

振り切れた1倍強震計記録の修復波形による 長周期応答スペクトル†

RESPONSE SPECTRA OF LONG-PERIOD GROUND MOTIONS OBTAINED BY MENDING OF SATURATED RECORDS OF A LOW-MAGNIFICATION SEISMOGRAPH

山田善一*・野田 茂**・嶋田三朗***・吉田隆治****

By Yoshikazu YAMADA, Shigeru NODA, Saburo SHIMADA and Takaharu YOSHIDA

In this paper, considering that valuable information concerning the aseismic design of structures are hidden in saturated records, a more reasonable method to mend the Japan Meteorological Agency's (JMA) low-magnification seismograms is proposed through a shaking table test. This method is able to mend a saturated seismogram with an error lower than 10% for engineering purpose. Seven JMA's records with saturations obtained during the 1968 Tokachi-oki earthquake, the 1978 Miyagiken-oki earthquake and the 1983 Nihonkai-chubu earthquake are mended by the proposed method. Consequently, some mended displacement seismograms are found to give much higher response spectra than design values for long-period (5 to 15 seconds) structures.

Keywords: long-period ground motion, low-magnification seismograph, shaking table test, mending

1. 序 論

最近の耐震設計技術などの進歩は、長大橋、超高層ビル、大型貯蔵タンクなど大規模で固有周期の長い構造物の建設を可能にしてきた。しかし、それらの構造物の耐震設計に必要なやや長周期領域(2~20秒)における地震動に関しては、現在のところ必ずしも十分な情報が得られているとはいえない。その原因の1つとして、従来のSMAC型加速度強震計では、この周期帯において各種の誤差が含まれている可能性があり、その記録長(最大3分間)も十分とはいえないことが挙げられる。最近では、従来は地震学の分野で利用されていた低倍率の変位型地震計(その代表的なものとして気象庁1倍強震計が挙げられる)の記録を数値化し、それを工学の分野に活用しようとする研究が各所で進められている^{1)~3)}。しかし、たとえば1倍強震計では、水平成分の記録最大振

幅が約±3cmであるため、震源近くの強震動に対しては振り切れてしまうことが多く、上述の数値化された変位計記録には、これらの振り切れた記録は通常含まれていない。

ところで、著者ら^{4),5)}は、1983年日本海中部地震のときに得られた新潟地方気象台での気象庁1倍強震計の振り切れた記録を簡便な方法で修復し、その速度応答スペクトルを求めたところ、周期10秒前後で200kine(減衰定数 $h=0.1\%$)もの値になることを示した。この値は、石油タンクの観測スロッシング高さから逆算して求めた応答スペクトル値や、SMAC記録から得られた応答スペクトルとも調和的であった。また、森岡⁶⁾は、1923年関東大地震時の東京本郷で得られたユーイング型強震計の振り切れた記録を修復し、その速度応答値($h=0\%$)が周期13秒付近で300kineにもなることを示している。このように、振り切れた記録には、長周期構造物の耐震設計上、看過することができない強震動が秘められていることがわかる。

本研究は、このような観点から、①振り切れた1倍強震計記録の合理的な修復法を開発し、②それを用いて過去のいくつかの振り切れた実地震記録の修復を試み、それらの応答スペクトルを求めようとしたものである。なお、著者ら⁷⁾は以前にも振り切れた記録の修復法を提案

† 土木学会第41回年次学術講演会⁷⁾および第7回日本地震工学シンポジウム⁸⁾にて一部発表

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室 (同上)

*** 正会員 工博 前田建設工業(株)土木設計部課長代理 (〒102 千代田区富士見2-10-26)

**** 正会員 工修 前田建設工業(株)土木設計部(同上)

しているが、本研究ではその欠点の改良を図っている。

2. 気象庁1倍強震計とその振り切れ現象

気象庁1倍強震計は、水平方向2成分と上下方向1成分の3成分で構成されている。そのうちの水平方向1成分のみを組み立てたもの(52C型)を写真-1に示す。以下、水平成分のみを対象とする。写真-1の1倍強震計の計器特性は、自由振動実験を行ったところ、固有周期が5.95秒、減衰定数が0.55(制振度=8)であった。この地震計は上記のごとく固有周期が比較的長い為、やや長周期の地震動を記録するのに適している。減衰機構はマグネットによる。この計器特性のため、周期6秒以上の波動と比べ、周期8秒で1/1.66、周期10秒で1/2.55、周期15秒で1/5.93まで感度が低下する。

記録は直径約25cmのドラムに巻きつけた紙上にペンで描かれる。ドラムの回転による紙送り速度は3cm/分で、ペンによる記録線の太さは写真-1の計器の場合で0.2~0.3mmである。ドラムは電動で1回転約25分の速度で常時回転しており、記録の重なりを避けるため、1回転で約1.5mmずつドラムが回転軸方向にずれていく。記録紙は1日1回定時に交換される。

振子の重量は約6kgで、アーム長は約30cmである。振子は計器保護のため、中立位置より約±3cm(ボルトにより調節可)のところ、ストッパーにより振幅が制限されている。振子があたる部分(ボルトの先端)には厚さ1~2mmの牛革が装着されており、緩衝材の働きをしている。1倍強震計は地震動を受けて記録振幅が±3cm以上になると、振子がストッパーに衝突し、は

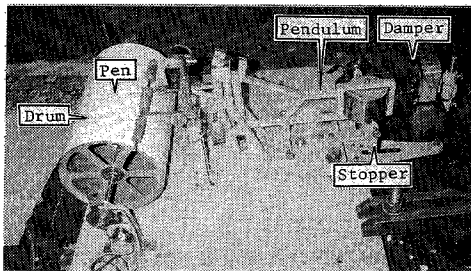


写真-1 気象庁1倍強震計(52C型、水平1成分のみ)

