

高知市の沖積層における地盤液状化について

高知大学農学部 小椋 正澄
高知工業高等専門学校 吉川 正昭

1. まえがき

1995年1月17日午前5時46分、淡路島北部を震央（北緯34度36.44分，東経135度2.57分，震源深さ14km）とするM7.2の直下型大地震が発生し，神戸市および北淡町では震度Ⅶの烈震が記録され，鉄道，道路及び港湾施設が寸断あるいは破壊され，交通・輸送手段が途絶した。倒壊建築物は，14万余戸にもおよび，電気・ガス・水道などのライフラインも甚大な被害を受けた。この地震は，物的被害の大きさばかりでなく，関東大震災，濃尾地震につぐ死者5千余名，負傷者2万数千人におよぶまことに痛ましい人的被害を蒙った。この兵庫県南部地震を含め，わが国は，1993年1月15日の釧路沖地震（M7.8）以降，北海道南西沖（M7.8），北海道東方沖（M8.1）および三陸はるか沖（M7.5）と，2年あまりの間に関東大震災に匹敵する大規模地震に5回も見舞われている。地震が恐ろしいのは，過去の被災例に見られるように，激しい震動，津波，地すべり，山崩れ，地盤の液状化などにより，人命を初めとして，家屋，橋梁，港湾施設，ダム，道路，ライフラインなどあらゆる構造物を破壊することである。

近年，地震による地盤の液状化現象が社会的関心を集めており，兵庫県南部地震でも，ポートアイランドで起こった液状化による被害が大きく取り上げられている。地盤が液状化すると地盤は完全に強度を失い，液状化した地盤の密度より軽い地中構造物は地上に浮き上がり，逆に地上建造物は沈下あるいは倒壊する。また，土砂の流動により地盤の沈下および埋立地・盛土の陥没やすべり破壊が起こる。地震による液状化現象は古くから知られ「噴水現象」とか「噴砂現象」と呼ばれていたが，被害が多く発生し出したのは近年になってからである。1964年の新潟地震で新潟市内のいたるところで地下から大量の砂が噴き出し，同時に県営アパートの倒壊，昭和大橋の落橋，下水管の浮き上がりなど液状化による被害が社会的に関心を集めるようになった。その後，わが国だけでも1968十勝沖地震以降宮城県沖・日本海中部沖・釧路沖地震と液状化による被害が多数報告されている。

本報告は，近い将来発生するであろう南海道地震を想定し，高知市内の沖積層の液状化の危険性について3種の判定基準を用いて判定したものである。

2. 南海地震と液状化現象

高知県では有史以来8回の大地震に見舞われている。過去の南海地震の発生時期と規模は，資料が少なく信頼性に乏しいものもあるが，天武（684年，M8.25），仁和（887年，M8-8.5），慶和（1099年，M8-8.3），正平（1361年，M8.25-8.5），慶長（1605年，M7.9），宝永（1707年，M8.4），安政（1854年，M8.4）および昭和（1946年，M8.0）の各地震である。これらの地震の震央は，古文書に記録されている被害分布状態から図-1に示す南海トラフの陸側に沿って分布すると推定されている¹⁾。

昭和南海地震による被害は，津波波高が高知沿岸で4～6m，地盤隆起が室戸で1.27m，地盤沈下が須崎・甲浦で1m，田園の水没15km²，死者



図-1 南海地震の震央¹⁾

1,330人,全壊家屋11,591戸,半壊家屋,23,487戸,流失家屋1,451戸,焼失家屋2,589戸等の記録がある¹⁾。

地震による液状化に関しては,安政南海地震で高知市内江の口と小高坂の間の田に潮が吹いたとの記録が残されている¹⁾。昭和南海地震では,野根町二本松で水田から粘土と砂礫が吹き上げられた記録及び奈半利川海岸の砂地から泥水が噴出した記録がある。高知市内の液状化現象の記録は見あたらないが,澤田らは高知平野の被害報告から液状化に関係した被害発生位置を抽出し液状化地域推定図を作成している²⁾。これによると,液状化発生地域は,鏡川,江の口川,久万川の三角州地帯から自然堤防及び後背湿地帯の市街地全域にわたり,液状化の激しかった地域として浦戸湾周辺デルタ地帯のかなり広い範囲を推定している。

