

(11) 振り切れた気象庁 1 倍強震計記録からの地動の再現

京都大学工学部

野田 茂

山田 善一

前田建設工業(株)

嶋田 三朗

吉田 隆治

1. まえがき

最近、やや長周期(2~20秒)地震動の工学的特性を調べるために、気象庁 1 倍強震計をはじめとする低倍率強震計記録の解析が各所で進められている¹⁾。しかし、例えば気象庁 1 倍強震計では、記録最大片振幅が水平成分で約 3cm であるため、強震動に対しては振り切れてしまうことが多く、解析される記録には通常このような振り切れた記録は含まれてはいない。しかしながら、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可能性がある。本研究は、このような観点から、振動台実験を通して、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するものである。なお、著者ら²⁾は以前にも振り切れた記録の修復法を提案しているが、本研究ではその欠点の改良を図っている。

2. 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。長周期帯域で高精度の性能を有する油圧式の振動台に 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。

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、 $\pm 3\text{cm}$ を超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、 $AiPj$ 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、各々、頭部に MO 、 T 、 H 、 MR の記号を付し、続く Ai 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)製のディジタイザー D-SCAN, DH 7500(A0 版)で行った。本器の読み取り精度(分解能)は 0.0254 mm である。

(2) 振り切れ加振実験の検討

a) 振り切れ波形の再現性に関する基本的な考え方

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 3cm 、周期が 4 秒から 14 秒の正弦波入力の場合 ($A3P4 \sim A3P14$) について検討したが、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った。さらに、地震波入力 ($TA0$, $MOA0$, $HA12$, $MRA8$) に対する最大振幅の誤差は数%、速度応答スペクトル ($b=2\%$) については、周期 4 秒~15 秒で平均的に $-5 \sim 1\%$ 程度の誤差であり、最大・最小でも $\pm 10\%$ 程度の誤差に収まっていた。

そこで、正弦波加振実験のうち、表 1 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 1 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 $0.2 \sim 0.3\text{ mm}$ 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²⁾は、図 1 の a 点と b 点とから衝突速度 $v_1 = \Delta x / \Delta t_1$ 、また、 b 点と c 点とから反撥速度 $v_2 = -\Delta x / \Delta t_2$ として v_1 および v_2 を求め、数値解析法(詳細は文献 2) 参照)に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、反撥係数 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

表1 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

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、この場合には反撥係数 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。

反撥係数 e は、反撥実験の結果により、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2の(a)は、周期10秒、振幅14cmの正弦波加振実験による振り切れ記録(A14P10S)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、反撥係数 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²⁾で見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=5.3cm)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2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形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、若干小さ目になっている。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1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、入力波の周期の短いものほど、また、振幅の大きいものほど、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1の Δt の中には、図3で示した衝突時間 ΔT_c も含まれており、この ΔT_c は衝突速度や反撥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、その量は試算によると0.025秒程度と極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1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。

b) 修復法の改良

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1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

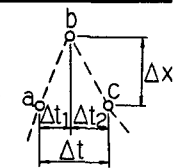


図1 振り切れ部分の読み取りの模式図

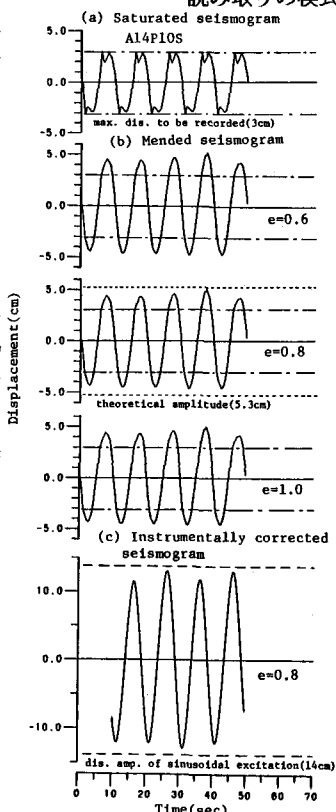


図2 正弦波加振実験の振り切れ記録の修復(A14P10S)

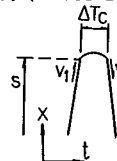


図3 衝突前後の模式図

しくなるように、上記の手続きを反復的に繰返し、 $[v_1 - v_2]$ に乗ずべき補正係数 β を求めた。

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4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/sec)。

$$\beta = 0.14 v_1 + 1.27 \quad \dots\dots\dots (1)$$

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言えない。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。

式(1)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2に示す。ただし、周期に関する誤差は表1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 $\pm 10\%$ 以内に収まっており、しかもその誤差は、表1のように負の値のみに片寄ることもなく、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5は原記録の振幅を拡大した苫小牧の波形(TA12S)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)、(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、両者の波形は極めて類似しており、修復が適切に施されていることがわかる。

3. 振り切れた実地震記録の修復とその波形の特徴

我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きている。そこで、比較的大きな地震で振り切れた気象庁1倍強震計記録に対して、2.で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、文献3)で簡便な方法により修復を試みている。

