

液状化による被災住宅の調査と対策

中央復建コンサルタンツ株式会社	正会員	林 健二
同上	正会員	福田勇治
同上	正会員	中野尊之
福山大学工学部	フェロー	柴田 徹

1. まえがき

兵庫県南部地震では大規模な液状化現象が発生し、数多くの被害を生じた。本報告では、液状化により被害を受けた住宅の震災後の基礎地盤調査手法について提案するとともに、調査結果より判定される被害程度に応じた復旧対策の考え方について示すものである。

2. 被害調査方法

兵庫県南部地震では、数多くの地盤災害が発生し、各種の構造物が被害を受けることとなった。特に、阪神地域の臨海部および埋立地においては大規模な液状化現象が発生し、水際線付近の港湾構造物や基礎構造物に顕著な被害が確認された¹⁾。また、べた基礎や布基礎等の浅い直接基礎を有する住宅（小規模な低層構造物）も例外にもれず、傾斜、不等沈下等の被害を受けた²⁾。

液状化による住宅の被害は大別して、地上部の構造物被害と基礎地盤の被害に分類できる。この内、地上部の構造物被害は傾斜、クラック等の損傷状況を調査することにより、容易に被害程度を判定することが可能である。一方、基礎地盤の被害状況については目視することができないため、被害程度を的確に把握する実用的な地盤調査手法が求められている。

液状化による基礎地盤の被害としては、局所的なゆるみや空洞の発生に起因する基礎地盤の支持力低下が想定される。特に、浅い基礎を採用する住宅では、地表面下数m程度までの地盤のせん断抵抗に着目する必要がある。これら浅い部分の地盤はほとんどが地下水位より上位にあたり、液状化を発生する土層ではないが、地下水位以深の液状化層からの噴砂・噴水の通路となることから、地震発生後に著しく乱される可能性がある。兵庫県南部地震においても、激しい液状化の発生した地域では、地下水位より上位の地盤のN値が液状化発生後に顕著に小さくなるという調査結果がいくつか報告されている³⁾。このため、基礎地盤の支持力が震災後に低下することが懸念される。また、震災後の復旧に際しては、基礎地盤の支持力特性を詳細に把握する必要があるが、調査対象件数が多いことに加えて構造物が軽量であるが故に、要求される基礎地盤の支持力特性が各構造物毎に微妙に異なるという問題点を持つ。このような問題点を克服するために、簡易で低コストな調査手法が必要となる。

本報告では、液状化により被害を受けた住宅の震災後の基礎地盤調査手法として、簡易動的コーン貫入試験と弾性波（レーリー波）探査を併用した調査手法を提案する。本調査手法は迅速かつ低コストな調査手法であり、地表面の状況や土層に対する適用性が広い。特に、簡易動的コーン貫入試験はコーンが小型であるため、礫地盤に対しても貫入が容易であり、連続的に数cm単位で土層のゆるみを把握することが可能である。また、舗装や障害物等により簡易動的コーン貫入試験の実施が不可能な地点においては、弾性波探査を併用することで対処する。以下、住宅（小規模な低層構造物）を対象とした場合の基礎地盤調査手法について述べる。

調査の流れを図-1に示す。1件の構造物に対する調査地点は、構造物隅角部の4点以上とする。また、調査深度は土層構成や対象構造物の重量により異なるが、軽量の低層構造物の場合、概ねGL-5m程度が妥

キーワード：液状化、地盤調査、貫入試験、住宅、兵庫県南部地震

連絡先：大阪市淀川区西宮原 1-8-29 ・ TEL 06-393-1136 ・ FAX 06-393-1146

当であると考えられる。調査方法は原則として簡易動的コーン貫入試験によるものとするが、舗装等で貫入が不可能な地点は弾性波（レーリー波）探査を採用する。

調査項目の一覧表を表-1に示す。調査では簡易動的コーン貫入試験による深度毎のNd値あるいは弾性波探査による深度毎の弾性波速度 V_R に加えて、液状化による噴砂堆積域、噴砂孔、地割れ、地盤高や家屋の傾斜角度等のデータを収集、整理する。これらのデータは所定のフォーマットに整理し、各構造物のカルテとしてまとめると有用である。

