

液状化の発生した地盤の地震時挙動に関する検討

三輪 滋¹・池田 隆明¹

¹ 正会員 飛鳥建設株式会社 技術研究所 地盤耐震研究室 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

釧路沖地震、北海道東方沖地震で液状化が生じた釧路西港埋立地盤で観測されたいくつかの強震記録を釧路地方気象台での記録と比較し、軟弱埋立地盤の地震時挙動の検討を行った。また、設計実務で多用される等価線形解析を、液状化の影響を考慮して実施し、液状化の生じる地盤の地震動増幅特性を検討した。その結果、短周期成分の増幅は小さいが、小さな地震動レベルから比較的周期の長い成分が増幅されること、液状化が発生した場合には、さらに顕著な非線形性が生じ、地震動増幅特性大きく変化することがわかった。また、液状化の影響を適切に評価することで等価線形解析によって、液状化した地盤の挙動もある程度表現できることを検証し、釧路沖地震での地震動の推定を試みる事ができた。

Key Words : Liquefaction, Strong Ground Motion, Amplification, Nonlinearity

1. はじめに

1993年1月15日の釧路沖地震では釧路市をはじめ、道東地域に多くの被害が発生した。地震後、表層地質の地震動に及ぼす影響を検討するため、釧路市で共同地震観測が実施された¹⁾。その一環として釧路沖地震で液状化被害が生じた釧路西港に着目し、液状化の生じる軟弱埋立地盤での地震動増幅を検討することを目的に、釧路西港第一埠頭のフェリーターミナル建物(以下FTBと呼ぶ)において地震観測を実施した。1994年10月4日に北海道東方沖地震(以下東方沖本震と呼ぶ)が発生し、釧路西港では再液状

化が発生し、FTBにおいても地震動記録を観測することができた²⁾。

ここでは、建設省建築研究所が釧路地方気象台内に設置した鉛直アレー(以下BRIと呼ぶ)観測記録³⁾と、釧路西港での観測記録を比較し、その地震動増幅特性を検討するとともに、液状化を考慮した等価線形解析を実施し、釧路沖地震の際の釧路西港での地震動を推定した。

2. 地震観測および地震被害の概要

(1) 地震観測地点の位置と地質

図-1に釧路市の表層地質と地震観測地点位置を示す。釧路市とその周辺の地形は、釧路低地とそれを三方から取り囲む台地からなっている。旧釧路川を挟んで西側は沖積低地、東側は根釧台地となっている。図-2に観測地点の土質柱状図を示す⁴⁾。建築研究所の地震計が設置されている釧路地方気象台はこの台地上にあり、古第三紀堆積岩の浦幌層群上に、火山灰質砂質土層(大衆毛層群)、さらにシルト質火山灰層(屈斜路軽石流堆積物)といった比較的軟質な洪積層が堆積している。一方、釧路西港は釧路川の河口部左右に広がる埋立地の西側部分に位置し、S波速度が400m/sを安定的に越える層が現れるのは、西港地区の港湾技術研究所の地震観測点(以下PHRIと呼ぶ)の柱状図⁵⁾などから、GL-50m以深と考えられる。

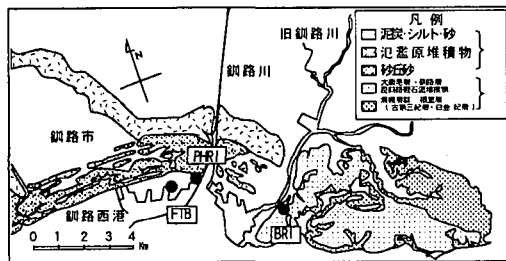


図-1 釧路市の表層地質と観測点の位置

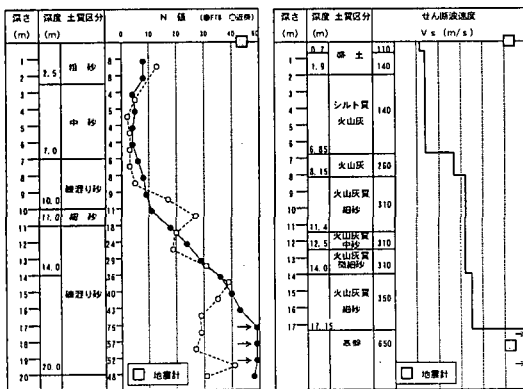


図-2 地盤観測地点の土質柱状図

(2) 釧路西港観測地点の地震観測、地盤、被害

FTBは北緯42° 59.71'、東経144° 20.63'の釧路西港第一埠頭西側岸壁横に位置し、周辺地盤の標高は3mである。地震計は東京測振製16ビットデジタル式強震計SAMTAC17であり、建物の一階床に水平2成分をNS・EWにあわせて設置した²⁾。1993年8月~1995年3月の観測期間に61地震が記録された。