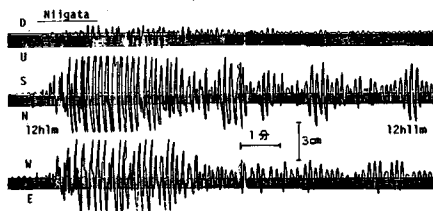


図-1 日本海中部地震(昭和58年5月26日)による新潟地方気象台での1倍強震計記録

ね返されながら記録を続ける。図-1は日本海中部地震のときの新潟での記録であるが、水平2成分で約2分半にわたって振り切れている。

図-1の記録の場合、周期10秒程度の地震動が支配的であるので、後に述べる振動台実験においても、この程度のゆっくりした周期の動きに対しては、振子がストッパーに衝突し、はね返される動きを視覚的にも十分追うことができ、振り切れ波形を修復することがそれほど困難ではないと感じられる。しかし、実際の振り切れ記録の中には、何らかの理由で途中で記録が全く途絶されているものや、振動周期が比較的短いために記録が密集して判読が困難なもの、さらに、ペン書きのインクがかすれてしまっているものなど、修復が困難と考えられる記録も見受けられる。そこで、本研究で扱う振り切れ記録は、記録波形の連続性ははっきり認識できるものに限った。

3. 振り切れ現象のモデル化と数値解析的検討

図-2は写真-1の1倍強震計の減衰装置を取りはずし(このときの系の減衰は $h=0.4\sim1\%$ と非常に小さくなる)、片側のストッパーを中立点にセットして、振子のストッパーへの衝突・はね返りの自由振動を記録したものである。図より、振子は反発係数 $e=0.8$ 程度のはね返りを示している。

そこで、振子とストッパーとの関係を、図-3のごとくモデル化し、振り切れ波形の修復法についての数値解析的な検討を行う。図-3において、 k_1 および c_1 は質量 m の振子の、また、 k_2 および c_2 はストッパーの緩衝材のばね定数および減衰係数である。 s は振子の中立位置よりストッパーまでの間隙で約3cmにセットされている。

このとき、地動 y に対する振子の変位応答 x は、次式の1自由度系の運動方程式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 & m(\ddot{x} + \ddot{y}) + c_1\dot{x} + k_1x = 0; x \leq s \quad (\text{状態1}) \\
 & \left. \begin{aligned}
 & m(\ddot{x} + \ddot{y}) + (c_1 + c_2)\dot{x} + k_1x + k_2\left(x - \frac{x}{|x|}s\right) \\
 & = 0; x > s \quad (\text{状態2})
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

ここに、状態1は振り切れない状態、また、状態2は振子がストッパーに接触している状態を示している。



図-2 振子の反発試験の記録

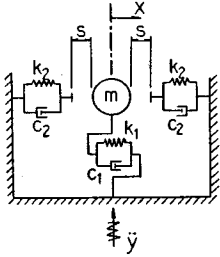


図-3 衝突モデル

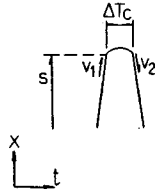


図-4 衝突前後の様式図

振子がストッパーに衝突するときの挙動を模式的に表せば、図-4のようになる。すなわち、振子は速度 v_1 でストッパーに衝突し、速度 v_2 ではね返される。いま、衝突時間 ΔT_c が地動の周期に比べて無視し得るくらい短いと仮定すると、衝突時間内に作用している地動の影響は無視できるであろう。そして、振子はストッパーに衝突した瞬間に速度 $v_2 = -e v_1$ ではね返されたと考えられる。これにより、 v_1 と v_2 (あるいは e) がわかれば、ストッパーに当たった瞬間に $[v_1 - v_2]$ (あるいは $[1 + e] v_1$) の初速度が与えられた状態1の振子の自由振動を求め、それを振り切れた記録に重ね合わせることににより、ストッパーが存在しない場合の振子の変位応答を求めることができる。

以上が本研究で提案する修復法の基本的な考え方であり、修復波形を $x(t)$ 、振り切れた波形を $x'(t)$ とすると、次式の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 x(t_0 + \tau) &= x'(t_0 + \tau) + (v_1 - v_2) \exp(-h_1 \omega \tau) \sin(\omega_d \tau) / \omega_d \\
 &= x'(t_0 + \tau) + (1 + e) v_1 \exp(-h_1 \omega \tau) \sin(\omega_d \tau) / \omega_d \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

ここで、 t : 時間、 t_0 : 衝突時刻、 $\tau = t - t_0$ 、 ω : 地震計の固有円振動数 ($= \sqrt{k_1/m}$)、 h_1 : 地震計の減衰定数、 $\omega_d = \omega \sqrt{1 - h_1^2}$ である。

次に、式(1)を数値積分して求めた解析上の振り切れ波形を本手法により修復し、それと振り切れのない理論波形との比較から、その修復精度を検討する。このときのストッパーの緩衝材の物性値は、その静的および動的試験を実施して求めた結果、 $k_2 = 100 \text{ kg/cm}$ 、 $c_2 = 0.1427 \text{ kg}\cdot\text{s/cm}$ であった。また、修復に用いる衝突速度 v_1 と反発速度 v_2 は、応答解析によって得られる速度値をそのまま用いた。数値積分は Nigam と Jennings の方法により、時間刻みは、状態1では0.1秒、状態2では0.001秒とした。

まず、正弦半波入力に対する振り切れ波形の修復結果について述べる。入力波は、周期 T_e が4秒から14秒、振幅 D_e が3cmから30cmの範囲にある正弦半波(20ケース)である。

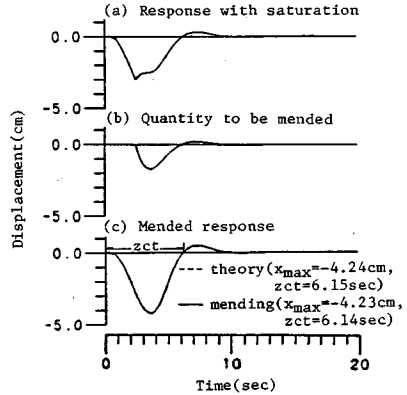


図-5 振り切れ波形の修復結果と理論波形の比較 (周期 $T_e = 8$ 秒, 振幅 $D_e = 8$ cm)

