

摩擦力を考慮した橋脚と橋桁の地震時挙動

東北大学大学院 学生員 ○西尾 若志
東北大学工学部 正員 柳沢 栄司

1. はじめに

1978年2月20日の宮城沖地震及び6月12日の「宮城県沖地震」によつて、多くのコンクリート橋、高架橋などに被害が生じた。特に、シューにひびわれが入り、たり、シューを留めるアンカーボルトが曲がりたりするなどの被害が目についた。橋脚と橋桁の接合部であるシューには、施工上の理由からCLEARANCEが存在する。このため、橋脚と橋桁は、地震入力のある範囲内では摩擦力により一体となつて挙動するが、それを越えるとすべり始め、ある速度で衝突することが予想される。このような、地震動による加振を受けたとき、摩擦力の存在により振動系そのものが変わつてしまう現象は、例えば、地震による土構造物の斜面のすべりなど、その他にも見られ興味深い問題である。本研究は、こうした問題の初歩的段階として、ワーロン摩擦だけで結ばれた2質点系のモデルを考え、この系に水平地震動だけを入力して地震応答解析を行い、主に地震入力と応答値の関係を調べたものである。

2. モデル及び運動方程式

〈Fig-1〉に示すモデルを考える。物体B(質量 m_b)は、地面とバネ(k)及びダッシュポット(C)で結ばれ、物体A(m_a)とはワーロン摩擦だけで結ばれている。(静止摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_k)この系に、地震地動水平変位 $z(t)$ が入力したときの系の運動方程式は次のようになる。

E.M. No.1 ; $|\dot{Y}| < \mu_s g$

$$\begin{cases} (m_a + m_b) + C\dot{Y} + kY = kZ + C\dot{Z} \\ m_a \ddot{Y} = 0 \end{cases}$$

E.M. No.2 ; $|\dot{Y}| \geq \mu_s g, \dot{Y} \geq 0$

$$\begin{cases} m_b \ddot{Y} + m_a \mu_k g + C\dot{Y} + kY = kZ + C\dot{Z} \\ m_a \ddot{Y} = m_a \mu_k g - m_a \ddot{Y} \end{cases}$$

E.M. No.3 ; $|\dot{Y}| \geq \mu_s g, \dot{Y} < 0$

$$\begin{cases} m_b \ddot{Y} - m_a \mu_k g + C\dot{Y} + kY = kZ + C\dot{Z} \\ m_a \ddot{Y} = -m_a \mu_k g - m_a \ddot{Y} \end{cases}$$

ここに、 Z, \dot{Z}, \ddot{Z} ; 地動絶対変位、速度、加速度

Y, \dot{Y}, \ddot{Y} ; 物体Bの絶対変位、速度、加速度

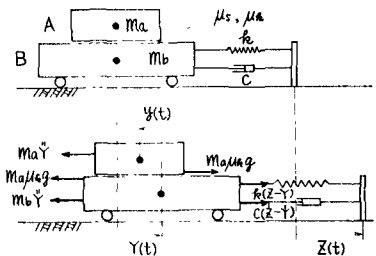
y, \dot{y}, \ddot{y} ; 物体AのBに対する相対変位、速度、加速度

g ; 重力加速度

この運動方程式は、地震地動水平変位及び速度に対して、NEWMARKの β 法を用いて数値的に解かれた。

3. 解析モデル及び正弦波入力に対する応答

解析したモデルは、 $m_a = 6.1 \times 10^5 [g \cdot sec^2/cm]$ (重量600t)、 $m_b = 3.8 \times 10^5 [g \cdot sec^2/cm]$ (重量370t)、 $k = 8.0 \times 10^8 [g/cm]$ 、 $C = 7.5 \times 10^6 [g \cdot sec/cm]$ 、 $\mu_s = 0.35$ 、 $\mu_k = 0.17$ なる系である。物体AとBが一体となつて運動しているときの固有周期は0.22[sec]、すべっているときの物体Bの固有周期は0.14[sec]である。この系に、〈Fig-2〉に示す正弦波を入力したときの、物体Bの絶対挙動(Fig-3)、物体Aの絶対挙動(Fig-4)、AのBに対する相対挙動(Fig-5)を示した。初めのうちはA、B一体となつてほぼ(A+B)の固有周期で振動しているが、応答加速度が最大静止摩擦力に相当する加速度を越えると急に応答値が大きくなり、周期も



〈Fig-1〉 モデル

短かくなっている。AのBに対する相対速度がゼロになると、再びA、B一体となり、挙動し、応答値は小さくなる。Aは、A、B列々に挙動している向は等加速度運動をしており、再び一体となった瞬間は、そのときのBの挙動に影響を受け、一瞬大きな応答値を示す。

