

振動台を用いたトルコ・コジャエリ地震の再現実験 — 傾斜を考慮した強震記録の基線補正 —

豊嶋 学*

要約: 地震時に観測される水平加速度記録は鉛直面内の回転による影響を受けていると考えられる。トルコ・コジャエリ地震の際 YPT 観測局で計測された地震記録には、基礎の回転による影響が現れており、加速度を積分してえられる速度や変位に発散現象がみられる。

本研究では、コジャエリ地震の YPT EW 波の積分速度が直線的に発散していることから、基礎の回転を等価的な基礎の傾斜と置き換えて考えることとし、その影響を考慮して加速度記録の基線補正を行った。その結果、振動台の加振性能および計測機のノイズの影響を除去することで、生の加速度記録に含まれる等価的な傾斜の影響を再現することができた。

キーワード: トルコ・コジャエリ地震, 振動台実験, 基線補正, 傾斜

- 目次:** 1. はじめに
2. 振動台入力波の作成
3. 振動台による YPT EW 波の再現
4. おわりに

1. はじめに

地震時に観測される水平加速度記録は鉛直面内の回転による影響を受けていると考えられる。回転が加わった場合、計測される加速度 X_{ob} は本来の水平加速度を X 、回転を θ 、回転中心からの距離を L 、重力加速度を G とすると次式のように表される。

$$X_{ob} = X \cdot \cos(\theta) + G \cdot \sin(\theta) + L \cdot \ddot{\theta} \quad (1)$$

回転量が微小であると仮定すると、式(1)の \sin の項は回転の一次関数に近似され、 \cos の項は $1 - \theta^2/2$ に近似される。従って、この関係を用いて式(1)を書き直すと次のように表される。

$$X_{ob} = X + G \cdot \theta + L \cdot \ddot{\theta} \quad (2)$$

鉛直面内の回転は地震計の基礎の傾斜と見なすことができるが、式(2)の右辺第3項を一台の地震計から推測することができないため、計測された加速度記録から傾斜を推定し水平加速度を求めたとしても、それは回転加速度を含んだものであり本来の加速度記録とは異なっている。また、地震の間に地震計の基礎がどのような回転運動を起こしたかは特定できない。ここでは等価的なものとして、加速度記録の中の傾斜を考えるものとする。式(2)からわかるように、傾斜を生じると加速度はシフトし、速度は直線的に発散、変位は二次関数的に発散する。この発散の状況から傾斜量、傾斜開始時点を推定する。

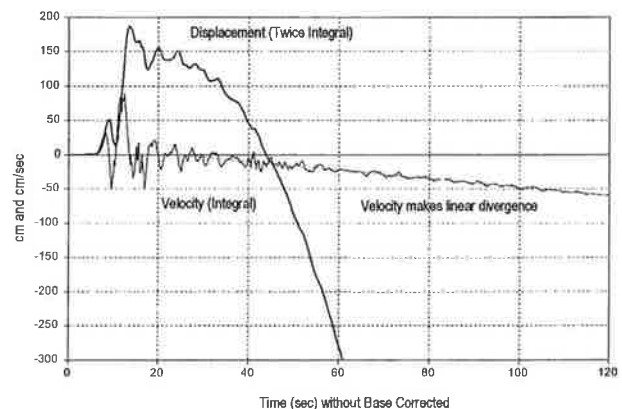


図1 トルココジャエリ地震 YPT EW 波の特性

2. 振動台入力波の作成

図1に示すように、トルコ・コジャエリ地震の際 YPT 観測点で観測された加速度記録 EW 成分（以下 YPT EW）の加速度記録を積分すると、20秒を過ぎたあたりで傾斜し、速度が直線的に発散しはじめ、120秒では約 60cm/sec の残留速度に達している。これは、約 0.6cm/sec^2 の傾斜が20秒を過ぎたあたりで生じたことに相当し、観測された加速度記録にこの逆の傾斜を与えることで発散しなくなる。図2に、観測された YPT 原波（加速度記録）に基線補正を行わないで2階積分した変位波形を示す。N-S 成分、E-W 成分ともに発散現象が見られ、U-D 成分にもわずかに同様の現象が確認できる。

