

37. 地盤の部分的液状化が地中構造物に与える 影響の有限要素解析

武蔵工業大学 片田 敏行
地震研究所 伯野 元彦
前田建設工業株式会社 高木 哲郎

(昭和 56 年 9 月 8 日受理)

1. はじめに

これまでの震害例によれば、地震動によって表層の飽和砂層地盤が液状化すると、その地盤に存在する埋設管に大きな被害が生じることが報告されている(久保・他, 1974)。液状化する表層地盤が地中構造物におよぼす影響については、主に砂箱を用いた模型実験によって解析されている(片田・他, 1981)。これらの砂箱実験では、模型地盤全体が液状化する。

しかし、現実の地盤において、土質状態によっては表層の一部分のみが液状化するだけで終わることも考えられる。特に、水平方向に細長い地中埋設管では、その埋設管の存在する地盤全体が液状化することは少ないと思われる。また、垂直方向に長い地中構造物(例えば、杭基礎、ケーソン基礎など)においても、ある地層だけが液状化した場合、構造物にどのような影響を与えるかを明らかにする必要がある。

伯野・松井(1976)は表層地盤の S 波速度が 10, 30, 50, 100 m/s の各ケースについて、地盤-構造物系の動的応答解析を行い、その結果を比較検討することによって、表層地盤全体の液状化が構造物に与える影響を考察している。

伯野・松井(1976)の計算結果である Fig. 1 は土の軟度と地震時における最大ひずみの関係を示しており、Fig. 2 は土の軟度とケーソン壁に作用する最大土圧の関係を示したものである。Fig. 1, 2 から液状化が進行して、地盤剛性が低下するとケーソン壁面に接した部分の土のひずみは大きくなり、土圧は小さくなっていくことがわかる。

さて、過去の地震観測結果(田村・他, 1973, 1975; 中山・他, 1975)、および模型実験などによって、地中構造物では地震時に固有振動が誘起されることはないといわれている。すなわち、地震時における地中構造物の挙動は周辺地盤の動きに支配され、地中構造物に作用する地震力は地盤の変形状況やひずみ分布に由来するといわれる。

また、過去の被害地震では、地震時に大きなひずみが生じる軟弱地盤地帯において、地中埋設管に大きな被害が生じている(土木学会, 1966; 久保・他, 1974)。このことは、地震時において地盤に生じるひずみの大きさが地中構造物の被害の有力な原因となりうることを示すものであるといえよう。

それゆえ、本研究では有限要素解析によって、次のことを明らかにしようと試みるわけである。すなわち、地中構造物と液状化地盤はほぼ一体となって動くと考えられる(片田・他, 1981) から初めに部分的液状化地盤のひずみと応力の分布状態を解析する。次に、液

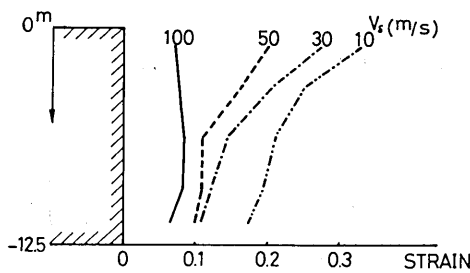


Fig. 1. Relation between flexibility of surface ground and distribution of maximum strain during earthquake (HAKUNO et al., 1976).

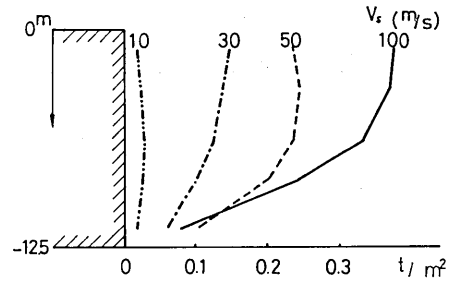


Fig. 2. Relation between flexibility of surface ground and distribution of maximum soil pressure acting on underground structure (HAKUNO et al., 1976).