図6に修復結果の一部を示す。図6の(a)がディジタイザー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)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 $\pm 3\text{cm}$ で振り切れたものであるが、修復後の波形の最大振幅は5~11cmを示している(新潟のNS成分は11cm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33cm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7には、新潟の水平2成分を2方向入力として得られた2次元速度応答スペクトルを示した。このスペクトルは、NSおよびEW成分の速度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³⁾では周期9.8秒で190kine($h=0.1\%$)を示して

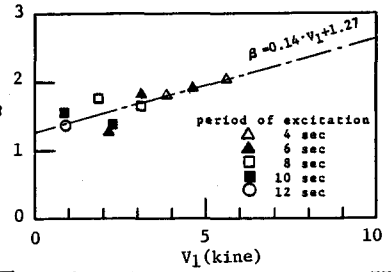


図4 補正係数 β と衝突速度 v_1 との関係

表2 補正係数 β を用いた場合の修復誤差

Experiment code	Double amplitude(cm)		Error (%)
	Shaking table	JMA	
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

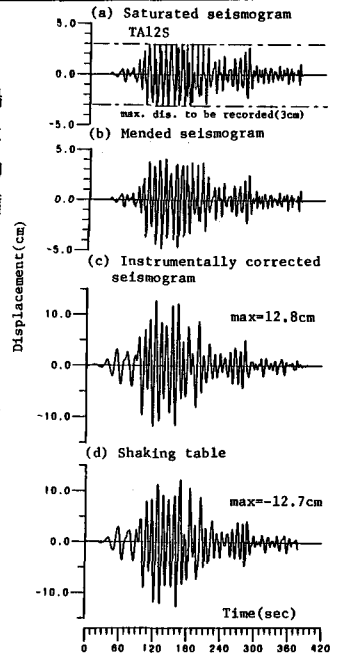


図5 地震波入力に対する振り切れ波形の修復結果(TA12S)

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 ($h=0.1\%$) は、周期 8秒から 11 秒の間で 200 kine以上 (最大 230kine)を示していた⁴⁾。図7の中

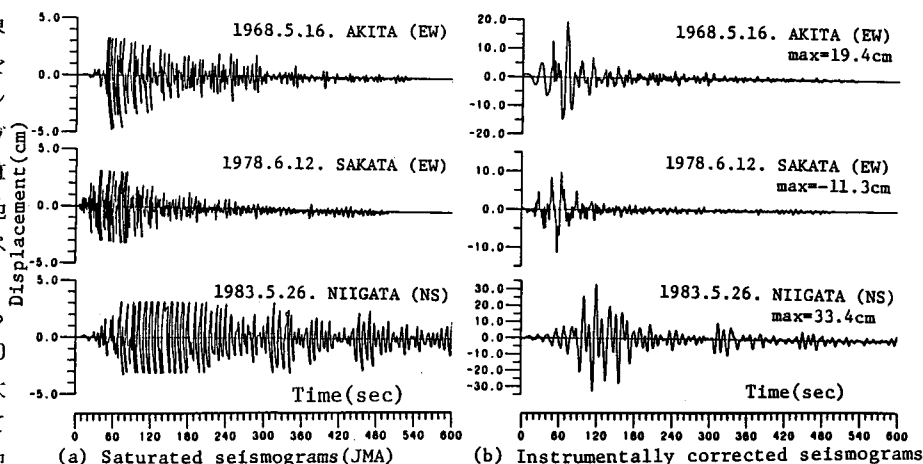


図6 実際の振り切れた気象庁1倍強震計記録の修復結果

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。振り切れた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言える。

4. あとがき

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。その結果、次のようなことがわかった。1) 本研究で提案した修復法、すなわち、①反撥係数 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 $[v_1 - v_2]$ に乗ずべきことによって、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となった。2) 過去の振り切れた実地震記録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が見受けられた。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が確かめられた。

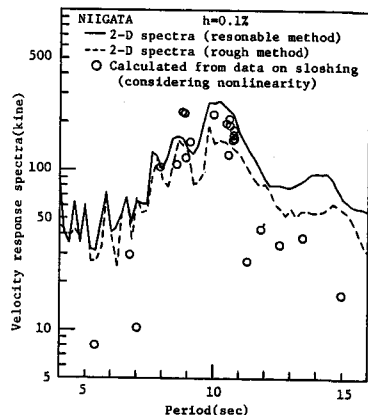


図7 日本海中部地震の新潟の修復波形より求めた2次元速度応答スペクトル

謝 辞 加振実験を進めるに当たり、京都大学工学部土木工学教室の家村浩和助教授、伊津野和行助手と中西伸二技官、(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と増子芳夫主任研究員、前田建設工業(株)土木設計部の上田達哉氏と石黒健氏、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す次第である。

参 考 文 献 1) 例えば、田中貞二・吉沢静代・大沢胖: 地震研究所彙報、Vol.54, pp.629~655, 1979年。2) Yamada, Y., Noda, S., Shimada, S. and Yoshida, T.: 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。3) 山田善一・家村浩和・野田茂・嶋田三朗: 土木学会論文集, 第362号, pp.471~480, 1985年10月。4) 嶋田三朗・山田善一・家村浩和・野田茂: 土木学会論文集, 第368号, pp.383~392, 1986年4月。