

地震外力による地盤と構造物の間の剝離と滑動

京都大学防災研究所 正員 土岐憲三
 京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信
 京都大学防災研究所 正員 ○三浦房紀

1. まえがき

地盤と構造物との間の動的相互作用を考慮に入れて、地盤-構造物系の震動解析を行う場合、従来より用いられている手法は、弾性波動論を適用する手法、集中質量法、有限要素法等に代表され、解析の対象とする系に応じて適宜有効な手法が選ばれている。しかし、これらの手法はいずれも地盤と構造物とは完全に密着しているという仮定を前提としており、地盤と構造物との接触面において剝離現象の生じる可能性がある大地震時の解析を行う場合でも、従来の手法を用いるかぎりこの現象は表現し得ず、その結果、地盤は引張りに対しても抵抗を示すという地盤の物性としては極めて妥当性を欠いた仮定の下で解析が行われることになる。また地盤と構造物との間の滑動現象も完全密着という従来の仮定の下では表現し得ない。

一方、静力学の分野では、連続体内の弱線の滑動や剝離といった問題が取り扱われており、特に有限要素法による解析ではジョイント要素の導入によりこの種の問題に対して詳細な検討の可能性が開かれつつある^(1,2)。そこで、本研究はこのジョイント要素を地盤と構造物との接触面に導入することによって、両者の間の接触面における剝離および滑動現象を表現し得る地盤-構造物系のモデル化を行い、このような現象をも考慮に入れた地盤-構造物系の強震時の挙動を調べたものである。

2. 剝離、滑動現象を伴う地盤-構造物系の有限要素法によるモデル化

2-1 ジョイント要素の構成関係

図-1にジョイント要素を示す。ジョイント要素はI、J、K、Lの4節点から構成され、初期状態においては面I-Jと面K-Lとは密着しているものとする。地盤と構造物との接触面の状態は、ジョイント要素の面I-Jおよび面K-Lの相対的位置関係で表わされ、この両面の相対運動は、(1)面に平行な方向への運動(地盤と構造物との滑動を表わす)、(2)面に垂直な方向への運動(地盤と構造物との剝離および接触を表わす)、(3)ジョイント要素の中心を回転中心とする回転運動、の3成分に分離され、それぞれに対応してジョイントのせん断方向の剛性 k_s 、垂直方向の剛性 k_n 、回転剛性 k_w なるばね係数を与えることによりジョイント要素の構成関係は規定される。ここで回転剛性 k_w はジョイントの変形モードを適当に仮定することにより k_n の関数として表わせ、結局ジョイント要素の相互ばね係数は k_s 、 k_n の2つとなる。ジョイント要素では通常の有限要素における無次元量であるはずみに対応する量として、ジョイントの中心($S=D$)で次式のように定義される「変位」を考⁽²⁾え、これと応力との間で構成関係を考える。

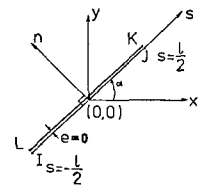


図-1 ジョイント要素と座標系

ここに

$$\begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ \omega \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{u_k + u_l}{2} - \frac{u_i + u_j}{2} \\ \frac{v_k + v_l}{2} - \frac{v_i + v_j}{2} \\ \frac{v_k - v_l}{l} - \frac{v_j - v_i}{l} \end{Bmatrix} \quad \dots (1)$$

u_0 : ジョイント中心のS方向変位
 v_0 : ジョイント中心のn方向変位
 ω : ジョイント中心の反時計回りの回転角
 u_i ($i=I, J, K, L$): S方向の節点変位
 v_i ($i=I, J, K, L$): n方向の節点変位
 l : ジョイント要素の長さ

ジョイント要素でモデル化される不連続面において、1つの要素内では力はその面全体を通じて一様に伝達されるものと仮定して、ジョイント要素の応力は次のように定義される⁽²⁾。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{1}{L}(F_{s,K} + F_{s,L}) \\ \sigma &= \frac{1}{L}(F_{n,K} + F_{n,L}) \\ M_0 &= \frac{L}{2}(F_{n,K} + F_{n,L}) \end{aligned} \right\} (2)$$