簡易動的コーン貫入試験や弾性波探査から得られるNd値や V_R は、地盤の支持力特性を考察する指標としては使い難いため、両者をN値に換算すると実用的である。Nd値や V_R とN値との相関関係はいくつか提案されているが、調査結果を有効利用し支持力特性の予測精度を向上させるため、調査区域の地盤においてローカルな相関関係を見い出せるよう調査計画を立案することも大切である。

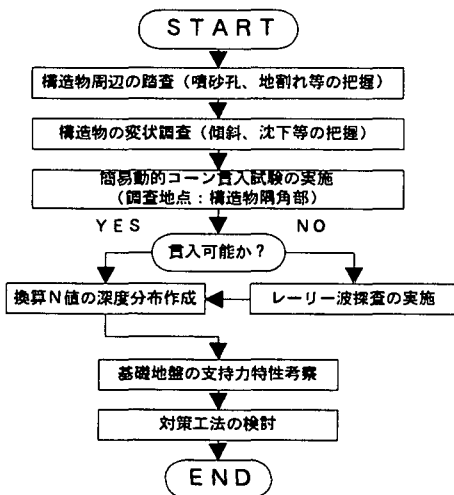


図-1 調査の流れ

表-1 調査項目

調査対象	調査項目
構造物周辺の地表踏査	<ul style="list-style-type: none"> 地割れ、クラック 地盤高（沈下、隆起） 噴砂堆積域、噴砂孔 噴砂試料サンプリング
構造物	<ul style="list-style-type: none"> 構造物の沈下、傾斜 構造物の損傷（クラック等） 構造物の既存試料（基礎設計図等）
基礎地盤	<ul style="list-style-type: none"> 基礎地盤の締めり具合（簡易貫入試験結果あるいは弾性波探査結果からN値換算） 局所的な空洞の存在 地下水位

3. 調査手法の適用性

(1) 簡易動的コーン貫入試験

ここでは筆者らが実施した簡易動的コーン貫入試験および標準貫入試験結果⁴⁾に基づいて、Nd値とN値の関係について考察する。紹介する試験結果は、関西地域における地盤特性が異なった粘性土、砂質土、礫質土の3種の地盤を対象に、同一地点で簡易動的コーン貫入試験および標準貫入を実施して得られたものである。表-2に各地盤の地盤特性を示す。

図-2は各地盤におけるNd値とN値の関係を示したものである。各地盤ともNd値とN値には良好な相関関係が認められる。また、Nd値とN値の関係式 $N = \alpha \cdot Nd$ における係数 α の関係は土質により異なることが明らかである。図-3は係数 α と50%粒径 D_{50} の関係を示したものである。係数 α と $\log D_{50}$ の間にほぼ直線的な関係が認められるが、これは簡易動的コーン貫入試験の更なる適用性の拡大を示唆するものである。

表-2 調査地域の地盤特性

地盤	土質	N値 (平均値)	細粒分(%) (平均値)	D_{50} (mm) (平均値)	相対 密度
A	細粒土 (F)	10~26 (18)	57.8~79.4 (69)	0.01~0.03 (0.02)	硬い
B	シルト質砂 (SM)	2~21 (9)	37.7~60.4 (47)	0.04~0.39 (0.18)	緩い
C	粘土混り 砂礫 (G-C)	3~17 (9)	5.2~18.9 (12)	0.72~23.4 (7.6)	緩い

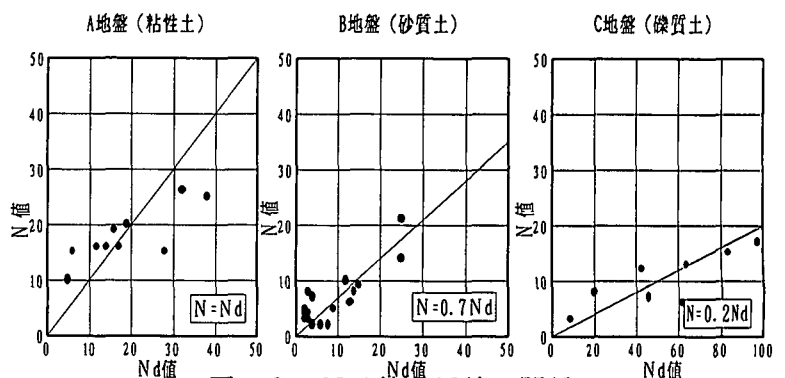


図-2 Nd値とN値の関係

(2)弾性波探査

本調査手法では、簡易動的コーン貫入試験による地盤評価を原則とするが、礫地盤や舗装等で貫入が不可能な地点は弾性波（レーリー波）探査を採用する。従って、弾性波探査により得られた基礎地盤の弾性波速度 V_R についても、N値に換算するのが実用的である。図-4は関西地域の埋立層を対象に実施した弾性波探査結果と標準貫入試験結果を比較したものであり、同一地点、同深度での両者の試験結果を対比させている。両者にはある程度の相関関係が認められるが、これは弾性波探査の基礎地盤調査への適用が可能であることを示すものである。