3. 高知平野の地形と土質^{3, 4)}

高知平野の地形を区分すると図-2に示すように各水系溪口部に扇状地,それに続く自然堤防地帯および河口部の三角州に分けられる。

扇状地は,鏡川の形成したものが最大で,標高10mの米田地区を扇頂とし,能茶山付近を扇端とし,層厚約10mの砂礫層からなる。この扇状地の背後の樹枝状の谷或いは小河川は出口をせき止められ溺れ谷を形成し,主として腐植土が分布し,超軟弱地盤となっている。

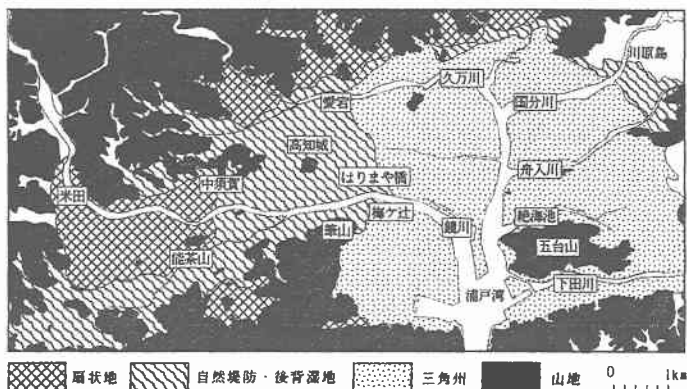


図-2 高知市の微地形分類図³⁾

また,北部山麓地域の開析地を埋める久万川の各支流もそれぞれ扇状地を形成している。

自然堤防地帯は,鏡川流域では標高5m付近(中須賀-能茶山)から標高1~1.5m(はりまや橋-梅ヶ辻)まで,久万川流域では愛宕大橋付近まで,国分川流域では川中島付近までの地域で,砂または小礫からなっている。自然堤防間の低地は,後背湿地帯を形成し,排水不良地域で,砂~シルトからなり,山麓付近ではビートの分布が見られる。

三角州地帯は,標高1~1.5m以下の地域で,浦戸湾に注ぎ込んでいる各河川の河口部に形成された平坦地である。構成土質は盆地状平野内の浅海性の堆積でシルト~粘土からなり,表層部にはかなりルーズな砂層が認められる。また,浦戸湾東部一帯は,かつてゼロメートル地帯であったが,市街の膨張に伴い,砂質土で埋め立てられ,表層部が非常にルーズな状態になっている。

4. 高知平野の沖積層の土性^{3, 5, 6)}

高知平野下の沖積層の層序区分は上部から第Ⅰ砂礫層(GⅠ),第Ⅰ泥質層(MⅠ),第Ⅰ砂層(SⅠ)および第Ⅱ泥質層(MⅡ)となり,下部は洪積層の第Ⅱ砂礫層に続く(図-4,5参照)。

第Ⅰ砂礫層は現河床および旧河床の堆積物で,扇状地的構造を示し,層厚は山麓付近で厚く河口部で薄い。鏡川の扇状地に分布する砂礫層は,非常に透水性が高く,透水係数は 10^{-1} cm/secのオーダーを示し,N値は20前後を示す場合が多く,重量構造物の支持層としてはやや信頼性に欠ける。

第Ⅰ泥質層は自然堤防地帯,後背湿地および三角州地帯全域に分布する海成泥質土で腐植物・貝殻などを含有した粘土~シルトからなり,自然堤防地帯で深度10~15m,三角州で10~20mとなり,浦戸湾に近づくにつれ層厚を増す。この層の粒度組成の特徴は,砂分が自然堤防・後背湿地地帯で15~40%,三角州地域で10%以下を示すことが多い。自然含水比は,液性限界とほぼ等しいかやや高く30~60%の値をとる。N値は

1～5，一軸圧縮強さは、粘土含有量が20%以下で0.1～0.5kgf/cm²，20%以上で0.6～1.2kgf/cm²，圧縮指数は0.3～0.6を示す。また、平野周辺部に点在する小溺れ谷や潟湖跡地では主に高含水比・高圧縮性の腐植土からなる。その土性は、砂・シルトの含有割合によってかなり異なっており、自然含水比150～1900%，湿潤密度1.04～1.4g/cm³，間隙比1.9～23を示す。一軸圧縮強さは0.18～0.46kgf/cm²で、圧密による強度増加は著しく2～3m程度の盛土荷重で0.8～0.9kgf/cm²を示す。圧縮指数は0.9～19と非常に大きく含水比と比例関係にある。