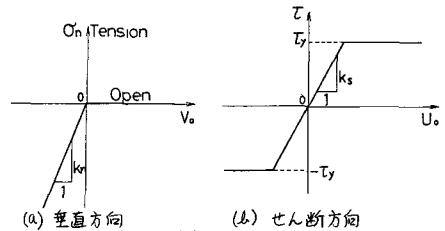
ここに
 τ ジョイント要素のせん断力
 σ ジョイント要素の垂直応力
 M_0 ジョイント要素の中心に関する節点力によるモーメント
 $F_{s,i}$ ($i=K,L$) S方向の節点K,Lにおける節点力
 $F_{n,i}$ ($i=K,L$) N方向の節点K,Lにおける節点力

ジョイント要素の構成関係を図-2に示す。これは式(1)と(2)と関係づけるものである。図-2(a)はジョイントに垂直な方向、(b)は平行な方向における関係である。垂直方向に関しては、 $v_0 > 0$ (剥離)の場合には力の伝達が行われず、 $v_0 < 0$ の場合にはばね係数 k_n を介して構成関係は線形関係にあり、せん断方向に関しては発生しているせん断応力の絶対値が降伏応力度 $|\tau_y|$ を越えるときはバリエーションを生じ、それ以下であれば線形関係にあるいわゆる完全弾塑性性としての挙動を示すものと仮定している。

降伏条件としてMohrの降伏条件を仮定すれば、降伏応力度 τ_y は次式で与えられる。

$$\tau_y = C - \sigma \tan \phi \quad (3)$$

ここに
 C 粘着力
 ϕ 内部摩擦角



(a) 垂直方向 (b) せん断方向
 図-2 ジョイント要素の構成関係

ばね係数 k_s , k_n は地盤と構造物の接触面の弾性的な相対運動を表すものであるが、実際上は接触面の地盤側の面と構造物

側の面との間に弾性的な相対運動を期待することは困難であり、この意味から k_s , k_n はできる限り大きな値とすることが望ましいが、逆に極端に大きくすると数値解析上不都合な現象が生じる。したがって本研究ではジョイント要素と構造物の剛性マトリクスが同程度の大きさを有するように k_s , k_n の値を選定している。

2-2 初期応力の算定

一般の動的解析においては静的つり合い状態からの変動を問題とすればよいから重力場による力を考慮する必要はない。しかし対称ジョイント要素のように引張りに対する抵抗を示さない特性を有する要素においては、要素に垂直な方向に働くかすかの引張力によっても剥離は発生することになる。したがって、これを地盤-構造物系に導入するために、ジョイント面上での重力に起因する初期応力を考慮する必要があり、その応力を決定し、その後に外乱を受けるといった解析過程を経る必要がある。本研究では、地盤を半無限弾性体と仮定して、構造物の自重を等分布荷重に換算し(これを q とする)、Bousinesqueの解を用いて、これから初期応力を算出して(図-3参照)、応答解析の初期条件とした。

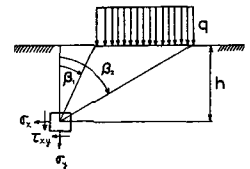


図-3 初期応力の算定

3. 地震応答解析

3-1 解析モデルおよび入力地震動

解析に用いる地盤-構造物系のモデルを図-4、図-5に示す。図-4に示すモデルは構造物が地表上に設置されている場合であり、以下これをモデル1と呼ぶ。図-5に示すモデルは構造物が地盤内に根入れされている場合であり、以下これをモデル2と呼ぶ。モデル1、モデル2の諸元をそれぞれ表-1、表-2に示す。モデル1の接触面については $C=10 \text{ t/m}^2$, $\phi=0^\circ, 30^\circ$ を仮定し、モデル2については、構造物の底面については $C=20 \text{ t/m}^2$ 、側方については $C=10 \text{ t/m}^2$ を、 ϕ はどちらも $0^\circ, 30^\circ$ の2通りを仮定している。