図3は前述の方法で基線補正した YPT の加速度記録を2階積分して変位を計算したもので、発散現象はなくなり実際の変位に近い値を示しているものと考えられる。

3. 振動台による YPT・EW波の再現

振動台試験では、YPT EW波について表1に示す4種類の加振を行った。なお、振動台ストロークの制限(表2参照)により観測記録より求めた変位の半分の振幅により加振した。

3.1 振動台上で計測された加速度

振動台は変位制御のため、実際に振動台に送信する加振波は目標となる加速度波形を二階積分した変位波形となる。したがって、振動台上における加速度の再現性を確認するため図4に YPT 原波と加振Bの時に計測された加速度波形を重ね書きした図を示す。図から分かるように加速度記録においては振動台で再現された波形は、目標である YPT・EW 原波と極めてよく対応している。

図5に加振A~Dを行ったとき振動台で計測された加速度記録を積分して得られた速度および変位波形を示す。加振Aは傾斜を取り除いたケースであるにもかかわらず、変位波形は正側に発散し、約 0.3cm/sec^2 の等価的な傾斜が生じている。これが、振幅1/2の YPT EW 成分波入力に対する本振動台および計測系のノイズ特性を表すものである。加振Bは地震時に計測された YPT EW の1/2に相当するもので、 -0.32cm/sec^2 の傾斜を入力している。本来、変位波形は生のデータと相似の形で負側に発散するはずであるが、加速度計に現れる傾斜は振動台のノイズと合わさり、加振Aに比べてやや収束側に移行した程度にとどまっている。加振C、Dは、 -0.64 、 -1.28cm/sec^2 の傾斜を入力した場合である。傾斜角を大きくすると変位の発散が負側に増大していく様子が見え、振動台の傾斜量を増やして行くに従って水平加速度記録にその影響が次第に増大してゆく傾向のあることが分かる。

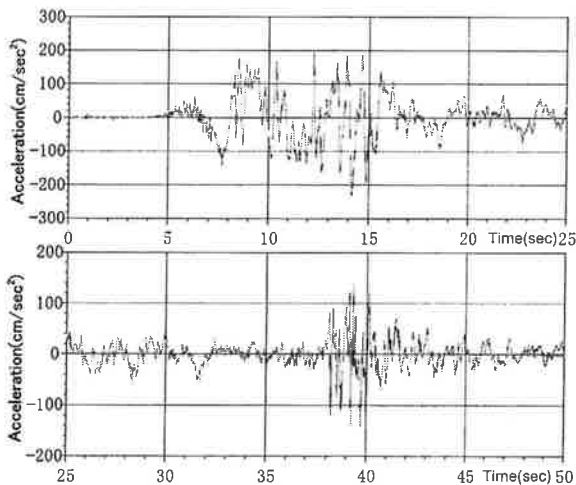


図4 YPT 原波と加振Bの時に計測された加速度波形

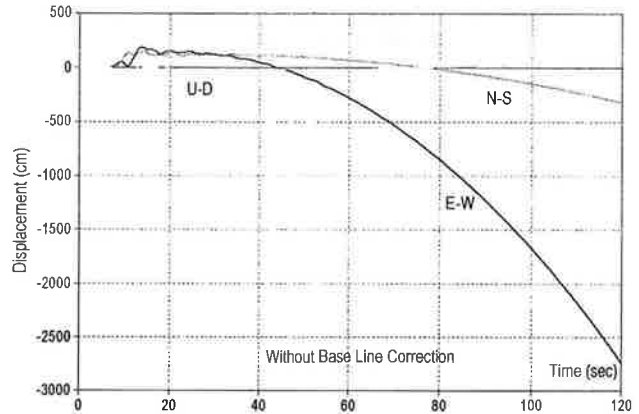


図2 基線補正前の YPT 変位波形

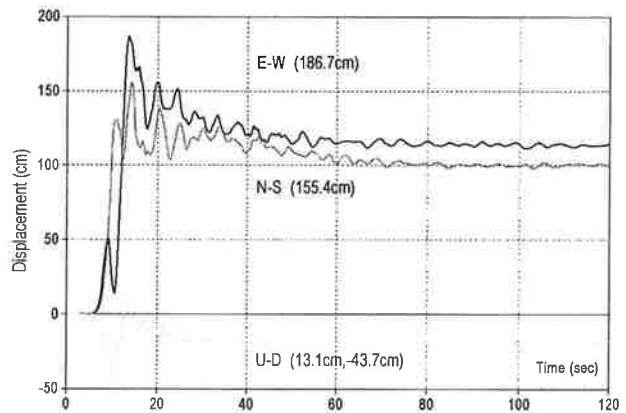


図3 基線補正後の YPT 変位波形

表1 加振ケース

加振ケース	振幅	傾斜(cm/sec^2)
加振A	1/2	0
加振B	1/2	$1*0.48*G/1500$
加振C	1/2	$2*0.48*G/1500$
加振D	1/2	$4*0.48*G/1500$