第Ⅰ砂層は火山灰とその下位の砂層からなる。火山灰層は、喜界島に噴火源をもつ降下堆積物で、層厚は1～2mの所が多いが、本町付近で7mと厚く河口付近では厚さを減じる。粒度組成は粘土分が数%で砂とシルトの含有量はほぼ等しく、土粒子密度は2.4～2.5g/cm³，自然含水比は90%前後を示す。この火山灰層のN値は20前後を示し、中位の相対密度で、層厚の厚いところでは被圧地帯水層を形成しており、透水係数は10⁻³cm/sec程度である。砂層は、はりまや橋から潮江にかけて顕著な分布を示し、深度15～25mとなる。N値は10～20を示す。

第Ⅱ泥質層は約10m前後の比較的一定な層厚をもち、粘土～砂質シルトからなり、自然含水比50～70%，湿潤密度1.6～1.7g/cm³を示す。N値は2～6，一軸圧縮強さは、0.7～1.3kgf/cm²を示し、第Ⅰ泥質層より強度が高い。

第Ⅱ砂礫層（洪積層）は沖積層基底面下の砂礫層で、山麓に近い扇状地性砂礫層とその下位から平野中央部に突出した段丘性砂礫層、浦戸湾周辺一帯に分布する河床砂礫層に分けられる。これらの砂礫層はN値が50以上を示す非常に緻密な地層で、高知平野の重量構造物の支持層となっている。また、この砂礫層は透水係数が10⁻¹cm/secのオーダーを示し、被圧帯水層を形成していて、地下水取水対象層としても価値がある。なお、この層の下部に分布する泥質層は、洪積粘土としては比較的軟質であり、浦戸湾東北地域には圧縮指数が1.3～1.4を示すものがある。

5. 高知市沖積層の液状化の判定

(1) 判定方法

液状化の判定は、図-3に示す土質データのある18地点⁷⁾と高知地盤図⁸⁾に収録されている土質区分名及びN値の記載されている柱状図から59地点を選び、道路橋設計示方書、港湾の施設の技術上の基準及び建築基礎構造設計指針に準じて行った⁹⁾。

表-1 土質分類名と土質特性の代表値

記号	土質分類	γ_{sat} t/m ³	γ_t t/m ³	D ₅₀ mm	Fc %	港湾 粒度	備考	記号	土質分類	γ_{sat} t/m ³	γ_t t/m ³	D ₅₀ mm	Fc %	港湾 粒度	備考
C	粘土	1.6	1.4	0.0055	100	—	**	FSM	シルト質細砂	1.8	1.6	0.07	40	bf	*
CM	シルト質粘土	1.7	1.5	0.007	95	—	**	SC	粘土質砂	1.8	1.6	0.13	40	A	**
CS	砂質粘土	1.8	1.6	0.05	70	—	**	SM	シルト質砂	1.8	1.6	0.17	30	A	**
M	シルト	1.75	1.55	0.025	90	Bf	*	S-M	シルト混り砂	1.9	1.7	0.18	10	a	
MC	粘土質シルト	1.8	1.6	0.012	100	Bf	**	S-G	礫混り砂	2.0	1.8	0.25	5	A	
MS	砂質シルト	1.8	1.6	0.04	70	A	**	G	礫	2.1	1.9	20	0	—	
M-S	砂混りシルト	1.8	1.6	0.035	85	A	**	GS	砂質礫	2.0	1.8	2.0	0	Bc	*
S	砂	2.0	1.8	0.2	5	a	*	G-S	砂混り礫	2.1	1.9	12.5	0	—	**
FS	細砂	1.85	1.65	0.15	10	a	*	Ss	表土	1.7	1.5	0.02	80	—	*

γ_{sat} ：飽和密度， γ_t ：湿潤密度，D₅₀：平均粒径，Fc：細粒分含有量

a, af, ac：均等係数が小さい砂の粒度範囲の分類，A, Af, Ac：均等係数が大きい砂の粒度範囲の分類

備考欄の*印は、道路橋設計示方書，**印は、高知市内の土質試験結果の平均値

これらの判定方法は、土質定数として土層の単位体積重量、細粒分含有率及び平均粒径あるいは分布形状を必要とする。そこで、地盤図の柱状図による判定は、記載されている土質区分名をもとに道路橋設計示方書¹⁰⁾及び高知市内の沖積層における土質試験結果を参考に表-1に示す土質定数を代表値として用いることにした。