4. 入力地震波及び解析例

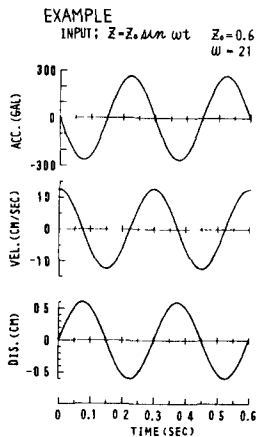
入力した地震波は〈Table-1〉に示すように、EL CENTRO (1940), TAFT (1952), 八戸 (1968), 樽水ダムギャラリー (1978) の4地点で得られた強震記録をそれぞれ、最大加速度 50~450 gal の範囲で適当に拡大、縮小した計34波である。本研究では、地震入力として地動速度及び変位を入力するが、加速度記録を積分して速度、変位を求める場合、記録自身及びサンプリング処理中に含まれる DRIFT により単純な積分では速度、変位は発散してその目的を達しない。又、運動方程式をβ法などの直接積分法で解く場合も、同じ理由により、応答速度、変位は発散してしまう。そこで、本研究では、速度計算値における補正を3次多項式で近似した BASE LINE CORRECTION をほどこし入力した。原記録と、BASE LINE CORRECTION をほどこしたものの違いは、〈Fig-6〉に見ることができる。

応答解析例として、〈Fig-6〉に示す地震入力 (EL CENTRO) に対するBの絶対挙動 (Fig-7)、Aの絶対挙動 (Fig-8)、AのBに対する相対挙動 (Fig-9) を示した。応答挙動の基本的な特徴は、正弦波入力に対する応答で述べたものと全く同様である。

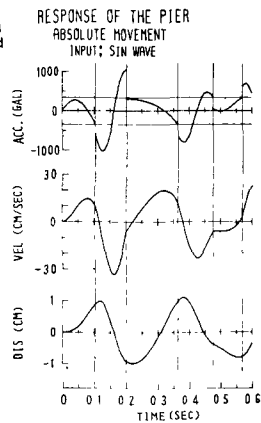
5. 結果及び考察

〈Fig-1〉に示されたようなモデルは、地震入力のある範囲 (物体Aに作用する慣性力が最大静止摩擦力を越えない範囲) では、A、B一体となり、挙動するが、それを越えると列々に挙動し始め、ストッパーが存在すれば、ある速度で衝突する。従って、こうした構造の地震に対する安全性を考える場合、(i) 物体A及びBの応答絶対加速度 (慣性力) の他に、(ii) AとBの応答相対速度 (衝撃力) 及び変位 (すべり量) も又、向題になる。こうした観点から、以下に、入力最大加速度と応答値の関係をまとめてみる。

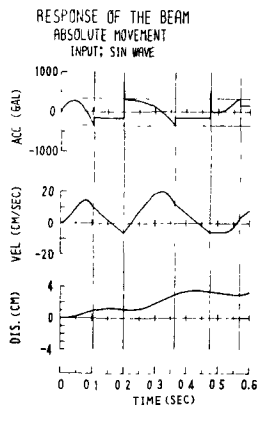
〈Fig-10〉及び〈Fig-11〉は、入力最大加速度に対するそれぞれ、物体B及びAの応答最大絶対加速度との関係を示したものである。一種類の地震波についてみると、入力最大加速度がある値になるまでは、A、B一体となり、挙動し、それを越えると列々に挙動するようになり、応答最大絶対加速度は急に大きくなっている。この境界となる入力最大加速度は、地震波の種類によ、大きく異なり、この例では 85 gal から 260 gal にわたっている。〈Fig-12〉及び〈Fig-13〉は、入力最大加速度に対するAのBに対する、それぞれ応答最大相対速度及び変位を示したものである。〈Fig-14〉及び〈Fig-15〉は、それぞれ CLEARANCE が 1.00 cm 及び 2.00 cm としたときの入力最大加速度と衝突最大速度との関係を示している。



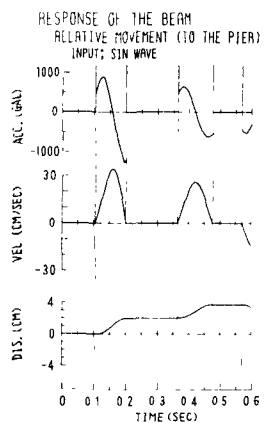
〈Fig-2〉



〈Fig-3〉



〈Fig-4〉



〈Fig-5〉

以上のそれぞれの応答値について見ると、小さな入力最大加速度で別々に挙動するようになったものほど、同じ入力最大加速度に対して、大きな応答値を示すことがわかる。

<Fig-16>は、入力最大加速度には関係なく、CLEARANCEと衝突最大速度との関係を示したものである。この図からCLEARANCEには最も大きな衝突速度が予想される大きさが存在することがわかる。