状化したことによって地盤に生じたひずみと応力がそこに存在する構造物にどのような影響を与えるかを解析する。また、地盤が部分的に液状化した場合、基盤に対する構造物の支持形式の違いが構造物に与える影響についても考察することにする。

2. 解析方法

解析の方法として、本研究では以下のような方法を用いることにする。地盤の液状化が進行するにつれて、土の単位体積重量や地盤剛性の値は変化する。このとき、地盤剛性の変化は土の単位体積重量の変化よりも大きい。そこで、地盤の液状化部分の S 波伝播速度を低く見積ることによって、近似的ではあるが地盤の部分的な液状化による地盤剛性の低下を考慮し、構造物にどのような影響を与えるかを有限要素法で解析する。地盤全体が完全液状化状態では S 波伝播速度はゼロである。したがって、地盤の液状化部分の S 波

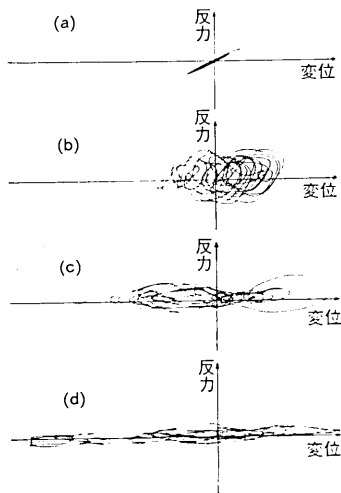


Fig. 3. A change of restoring force characteristics of saturated sand in liquefaction process (KATADA et al., 1982).

の伝播速度を非液状化部分の値よりも低く見積ことは不完全液状化状態を仮定したといえるであろう。この方法は物理的な裏付けを無視したきわめて、簡便な方法といえるかもしれない。現在において、液状化の影響を考慮する最も合理的方法は有効応力解析に基づいて各時間ステップの地盤剛性を定めて応答解析を行う方法であろう。しかし、地盤中に構造物が存在する場合や地盤がきわめて複雑な地層構造の場合など、有効応力の解析が困難な場合も少なくない。さらに、液状化過程において砂層地盤は非常に複雑な応力-ひずみ曲線を描く (Fig. 3)。それゆ

え、復元力特性をモデル化して、液状化過程における砂層地盤の非線形振動解析を行うには困難が伴うであろう。したがって、すでに述べたような解析方法による線形振動解析の結果から、定性的な傾向を明らかにすることも意義がある。

解析には I. M. IDRIS, J. LYSMER et al. (1973) の作成した QUAD-4 を用いた。解析では線形応答を求めた。入力としては、ARVIN-TEHACHAPI 地震 (1952. 7. 21) の Taft 地震記録 (N21E 成分) を最大加速度 50 gal に正規化した波を用いた。計算の時間刻みは $\Delta t=0.005$ sec である。Taft 地震記録はそのフーリエスペクトルから 1.5 Hz と 2.9 Hz に卓越振動数を持つような波であることがわかる。

さて、入力波の周波数特性は地盤の固有周期との関係から地盤あるいは地中構造物の応答特性に影響してくる。そこで、地盤-構造物系の固有周期に近い卓越周期を持つ人工地震波をも作成して入力として用いて共振効果を考察することにした。

人工地震波としては任意のパワースペクトルを有する定常確率ガウス過程で表現した波を用いた。このような数学モデルで与えられる人工地震波は物理的な根拠はないが、これまで得られた地震波を忠実に再現できる。このような点から任意の周波数特性を有する波を作成して、応答解析に用いることが可能である。この点に数学モデルで与えられる人工地震波を用いる利点があるといえよう。さて、任意のパワースペクトル密度関数 $S_x(2\pi f)$ を有する定常確率ガウス過程は次式で与えられる (星谷, 1974)。

$$x(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (1)$$

ここで

$$a_k^2 = 4 S_x(2\pi f_k) \cdot 2\pi \Delta f \quad (k=1, 2, \dots, N)$$

$S_x(2\pi f)$: パワースペクトル密度関数

$$\Delta f = (f_u - f_l) / N$$

f_u, f_l : $S_x(2\pi f)$ の正の周波数領域における上限値と下限値

$$f_k = f_l + \left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta f \quad (k=1, 2, \dots, N)$$