入力地震動は、El Centro (1940) のNSとUDの2成分の加速度記録であり、これを同時に入力する。入力加速度記録を図-6に示す。

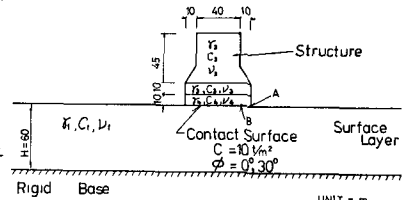


図-4 地盤-構造物系のモデル化(モデル1)

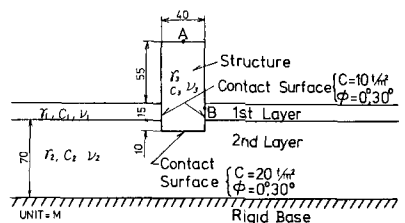


図-5 地盤-構造物系のモデル化(モデル2)

3-2 モデル1に対する応答解析

一般に構造物と地盤との接触面に生じる応力は、入力レベル、入力の水平成分と鉛直成分との位相差あるいはモデルの材質、形状等の複雑な関数となるため、滑動あるいは剝離現象が発生するか否かの判定は、現時点においては個々の地震波、モデルについて解析を行った上で行なわねばならない。モデル1においては構造物と地盤との接触面に発生すると考えられるせん断応力は、線形計算によれば、最大約 19 t/m^2 という結果が得られ、式(3)で与えられる降伏応力がこれ以下だと滑動を生じることになる。最も構造物の安定性が不利になる $t=2.2$ 秒付近におけるモデル図中 B 点の垂直応力は約 38.6 t/m^2 となり、粘着力 $C=10 \text{ t/m}^2$ とした場合滑動が生じないためには約 13.7° 以上の内部摩擦角が必要となる。これ以上の内部摩擦角に対しては、内部摩擦角の値にかかわらず同様の応答結果となり、本解析例で仮定した $\phi=30^\circ$ の場合には滑動は生じていない。

図-7 は滑動の発生した $\phi=0^\circ$ の場合の図-4 における B 点でのせん断変形に対する履歴曲線であり、図中には各点の時刻が示してある。初め線形弾性体としての挙動を示しており、 $t=1.71$ 秒に至って滑動を生じ始め、 $t=2.04$ 秒からは逆方向に滑動し、その後再び滑動をくり返して最終的には約 11 mm の残留変位を生じている。ここで、滑動を生じる時刻を図-6 の入力加速度図に印で示した。これより滑動を生じる直前に水平成分に大きなピークが存在し、これらのピークはいずれも 200 gal を越えており、 200 gal を越えるピーク後に滑動を生じた例はわずか1例しかなく(印)、また逆に 200 gal 以下のピークでは滑動は生じておらず、これらのことを勘案すると、滑動現象発生には水平加速度レベルが1つの大きな要因であり、この方面からの滑動現象発生判定の可能性を示唆しているものと考えられる。

図-8 は図-4 A 点の地盤側(Ground)、構造物側(Structure)の非線形および線形の応答変位を示したものである。これより構造物が滑動に引き起こされる残留変位を生じて運動している様子が見える。線形計算と比較すると構造物側は極めて大きな変形を生じているが、地盤側は逆に線形の場合よりわずかに応答は小さくになっている。

図-9 は滑動が生じた場合と生じない場合とで振動形態がどのように異なるかを明らかにするために $t=2.2$ 秒における振動形態を $\phi=0^\circ$ の場合を(a)に、 $\phi=30^\circ$ の場合を(b)に示したものである。これより滑動が生じた $\phi=0^\circ$ の場合には構造物の振動形態はロッキング運動よりも並進運動が支配的であり、逆に滑動が生じない $\phi=30^\circ$ の場合にはロッキング運動が支配的であることが分かる。また、滑動現象が生じるか否かで振動形態が異なるものとなる可能性のあることが明らかである。