6. まとめ

橋脚と橋桁からなる構造の地震時の相対的挙動の特徴を推定することを動機として、クーロン摩擦だけで結ばれた2質点系のモデルを考え、これに水平地震動を入力し、応答解析を行った。

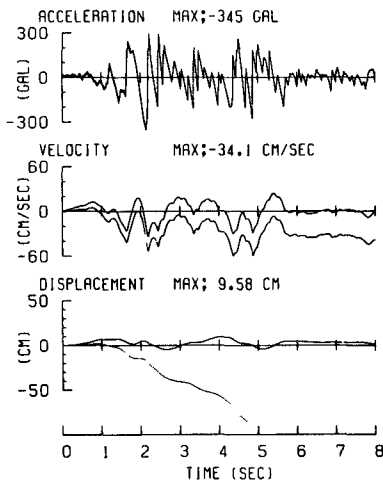
いうまでもなく、実際の地震動には上下動も含まれており、その影響はかなりあると思われる。従って、このようなモデルで、地震時挙動を完全に評価することはできないが、設計上必要な基本的資料は得られるものとする。

摩擦力によらず結ばれたこのような構造の地震に対する安全性を考える場合、重要となる要素は、それぞれの物体の応答絶対加速度及び物体間の応答相対速度、変位である。これらのいずれも、上部物体に最大静止摩擦力を越える慣性力が作用し、2つの物体がすべり始めると急に大きな応答値を示す。その境界となる

地震名	年月日	観測場所	方向	最大加速度 (GAL)	拡大・縮小した波の最大加速度 (GAL)
Imperial Valley	1940 V 18	El Centro	N S	345	100, 160, 200, 250, 300, 400
Kern County	1952 VII 21	Taft	N S	174	100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450
1968年 十勝沖	1968 V 16	八戸	N S	224	50, 85, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450
宮城県沖	1978 VII 12	樽水ダム ギャラリー	N35°W	237	100, 200, 270, 350, 400

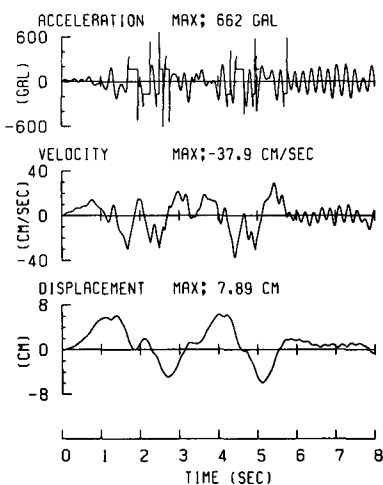
<Table-1> 入力地震波

INPUT EARTHQUAKE GROUND MOTION
EL CENTRO NS, IMPERIAL VALLEY 1940.5.18
— WITH BASE LINE CORRECTION
- - - WITHOUT B.L.C.



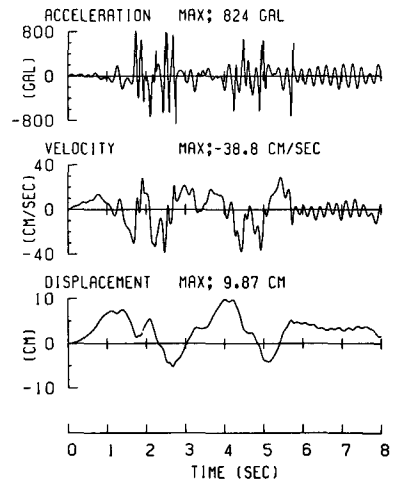
<Fig-6>

RESPONSE OF THE BEAM
ABSOLUTE MOVEMENT
INPUT; EL CENTRO O (ACC. MAX. -345 GAL)



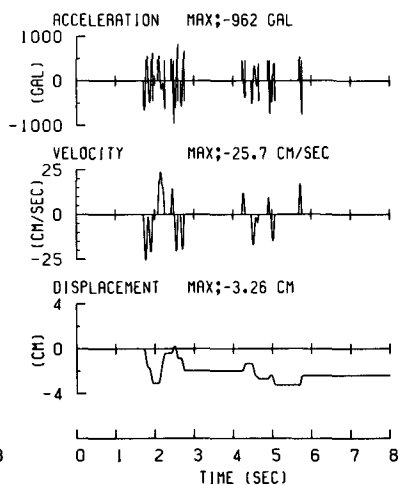
<Fig-8>

RESPONSE OF THE PIER
ABSOLUTE MOVEMENT
INPUT; EL CENTRO O (ACC. MAX. -345 GAL)