ϕ_k : $0 \sim 2\pi$ で一様な乱数

N : 十分大きな整数

(1) 式を用いてプログラムを作成し、入力用の人工地震波をシミュレートした。与えたパワー・スペクトル密度関数は三角形分布である。地盤構造物系と共振するように中心周波数は 1.5 Hz とした。

用いたパラメーターを以下に示す。

パワー・スペクトル密度関数 $S_x(2\pi f)$		三角形分布 (中心周波数 1.5 Hz)
周波数の上限値	f_u	3.0 Hz
周波数の下限値	f_l	0.0 Hz
周波数領域における分割数	N	90
時間間隔	Δt	0.01 sec
継続時間	T	20 sec

3. 解析モデル

対象とした解析モデルは次の3つである。

- (1) 地盤
- (2) 地盤-ケーソン構造物系
- (3) 地盤-トンネル構造物系

地盤の部分的な液状化の効果は S 波速度を $V_s=100\text{ m/s}\sim 300\text{ m/s}$ の間で9段階に分布させることによって考慮した。解の安定性のために、 S 波速度の下限をそれほど落とすことができなかった。

いずれの地盤モデルおよび地盤-構造物系モデルも120個の有限要素に分割した。地盤モデルでは、8個を1グループごとに非液状化と液状化の別を考えた。すなわち、あるグループを非液状化とするならば、そのグループ内の8個のすべての有限要素の S 波伝播速度を 300 m/s とし、液状化とするならば、グループ内の8個のすべての有限要素の S 波伝播速度を 100 m/s とした。これは、地盤の同じ液状化部分内でも応力やひずみの分布が一樣ではないと考えて、その分布状況を明らかにしようとしたためである。

部分的液状化地盤-ケーソン構造物系の場合には、ケーソン部は $V_s=500\text{ m/s}$ 、地盤の非液状化部分は $V_s=300\text{ m/s}$ 、液状化部分では $V_s=100\text{ m/s}$ として有限要素解析を行った。液状化部分が地盤の中間に帯状に存在するようなモデルを用いた。

また、地盤-トンネル構造物系の場合には、トンネルの横断面を想定して有限要素解析を行った。このときはトンネル構造物の真横に液状化が生じるような場合を想定した。トンネル構造物における V_s の値は 400 m/s とした。他の値はケーソン構造物の場合と同じである。

以上の有限要素解析の計算に用いた定数を Table 1 に示す。なお、境界条件は水平方向が自由で、垂直方向が拘束とした。

4. 解析結果及び考察

前節に述べた解析モデルに対して、Taft 地震記録を入力として、有限要素解析により地盤および地盤構造物系のせん断応力とせん断ひずみを求めた。計算結果を Fig. 4, 5, 6

Table 1. Values used in calculation.

		$V_s(\text{m/s})$	Weight per unit volume (t/m^3)	Poisson ratio	Damping constant
Ground	1	100	1.70	0.450	0.100
	2	125	1.76	0.444	0.097
	3	150	1.83	0.439	0.094
	4	175	1.88	0.433	0.092
	5	200	1.92	0.428	0.089
	6	225	1.97	0.422	0.086
	7	250	2.01	0.417	0.083
	8	275	2.06	0.406	0.081
	9	300	2.10	0.390	0.078
Tunnel		400	2.25	0.370	0.065
Caisson		500	2.30	0.360	0.060

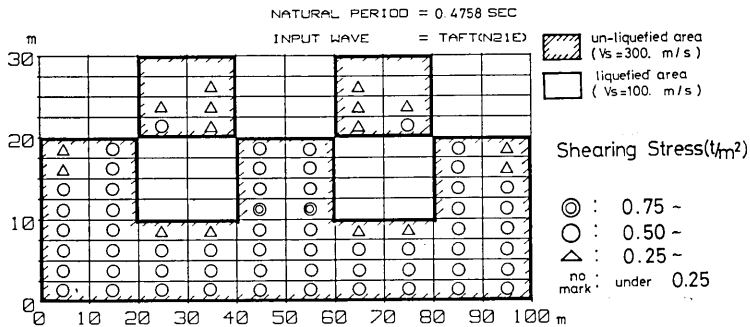


Fig. 4(a). Distribution of shearing stress in surface ground that locally liquefied.