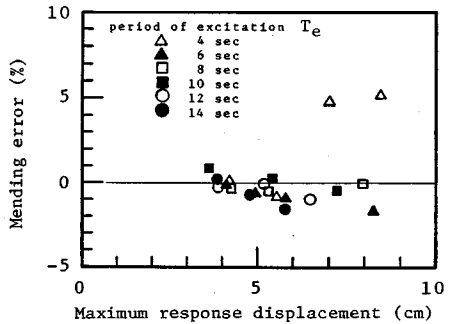
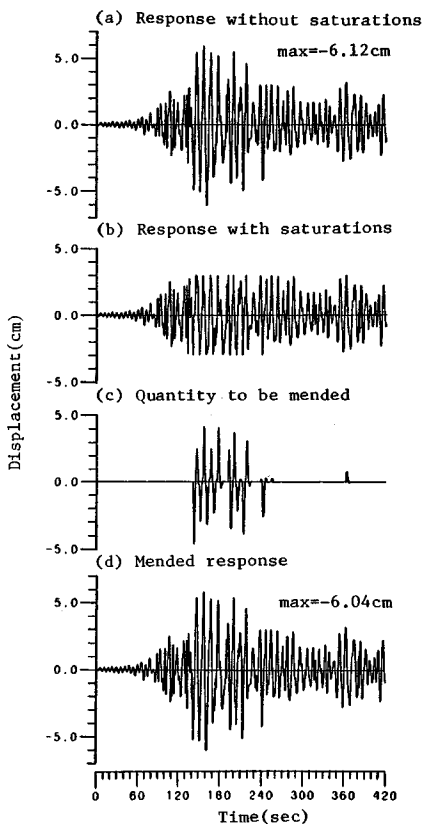


図-6 正弦半波入力に対する最大応答振幅 x_{max} に関する修復誤差

図-5に入力波の周期が8秒で振幅が8cmの場合の結果を示す。同図の(a)は数値解析的に求めた振り切れ波形である。接触時間 ΔT_c は0.0248秒で、状態2における固有周期 $T_c = (2\pi \sqrt{m/(k_1 + k_2)}) = 0.0492$ 秒の約1/2となっている。また、ここで対象としている数秒~10数秒のやや長周期の震動に対しては、きわめて短い接触時間になっていることがわかる。図-5の(b)は衝突した時刻に初速度 $[v_1 - v_2]$ を与えたときの自由振動波形である。そして、同図の(c)の実線は(a)と(b)を加え合わせた修復波形である。(c)には破線で理論波形も示してあるが、本方法によると、目視ではほとんど差が認められない程度に修復することができる。最大振幅 x_{max} は、理論波形が4.24cmであるのに対し、修復波形が4.23cmである。最初のゼロクロス時刻 z_{ct} は、同じく6.15秒および6.14秒である。20ケースについて、最大振幅 x_{max} に関する修復誤差を図-6にまとめた。図-6より、修復誤差はほとんど±2%以内に収まっており、最大でも約5%である。ここで、誤差の比較的大きくなるケースは、周期の短い場合である。

次に、地震波入力に対する検討結果について述べる。



図一七 地震波を用いた数値解析上の修復誤差の検討

図一七の (a) は、図一四の NS 成分を簡便な方法で修復して得られた地震動⁹⁾を入力波として、1 倍強震計の変位応答を解析的に求めたものである。同図の (b) は解析によって求めた振り切れ波形である。また、(c) はその修復量、そして、(d) は (b) と (c) を加え合わせた修復波形である。図一七の (a) と (b) は比較的周期特性が似ているが、その波形は全く異なっており、(b) からその原波形である (a) を想像することは困難である。しかし、本手法で修復した波形 (d) は目視では (a) との差がほとんど認め難い程度に修復されている。この場合の最大振幅の修復誤差は 1% である。

以上の数値解析上の検討で明らかになったことは、「もし、実際の振り切れ現象が図一三の衝突モデルで表わされるならば、接触時間 ΔT_c の影響は無視でき、衝突速度 v_1 と反発速度 v_2 を実際の記録から読み取ることにより、振り切れ記録の修復が可能である」ということである。次章では、1 倍強震計の振動台実験により、さらに本手法の有効性について検討を行う。

4. 振動台実験による修復法の検討

(1) 実験の概要

振り切れた 1 倍強震計記録の修復精度を検討するために振動台実験を実施した。使用した振動台はテーブル寸法 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 、最大積載重量 10 t 、水平方向最大加振力 17.6 t 、最大振幅 $\pm 15\text{ cm}$ 、加振振動数 $DC \sim 30\text{ Hz}$ の性能を有するものである。この振動台に写真一に示す 52 C 型気象庁 1 倍強震計の水平 1 成分を搭載し、各種の実験を行った。振動台の挙動は差動トランス型変位計で計測した。なお、1 倍強震計のほか SMAC 型加速度強震計なども同時に振動台に搭載して記録をとったが、それらについては別の機会に報告する予定である。

実験は、まず、振り切れない場合の記録精度を検証する目的で、記録振幅が $\pm 3\text{ cm}$ 以内になる正弦波および地震波について行った。次に、 $\pm 3\text{ cm}$ を越える大振幅の正弦波および地震波により、1 倍強震計を振り切らせた実験を行った。

以下、実験番号として、 A_iP_j と表記する場合は、振幅が $i\text{ cm}$ で周期が j 秒の正弦波入力 (i, j とも、実験の際の目標値を示している) を意味し、さらにその末尾に S を付けた場合は振り切れたことを示す。また、地震波としては、1983 年日本海中部地震のときに各気象台あるいは測候所で観測された 1 倍強震計記録を数値化したもの 4 波を用いた。すなわち、森、苫小牧、八戸および室蘭の記録の NS 成分である。実験番号は、おのおの、頭部に MO, T, H, MR の記号を付し、続く A_i で入力最大振幅 $i\text{ cm}$ を示している。ただし、AO と表記してあるのは原波形のまま入力したことを示し、末尾の S は、正弦波実験と同様、振り切れたことを示している。

なお、1 倍強震計記録の読み取りは、セイコー電子工業(株)製のデジタルイザード-SCAN, DH 7500 (A0 版) で行った。本器の読み取り精度は 0.0254 mm である。

(2) 1 倍強震計の記録精度の検討

振り切れない場合の 1 倍強震計の記録精度を検討した例としては、これまでも振動台実験による篠らの研究⁹⁾がある。本研究では、文献 9) の結果を参考にしつつ振り切れ実験に先だち、使用計器の精度および数値化に伴う各種の誤差を把握することを試みた。

まず、振幅が約 3 cm 、周期が 4 秒から 14 秒の正弦波入力の場合 (A3P4~A3P14) について検討した。1 倍強震計記録に各種の補正²⁾を施し、差動トランス型変位計から得た振動台変位の周期および振幅と比較したのが表一である。誤差は、周期、振幅ともおよそ 2% であり、十分な記録精度が得られていることがわかる。