<Fig-7>

RESPONSE OF THE BEAM
RELATIVE MOVEMENT (TO THE PIER)
INPUT; EL CENTRO O (ACC. MAX. -345 GAL)

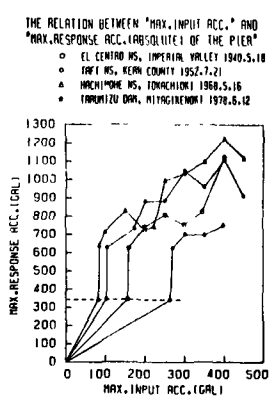


<Fig-9>

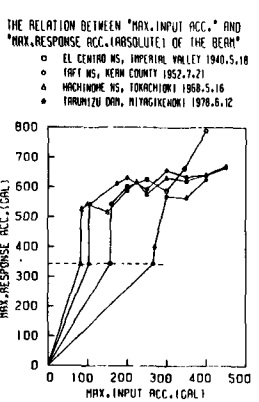
入力は、地震波の種類によつてばらついており、小さな入力加速度ですべり始めるような地震波に対しては、それより大きな入力加速度ですべり始める地震波の応答に比べて、一般に大きな応答値を示す。従つて、入力地震波の特性のうち、どのような要因で物体がすべり始めるかということが問題となる。本研究で示されたように、地震波の最大加速度というパラメーターでは、これを統一的に示すことはできそうにない。すなわち、本解析例で言えば、最大加速度が 100 gal 以下ですべり始める地震波もあり、 250 gal でもすべり始めない地震波も存在する。

地震の被害は、必ずしも地震波の最大加速度に依存しないということが言われているが、本研究においても、同様のことが確かめられたと言える。加速度振幅と共に、振動数特性、強震の継続時間、揺れ数などを考慮に入れた新しいパラメーターによつて整理し直す必要があると思われる。

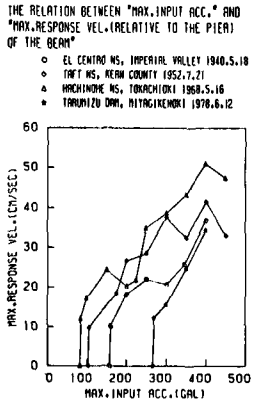
橋脚と橋桁がある入力波に対してすべり始める入力最大加速度は、橋脚と橋桁が一体となり、これらとして応答解析を行ない、この加速度応答が最大静止摩擦力を越える点に着目することにより、簡単な評価はできるように思われるが、その後の相対挙動については本研究のような手法を用いる必要がある。応答値を小さくするためには、下部構造の剛性、上部構造の重量、CLEARANCEの大きさ、などに注意するか、別な構造形式(例えば、支承の構造を変える)などの必要があると思われる。



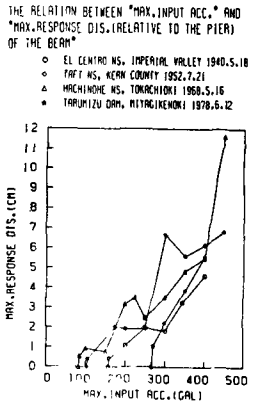
< Fig-10 >



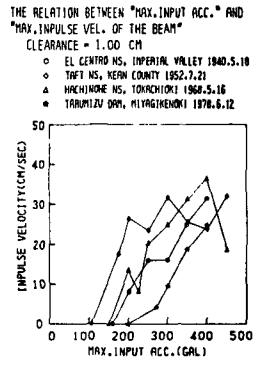
< Fig-11 >



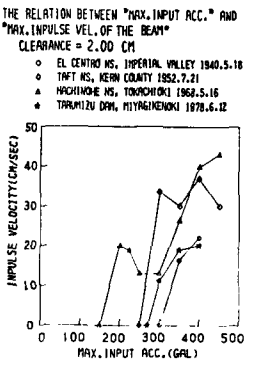
< Fig-12 >



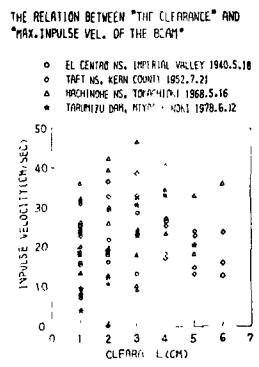
< Fig-13 >



< Fig-14 >



< Fig-15 >



< Fig-16 >