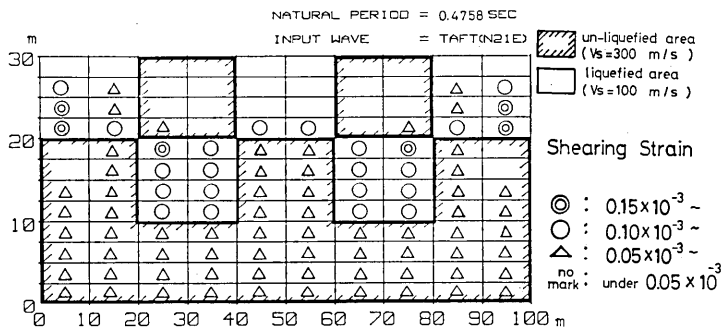


Fig. 4(b). Distribution of shearing strain in surface ground that locally liquefied.

に示す。また、人工地震波を入力として、有限要素解析によって求められた構造物に作用する最大土圧と構造物周辺における地盤の最大水平ひずみの分布を Fig. 7, 8 に示す。

以上の解析結果に対して、地震動によって地盤が部分的に液状化した場合、その地盤がそこに存在する地中構造物にどのような影響を及ぼすかという観点から考察する。

部分的液状化地盤

地盤が液状化しない場合にはせん断応力もせん断ひずみも規則正しく分布し、その値も基盤に近いほど大きくなる。これに対して、地盤が部分的に液状化した場合、液状化部分ではせん断応力が小さくなっているが (Fig. 4 (a)), 逆にせん断ひずみは大きくなっている (Fig. 4 (b)). このような解析結果は軟らかい部分では変形しやすいが、応力は大きくなりにくいと考えれば説明できよう。また非液状化部分内において、液状化要素と非液状化要素が接するところでせん断応力の値が大きくなっているところがある。さらに液状化部分内において、液状化要素と非液状化要素が接するところで、せん断ひずみの値が大きくなっているところがある。すなわち、隣り合うグループの液状化の程度、つまり地盤の剛さによって、同じグループ内でもせん断応力とせん断ひずみの値は局部的に大きくなることを示しているものといえよう。

部分的液状化地盤-ケーソン構造物系

非液状化地盤の場合には基盤に近いほど地盤のせん断応力とせん断ひずみは大きくなる。

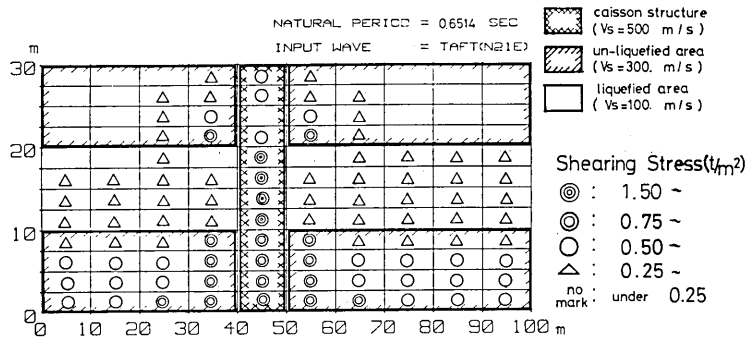


Fig. 5(a). Distribution of shearing stress in the system of caisson foundation-surface ground that locally liquefied.