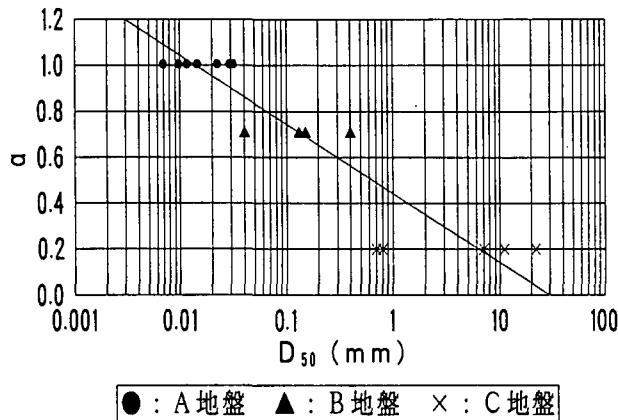


図-3 係数 α と D_{50} の関係

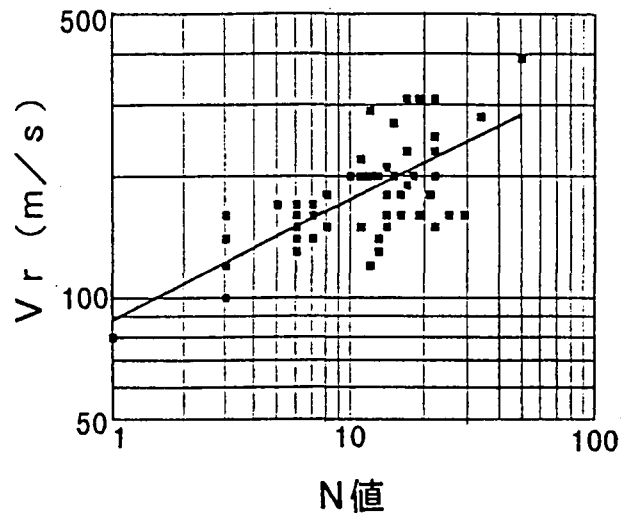


図-4 V_R と N 値の関係

4. 調査結果の解釈と対策工の考え方

ここでは、提案する調査手法により得られる調査結果の解釈について述べる。すなわち、対象構造物周囲4点の調査により、Nd値から換算されたN値を用いて図-5に示すような調査結果を得ることができる。図-5より、対象構造物のどの地点の支持力がどの程度弱いかを容易に判断することが可能である。また、緩い砂質土地盤においては、調査結果から次の2項目について考察すれば、対策を考える際に有効である。

- ①地盤が全深度にわたり緩い地点の抽出（例えば、N値4以下程度の緩い地盤が連続的に続く地点）
- ②局所的に空洞に近い部分の存在（例えば、N値1以下程度の極めて緩い地盤が存在する地点）

上記2項目に該当する地点が、調査箇所内の何点で見られるかにより構造物をランク分けすれば、対象構造物毎の地盤支持力の評価や対策工の必要性、適切な対策工法の種類についての検討が容易となる。

