

(80) 地盤液状化と地震動に関する事例解析

(株) 熊谷組 ○仙頭 紀明

建設省 土木研究所 萩原 良二

建設省 土木研究所 二宮 嘉朗

1. はじめに

近年では地盤上で300galを越えるような加速度強震記録が多く得られている。これらの地表面最大加速度で液状化をF_L法⁽¹⁾で判定した場合の有効性を検討するために釧路沖地震や北海道東方沖地震で加速度強震記録の得られた強震計設置位置の液状化調査(現地調査、ボーリング調査)および強震記録の解析から液状化の有無の確認を行い、液状化判定結果と比較を行った。また強震記録から地盤の液状化を判定を行うために過去に土木研究所で観測された記録について100gal以上で液状化したと思われる地点を抽出し、地盤が液状化した場合の加速度応答スペクトルの長周期成分に着目して検討を行った。

2. 強震記録の特性

液状化したと観測される地点の強震記録の例は日本海中部地震(1983)で観測された八郎潟干拓堤防、津軽大橋の2例⁽²⁾について検討した。図-1(a)、(b)に加速度記録、(c)、(d)に加速度応答スペクトルを示す。(d)の日本海中部地震では長周期成分がかなり含まれているが、これは津軽大橋はⅢ種地盤のため液状化しない場合でも長周期成分が卓越してくることが考えられる。そこで地表面最大加速度が比較的小さい時(北海道南西沖地震)の加速度応答スペクトルも同時に示す。強震記録は最大加速度を記録後、液状化により地盤が軟化することにより長周期化しており、(a)の八郎潟では短周期成分がカットされた波形となる。また(c)の加速度応答スペクトルでは液状化した地盤では周期が2秒前後においても応答スペクトルが小さくならず、液状化の影響が現われていると考えられる。

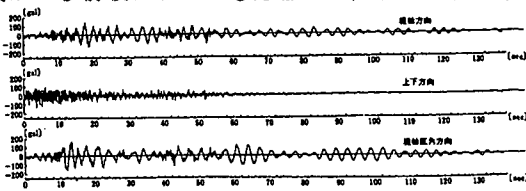


図-1 (a) 八郎潟干拓堤防の加速度記録

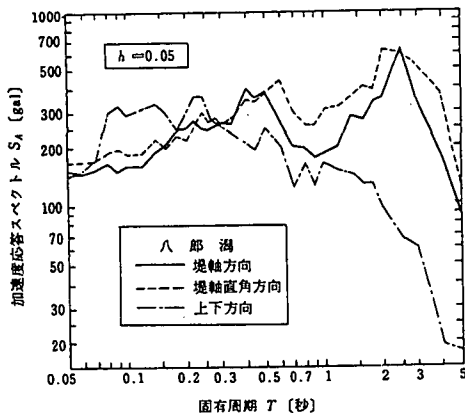


図-1 (c) 八郎潟干拓堤防の加速度応答スペクトル

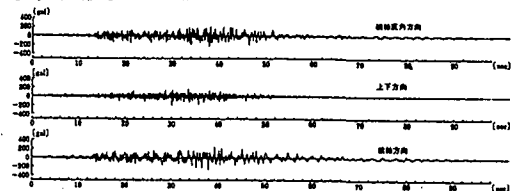


図-1 (b) 津軽大橋の加速度記録

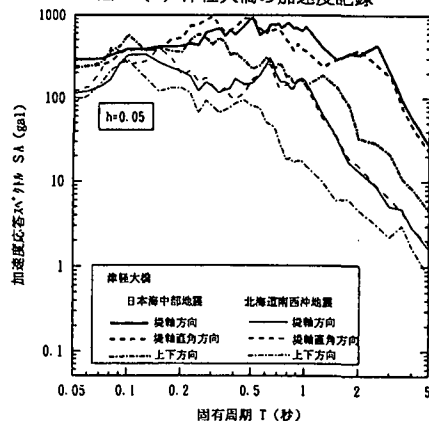


図-1 (d) 津軽大橋の加速度応答スペクトル

そこで過去に得られた地表面の強震記録で100gal以上のものについて、地盤種別ごとの周期に着目して長周期成分(ここでは2~2.5秒)の応答スペクトル値がどのような傾向を持つか検討してみる。まず加速度応答スペクトル(h=0.05)について検討してみる。ここで地盤種別の違いを検討するためにⅠ、Ⅱ、Ⅲ種地盤を代表させるものとして、0.01~0.2秒間、0.2~0.6秒間、0.6~1.0秒間の加速度応答