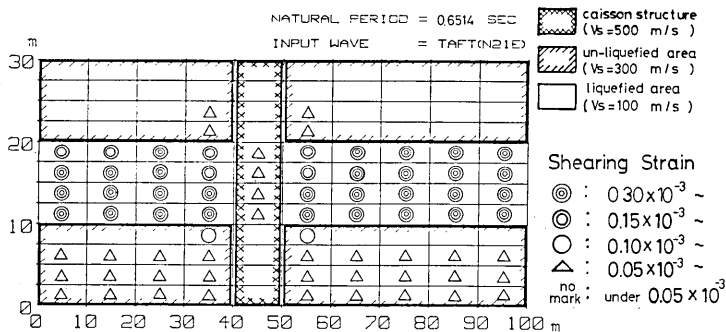


Fig. 5(b). Distribution of shearing strain in the system of caisson foundation-surface ground that locally liquefied.

また、ケーソン構造物も基盤に近いほどせん断ひずみは大きくなり、周辺の地盤よりもその値は大きくなる。構造物せん断応力も基盤に近いほど大きくなるが、周辺の地盤よりもその値は小さくなる。これはケーソン構造物の剛性を周辺地盤よりも硬いものとしてモデル化したことを考えれば当然の解析結果であろう。

さて、地盤が部分的に液状化した場合において、せん断応力の分布 (Fig. 5 (a)) では液状化部分でその値がかなり小さくなっているのがわかる。非液状化部分では、ケーソン構造物付近の方が離れたところよりもその値が大きくなっている。せん断ひずみの分布 (Fig. 5 (b)) では液状化部分でかなりその値が大きくなっている。

また、ケーソン構造物では液状化部分と接する部分では非液状化部分と接するところよりもせん断応力が顕著に大きくなっており、せん断ひずみも、大きくなっていることが注目しよう。

部分的液状化地盤-トンネル構造物 (横断面) 系

次に、基盤には固定されたケーソン構造物の場合と異なり、基盤には固定されていないトンネル構造物 (横断面) について解析を行った。

地盤が部分的に液状化した場合について、せん断応力の分布状況 (Fig. 6 (a)) を液状化しない場合と比較してもそれほど差異は見られない。しかし、これまでと同様に液状化部分では、地盤のせん断応力の値は低下している。また、基盤に近い部分でも、せん断応力

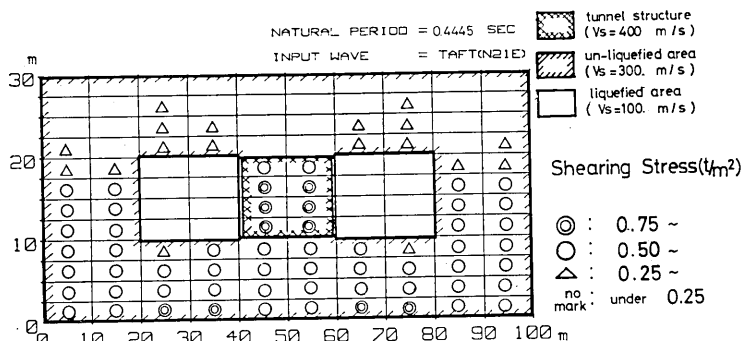


Fig. 6(a). Distribution of shearing stress in the system of tunnel structure (cross section)-surface ground that locally liquefied.

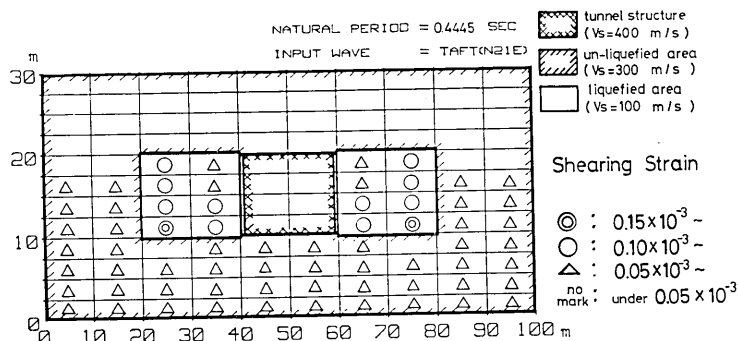


Fig. 6(b). Distribution of shearing strain in the system of tunnel structure (cross section)-surface ground that locally liquefied.