表-1 モデル1の諸元

	単位体積重量 (t/m^3)	せん断波速度 (m/sec)	ポアソン比	減衰定数
地盤	$\gamma_1 = 1.8$	$C_1 = 500$	$\nu_1 = 0.4$	0.2
構造物	$\gamma_2 = 0.75$ $\gamma_3 = 1.7$ $\gamma_4 = 2.4$	$C_2 = 1720$ $C_3 = 1600$ $C_4 = 1600$	0.167	0.05
ジョイント	$R_s = 25910 \text{ t/m}^2$ $R_n = 25910 \text{ t/m}^2$		$C = 10 \text{ t/m}^2$ $\phi = 0^\circ, 30^\circ$	

表-2 モデル2の諸元

	単位体積重量 (t/m^3)	せん断波速度 (m/sec)	ポアソン比	減衰定数
地盤	$\gamma_1 = 1.8$ $\gamma_2 = 1.8$	$C_1 = 180$ $C_2 = 360$	0.4	0.2
構造物	$\gamma_3 = 2.4$	$C_3 = 1600$	$\nu_3 = 0.167$	0.05
ジョイント	$R_s = 20000 \text{ t/m}^2$ $R_n = 20000 \text{ t/m}^2$		$C = 20 \text{ t/m}^2$ (底面) $C = 10 \text{ t/m}^2$ (側面) $\phi = 0^\circ, 30^\circ$	

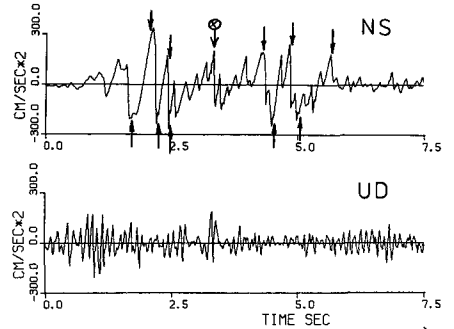


図-6 入力加速度波形 (水平(NS), 鉛直(UD))

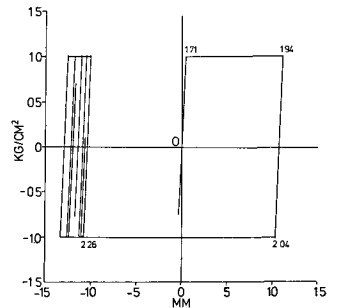


図-7 モデル1 B点の履歴曲線(せん断)

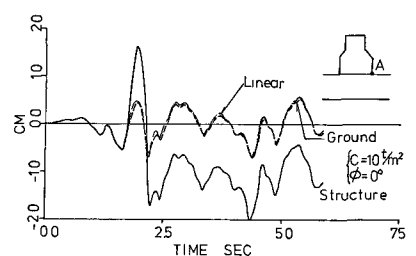


図-8 モデル1 A点の変位応答

3-3 モデル2に対する応答解析

モデル2に対しては、構造物底面と側面での粘着力の値を変えてそれぞれ 20 t/m^2 、 10 t/m^2 としており、内部摩擦角は共通で 0° および 30° を設定している。応答解析を行った結果、 $\phi = 0^\circ$ 、 30° のいずれの場合にも構造物側方の接触面では滑動、剥離の両現象が生じているが、構造物底面ではどちらの現象も生じていない。底面における最大せん断力は $\phi = 0^\circ$ の場合 $t = 2.19$ 秒で 14.6 t/m^2 、 $\phi = 30^\circ$ の場合 $t = 2.18$ 秒で 17.2 t/m^2 とっており、 $\phi = 0^\circ$ の場合 C が 14.6 t/m^2 以下であれば滑動が生じることに注意。一方、 $\phi = 30^\circ$ の場合、この時の $\sigma \cdot \tan \phi = 48.9 \text{ t/m}^2$ とあり、 $C = 0 \text{ t/m}^2$ でも滑動は生じないことに注意。

図-10、11は図-5 B点における $\phi = 0^\circ$ の場合のそれぞれせん断方向、垂直方向の履歴曲線である。 $t = 2.19$ 秒から $t = 2.37$ 秒にかけて剥離現象が生じており、この間せん断抵抗力は零となり滑動現象が著しい。