表2 三次元振動台の性能

Size	4m x 4m		
Maximum Test Weight	50 tons		
Driving Type	servo-controlled electro-hydraulic actuators		
Shaking Direction	X-Horiz	Y-Horiz	Z-Vert
Max.Acc(at max. loading)	$\pm 1G$	$\pm 1G$	$\pm 1.8G$
Maximum Velocity	$\pm 150\text{ cm/s}$	$\pm 100\text{ cm/s}$	$\pm 99\text{ cm/s}$
Maximum Displacement	$\pm 50\text{cm}$	$\pm 20\text{cm}$	$\pm 10\text{cm}$
Exiting Frequency	DC~30Hz	DC~50Hz	DC~50Hz
Rotational Movement	$\pm 2.8\text{deg}$	$\pm 2.8\text{deg}$	$\pm 4.0\text{deg}$

3.2 振動台上で計測された加速度記録の補正

図5に示した加振Aの加速度記録を積分して得られた速度および変位波形から推測されるように、振動台には何らかのノイズを発生する原因があると考えられる。図6は、加振A、Bにおける振動台の傾斜を示した図である。これに重力加速度Gを乗じると加速度計に含まれる傾斜となる。加振Aでは、本来この値は0でなければならないが、リンク式振動台の制御の限界から、この程度の回転が生じてしまうと推測される。ところで図6に示した振動台の回転動について注意すべき点がある。本振動台の場合、振動台を支える4本の上下加振機(動的アクチュエータ)の変位差から振動台の傾斜を計測する事ができるが、回転量が非常に小さく、それが実際の振動台の回転に相当するかどうかは検討を要する。しかしこの試験では、計測結果を根拠にする以外には方策はないと考え、変位差をそのまま振動台の回転量として用いることとした。

加振Aの加速度記録を二階積分し変位を求める場合、その時記録された傾斜の3.05倍(以下、回転補正係数)程度を用いて補正すると図7に示すように地震時に計測された変位(基線補正後の変位)に近い値を得ることができる。また、回転を補正する前の速度が正側に傾斜しているのに比較し、回転補正後の速度はほぼ0に収束していることが分かる。

表1に示すように、加振Bは実地震時に観測された加速度記録の積分速度、積分変位を1/2スケールで再現しようとしたものである。振動台で再現する際に傾斜を加えていない加振Aのノイズと図7で示した回転補正係数3.05を用い、加振Bの値を補正したのが図8である。積分変位波形を生データと比較すると精度よく再現しているとはいえない。図9は、回転補正係数として3.8を選んで同様の積分計算を行った結果である。積分速度、積分変位ともに観測された生データによく一致している。これらのことから、振動台のノイズの入り方は、加振ごとにばらつきを持っていることがわかる。