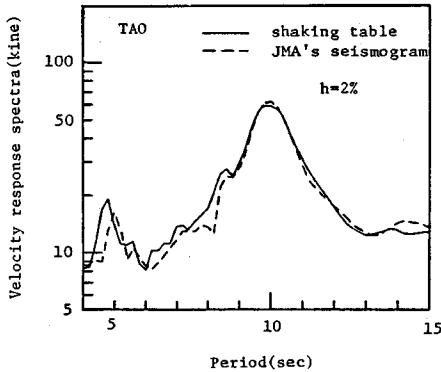
次に、地震波入力に対する結果を示す。表二は、4 種の地震波に対する最大振幅を比較したものであるが、いずれも数%の誤差が認められる。図一八に苫小牧の波形 (TAO) を入力した場合の振動台の波形および 1 倍強震計記録より求めた速度応答スペクトル ($h=2\%$) を

表一 振り切れない場合の正弦波加振実験の結果

Experiment code	Period(sec)			Double amplitude(cm)		
	Shaking table	JMA	Error (%)	Shaking table	JMA	Error (%)
A3P4	3.99	4.07	2.01	6.18	6.23	0.81
A3P6	6.00	5.89	-1.83	6.22	6.15	-1.13
A3P8	8.00	7.96	-0.50	6.20	6.16	-0.65
A3P10	9.99	9.97	-0.20	6.21	6.22	0.16
A3P12	11.98	11.93	-0.42	6.24	6.17	-1.12
A3P14	13.99	13.83	-1.14	6.22	6.11	-1.77
	Mean value			Mean value		
			-0.35			-0.62

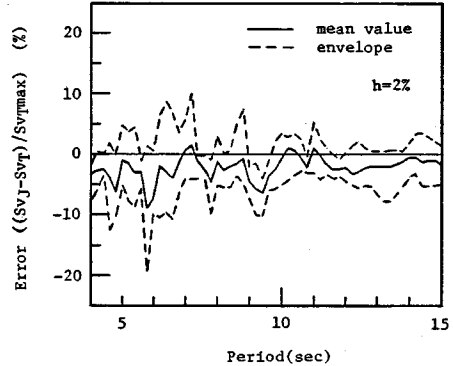
表二 振り切れない場合の地震波加振実験の結果

Experiment code	Maximum displacement(cm)		
	Shaking table	JMA	Error (%)
MOAO	7.46	-7.00	-6.17
TAO	-7.99	8.64	8.14
HAL2	-12.26	-12.05	-1.71
MRA8	8.13	8.76	7.75
	Mean value		
			2.00



図八 振動台変位および1倍強震計記録より求めた速度応答スペクトル

示す。両者のスペクトルは周期10秒前後のピークでよく一致している。図九には、表二に示した4種の地震波について、速度応答スペクトル ($h=2\%$) の誤差をまとめた。すなわち、1倍強震計記録と振動台変位の速度応答スペクトル値の差 ($S_{vj} - S_{vt}$) を、4秒~15秒の周期範囲における振動台の最大応答スペクトル値 (S_{vtmax}) で基準化し、4地震波についての最大・最小および平均をまとめたものである。図より、周期4秒~15秒で平均的には $-5\sim+1\%$ 程度の誤差であり、最



図九 表二の4地震波による振動台変位の最大応答スペクトルで標準化された相対誤差の最大・最小および平均

大・最小でも $\pm 10\%$ 程度の誤差で収まっている。

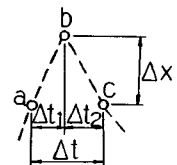
以上の検討より、1倍強震計の記録からその読み取りおよび各種の補正を含めた総合的な誤差は、 $\pm 10\%$ 程度であると考えられる。

(3) 振り切れ加振実験の検討

まず、正弦波加振実験のうち、表三に示す10ケースについて、振り切れた1倍強震計記録の修復を行った。衝突部分の波形は、図一〇に示すa, b, cの3点の座標をディジタイザーで順次読み取ることになる。しかし、ペン書きの記録線の太さが0.2~0.3mmであることから、b点にあまり近づけてa点およびc点を設定すると、両点の判別が困難になる。そこで、判別可能な位置までa点およびc点をb点から離して読み取ることとした。著者らが前論文で採用した修復法⁸⁾は、図一〇のa点とb点とから $v_1 = \Delta x / \Delta t_1$ 、また、b点とc点とから $v_2 = -\Delta x / \Delta t_2$ として v_1 および v_2 を求め、式(2)に

表三 振り切れのある場合の正弦波加振実験の結果

Experiment code	Period(sec)			Double amplitude(cm)		
	Shaking table	JMA	Error (%)	Shaking table	JMA	Error (%)
A5P4S	4.00	3.91	-2.25	10.13	6.87	-32.2
A10P4S	4.00	3.78	-5.50	19.95	11.26	-43.6
A5P6S	6.01	6.02	0.17	10.15	8.93	-12.0
A10P6S	6.01	5.86	-2.50	19.88	13.00	-34.6
A14P6S	6.01	5.98	-0.50	27.91	17.30	-38.0
A10P8S	8.00	7.93	-0.88	19.75	14.80	-25.1
A14P8S	8.00	7.70	-3.75	27.86	19.49	-30.0
A10P10S	9.99	9.76	-2.30	19.93	17.00	-14.7
A14P10S	10.00	9.86	-1.40	28.03	23.52	-16.1
A14P12S	12.03	11.77	-2.16	28.12	25.16	-10.5



図一〇 振り切れ部分の波形の読み取りの模式図

より記録波形を再現するものであった。しかし、この方法によると、 Δt_1 あるいは Δt_2 の読み取り誤差が v_1 あるいは v_2 の算定に大きく影響し、良好な修復波形が得られない場合があった。

そこで、反発係数 e を導入し、 $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ を $1 : 1/e$ になるように Δt を再配分し、改めて v_1 および v_2 を求めることとした。この方法によると v_1 および v_2 は b 点の t 座標に関係なく、 Δt のみで算出できるため、読み取り誤差の影響を格段に小さくすることができる。しかし、この場合には反発係数 e を与える必要がある。そこで、 e の値により修復波形がどれだけ影響を受けるかを検討した。