港湾施設技術基準の判定で用いる等価加速度は、等価線形重複反射モデルによる地震応答解析結果から求めた最大せん断応力 $\tau_{\max}$ と有効上載荷重 σ_v' から算定することになっているが、今回の解析では岩崎・龍岡らの方法¹¹⁾で求めた $\tau_{\max}/\sigma_v'$ から算定した。また、判定地点の地表最大加速度 $a_{\max}$ は、金井式を震央付近の算定加速度を考慮した次に示す修正式¹²⁾を用い、震央を昭和南海地震の震源（北緯33.03°, 東経135.62°）、地震の大きさをマグニチュード8と仮定し求めた。

$$\alpha_{\max} = \frac{5}{\sqrt{T_g}} \cdot 10^{0.61M - (1.66 + 3.60/L) \log L + (0.167 - 1.83/L)}$$

なお、道路橋設計示方書による判定は、設計水平震度0.15をそのまま用いた。

(2) 判定結果

3方法によるA7地点の液状化判定計算例を表-2に示す。液状化の有無は、土質定数に推定値を用いているため2つ以上の判定方法で液状化が生じると判定されたものを液状化有、1つ以下のものを液状化無とした。液状化の判定は、道路橋設計示方書で液状化に対する抵抗率 F_L が1以下の土層、建築基礎構造設計指針で液状化発生に対する安全率 F_L が1以下の土層及び港湾施設技術基準で液状化予測のための土層の分類がIとIIになる土層を液状化するものとした。図-3に判定地点及び液状化判定結果を示す。

判定地点の空白地域があるが、これらの解析結果から、浦戸湾に流入する各河川流域のデルタ地帯から自然堤防地帯の下流にかけて河川に隣接した地帯で液状化の危険性が大きく、特に、浦戸湾東部のデルタ地帯は、全域にわたって液状化の危険がある。また、礫層が主体で液状化が生じにくいと考えられる扇状地地域でも判定数の1/3が液状化する結果となった。自然堤防地帯の河川から離れた地帯及び各河川河口部は、主として粘性土が堆積しており液状化の危険性が少ない。

表-2 液状化判定計算例（A7地点：地表最大加速度 $\alpha_{\max}=88.3\text{gal}$ 、地盤の卓越周期 $T_g=0.786\text{sec}$ ）

道路橋設計示方書					港湾施設技術基準					建築基礎構造設計指針					備 考
深 度 m	土質 分類	N値	σ_v tf/m ²	σ_v' tf/m ²	R	L	F _L	N _{0.65}	a_{eq} gal	土層 分類	補正 N値	$\frac{\tau_i}{\sigma_v'}$	$\frac{\tau_d}{\sigma_v'}$	F _L	
0.75	FI	3.0	1.20	1.20											
1.95	GS-C	16.0	3.21	3.21											
2.60	S	5.0	4.50	3.90	0.194	0.170	1.15	6.16	71.3	III	8.01	0.106	0.070	1.51	
3.15	S	25.0	5.60	4.45	0.418	0.183	2.28	27.78	77.8	IV	37.48	0.500	0.076	6.61	
4.00	GS	23.0	7.35	5.35	0.331	0.198	1.67	24.45	84.9	IV	31.44	0.500	0.081	6.14	
5.00	GS	15.0	9.45	6.45	0.245	0.207	1.18	15.12	90.6	IV	18.68	0.215	0.085	2.52	
6.00	MS	2.0	11.40	7.40	0.414	0.214	1.93	1.80	95.2	II	13.33	0.154	0.088	1.75	
7.15	MS	4.0	13.47	8.32	0.453	0.221	2.05	3.45	100.1	IV	15.39	0.176	0.091	1.93	
10.00	VA	12.0	17.72	9.72	0.666	0.237	2.81	12.00	112.7	V	23.17	0.342	0.098	3.50	
12.00	VA	15.0	20.52	10.52	0.688	0.245	2.81	15.00	120.6	V	25.62	0.500	0.101	4.96	
14.15	VA	12.0	23.53	11.38	0.655	0.249	2.63	12.00	127.8	V	22.25	0.302	0.103	2.94	
16.95	M	1.7	28.20	13.25	0.471	0.243	1.94	1.70	131.5	I	12.48	0.146	0.100	1.46	
19.00	S	7.0	32.07	15.07	0.163	0.233	0.70	4.08	131.6	I	5.70	0.089	0.096	0.92	←液状化