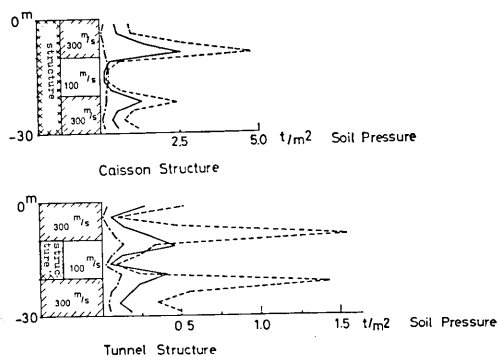


Fig. 7. Maximum soil pressure acting on structure during earthquake.

- Surface ground that locally liquefied
- - - Surface ground that didn't liquefy
- · · Resonance between input wave and surface ground that locally liquefied

が低下する傾向が見られる。

せん断ひずみの分布を見てみると、液状化した場合 (Fig. 6 (b)) には液状化しない場合に比較して、液状化部分において、かなり大きなひずみが生じる場所が見られる。

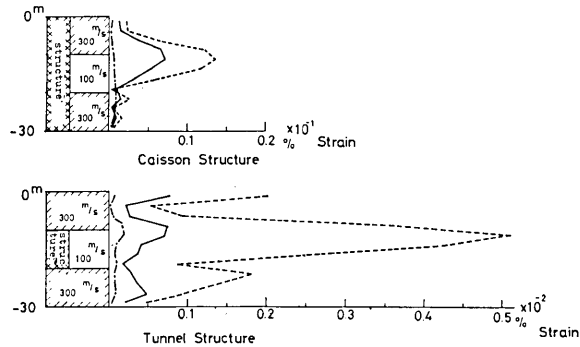


Fig. 8. Maximum horizontal strain of surface ground near underground structure.

- Surface ground that locally liquefied
- - - Surface ground that didn't liquefy
- · - Resonance between input wave and surface ground that locally liquefied.

構造物に作用する土圧

Fig. 7 は構造物近くの有限要素に生じる最大水平応力を構造物に作用する土圧と考えて図示したものである。地盤が液状化しない場合、部分的に液状化した場合について解析結果を示してある。地盤が部分的に液状化した場合、ケーソン構造物とトンネル構造物において地盤の液状化部分と非液状化部分の境界付近で土圧は大きくなっている。液状化して、地盤構造物系の固有周期が低下し、入力と共振した場合には、同様の傾向で、さらに大きな土圧が作用するという結果が得られた。

構造物周辺における最大水平ひずみ

Fig. 8 は部分的に液状化した地盤に存在する構造物(ケーソン, トンネル)付近ではどのような最大水平ひずみが生じるかを示している。ケーソン構造物では液状化部分と非液状化部分の境界付近で大きな最大水平ひずみが生じている。しかし、基盤に近いところでは水平ひずみが大きくなる傾向は見られない。また、トンネル構造物でも液状化部分と非液状化部分の境界付近で大きな水平ひずみが生じている。液状化して、さらに地盤が共振すると、その値はより大きくなるという結果も得られた。

5. あとがき

液状化部分のS波伝播速度を低く見積ることによって、地盤の部分的な液状化を考慮し構造物にどのような影響を与えるかを有限要素法で解析した。その結果、次のようなことが明らかになった。

1) 部分的液状化地盤に生じるひずみと応力の分布

地盤の液状化部分ではせん断応力が低下し、せん断ひずみが増加する。同じ液状化部分内でも隣接する部分が非液状化部分ならば、せん断応力は大きくなるが、せん断ひずみは小さくなる。逆に、隣接する部分が液状化部分ならば、せん断応力は小さくなるが、せん断ひずみは大きくなる。