反発係数 e は、図-2 の反発実験の結果により、0.78 であった。そこで、 $e=0.6, 0.8, 1$ とし、それらの修復波形を比較した。図-11 の (a) は周期 10 秒、振幅 14 cm の正弦波加振実験による振り切れ記録 (A 14 P 10 S) に円弧補正を施した波形である。同図の (b) は修復後

の波形で、上から $e=0.6, 0.8, 1$ の場合のものである。これらの 3 種の波形を比較すると、反発係数 e の影響はほとんど認められない。そして、いずれのケースにおいても、前論文⁸⁾でみられた極端な波形の飛び出しもなく、比較的振幅のそろった正弦波 (理論的な最大記録振幅 = 5.3 cm) に修復されている。そこで、以下に示す修復計算においては $e=0.8$ の値を用いることにした。

図-11 の (c) は $e=0.8$ を用いて修復した波形に計器補正を施したものである。同図には振動台変位の正弦波の最大振幅を破線で示している。修復波形の振幅は振動台変位波形の振幅に比べ、若干小さめに求まっている。他の実験ケースについて、その周期および振幅を振動台のものと比較した結果を表-3 にまとめた。修復波形の周期に関する誤差は 5% 以下で、まずまずの結果が得られている。しかし、振幅に関しては、大きなもので 40% もの誤差が生じている。そして、入力波の周期が短いものほど、また、振幅が大きいものほど、その誤差は大きくなっている。この誤差が何に起因するものかは、現在のところ不明であるが、次のようなことが考えられる。

すなわち、図-10 の Δt の中には、図-4 で示した衝突時間 ΔT_c も含まれており、この ΔT_c は衝突速度や反発速度の算定の際には、本来 Δt より差し引いておくべき量である。しかし、その量は 3. の試算によると 0.02 秒程度ときわめて小さかったため、無視して修復を進めてきた。ところで、振動台実験の際の目視による注意深い観察あるいはビデオ映像によると、振子がストッパーに激しく衝突したときには、その衝撃でペンアームがたわみ、また、ストッパーを支えているフレームもびびるように振動する現象が認められた。このような現象は、記録波形において ΔT_c を増す方向に作用し、かつ、衝突速度が大きくなるほど、その傾向は強くなるものと考えられる。このようなことから、表-3 に示すように、振幅に関しては大きな誤差が生じたのかもしれない。

そこで、上記の誤差を実験結果より補正することを試みた。まず、図-10 の Δt および Δx の読み取り値を用いて算定される $[v_1 - v_2]$ を β 倍 (初期値としては 1.5 倍あるいは 2 倍を考える) にして修復波形を求める。そして、修復波形の振幅が振動台変位波形の振幅に等しくなるように、上記の手続きを反復的に繰り返し、 $[v_1 - v_2]$ に乗すべき補正係数 β を求める。

このようにして得られた β を v_1 に対してプロットしたのが図-12 である。図より、修復量の補正係数 β は v_1 に関して直線的に増加し、次式で近似できる (v_1 の単位は cm/s)。

$$\beta = 0.14 v_1 + 1.27 \dots \dots \dots (3)$$

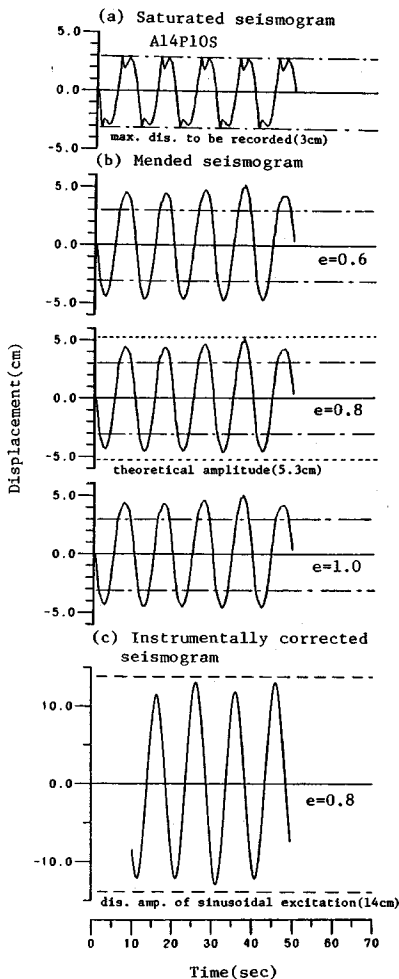
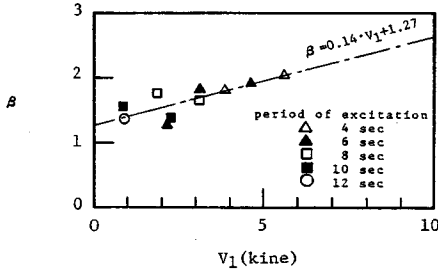


図-11 正弦波加振実験の振り切れ記録の修復 (A 14 P 12 S)



図—12 補正係数 β と衝突速度 v_1 との関係

表—4 補正係数 β を用いた場合の修復誤差

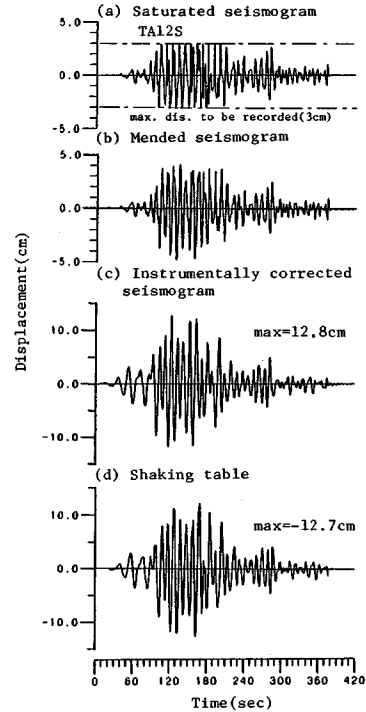
Experiment code	Double amplitude(cm)		
	Shaking table	JMA	Error (%)
A5P4S	10.13	11.12	9.77
A10P4S	19.95	18.61	-6.72
A5P6S	10.15	11.40	12.32
A10P6S	19.88	18.56	-6.64
A14P6S	27.91	26.92	-3.55
A10P8S	19.75	18.38	-6.94
A14P8S	27.86	28.30	1.58
A10P10S	19.93	19.32	-3.06
A14P10S	28.03	30.44	8.60
A14P12S	28.12	28.66	1.92