σ_v ：全上載圧、 σ_v' ：有効上載圧、 $N_{0.65}$ ：等価N値、 a_{eq} ：等価加速度

τ_1/σ_v' ：液状化抵抗比、 τ_d/σ_v' ：繰返しせん断応力比

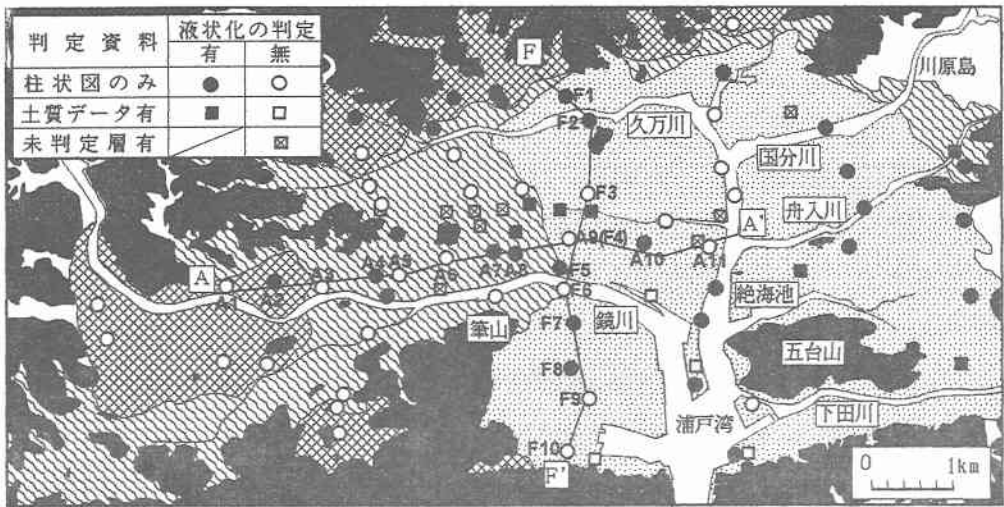


図-3 液状化の判定位置および判定結果

図-4 及び図-5 に図-3 中の A-A' 及び F-F' 位置の地質断面⁸⁾と液状化の危険性が判定された深度を示す。液状化危険深度分布から自然堤防地帯から扇状地にかけて第Ⅰ砂礫層下部に明瞭な砂層が分布し、地質構造によっては扇状地でも液状化発生の危険が有ることがわかる。また、第Ⅱ泥質層中にも砂層が分布し深い層で液状化の危険が判定されている。デルタ地帯は、鏡川の南側で第Ⅰ砂礫層、北部で砂層が上層部に分布し、中部から下部にかけては主として粘性土が厚く堆積している。この地域の液状化は、第Ⅰ砂礫層下の砂層でほとんどが発生し、第Ⅱ泥質層では粘性土中に薄く挟在する砂質シルト～細砂層部分で判定されている。なお、地表に近い部分の粘性土層の地震動による流動化現象については、この地域の土の一軸圧縮強さが、ほとんど0.2kgf/cm²以上であり、あまり心配する必要がないと考えられる。

