論文集, pp.317-320, 1998
- [22] 國生剛治・故島哲朗: 液状化地盤の流動メカニズムに与える水膜現象 (WFE) の影響に関する模型実験, 地盤工学会, 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変位に関するシンポジウム発表論文集, pp.313-316, 1998.
- [23] 國生剛治・澤野珠揮・故島哲朗・中野孝威・野中のぞみ: 液状化砂層の側方流動に及ぼす水膜の影響とその生成条件, 第 10 回日本地震工学シンポジウム発表論文集, pp.1463-1468, 1998.
- [24] 國生剛治: 水膜現象が液状化砂層の側方流動へ与える影響, 土と基礎, Vol.47, No.4, pp.103-106, 1998.
- [25] 國生剛治, 澤野珠揮「砂地盤の側方流動に関わる水膜の生成に関する研究」地盤工学会, 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変位に関するシンポジウム発表論文集, pp.317-320, 1998 年 5 月
- [26] 國生剛治, 澤野珠揮, 故島哲朗「液状化砂層での水膜の生成に関する一次元圧密解析」第 34 回地盤工学研究発表会, pp.2067-2068, 1999
- [27] Kokusho, T.: Water film effect on lateral spreading in liquefied sand, Proc. 11th Asian Regional Conf. on SMGE (Seoul), pp.47-50, 1999
- [28] Kokusho, T.: Formation of water film in liquefied sand and its effect on lateral spread, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society for Civil Engineers, Vol.125, No.10, pp.817-826, 1999.

- [29] Kokusho, T., Kojima, T. and Nonaka, N.: Emergence of water film in liquefied sand and its role in lateral flow, Proc. 12th WCEE (Auckland), CD version, 2000
- [30] 松下良子, 國生剛治, 野中のぞみ, 樺沢和宏: 液状化地盤の側方流動メカニズムに及ぼす水膜の影響, 土木学会第 27 回関東支部技術研究発表会, pp.426-427, 2000
- [31] 森嶋聡, 國生剛治, 藤田勝久: 新潟地震時の砂層中における水膜生成の可能性について, 土木学会第 27 回関東支部技術研究発表会, pp.468-469, 2000
- [32] 國生剛治: 砂層の成層構造による液状化時の水膜生成と地盤安定性への影響, 応用地質, 第 41 巻, 第 2 号, pp.77-86, 2000
- [33] 國生剛治, 藤田勝久, 森嶋聡: 新潟地震における液状化砂層での水膜生成の可能性, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.2249-2250, 2000
- [34] 國生剛治, 樺沢和宏, 野中のぞみ, 松下良子: 水膜を生成する低透水性シルトの塑性の違いによる液状化地盤の側方流動現象の比較実験, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.2253-2254, 2000
- [35] 國生剛治, 故島哲朗: 液状化砂層中での水膜生成の解析コードの開発と実験への適用, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.2257-2258, 2000.
- [36] Kokusho, T. and Kojima, T.: Mechanism for postliquefaction water film generation in layered sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society for Civil Engineers, Vol.128, No.2, pp.129-137, 2002.
- [37] Kokusho, T. and Fujita, K.: Site investigation for involvement of water films in lateral flow in liquefied ground, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society for Civil Engineers, Vol.128, No.11, pp.917-925, 2002.