この補正係数 β は、その物理的な意味を説明することが現状では困難で、しかも、その値は1.3~2にまで及び、必ずしも補正量として適切な値の範囲とはいえない。しかし、振り切れ波形の修復という工学的意義を考え、あくまで実験に基づく値として以下の検討に用いることとした。その詳細については、今後の課題としておく。

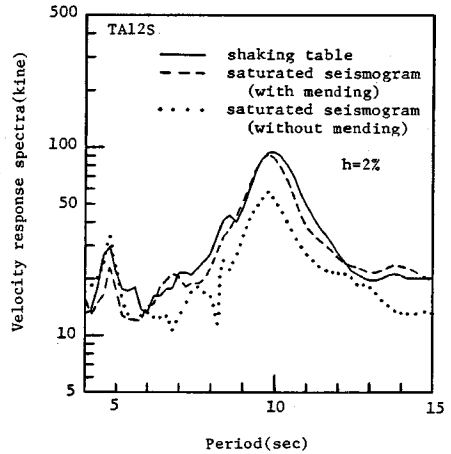
式(3)の補正係数を用いて、正弦波加振による振り切れ波形を改めて修復した結果を表—4に示す。ただし、周期に関する誤差は表—3とほとんど変わらないので省略してある。振動台の変位振幅に対する誤差はおおむね±10%以内に収まっており、しかもその誤差は、表—3のように負の値にのみ片寄ることもなく、正と負に均等にばらついている。

次に、地震波入力に対する振り切れ波形の修復結果について述べる。図—13は原記録の振幅を拡大した苫小牧の波形(TA 12 S)を振動台に入力した場合の修復結果である。図の(a)は振り切れ波形(円弧補正済み)、(b)は(a)の修復波形、(c)は(b)に計器補正を施した波形、(d)は振動台の変位波形である。(c)と(d)を比較すると、両者の波形はきわめて類似しており、修復が適切に施されていることがわかる。

また、両者の速度応答スペクトル($h=2\%$)を比較したのが図—14である。図の実線が振動台の変位波形、破線が修復波形によるものである。また、点線は図—13の(a)を修復せずに求めたスペクトルである。修復を施さない場合には、振動台の変位波形のスペクトルと大きく異なっているが、修復を施すことにより、ほぼ振動台に等しいスペクトルが得られている。特に、周期10



図—13 地震波入力に対する振り切れ波形の修復結果 (TA 12 S)



図—14 速度応答スペクトルの比較 (TA 12 S)

秒前後のスペクトルのピーク付近はよい一致を示しており、工学的には十分な精度で修復がなされていることがわかる。

なお、ほぼ同様の結果が他の地震波(振り切れの度合が小さいものも含まれている)でも得られている。

以上の検討より、本研究で提案した修復法、すなわち、①反発係数 e を導入することにより読み取り誤差の影響を小さくすること、および、②実験より得られた補正係数 β を $[v_1 - v_2]$ に乗ずること、によって、これま

で工学的にはほとんど利用されていなかった1倍強震計の振り切れ記録を、十分な精度で蘇らせることが可能であることがわかった。

5. 振り切れた実地震記録の修復とその波形の特徴

わが国では過去にマグニチュード $M=7\sim 8$ クラスの地震がしばしば起こっている。そこで、比較的大きな地震で振り切れた気象庁1倍強震計記録のうち、表—5に示す7成分について、前章までに提示した計算法を適用し、修復波形を求めてみた。ここでは、1983年日本海中部地震 ($M=7.7$) による新潟のNSおよびEW成分、同じく酒田のEW成分、1978年宮城県沖地震 ($M=7.4$) による酒田のNSおよびEW成分、そして1968年十勝沖地震 ($M=7.9$) による秋田でのNSおよびEW成分を対象とした。このうち、新潟の2成分は、前論文で簡便な方法により修復を試みている⁴⁾。また、観測地点はいずれも本州北部の日本海側の都市で、第3紀の堆積岩が厚く分布しており、岡田ら¹⁰⁾によると、やや長周期帯域での地震動に対し、全国的にも特に揺れやすい地域となっている。そのことを反映して、震央距離が170~320 kmと大きいにもかかわらず、1倍強震計が振り切れ