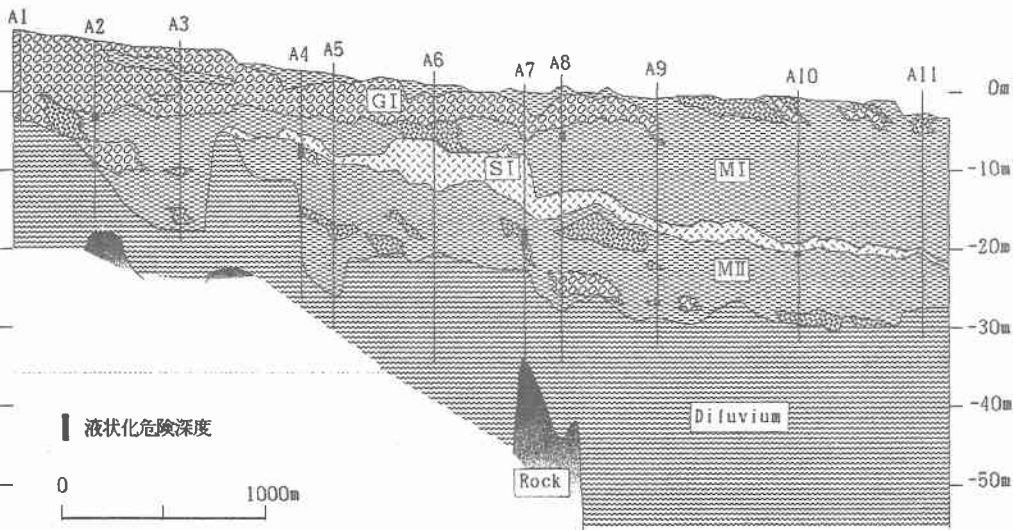


図-4 A-A'地質断面と液状化危険深度

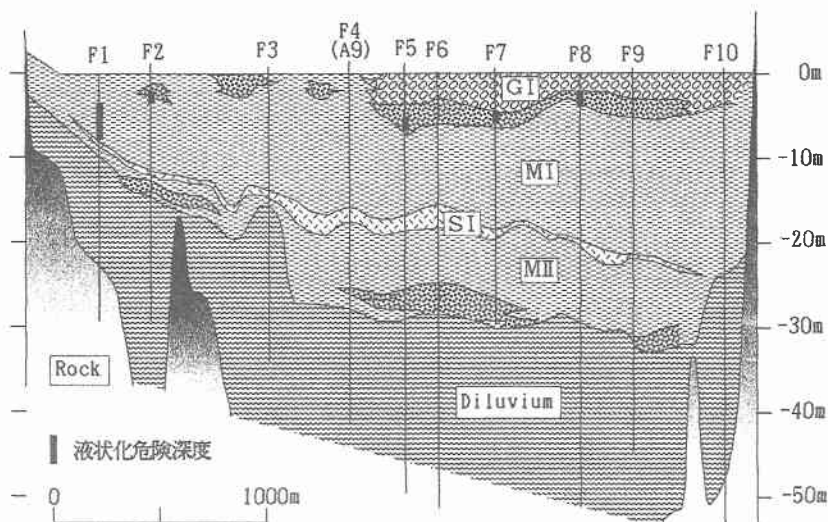


図-5 F-F'地質断面と液状化危険深度

6. あとがき

高知市内の沖積層の地盤調査は、これまで非常に多く行われている。しかし、土質試験に関してはデータが少なく、沖積層が軟弱な細粒土層のため、そのほとんどが軟弱地盤を対象としたものであり、粘性土層間に挟在する砂質土層のデータが非常に少ない。そのため、土質情報が少なく、今回の解析精度にやや問題があると考えられる。今後、液状化の被害を及び対策を考えるに当たって、砂質土層の厚さや基礎形式との関係も検討課題となる。

参考文献

- 1) 岡野健之助: 四国の地震, 土佐出版社, 1988
- 2) 澤田健吉, 小竹良・長田光司・貴志友基: 南海地震時の高知市における液状化被害の見直し, 第42回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, 1990
- 3) 甲藤次郎・西和彦: 高知平野の地形と沖積層, 高知大学学術研究報告, 第20号, 自然科学, 1971
- 4) 甲藤次郎・西和彦・平朝彦・岡村真・中野尊正: 高知平野地下の第四系ならびに地質災害について, 高知大学学術研究報告, 32, pp111-150, 1984
- 5) 榎明潔・小椋正澄・鈴木寿: 2. 四国の地盤特性, 2.1 平野部・沿岸部の地盤特性, 土と基礎, 39(9), pp31-37, 1991
- 6) 小椋正澄・溝塩大洗・吉田泰治: 四国の軟弱地盤, 支部創立30周年記念出版, 30年のあゆみ, pp62-83, 土質工学会四国支部, 1989
- 7) 小椋正澄・右城猛・中村和弘: 高知平野の地震時液状化の判定, 土質工学会四国支部技術・研究発表会, 1993
- 8) 高知地盤図編集委員会: 高知地盤図, 高知県建築設計監理協会, 1992
- 9) 土質工学会: 液状化対策の調査・設計から施工まで, pp95-108, 1995
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1990
- 11) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進: 砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp641-648, 1978
- 12) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, p200, 森北出版, 1995