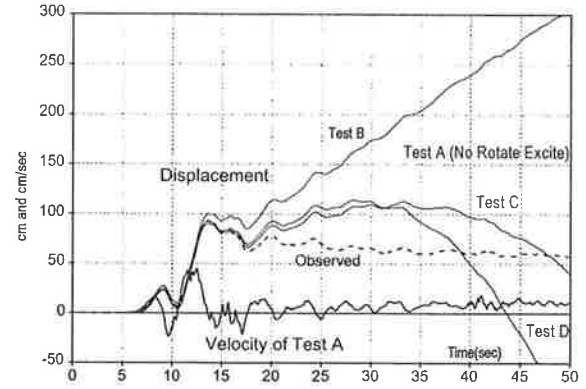


図5 加振A~Dの加速度記録から得られた速度、変位

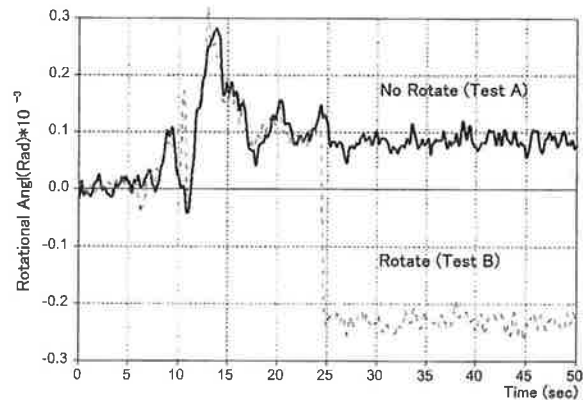


図6 計測された振動台の回転角

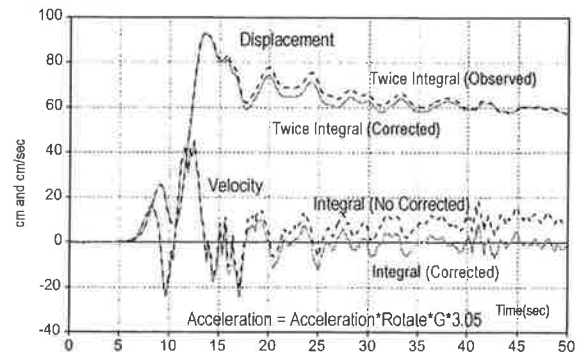


図7 加振A(振動台のノイズによる傾斜を補正)

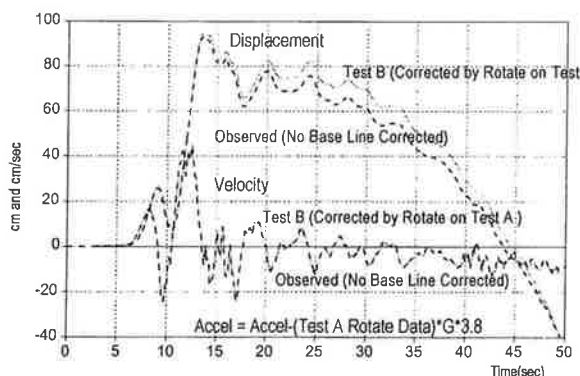


図9 加振B(回転補正係数 3.8)

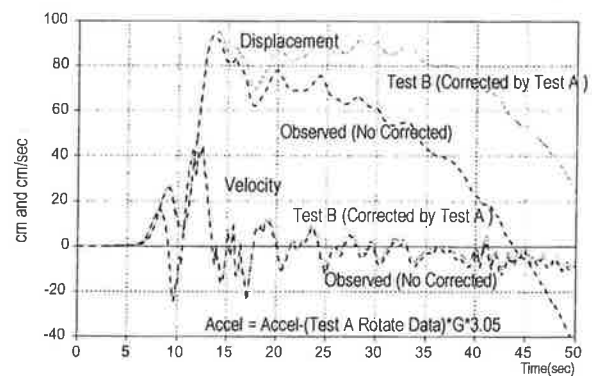


図8 加振B(回転補正係数 3.05)

4. おわりに

トルコ・コジャエリ地震の YPT 観測点の計測データを用いて振動台での再現性について検討を行った。等価的ではあるが、加速度記録に含まれる傾斜の影響を振動台で再現することができた。今後は、さらに多くの強震記録の分析を進めて行きたい。また、水平成分加速度記録をより正確に分析するためにも地震時における回転を記

録できる地震計の開発が望まれる。

【謝辞】 本研究は、科学技術庁防災科学技術研究所の箕輪氏の指導のもと、トルコ・Bogazici 大学の G.Birgoren 氏にも参加していただき、共同で実施した研究である。ご指導、ご協力いただきましたことに深く感謝します。

Reproducibility of the Kocaeli(Turkey) Earthquake using 3-Dimensional Shaking Table. - Base Line Correction of the Strong Motion considering the Tilt -

Manabu TOYOSHIMA

Strong earthquake motion data may include rotational movement effect of the base in vertical plane. The acceleration data that was recorded at YPT station (Kocaeli, Turkey) include the effect of base rotation. Therefore, the velocity and displacement calculated by integrated the acceleration data show divergent phenomena.

In this paper, we considered the rotational movement to be the equivalent tilt in order to take into account the tilt effect on recorded data, because the integral velocity showed linear divergence. The base line correction was carried out on the acceleration data. According to the shaking table test using the corrected data, the tilt effect of the original data was reproduced.