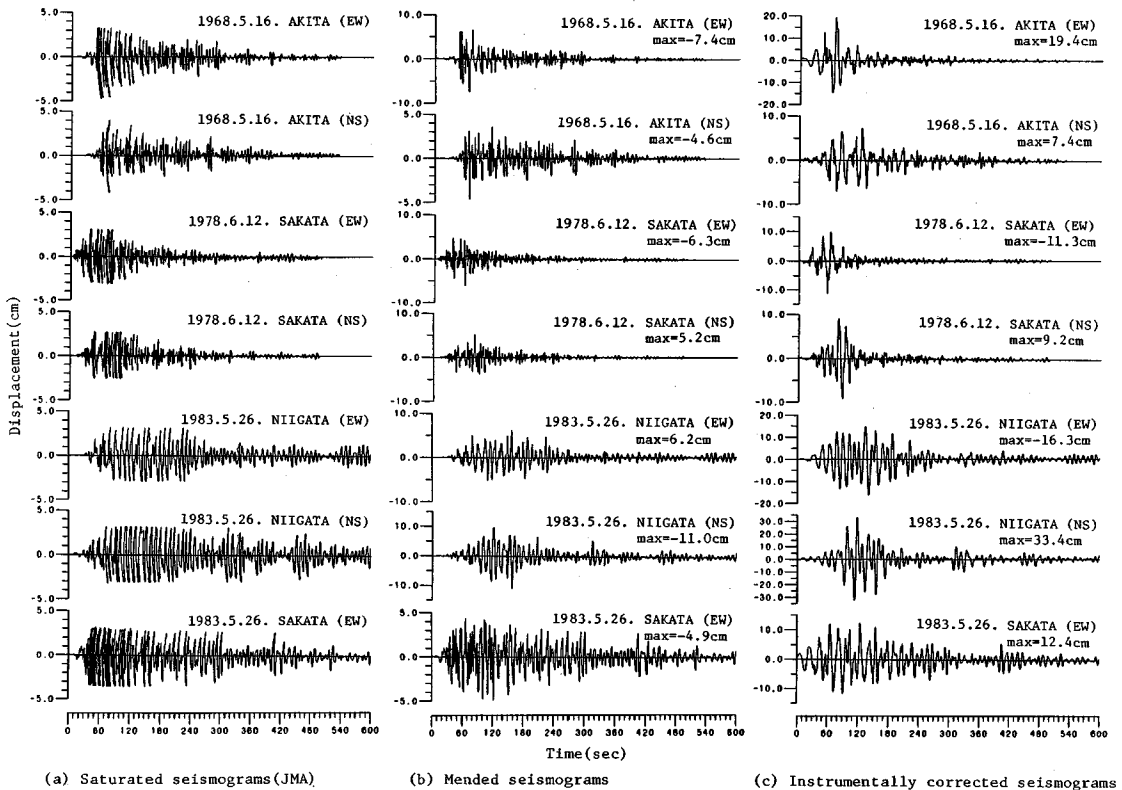
表—5 修復を試みた気象庁1倍強震計記録

Earthquake name	Date	Station	Component
Tokachi-oki ear.	1968.5.16.	AKITA	NS EW
Miyagiken-oki ear.	1978.6.12.	SAKATA	NS EW
Nihonkai-chubu ear.	1983.5.26.	NIIGATA	NS EW
		SAKATA	-- EW

たものと考えられる。

図—15にこれらの7成分の修復結果を示す。図—15の(a)がディジタイザで読み取った振り切れ波形、(b)がその波形を修復した波形(円弧補正済)、そして(c)が(b)の波形に計器補正を施した波形である。2秒以下および20秒以上の周期成分はcosine型のバンドパスフィルターでカットしてある。これらの記録は、いずれも±3 cmで振り切れたものであるが、修復後の波形の最大振幅は5~11 cmを示している(新潟のNS成分は11 cmにもなった)。計器補正後の波形は、補正前の波形に比べると、計器特性のために長周期の波が卓越してきている。最大変位については、バンドパスフィルターの影響を受けるが、新潟のNS成分で33 cmにもなっている。日本海中部地震の波形は、大きな振幅を示す部分が他の2つの地震による記録波に比べて長時間継続しているのも特徴である。

図—16は修復波形の速度応答スペクトルを示したも



図—15 実際の振り切れた気象庁1倍強震計記録の修復結果

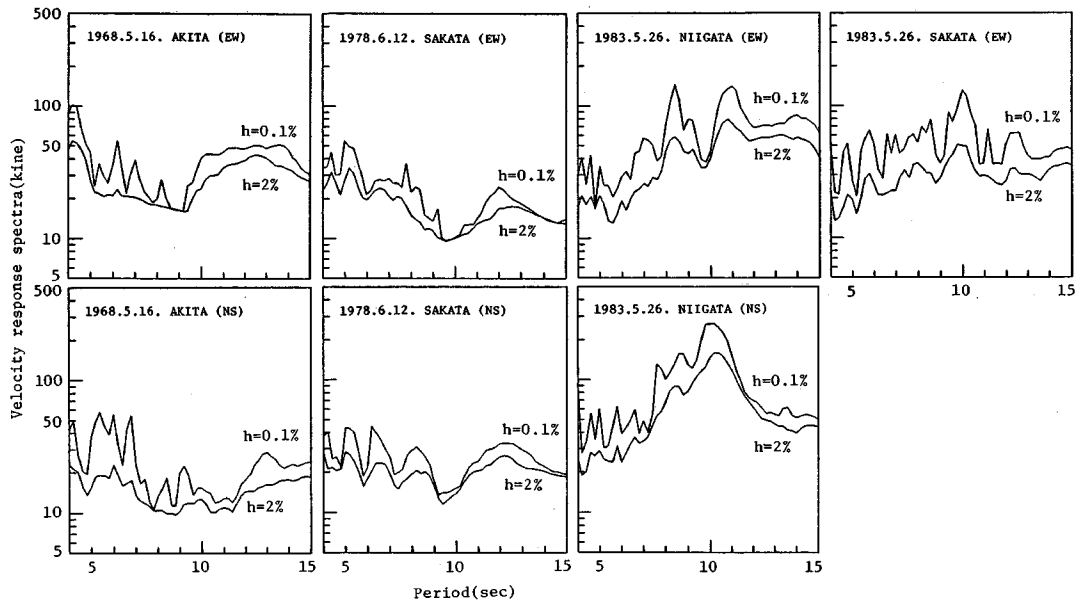


図-16 図-15の修復記録より求めた速度応答スペクトル

のである。減衰定数として、大型タンクのスロッシングを対象とした0.1%のものと、長大橋梁や超高層建築物を対象とした2%のものを示してある。日本海中部地震の新潟および酒田の3成分は、いずれも周期10秒前後で大きな値を示しており、そのピーク値は減衰0.1%の場合、新潟のNS成分で270kine(周期10.2秒)、同じくEW成分で180kine(11秒)、酒田のEW成分で130kine(10秒)となっている。

また、図-17には、新潟の水平2成分を2方向入力として得られた二次元速度応答スペクトル ($h=0.1\%$)を示した。このスペクトルは、NSおよびEW成分の応答スペクトルのほぼ包絡線となっており、そのピーク値はNS成分のそれに一致している。前論文の簡便な方法による修復波形⁴⁾では、周期9.8秒で190kineを示していた。一方、境界条件の非線形性を考慮して石油タンクのスロッシング観測高さから逆算して求めた入力地動の速度応答スペクトルは、周期8秒から11秒の間で200kine以上(最大230kine)を示していた⁵⁾。図-17には上記の2つの方法で求めた結果も併記(破線と○印)しているが、今回の修復波形(図中の実線)の方が簡便な方法で求めた修復波形よりも、スロッシングデータによく整合しており、調和的である。振り切れ波形の正確な値はよくわからないが、スロッシング現象から得た速度応答スペクトルとよく対応しており、本手法の有効性を示すものといえる。

図-16の減衰2%のスペクトルについてみると、新潟のNS成分で160kine(周期10.2秒)と異常に大きな値を示しているし、同じくEW成分で80kine(10.8