スペクトルの平均値をそれぞれ代表させる。液状化によって軟化した地盤は2.0～2.5秒の加速度応答スペクトルの平均値で代表させるものとして、それぞれ次式で示す。

$$\begin{aligned}
 & \text{I 種地盤の加速度応答スペクトルの平均値} & \frac{1}{0.19} \int_{0.01}^{0.2} S_A dt \\
 & \text{II 種地盤の加速度応答スペクトルの平均値} & \frac{1}{0.40} \int_{0.2}^{1.0} S_A dt \\
 & \text{III 種地盤の加速度応答スペクトルの平均値} & \frac{1}{0.40} \int_{0.6}^{2.5} S_A dt \\
 & \text{2～2.5秒の加速度応答スペクトルの平均値} & \frac{1}{0.50} \int_{2.0}^{2.5} S_A dt
 \end{aligned} \quad (1)$$

I～III種地盤のそれぞれの周期の加速度応答スペクトルの平均値を横軸に、2.0～2.5秒の加速度応答スペクトルの平均値を縦軸に示したものを図-2に示す。図より地盤種別による違いはあまり明確には得られないが、液状化したと考えられる▲の地点は他のIII種地盤に比べて大きな2.0～2.5秒の加速度応答スペクトルを示しており、液状化したかどうかを判断するためには有効なパラメータとなりうると考えられる。同様の地盤種別ごとの整理を速度応答スペクトル(h=0.20)について整理し、図-3に示す。それぞれの平均値は(1)式と同様に

$$\begin{aligned}
 & \text{I 種地盤の速度応答スペクトルの平均値} & \frac{1}{0.19} \int_{0.01}^{0.2} S_v dt \\
 & \text{II 種地盤の速度応答スペクトルの平均値} & \frac{1}{0.40} \int_{0.2}^{1.0} S_v dt \\
 & \text{III 種地盤の速度応答スペクトルの平均値} & \frac{1}{0.40} \int_{0.6}^{2.5} S_v dt \\
 & \text{2～2.5秒の速度応答スペクトルの平均値} & \frac{1}{0.50} \int_{2.0}^{2.5} S_v dt
 \end{aligned} \quad (2)$$

で表される。図-3ではI種、II種、III種の順で速度応答スペクトルのそれぞれの周期の平均値及び2.0～2.5秒の速度応答スペクトルの平均値は増加し、右上がりの傾向があらわれている。

図-2、3では周期2～2.5秒前後の応答スペクトルで液状化を判断したが、単純化するため、周期が2秒の時の地表面の加速度応答スペクトルに着目し、その値を地表面最大加速度で正規化することにより加速度応答スペクトル倍率をもとめ、最大加速度との関係について図-4に示す。

ここで周期2秒の加速度応答スペクトルに着目した理由は液状化した地盤の周期は2秒以上の長周期となると考えられるが、加速度は液状化してしまうと大きな応答を示さないで、液状化に至るまでの過渡的な応答が周期2秒前後に生じるものと考えたためである。液状化したと考えられる地点はIII種地盤に多いことから、ここではIII種地盤についてのみ示している。この図では最大加速度は400gal程度で頭打ちになっている。このことは液状化した地盤では剛性が低下し減衰が大きくなるた