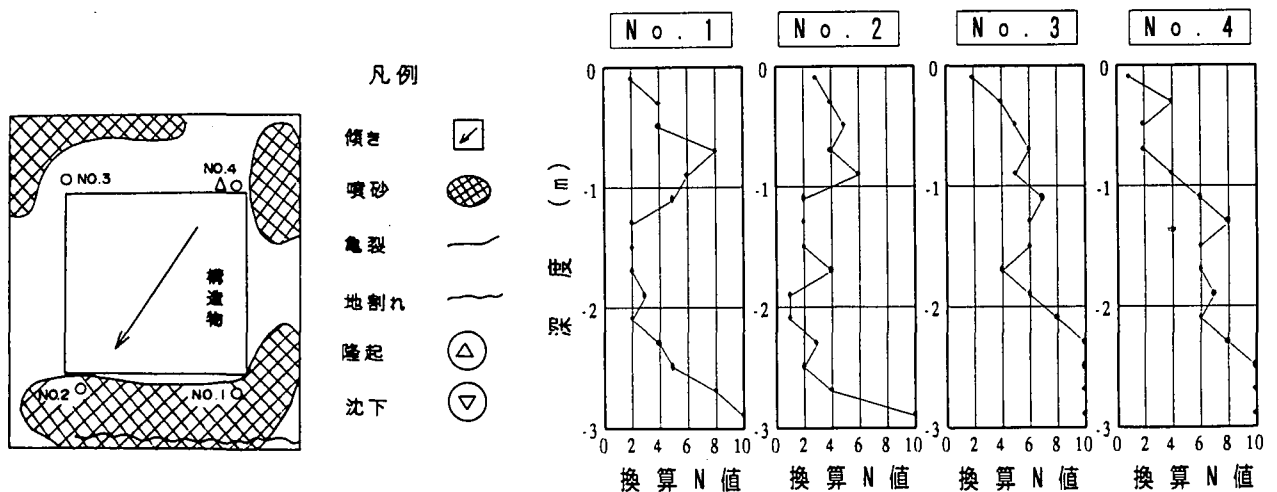


図-5 調査結果の整理例

液状化による被災地域の対策工法の目的は、以下の3通りに分類することができる。また、対策案としては表-3に示す4ケースの対策が考えられる。

- ①傾斜、沈下した構造物の補修を目的とする対策
- ②液状化により緩んだ基礎地盤の改良を目的とする対策
- ③大地震が今後発生しても問題のない対策

ここでは、上記②の基礎地盤の改良を目的とする対策について述べる。表-4は最適な対策工法を選定する場合の着目点や判定方法の一例を示したものである。また、表-5は既設構造物を移設せずに限られた施工空間で講ずることのできる対策工法を示したものである。ここで用いられる被害ランクは基礎地盤特性の良否を示すものであり、調査結果から得られる構造物周囲の基礎地盤の緩みの発生状況から判定することができる。また、この被害ランクに応じて適切な対策工法を選定することが可能となる。

表-3 対策目的と対策内容

	概要	対策の目的		
		①	②	③
ケース1	対策は必要なし	×	×	×
ケース2	構造物のみ対策	○	×	×
ケース3	構造物と地盤の対策	○	○	×
ケース4	今後の大地震への対策	○	×	×

表-4 対策工選定時の着目点

着目点	目安	判定
1. 地盤の緩み	$N \leq 4$	2種の着目点より、調査結果を総合的に判定し、被害ランクA~Cに判定
2. 局所的空洞	$N \leq 1$	

表-5 被害ランクと対策工法

被害ランク	対策工法
A	・注入工法 ・深層混合処理工法
B	・高剛性べた基礎工法 ・短杭打設工法
C	・対策不要

5. 被害調査事例

調査対象地域は、阪神地域の臨海部に位置する埋立地である。兵庫県南部地震においては、当該埋立地内の多くの区域で液状化による噴砂及び噴水が確認され、護岸、道路、橋梁等の構造物から低・中・高層の建築物まで様々な被害が生じた。特に、低層建築物の沈下や傾斜による被害が顕著であった。液状化現象による埋立地盤の変状度合の把握を目的として実施された土質調査結果を以下に示す。

本地域の土層構成は、図-6に示す通りであり、地表面から順に埋立層(B)、沖積粘土層(Ac)、洪積砂層(Ds)で構成されている。また、埋立層は上位から砂礫層(B₁)、砂層(B₂)、砂礫層(B₃)に分かれている。兵庫県南部地震において本地域の地表面付近にどの程度の水平加速度が生じたかは、観測記録が近傍にないため不明であるが、別途実施した本地域での動的応答解析結果に基づけば、地表面上で水平加速度370galの発生が推定される。図-7に水平加速度370galを用いて実施した液状化判定結果(F_L値分布)を示す。図-7より地下水位以下のほとんど全ての埋立層(B₂層及びB₃層)で液状化が発生したものと考えることができる。

