

## (81) 根入れのある構造物基礎の非線形地震応答解析

京都大学防災研究所 扶 長生  
京都大学防災研究所 正員 土岐憲三

1. まえがき ジョイント要素は岩盤内での不連続面を表現する手段として R. E. Goodman によって最初に提案され、発展してきた(1)。著者らは先にジョイント要素によって土と構造物の接触面の動的な滑動と剝離をモデル化することにより、構造物と地盤の動的相互作用に関する地震応答解析を行ない、強震時における構造物基礎の動的安定性を検討した(2)。また、地震時の土の非線形な動的挙動も考慮した解析(3)や斜面の地震時挙動の解析(4)にも応用した。一方、著者の一人は周波数領域で接触面の動的な性質を検討し、相対変位の時刻歴は高周波成分が卓越していることを指摘している(5)。

本研究は前論文(6)の継続と拡張であり、根入れのある構造物と土の接触面に三次元のジョイント要素を配置した三次元モデルで滑動と剝離を考慮した解析を行う。これにより、接触面の動的性質や根入れのある構造物基礎の動的安定性を検討し、構造物の地震応答に滑動と剝離の与える影響を検討する。

2. 解析モデル 解析に用いる三次元の根入れのある構造物-地盤系のモデルを図1に示す。これは二層地盤上に一辺30■、高さ60■、根入れ深さ20■のコンクリート構造物を想定したものであり、このモデルの諸元を表1に示す。そして、比較のために、根入れのないモデルについても検討するが、これをモデル2とし、根入れのあるものをモデル1とする。いずれのモデルにおいても地盤と構造物はともに線形挙動を示すものとし、接触面は非線形性を表現する手段としては前論文(6)で導入された三次元ジョイント要素を用いる。一方、根入れのある場合には、地震荷重を受ける前の状態における基礎側面での摩擦力の効果を調べるために、二つの状況を設定した。これは施工法に関わるものであり、前者は基礎側面に働く静的な摩擦力を考慮したものであり、これをケース1と称する。後者は側面の摩擦力をゼロとしたものであり、これは基礎を沈設した後に側面を埋めもどす場合に相当し、ケース2とする。

3. 地震応答 前述のモデルに  $x$  方向には EL CENTRO(1940)の NS 成分、 $y$  方向には EW 成分、 $z$  方向には UD 成分を入力し、系の地震応答解析を行う。地震波の最大加速度は原波形をそれぞれ 1.4、0.8、0.6 倍したものを用いる。この計算結果の一部を示したものが図3~8である。なお、図2は以下の図において検討する要素および節点の位置を示している。

図3~5は前論文(2)で定義した滑動安全係数、 $\tau_v/\tau$ を示したものである。滑動安全係数が1になれば、滑動が生じており、ゼロになれば、剝離が生じていることを意味する。また、安全係数が1.0以上となる場合には、1.0で打ち切って図示してある。これらの図より、根入れのある構造物の基礎側面で、入力地震波の最大値が200gal程度でも滑動と剝離を生じることがわかる。即ち、図3は根入れのあるモデル1のケース1に対して強度を0.6倍した EL CENTRO 波を入力した結果であり、 $t=2.34$ 秒、即ち構造物頂部の変位応答が一番大きくなる時に、図2に示した要素  $S_{x4}$  で剝離が発生している。ケース2については0.6倍の EL CENTRO 波を入力しに対しては、接触面は剝離しないが、0.8倍の EL CENTRO 波を入力しに対しては、ケース1と同じな時刻に剝離も発生することが図4よりわかる。さらに、ケース1の場合には静的解析による側面での摩擦力により、側面要素  $S_{x1}$  と  $S_{x2}$  での摩擦は地震動を受ける前から、滑動に近い状態にあることもわかる。一方、図5に示す根入れのない場合には、1.4倍した EL CENTRO 波を入力しても剝離は発生していない。しかしながら、底面での滑動がいずれの要素にも生じていることがわかる。

根入れのあるモデル1のケース2に対する図2のA点、即ち、構造物の天端での応答を図6に示す。左から  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の応答である。また、構造物底面(図2のB点)での構造物側の  $x$  方向の応答だけを示したのが図7であり、ジョイントのない線形モデルに対して同じ強度の入力を加えた場合の応答が図8であ