図-12 は $t = 2.25$ 秒における $\phi = 0^\circ$ の場合の振動形を示したものであるが、構造物の右側接触面で剥離現象が生じている様子がうかがえる。

図-13、14はそれぞれ構造物頂部(図-5 A点)の応答変位および応答加速度である。図には $\phi = 0^\circ$ 、 30° および線形計算の3通りの応答が示してあるが、変位、加速度いずれもこれら3通りの応答曲線は相似形をとり、これと構造物底面では滑動、剥離いずれの現象も生じていないことを勘案すると構造物の振動形態は、この場合側方接触面での剥離や滑動現象によって変化したこととわかる。しかし、側方からの拘束力が低下するために振幅は大きくなっており、 $\phi = 0^\circ$ の場合の変位の最大値は線形のそれの1.31倍($t = 5.44$ 秒)、加速度は1.36倍($t = 2.25$ 秒)に達している。これは地盤-構造物系の強震時における耐震性を検討する場合、接触面における滑動、剥離に伴う拘束力の低下も考慮に入れる必要があることを示唆しているものと考えられる。

以上、地盤と構造物の接触面における滑動、剥離現象を考慮に入れた震動解析について検討を行ってきたが、現在のところジョイント要素に付与すべき力学特性についてのデータは十分とはいえず、今後、動的付特性をも含めて接触面の力学特性が明らかになれば、データが集積されることが行われる。

参考文献 1) R.E. Goodman and R.L. Taylor: A Model For The Mechanics of Jointed Rock, ASCE, SM3, 1968, PP 637~659.

2) R.E. Goodman's Method Of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Company, 1976, Ch.8.

3) 赤井浩一: 土質力学, 朝倉土木講座5, 朝倉書店 1968, PP 204~205.

図-13 モデル2 構造物頂部の応答変位の比較

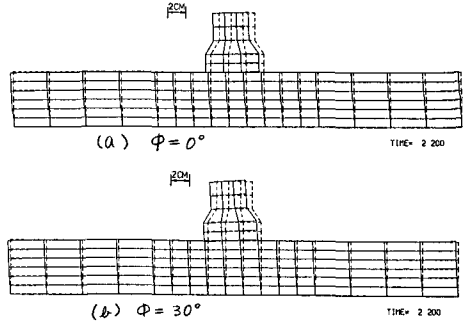
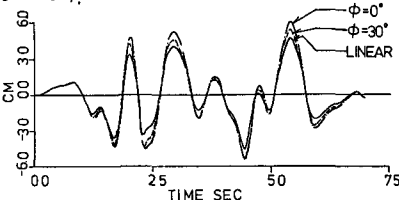


図-9 滑動を生じた場合と生じない場合の振動形の比較

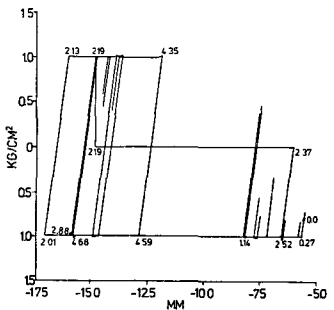


図-10 モデル2 B点の履歴曲線(せん断)

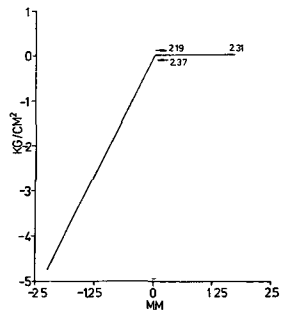


図-11 モデル2 B点の履歴曲線(垂直)

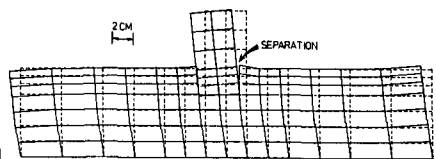


図-12 モデル2の振動形(phi=0 degrees)

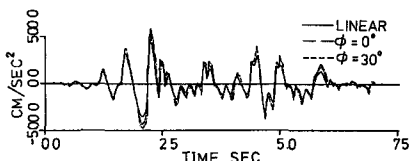


図-14 モデル2 構造物頂部の応答加速度の比較