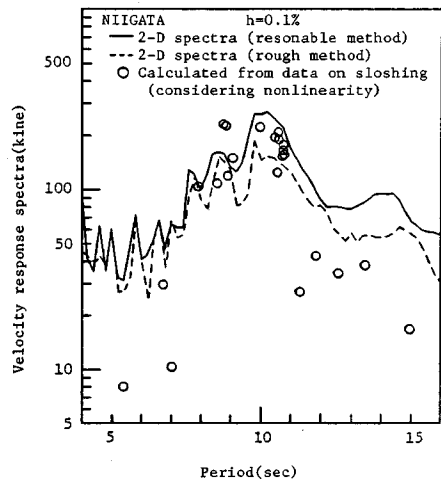


図-17 図-15に示した日本海中部地震の新潟の修復波形より求めた二次元速度応答スペクトル

秒)、酒田のEW成分で50kine(9.8秒)となっている。

これらのスペクトル値は、自治省の石油タンクのスロッシング高さに関する基準値約100kineや、本州四国連絡橋の耐震設計基準および高層建築技術指針における弾性設計用の基準値40~45kine程度⁴⁾に比べ、はるかに大きな値を示している。

宮城県沖地震による酒田の2成分については、周期10秒付近にスペクトルの谷間が現われており、日本海中部地震のものと著しく異なっている。震源メカニズムや波動伝播経路の影響が強く現われたためであろう。スペクトルの値は、全体に特に大きなものは見当たらず、

最大でも減衰0.1%で55 kine, 減衰2%で35 kine程度である。振り切れた波形をみると, かなりの強震動が作用したように考えられるが, 日本海中部地震の地動に比べると, はるかに小さなスペクトル値である。しかし, 震央距離が219 kmと大きいにもかかわらず, この程度の応答値を示していることは注目すべきことであろう。十勝沖地震による秋田の2成分についても, 宮城県沖地震による酒田のものと同じ程度の地動である。

以上, 今回修復を試みた7成分の実記録波形について, その修復波形と速度応答スペクトルの特徴を述べてきたが, これらの記録はいずれも震央距離が大きく, また観測点も本州北部の日本海側に限られたものである。今後, さらに種々の振り切れ波形について, その修復を試みる予定である。

6. 結 論

本研究では, 振り切れた気象庁1倍強震計記録の工学的な有用性に着目し, その修復法を強震計の振動台実験を通して開発した。そして, 新しく開発した計算プログラムの妥当性を調べるため, いくつかの振り切れた実地震記録の修復を試み, その波形とスペクトル特性について検討した。その検討結果をまとめると次のようになる。

(1) 数値解析による検討の結果, 1倍強震計の振り切れ現象が衝突モデルで表現できる場合には, 衝突時間内における入力地動の影響は無視できる。したがって, 衝突速度と反発速度がわかれば, 式(2)で示すように振り切れ波形の修復が可能である。

(2) 振動台を用いた加振実験によると, 1倍強震計の記録には, 記録の数値化および各種の補正を含めた総合的な誤差が10%程度含まれる可能性がある。

(3) デジタイザーによる振り切れ波形の読み取りから衝突速度および反発速度を算出する際, 反発係数を導入することにより, 読み取り誤差の影響を小さくおさえることができる。しかし, その修復量は常に不足する。そこで, 修復量を補正すべき係数を実験より求め, それを用いて振り切れた1倍強震計の記録波を再現する実用的なプログラムを新しく開発した。この方法を地震波入力による振り切れ記録に適用したところ, 良好な結果が得られた。

(4) 過去の振り切れた実記録7成分(1968年十勝沖地震, 1978年宮城県沖地震, 1983年日本海中部地震)の修復を行い, その速度応答スペクトルを求めたところ, やや長周期領域の設計地震動に関する各種の基準値をかなり上回るものも見受けられた。また, 大型タンクのスロッシング波高から逆算して求めたスペクトルと本結果はよく対応しており, 提案した手法の妥当性を確かめる

ことができた。

謝 辞: 加振実験を進めるにあたり, 京都大学工学部土木工学教室の家村浩和助教授, 中西伸二技官, 伊津野和行助手, (財)電力中央研究所の桜井彰雄副所長, 同耐震構造部の江刺靖行部長, 増子芳夫主任研究員, および前田建設工業(株)土木設計部の上田達哉氏と石黒健氏には多大なご協力をいただいた。さらに, 実験に用いた1倍強震計に関しては, 気象庁地震火山部の勝又護課長および(株)勝島製作所の丸山 昇取締役にお世話になった。また, 過去の振り切れ実記録の一部は茨城大学工学部建設工学科の井上涼介助手から提供を受けた。ここに記して深謝の意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 田中貞二・吉沢静代・大沢 胖: やや長周期帯域における強震動の特性, 地震研究所集報, Vol. 54, pp. 629~655, 1979年。
- 2) 建設省土木研究所: 気象庁1倍強震計記録に基づく長周期地震動特性の解析 その1およびその2, 土木研究所資料第1869号および第2245号, 昭和58年3月および昭和60年6月。
- 3) 井上涼介: やや長周期帯域における設計用入力地震動研究の展望, 土木学会論文集, 第374号, pp. 1~23, 1986年10月。
- 4) 山田善一・家村浩和・野田 茂・嶋田三朗: タンクのスロッシングおよび地震記象からみた長周期地震動の特徴, 土木学会論文集, 第362号, pp. 471~480, 1985年10月。
- 5) 嶋田三朗・山田善一・家村浩和・野田 茂: 円筒タンクの非線形スロッシング解析に基づく長周期応答スペクトルの推定, 土木学会論文集, 第368号, pp. 383~392, 1986年4月。
- 6) Morioka, T.: The ground motion of the great Kwanto earthquake of 1923, 日本建築学会論文報告集, 第289号, pp. 79~91, 1980年3月。
- 7) 吉田隆治・嶋田三朗・山田善一・家村浩和・野田 茂: 振り切れた1倍強震計記録の修復法に関する予備的検討, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集, 第1部, pp. 771~772, 1986年11月。
- 8) Yamada, Y., Noda, S., Shimada, S. and Yoshida, T.: On a method to mend the saturated records of a low-magnification seismograph, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 433~438, 1986年12月。
- 9) 篠 泉・片山恒雄: 気象庁1倍強震計記録による地動の再現性の検討, 第18回地震工学研究発表会講演概要集, pp. 69~72, 1985年7月。
- 10) 岡田成幸・鏡味洋史: 日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み, 日本建築学会論文報告集, 第267号, pp. 29~38, 昭和53年5月。

(1987. 4. 13・受付)