る。図6と図8を比較することにより、先に図4において示したように、ジョイントのあるモデル1においては剝離や滑動が生じているが、それらの発生している時間は極めて短いことから、これらの非線形挙動が構造物主体の応答に及ぼす影響はそれほど顕著でないことがわかる。特に、加速度応答においてはその影響は殆ど認められないが、変位応答においては変位振幅がやや増大している。一方、図6と図7との比較により、構造物の頂部と底部ではその挙動が異なり、頂部では底部に比較して短周期成分が減少し、応答振幅は増大するという剛構造物での一般的傾向がここでも認められる。特に、加速度においては増幅率はほぼ2倍であるが、変位振幅においては約6倍に増幅されており、全体としては動揺振動が卓越している。

4. あとがき 本研究では構造物と地盤の接触面に三次元のジョイント要素を配置し、剝離と滑動を考慮した根入れのある構造物基礎の動的な解析方法を提案した。得られた成果は以下のとおりである。

1. 構造物基礎側面は動的安定性が低く、本例では、根入れの深さ $h$ と基礎の幅 $b$ の比 $h/b$ が $2/3$ であるが、 $200\text{gal}$ 程度の最大加速度入力に対しても剝離や滑動が生じる。したがって、浅い根入れを持つ構造物については、一般的な解析方法のように基礎側面と地盤が完全に接触しているという仮定は適切ではない場合もあろう。

2. 施工過程を考慮しないケース1の場合には、側面に作用する初期の摩擦力の影響により、一部の側面区域は摩擦限界状態に近く、入力の初期の時期からその区域は滑動が発生する。その一部の滑動が上部構造物の変位応答に与える影響は小さいが、それによって、基礎の動的な安定性がケース2より低く評価されてしまう。

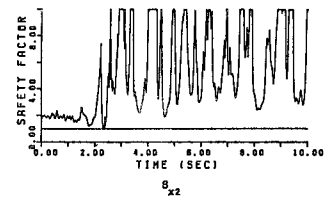
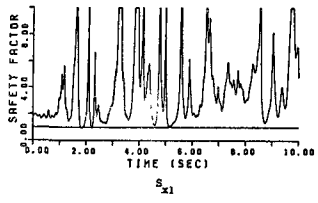
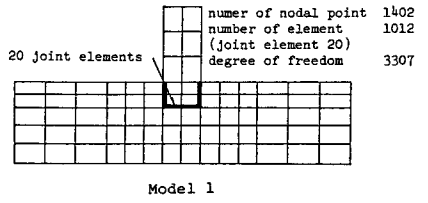
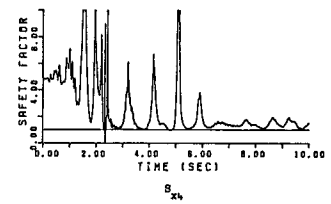
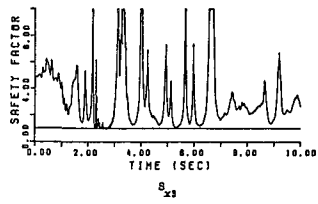
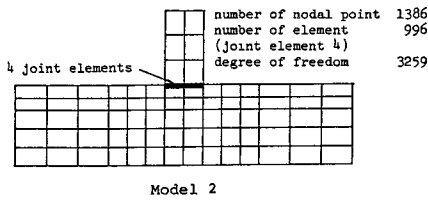
3. 基礎側面の動的安定性は側面上の垂直圧力に依存するから、施工過程や埋めもどしの締め固め状態に敏感である。この施工過程や埋めもどしが動的安定性に与える影響については、さらに詳しい検討が必要であらう。

4. 前述のように、本研究では地盤は線形挙動をするものと仮定した。しかし、接触面において局所的な剝離や滑動対象の生じる場合には、地盤にも大きなせん断応力が発生していることが予想され、三次元問題についても地割の非線形性を導入することによって、より現実に近い状況のもとで構造物基礎の動的な安全性に関して検討が行えるものと思われる。この点については現在解析を進めている。

なお、本研究の遂行に際しては、京都大学佐藤忠信助教授、山口大学三浦房紀助教授、日本コンピューターコンサルタンツ岸本英明氏、ならびに研究室の諸氏の協力が大である。記して感謝の意を表する次第である。