この地点は、表層7~8mが埋立層、さらにGL-26m付近

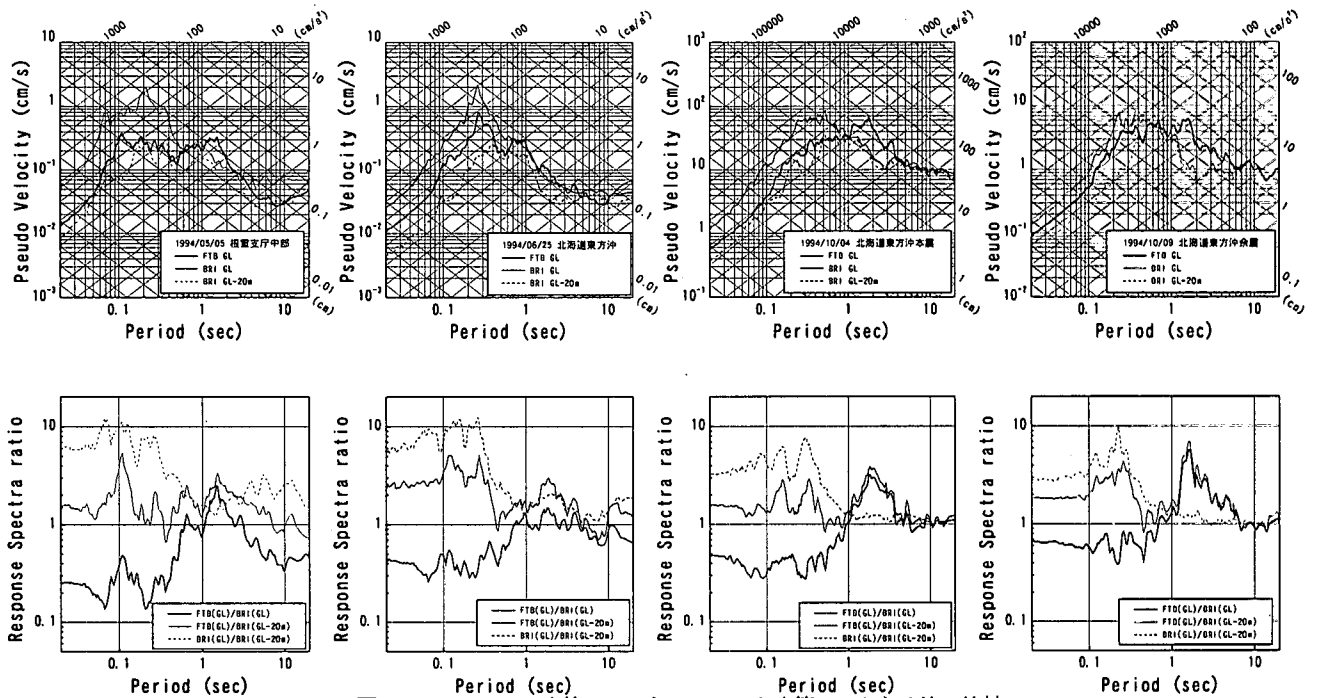


図-3 FTB, BRI の応答スペクトル($\eta=5\%$)と応答スペクトル比の比較

表-1 検討に用いた地震の諸元と観測記録の最大加速度 (cm/s^2)

No	地震名	発生日	規模 M	震央位置		深さ (km)	FTB			BRI GL			BRI GL-20m		
				北緯	東経		NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD
1	釧路沖地震	1993/01/15	7.8	42° 51'	144° 23'	107	-	-	-	671	688	363	-	-	-
2	根室支庁中部	1994/05/05	4.7	43° 15'	145° 15'	70	4.1	4.3	1.9	15	16	8.8	2.6	2.9	2.4
3	北海道東方沖	1994/06/25	5.4	43° 39'	147° 14'	67	3.3	3.7	1.2	7.6	7.3	2.7	1.2	1.4	.88
4	北海道東方沖本震	1994/10/04	8.1	43° 22'	147° 40'	30	160	177	84	355	341	189	112	99	74
5	北海道東方沖余震	1994/10/09	7.3	43° 34'	147° 49'	0	28	22	9	42	45	11	15	8.9	6.6