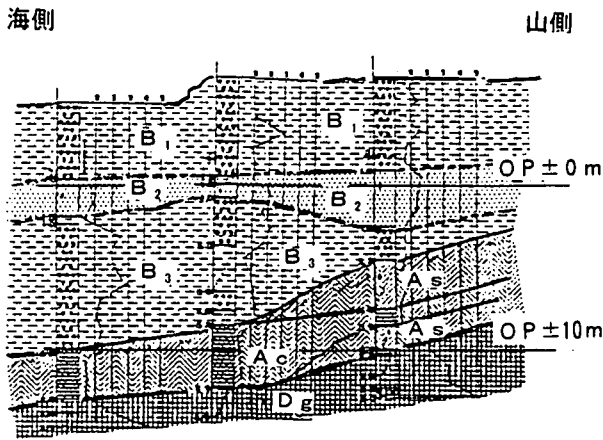


図-6 土層構成状況

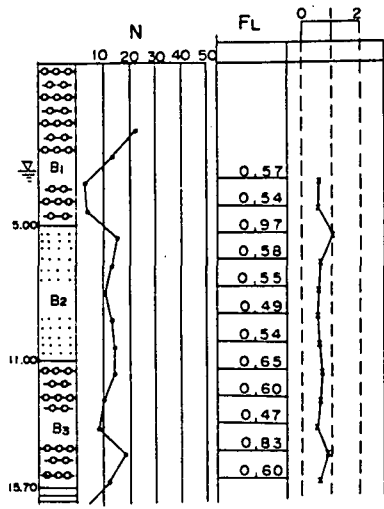


図-7 液状化判定結果

既存のデータと震災後のデータの比較より、本地域の埋立層のN値の変化をまとめたものが表-6である。液状化が発生したと考えられるB₂層及びB₃層ではN値の変化に増加あるいは減少の一定の傾向は認められない。一方、地下水位より上方に分布するB₁層においては、地震後にN値の減少していることがわかる。また、図-8、図-9は、震災前及び震災後のB₁層のN値の度数分布を示したものであるが、緩い砂層と考えてよいN値4以下となるデータの比率は地震前で約6%であったものが、地震後には約30%に増加している。これはB₁層が、液状化を生じたB₂層、B₃層からの噴砂・噴水の通り道となり、パイピング現象でB₁層に緩みが発生したためではないかと推測される。

表-6 震災前後のN値の変化

土層	ボーリング No.	造成完了後の N値	震災後のN値	平均値の 増減
B ₁	1	10 (10)	6~15 (9)	-1
	2	8~30 (15)	8~29 (14)	-1
	3	3~20 (11)	3 (3)	-8
	4	7~30 (15)	10~22 (17)	+2
	5	7~28 (19)	11~34 (19)	0
	6	14~27 (19)	3~17 (9)	-10
	7	2~36 (16)	3~22 (11)	-5
B ₂	1	4~12 (8)	7~18 (13)	+5
	2	—	21 (21)	—
	3	6~19 (10)	7~8 (8)	-2
	4	—	—	—
	5	7~14 (12)	6~22 (13)	+1
	6	5~20 (12)	11~14 (12)	0
	7	9~19 (15)	11~15 (13)	-2
B ₃	1	3~6 (5)	6 (6)	+1
	2	6~35 (17)	5~22 (13)	-4
	3	10~16 (13)	4~28 (16)	+3
	4	7~25 (17)	12~22 (15)	-2
	5	10~16 (12)	—	—
	6	6~15 (11)	5~18 (8)	-3
	7	9~26 (17)	8~18 (12)	-5

() : 平均値

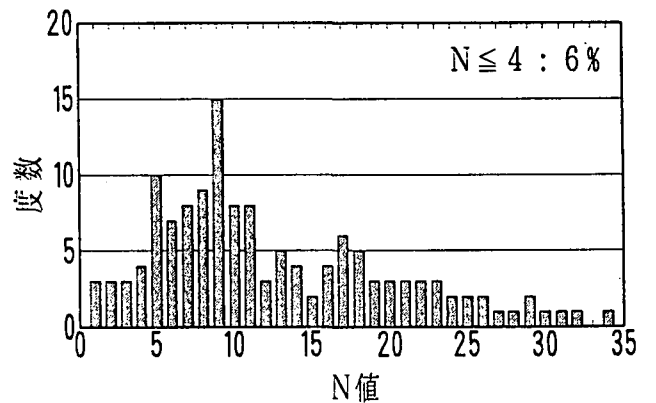


図-8 震災前のN値分布 (B₁層)