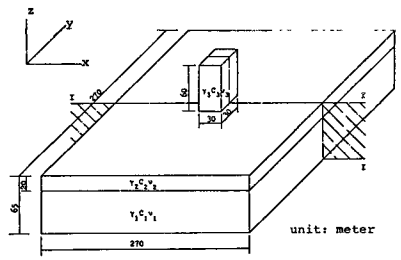
#### 5. 参考文献

- 1) R. E. Goodman: Method of geological engineering in discontinuous rock, West Publishing Company, 1976
- 2) K. TOKI, T. SATO & F. MIURA: Separation and sliding between soil and structure during strong ground motion, Earthq. engng. struct. dyn., 9, 263-277, 1981
- 3) K. TOKI and F. MIURA: Non-linear seismic response analysis of soil-structure interaction system, Earthq. engng. struct. dyn., 11, 77-89, 1983
- 4) K. TOKI, F. MIURA & Y. OGUNI: Dynamic slope stability analyses with a non-linear finite element method, Earthq. engng. struct. dyn., 13, 151-171, 1985
- 5) C. S. Fu & Z. D. Yu: Earthquake analysis of soil-structure system including relative displacements on interface, Proc. the 3rd inter. earthq. microz. conf. Seattle, USA, II, 969-979, 1982
- 6) 土岐憲三、三浦房紀、大竹敏雄：3次元ジョイント要素による地盤-構造物系の非線形震動解析、土木学会論文報告集、第322号、51-61、1982



(b)

図3 滑動安全係数、 $\tau_y/\tau$ 、モデル1、  
ケース1、0.6 倍のEL CENTROL入力



(a)

図1 解析モデル

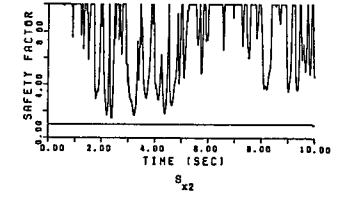
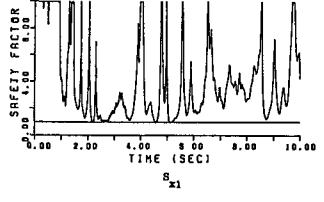
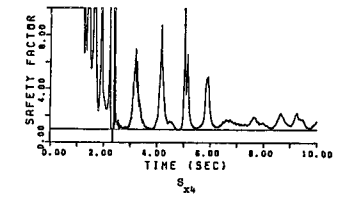
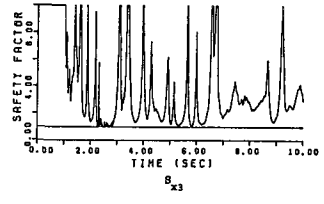


図4 滑動安全係数、 $\tau_y/\tau$ 、モデル1、  
ケース2、0.8 倍のEL CENTROL入力

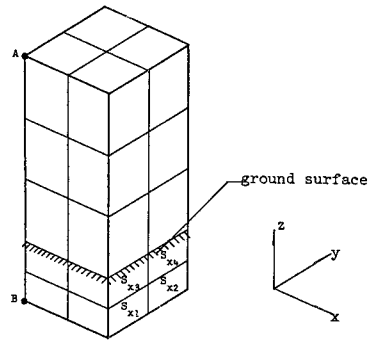


図2 検討する場所の位置図

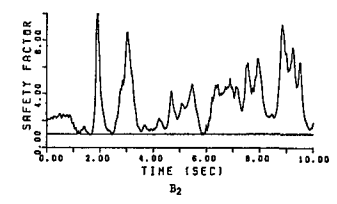
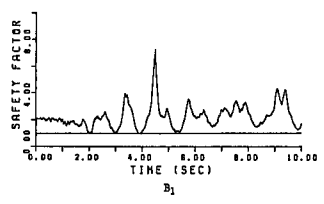
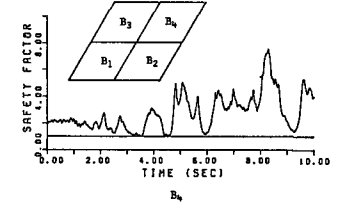
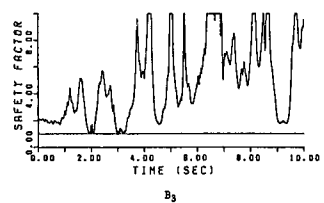