まで主に礫混じり砂の砂層が堆積し、GL-2.5m付近の地下水水位以下からGL-14m付近まではN値が小さく、液状化の可能性が高い層である。釧路沖地震では、この岸壁は液状化により大きな被害を受け、FTB周辺では多数の噴砂と40~60cmの沈下が生じた。地震後、岸壁はグラベルドレンによって液状化対策がなされ、東方沖本震では被害がなかった²⁹⁾。FTB周辺地盤では7-15cmの沈下が見られたが噴砂は生じなかった。しかし、西港第一埠頭内では数多くの再液状化が発生し、FTBの近傍でも噴砂が確認されている。これらのことからFTBでも地中で液状化が生じた可能性が高いと考えられる²⁹⁾。

3. 地震動記録による増幅特性の検討

FTBで観測された記録の内、表-1に示す五つの地震の記録を用いて地震動増幅特性を検討する。表-1には、地震の諸元および最大加速度値を、工学的基盤と考えられる堆積岩層内の記録が得られているBRIの記録とあわせて示す。根室沖地震と6月25日の北海道東方沖地震はBRIの地中での地震動レベルが数 cm/s^2 程度の地震、東方沖本震は地中で100 cm/s^2 を越え被害をもたらした地震、10月9日の東方沖地震(余震)は地中で10 cm/s^2 程度の地震である。

図-3に2観測地点の地表面での地震動の擬似速度応答スペクトル(減衰定数 $\eta=5\%$)とBRIを基準とした応答スペクトルの比を示す。地中の地震動は表層の影響を受けるが、それとの比較によっても増幅の傾向を検討できると考えられるので、その比較も行う。応答スペクトルは、

いずれの地震でも、FTBに比べBRIの方が短周期側に卓越が見られる。FTBには長周期側に卓越が見られるが、地震動レベルが小さい場合には、BRIの卓越に比べ小さく明瞭ではない。地震動レベルがある程度大きくなると、長周期側での卓越が明瞭となり、東方沖本震や余震では短周期側でのBRIの卓越と最大値は同程度となる。BRIの地中記録とのスペクトル比を見ると、短周期側での卓越、長周期側での卓越といった、これらの傾向がよく現れている。

地表の記録同士のスペクトル比で見ると、短周期側ではFTBはBRIの1/2程度に振幅が低減されるのに対し、長周期側は概ね周期1~4秒付近にかけて3倍前後の大きさとなる。これらは表層地盤の卓越だけでなく、より長周期側の卓越については表面波の影響も大きいと考えられる。また、短周期側の低減領域と長周期側の増幅する領域の境界周期は地震動レベルが大きくなるにしたがい、0.6秒から1秒程度へ移行していく。これらは、埋立地盤のFTBが軟弱でありBRIに比べ固有周期が長い(一次の固有周期は、概ね0.6秒から1.2秒程度にある)こと、さらに地震動が大きい場合には非線形性が顕著に現れ、1秒以下であった周期が伸びることなどに起因すると考えられる。

図-4に地中の地震動の最大値に対する増幅の程度、2地点の地表面同士の最大値の比較を示す。BRIでは加速度、速度とも地震動レベルの増加にしたがい、増幅率が低下している。また、FTBでは加速度では同様であるが増幅率の変化の程度は小さい。また、速度では明瞭な傾向は見られない。また、スペクトル強度(以下S.I.と呼ぶ)で見

るとBRIではある程度地震動レベルが大きくなると低下しなくなり、FTBでは地震動によらず同程度である。このように、最大加速度では、地震動レベルの増大による非線形性が明瞭であるが、速度やS.I.に関しては必ずしも増幅率が低減するとは限らず、特に軟弱地盤においては、むしろ増加する傾向も見られる。

2地点間を比較すると、スペクトルの比較でも見たように、短周期成分の影響を受ける最大加速度では地震動レベルによらずFTBがBRIの1/2程度となっている。一方、速度では、地震動レベルの小さい場合には同様に1/2程度で

表-2 地震応答解析に用いた地盤モデル (BRI)