2) 地盤の部分的な液状化が地中構造物に及ぼす影響

基盤と一体となって動くケーソン構造物において、地盤の液状化部分と接する部分ではせん断応力は顕著に増加し、せん断ひずみも増加する傾向が見られる。これに対して、基盤と一体となって動かないトンネル構造物では横断面の両脇が液状化すると、横断面内において、せん断応力は若干増加するが、せん断ひずみはそれほど変化しない。また、構造物に作用する土圧は、地盤が液状化しさらに地盤-構造物系が地震外力と共振した場合に最も大きな値を示す。

以上のことから、地中構造物の耐震性を検討する上で、周辺地盤が地震動により軟化あるいは液状化して地盤-構造物系の固有周期が増大し、地震外力と共振するかどうかという点が重要となってくるといえよう。また、地盤の部分的な液状化はケーソン構造物のように基盤と一体となって動く地中構造物に強く影響するといえる。さらに、地盤が部分的に液状化しただけでも地盤中に局部的に大きなひずみや応力が生じて、地中構造物に悪い影響を与えることも予想される。

以上の結論は線形計算に基づいた結果から得られたものである。しかし現実には液状化過程において、地盤は非線形振動をする。それゆえ、得られた結論は定性的には間違いがないといえるが、ひずみや応力のレベルに対する定量的な評価はできない。

参考文献

- 土木学会, 1966, 昭和 39 年新潟地震震害調査報告。
伯野元彦・松井芳彦, 1976, 不完全液化砂の地中構造物に及ぼす地震力, 土木学会第 14 回地震工学研究発表会講演概要集, p. 33-36。
星谷 勝, 1974, 確率論手法による振動解析, 鹿島出版会, p. 65。
IDRISS, I. M., LYSMER, J., HWANG, R. and SEED, H. B., 1973, QUAD-4 a computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures, Report of E.E.R.C, No. EERC, 73-16。
片田敏行・伯野元彦, 1981, 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, No. 306, p. 1-10。
片田敏行・伯野元彦, 1982, (掲載予定), 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。
久保慶三郎・片山恒雄, 1974, 地震時の地下埋設管被害に関する調査, 東京都防災会議, p. 9-10, p. 15-18。
中山茂雄・清宮 理, 1975, 衣浦港海底トンネルにおける地震応答観測, 第 4 回日本地震工学シンポジウム講演集, p. 639-646。
田村重四郎・岡本舜三・加藤勝行, 1973, 沈埋トンネルの地震時のヒズミの観測, 関東地震 50 周年記念地震工学シンポジウム概要集, p. 163-170。
TAMURA, C., OKAMOTO, S. and HAMADA, M., 1975, Dynamic behavior of a submerged tunnel during earthquake, Report of Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Vol. 24, No. 5。

37. *Numerical Analysis of the Effect of the Local Liquefaction on the Underground Structures.*

By Toshiyuki KATADA,
Musashi Institute of Technology,

Motohiko HAKUNO,
Earthquake Research Institute,

and Tetsuro TAKAGI
Maeda Construction Co., Ltd.

The present research deals with the influence of local liquefaction in the surface ground on the underground structures by use of a linear finite element method. In the calculation, it is assumed that shear wave propagation velocity decreases with the degree of liquefaction. A summary of the results is given as follows.

The distribution of the shearing stress and strain in the locally liquefied surface ground is very complicated. This is especially so in the liquefied area where the shear stress increases and the shearing strain decreases according to the degree of liquefaction of the adjacent area. In such a caisson structure that vibrates with the bed layer, the place in contact with the liquefied layer has a large shearing stress. On the other hand, in a tunnel structure that vibrates independently of the bed layer, the shearing stress and strain do not increase so much even if the layer in contact with it liquefies. The earth pressure acting on the structures is greatest when the surface ground incompletely liquefies and reverberates with an earthquake motion.

From the above results, the authors think that the possibility of a resonance between a structure-ground system and an earthquake motion in a liquefaction process is very important. Furthermore, it is thought that local liquefaction of the surface ground has considerable effect upon the structures that vibrate with the bed layer.