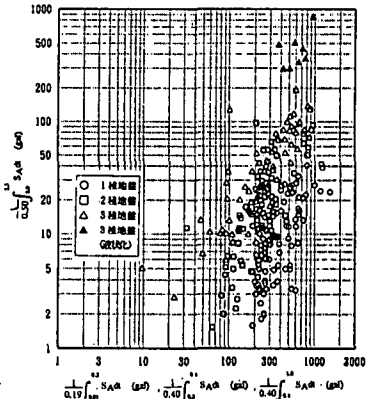


図-2 地盤種別別の加速度応答スペクトルの平均値と周期2～2.5秒の加速度応答スペクトルの平均値

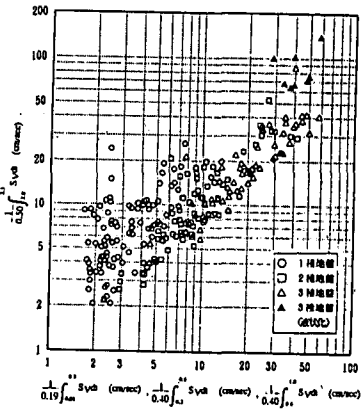


図-3 地盤種別別の速度応答スペクトルの平均値と周期2～2.5秒の速度応答スペクトルの平均値

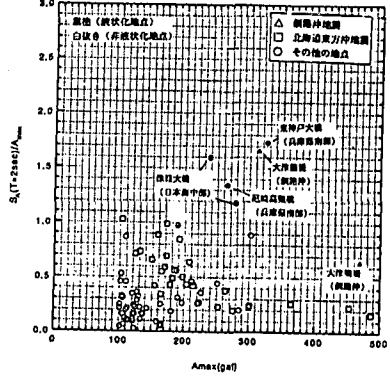


図-4 地表面最大加速度と固有周期2秒の加速度応答スペクトル倍率

め、地盤の変形や速度は大きくなるかわりに加速度が大きくなる
ないためであると考えられる。なお大津築堤は400gal以上の
値を示しているが、これは地表付近の土層の凍上の影響等がある
と推測される。また周期2秒の加速度応答スペクトル倍率は
液状化した地点では1を越えているものが多く、波形から液状
化を判断する際の1つの指標になると考えられる。また構造物
の被害予測等に用いられるSI値（スペクトラムインテンシ
ティ）（ $h=0.20$ ）に着目した整理について以下に示す。SI値
（ $kine$ ）は

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.01}^{0.25} S_v dt \quad (3)$$

に示すよう速度応答スペクトル S_v の周期0.1～2.5秒における
積分値の平均値として定義されている。SI値についても周期
2秒の時の加速度応答スペクトル倍率との相関について図-5
に示す。SI値が大きくなると加速度応答スペクトル倍率は増
加しており、地盤の非線形性の影響が現れている。この図では
SI値が40kine前後で液状化が発生している。さらにSI値が
大きくなると地盤の非線形も大きくなり、完全液状化状態に近
づき、加速度応答スペクトル倍率が大きくなることがわかる。

また変位については液状化すると地盤の変位も大きくなるこ
とからここでは周期2秒の変位応答スペクトル（ $h=0.05$ ）を周
期0.2秒の変位応答スペクトル（ $h=0.05$ ）で正規化した無次元
量と周期2秒の加速度応答スペクトル倍率の関係を図-6に示
す。▲は液状化した地点である。図では右上がりの傾向がみ
られ、Ⅲ種地盤の中でも液状化した地点は縦軸、横軸とも液状化
していない地点に比べて大きな値を示している。

3. 液状化調査

ヒアリングと目視により釧路沖地震と北海道東方沖地震による強震計設置地盤の液状化の有無の確認
を行った。図-7に強震計設置地点を示し、表-1では当該地震と得られた最大加速度を示している。
調査及び波形の検討により釧路沖地震(1993)、北海道東方沖地震(1994)の両地震で強震計設置地点で液
状化した可能性のあるものは釧路沖地震の大津築堤(NO.5)のみであった。そこで強震計設置地点の近
傍でボーリング調査を行い液状化判定を行った。地下水位以下の砂層の一部についてはチューブサン
プリングを行い、繰返し三軸試験を行うことにより繰返し回数20回のときの応力比 R_{20} をもとめ判定し
た。また最大加速度の深さ方向の分布をSHAKEにより計算した結果を大津築堤について計算した。
大津築堤の判定結果を図-8(a)、(b)に示す。地震時せん断応力比 L は地表面水平震度0.15を用い
て算定した場合と得られた強震記録の最大加速度の両方を用いて液状化判定を行った。図-8(a)
では L を水平震度0.15を用いて算定した場合 F_L 値は1以上となっている。また図-8(b)地盤の動的せん
断強度比 R を繰返し三軸試験で求めた場合と N 値、平均粒径、細粒分含有率から求めた R では若干
の違いがあるが大きな違いではないといえる。さら(b)でSHAKEを用いて L を求めた場合、道路
橋示方書の近似式から計算したものと多少の差が見られる。さらに表-1に示す地点について L を最大
加速度を用いて計算し、判定した結果を図-9に示す。ここで目視による調査と地表面の強震記録の検討

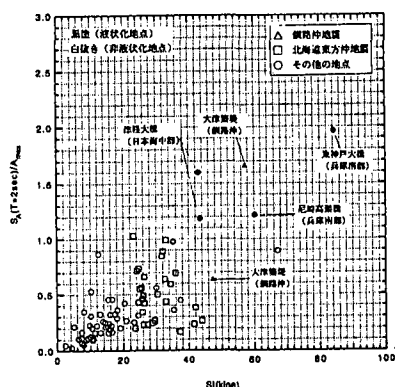


図-5 SI値と固有周期2秒の
加速度応答スペクトル倍率

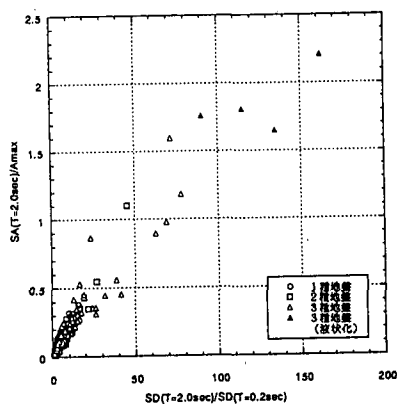


図-6 $SD(T=2.0sec)/SD(T=0.2sec)$ と
周期2秒の加速度応答スペクトル倍率

より液状化の有無を判断する場合、地表から10mまでの液状化判定結果の内、最小のものについてのみプロットしてある。図中の縦軸はR、横軸はL、実線は $F_L=1$ の線で、実線より下に位置する場合は液状化すると判定される。●は釧路沖地震で液状化したと観察された地点の判定結果、○、△は釧路沖地震及び北海道東方沖地震における液状化したと観察されなかった地点の判定結果をそれぞれ示す。最大加速度を用いた場合は最大加速度が300galを超えるような地点では非液状化地点でも液状化する判定となっている。