深度 (m)	層厚 (m)	土質	せん断波速度 Vs (m/s)	密度 ρt (t)	平均粒径 D50 (mm)	平均主応力 σm' (kN/m ²)
1	0.70	盛土	110	1.56	0.35	3.5
2	1.90	盛土	140	1.56	0.35	13
3	6.85	湧水質火山灰	140	1.63	0.07	45
4	8.15	火山灰	260	1.67	0.10	79
5	11.4	火山灰質細砂	310	1.78	0.15	105
6	12.5	火山灰質中	310	1.78	0.35	130
7	14.0	火山灰質微細砂	310	1.78	0.10	146
8	17.15	火山灰質細砂	350	1.78	0.15	173
9		砂岩	650	1.89		

表-3 地震応答解析に用いた地盤モデル (FTB)

深度 (m)	層厚 (m)	土質	N 値	せん断波速度 Vs (m/s)	密度 ρt (t)	平均粒径 D50 (mm)	平均主応力 σm' (kN/m ²)
1	2.5	粗砂	7	160	1.5	0.6	12
2	7.0	中砂	4	125	1.75	0.35	35
3	10.0	礫混り砂	8	160	1.8	0.6	55
4	11.0	細	10	170	1.75	0.15	65
5	14.0	礫混り砂	15	200	1.8	0.6	76
6	20.0	礫混り砂	30	250	1.8	0.6	99
7	23.0	細砂	30	250	1.75	0.15	122
8	26.0	細砂	50	300	1.75	0.15	136
9	34.0	シルト	24	230	1.75	0.025	164
10	37.0	細砂	50	300	1.75	0.15	190
11	40.0	シルト	7	190	1.75	0.025	205
12	44.0	細砂	30	250	1.75	0.15	222
13	46.0	シルト	12	230	1.75	0.025	237
14	52.0	砂礫	35	260	2.0	2.0	262
15		砂	50	500	2.0		(地下水位 GL-2.5m)

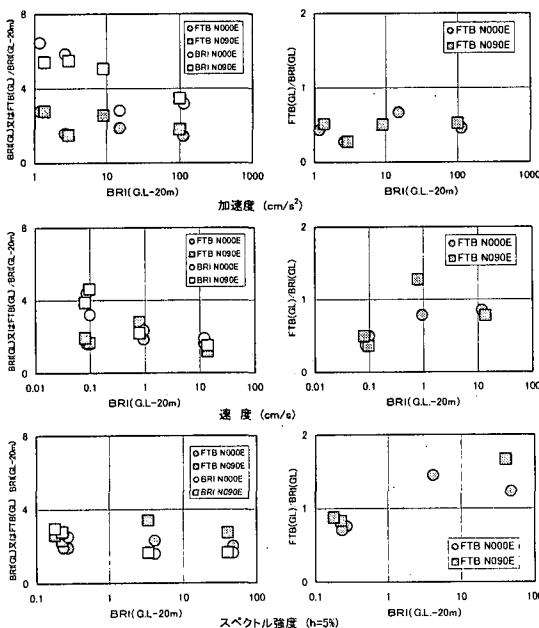


図-4 FTB, BRIの最大応答値による増幅率の比較

あるが、大きくなるにしたがい、同程度となる。さらにS.I.においては、FTBの方が1.5倍前後に大きくなることからわかる。このことは、釧路沖地震や東方沖本震において地震動加速度の大きかった気象台周辺よりも、港湾地域で地盤に関わる被害が広範囲に発生したことと関係が大きいものと考えられる。

4. 地震応答解析による増幅特性の検討

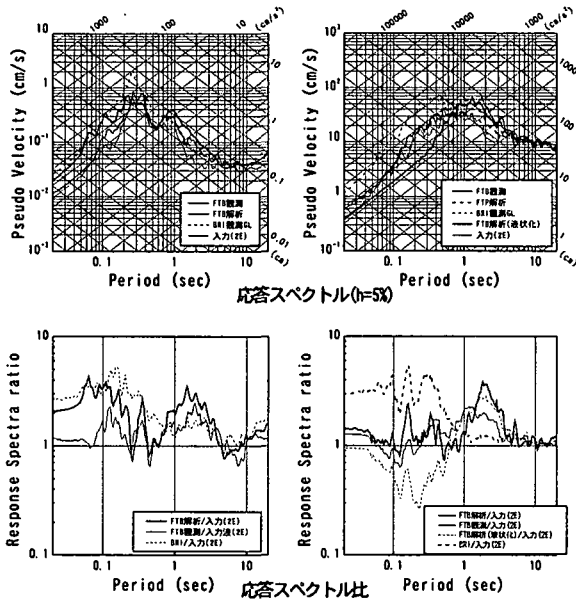
液状化の被害が激しかった釧路沖地震では、軟弱埋立地での記録は得られていない。ここでは、FTBでどの程度の地震動が作用したかを推定するために地盤の地震応答解析を実施した。