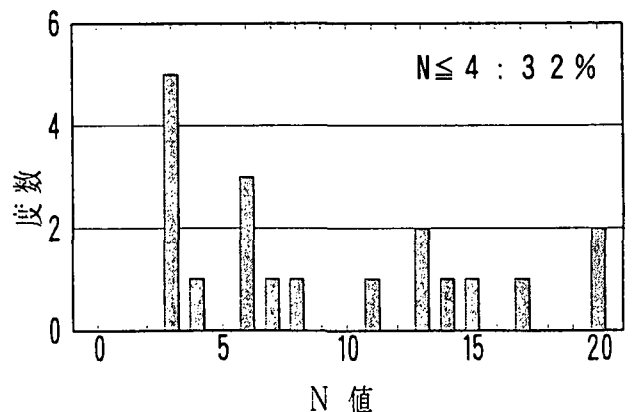


図-9 震災後のN値分布 (B₁層)

前記のような液状化による地盤災害を被った埋立地において、本編で提案する調査手法を用いて被災住宅の基礎地盤調査を実施した。すなわち、被害の比較的顕著であった十数件の住宅を調査対象とし、各住宅の隅角部4点において簡易動的コーン貫入試験あるいは弾性波探査による調査を行った。

表-7は調査結果より得られた液状化による各住宅の基礎地盤の緩みの発生状況を示したものである。調査住宅の半数以上が、構造物周囲4箇所の中の3地点以上で緩みが発生していることが明らかとなった。

表-8は、震災により緩んだ基礎地盤の改良を目的とした適用可能な対策工法を示したものである。表-8より、被害ランクに応じた適用性の高い対策工法を選定することができる。

表-7 基礎地盤調査結果

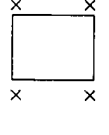
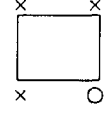
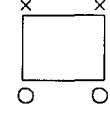
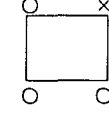
ゆるみ発生状況	【ランク1】 4地点ともゆるみ発生	【ランク2】 3地点でゆるみ発生	【ランク3】 2地点でゆるみ発生	【ランク4】 1地点でゆるみ発生	【ランク5】 ゆるみ地点はなし
					
	29%	50%	14%	7%	0%

表-8 適用可能な対策工法

工法	概要	適応性
高剛性ベタ基礎工法	コンクリートの高剛性のベタ基礎を作り、地盤の支持力を増すとともに、不等沈下を生じにくくさせる。	ランク 2~4
短杭打設工法	基礎地盤内に木杭等を密に打設し、地盤を締め固める。	ランク 2~4
深層混合処理工法	高圧噴射・攪拌工法により地盤改良を行い、地盤を固結させる。	ランク 1~2
注入工法	セメント系の注入材を地盤内に注入し、地盤を固結させる。	ランク 1~2
杭基礎工法	家屋を直接指示する杭基礎を施工し、家屋の沈下を防止する。	抜本的な対策となり、適応性は低い。

6. あとがき

本報告では、液状化発生地域における被災住宅の基礎地盤調査手法について提案した。簡易動的コーン貫入試験は深度方向の微妙な支持力特性の液状化後の変化を把握することが可能であり、液状化により不等沈下を生じた小規模構造物の対策を講じる上で有効な調査手法であると考えられる。しかしながら、調査位置、数量等の調査計画の立案が調査の成否に大きく係わることから、今後さらに本手法の適用性について検討を進める必要がある。対策工法へのアプローチ手法についても、対策工法の効果確認を含めた事例の収集が必要であり、さらなるデータの集積を行いたい。対策を面的に実施することによるスケールメリットも考えられることから、対策工計画についても十分に研究する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会阪神大震災震災調査・第2次報告会資料、土木学会、1995
- 2) Shibata, Ishikawa and Hayashi : Liquefaction at seaside of Nishinomiya city, 3rd Kansai International Geotechnical Forum, Kobe, 1997
- 3) Takahashi and Tanimoto : Change of SPT N-values measured on reclaimed land due to the 1995 Hyogo-ken nambu earthquake, 3rd Kansai International Geotechnical Forum, Kobe, 1997
- 4) 金村、高林、林 : 簡易動的コーン貫入試験の基礎地盤調査への適用性、第31回地盤工学研究発表会、1996