図5 滑動安全係数、 $\tau_y/\tau$ 、モデル2、  
1.4 倍のEL CENTROL入力

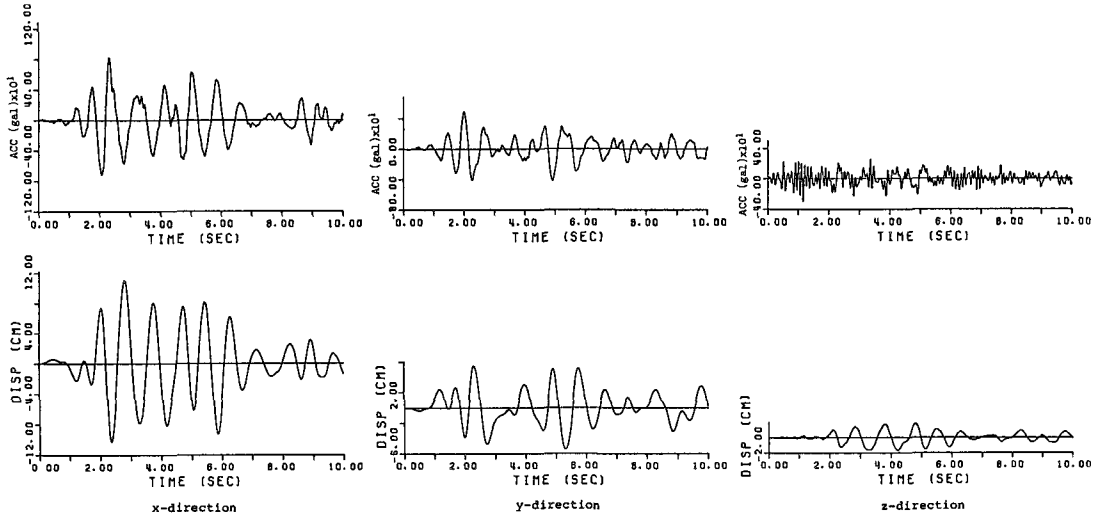


図6 A点の応答、モデル1、ケース2、  
0.8倍のEL CENTROL入力

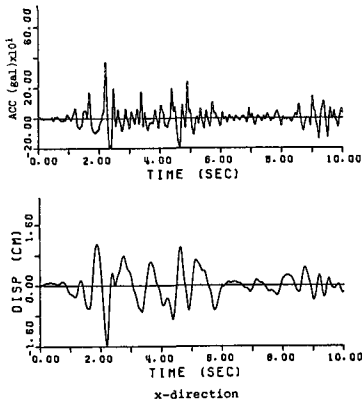


図7 B点の応答、モデル1、ケース2、  
0.8倍のEL CENTROL入力

Table I. Physical properties of the models

	Unit weight (t/m <sup>3</sup> )	Shear wave velocity (m/s)	Poisson's ratio	Damping factor	Cohesion (t/m <sup>2</sup> )	Friction angle (°)
Ground	$\gamma_1=2.0$	$C_1=600$	$\nu_1=0.333$	$h=0.2$	10	30
Structure	$\gamma_2=1.8$ $\gamma_3=2.4$	$C_2=200$ $C_3=1600$	$\nu_2=0.45$ $\nu_3=0.167$	$h=0.05$	—	—
joint	Shear spring const. $k_s=k_g=200000t/m^3$ Normal spring const. $k_n=200000t/m^3$				10	30

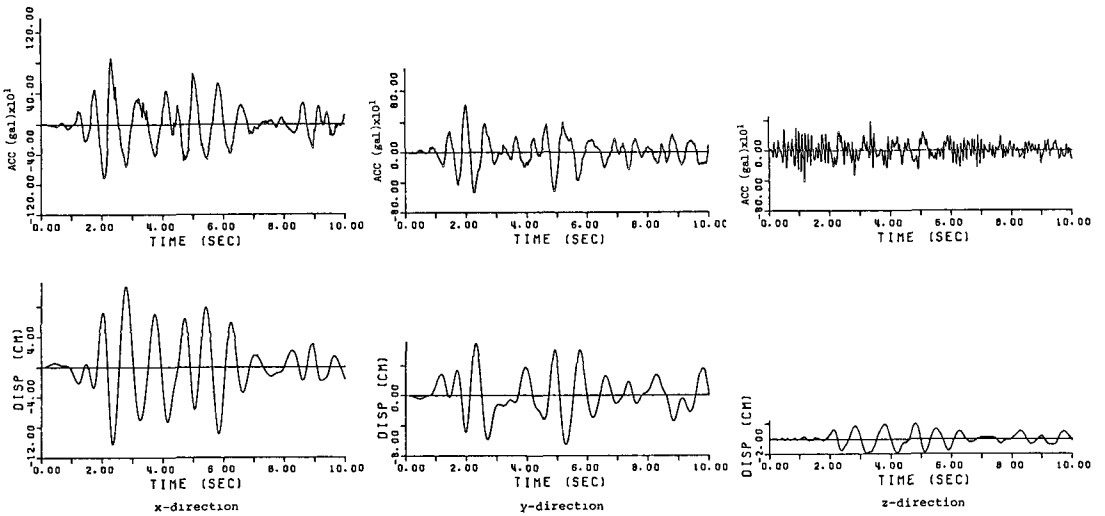


図8 A点の応答、モデル1、ジョイント要素なし、  
0.8倍のEL CENTROL入力