BRI地点については、地震観測記録の分析⁹⁾、地盤調査⁹⁾や応答解析⁹⁾などによりその増幅特性が詳細に検討されている。ここでは、地盤調査結果⁹⁾を基に地盤モデルを作成し、地中観測点を工学的基盤と見なし、観測波を入力した場合の工学的基盤での入射波を取り出し、それをFTB地盤に入力して地震応答解析を実施した。釧路沖地震以外は地中記録で応答解析を行い、地表の地震動が概ね表現できていることを確認して入射波を求め、地表記録のみの釧路沖地震では地表記録を用いて逆応答解析を実施した。なお、BRI地点は非線形性や地形効果など様々な要因を考慮する必要があるものの、観測地点の地盤調査に基づいた1次元モデルで評価されている⁹⁾ことから同様の1次元モデルとした。

FTBの地盤モデルは、N値分布などは異なるものの、FTBおよび周辺の柱状図では概ね層厚が同じことから、やはり1次元でモデル化した。GL-34m付近までは、図-2に示した柱状図を基に、それ(深は文献⁷⁾)のPHRI観測点の柱状図を参考にモデル化した。また、動的変形特性は安田・山口の方法⁹⁾で設定した。それぞれの地点のモデルを表-2、表-3に示す。

FTBでは釧路沖地震以外の地震についても、地震応答解析を実施し、地表面の記録を観測記録と比較することでモデルの妥当性を検証した。地震応答解析は等価線形解析で行い、その結果を基に液状化判定を行い、液状化する場合にはその影響を考慮して、地盤のせん断剛性を初期剛性の1/50とし、また、そのほかの層は収束剛性を用いて、再度応答計算を行う方法を用いた¹⁰⁾¹¹⁾。釧路沖地震と東方沖本震では、表層部がそれぞれGL-9m, GL-13mまで液状化する結果となった。このことは、実際の液状化の発生状況とも対応していると考えられる。

図-5に解析で得られたFTB地表面の応答スペクトルを観測記録とあわせて示す。比較的小さな地震動では短周期成分を大きめに評価しているものの、卓越周期などはよく表現できている。東方沖本震では、通常の等価線形解析では、短周期成分は一致するものの液状化による長周期化は十分表現できていない。一方液状化を考慮した解析では、長周期側の卓越をほぼ表現している。図-6に加速度波形を、図-7に地盤の液状化強度を基に、簡易判定法で液状化が生じる地表加速度が生じた時点の前後で記録を分割した応答スペクトルを示す。主要動の初期は通常の等価線形解析が、長周期化した部分では液状化を考慮した解析が一致度が高い。このように、地震動レベ



a) 1994年6月25日北海道東方沖地震 b) 1994年10月4日北海道東方沖地震
 図-5 観測と解析の応答スペクトル(h=5%)の比較

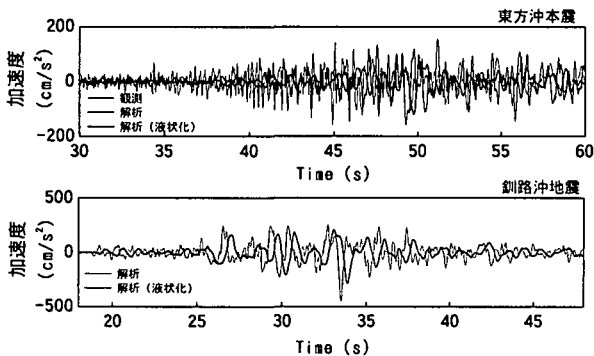


図-6 FTB での加速度時刻歴の比較

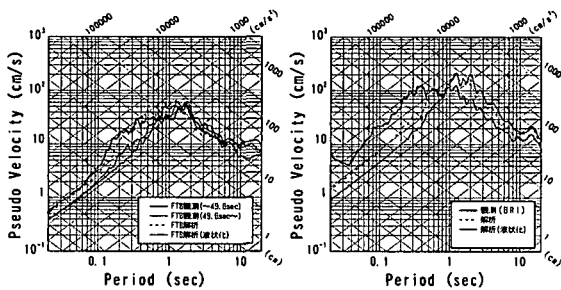


図-7 時間を区切った応答スペクトル(h=5%)の比較

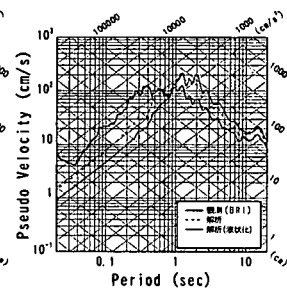


図-8 釧路沖地震の応答スペクトル(h=5%)