地点番号	観測地点	当該地震	最大加速度(gal)		
			LG	TR	UD
1	大森毛大橋	釧路沖	456	412	279
2	温根府大橋	釧路沖	341	358	124
3	広尾橋	釧路沖	524	306	158
4	千代田大橋	釧路沖	345	364	168
5	大津築堤	釧路沖	468	314	199
6	釧路川堤防	釧路沖	300	320	260
1	大森毛大橋	北海道東方沖	155	108	100
2	温根府大橋	北海道東方沖	316	332	
3	広尾橋	北海道東方沖	360		
4	千代田大橋	北海道東方沖	207	232	78
6	釧路川堤防	北海道東方沖	380	300	200
7	東橋橋(地盤)	北海道東方沖	487	223	167
8	竹曾町(橋体)	北海道東方沖	124	170	92
9	綾内(橋体)	北海道東方沖	204	211	120
10	札内町(橋体)	北海道東方沖	253	302	159
11	篠田(橋体)	北海道東方沖	171	158	96
12	路栗(橋体)	北海道東方沖	131	164	67
13	江ノ口(橋体)	北海道東方沖	103	172	81
14	斜路大橋	北海道東方沖	300	240	
15	厚岸大橋	北海道東方沖	225	215	

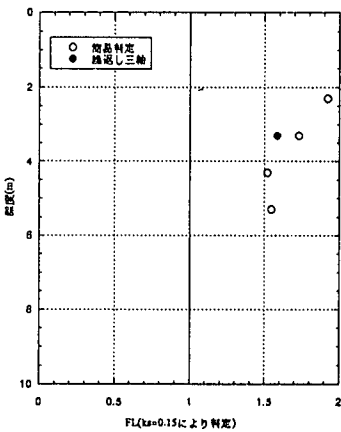


図-8 (a) 大津築堤の液状化判定 (水平震度0.15)

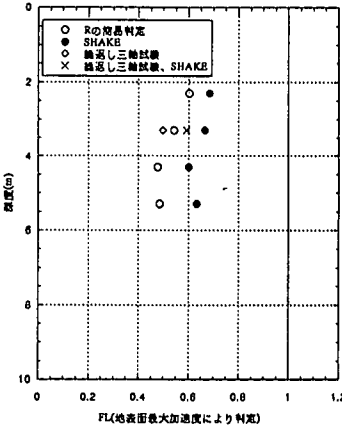


図-8 (b) 大津築堤の液状化判定 (地表面最大加速度)

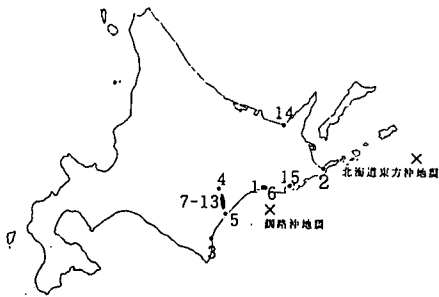


図-7 強震計設置地点

4. おわりに

- (1) 液状化が起こった地点の周期2秒における加速度応答スペクトル倍率の値は概ね1以上の値を示し、強震記録より液状化の判定を行える可能性を示している。
- (2) 最大加速度は250～500 galで液状化する地点もしない地点も混在している。しかしながらSI値や周期2秒の変位応答スペクトルはよい相関を示し、液状化判定として有効な指標になりうると考えられる。
- (3) 今回の事例解析で地表面最大加速度が300gal以上の地点では地表面最大加速度を用いて F_L 法で判定すると F_L 値が1以下でも液状化したと観察されない地点が多くあった。

本報告は、著者の一人が土木研究所の部外研究員として在籍中に行ったデータ整理した結果をまとめたものである。なお図-8、9でおこなった繰返し三軸試験については土木研究所の東枝官に行ってもらった。記して謝意を表する。

参考文献 (1) 道路橋示方書V耐震設計編 H2 日本道路協会 (2) 土木研究所報告第165号 1983年日本海中部地震災害調査報告 S60 建設省土木研究所