ルがそれほど大きくなく主要動の途中で液状化した場合には両方の解析を合わせて地盤の挙動を評価できると考えられる。

釧路沖地震について、図-6に解析で得られた地表面加速度波形を、図-8に応答スペクトルを示す。等価線形解析のため短周期成分はなくなっているが、液状化による長周期化が表現されている。また密な地盤で液状化の生じていないPHRIの記録⁽²⁾⁽¹¹⁾と比較して、液状化を考慮した解析結果がより周期が長くなっており液状化が生じた地盤であることを考慮すると妥当な結果と考えられる。スペクトルはBRIと大きく異なり1~2秒が卓越する。応答最大値もBRIより大きく200cm/s近い値となる。PHRIの記録にもこの傾向が見られ、港湾の被害が大きかったことと対応すると考えられる。

5. まとめ

①埋立地のFTBでの観測記録から見た増幅特性は短周期成分は小さく、0.6から4秒程度の長周期成分が卓越する。このうち0.6から1.2秒までは表層地盤での増幅に起因し地震動増幅とともに非線形性を示し長周期化する。速度やS.I.は地震動が大きくなると増幅が同程度が大きくなる傾向が見られる。

②等価線形解析に液状化によるせん断剛性の低下を考慮することで、北海道東方沖地震の挙動を概ね表現できた。同様の方法で求めた釧路沖地震の地震動は、1~2秒の成分が大きく卓越する地震動となり、液状化の被害と対応するものとなった。

謝辞：釧路西港での地震観測では釧路市港湾部、近海郵船(株)釧路ターミナルの皆様はじめ多くの方々のご協力をいただきました。検討には建設省建築研究所が釧路地方気象台で観測した地震動を使用させていただきました。また、データ分析は鈴木重良氏の強力な支援のもとに実施しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Association for Earthquake disaster Prevention Japanese Working Group on Effects of Surface Geology on Seismic Motion: Strong Motion Data Base Cooperative Strong Motion Observation in KKshiro, Hokkaido, Japan, 1997.1.
- 2) 三輪滋, 森伸一郎: 1994年北海道東方沖地震における釧路西港埋立地での地震動記録, 日本建築学会大会学術論文梗概集, B II 構造2, pp.259-260, 1995.8.
- 3) 鹿嶋俊英, 北川良和, 大川出, 小山信: 釧路地方気象台の強震動特性, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.739-744, 1994.12
- 4) 石田寛, 佐々木透, 丹羽正徳, 北川良和, 鹿嶋俊英: 釧路地方気象台の鉛直アレー地震観測記録に見られる表層地盤の増幅特性, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.91-100, 1996.12
- 5) 森伸一郎, 三輪滋, 関宝瑛: 1993年釧路沖地震で被災した釧路港埋立地盤の地震動増幅特性, 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム, pp.211-218, 1994.10.
- 6) 建設省建築研究所: 釧路地方気象台敷地内地盤調査結果, 地震工学振興会ニュース, No.136, pp.56-60, 1994.5.
- 7) 稲富隆昌ほか: 1994年北海道東方沖地震による港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No.856, 1997.3
- 8) 北川良和: 1993年釧路沖地震なぜ大きな加速度を生じたか, あらか12号, 1994
- 9) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会, pp.539-542, 1985.6.
- 10) 三輪滋ほか: 兵庫県南部地震における埋立地盤の地震時挙動の検討(その2: 液状化したまま土層に生じたひずみの検討), 第33回地盤工学研究発表会, pp.877-878, 1998.
- 11) S.Miwa et al.: Earthquake response evaluation of sites in liquefied area, Special Volume on Simultaneous Simulation for KOBE, 2nd International Symposium on The Effect of Surface Geology on Seismic Motion, pp.163-170, 1998.
- 12) 上田茂ほか: 1993年釧路沖地震港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No.856, 1997.3