

(29) 強震時における構造物の滑動と転倒に対する安全性

京都大学防災研究所 正会員 土岐 憲三
 京都大学防災研究所 〇正会員 三浦 秀紀
 京都大学大学院 学生員 吉村 隆

1. まえがき

強震時においては構造物と地盤との間に滑動現象や剝離現象の生じる可能性が考えられる。また、このような現象は生じることばかりでなく、想定される地震荷重の作用下において構造物が滑動や転倒に対してどの程度の安全性を保持しているか、地盤との動的相互作用を考慮した上で評価しておくことは極めて重要である。このような観点から著者らはジョイント要素を構造物と地盤との接触面に導入することによって、この面に沿って生じる剝離現象や滑動現象を考慮に入れて動的解析手法を提案しており¹⁾、さらに地盤を弾性-完全塑性体と仮定することによって地盤の非線形挙動をも考慮に入れて解析手法を提案している²⁾。本研究はこの解析手法を用いて、構造物基礎の重心高と基礎底面の軟幅の比、構造物基礎の根入れの有無、あるいは入力特性が構造物の滑動、転倒に対する安全率に対してどのように影響を及ぼすかについて検討を加えたものである。

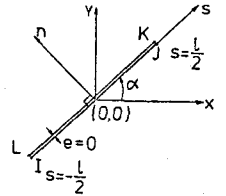


図-1 ジョイント要素

2. 動的滑動、剝離現象を伴う非線形地盤-構造物系のモデル化と解析手法

2.1 ジョイント要素による接触面のモデル化 図-1に地盤と構造物との接触面を

モデル化するために用いるジョイント要素を示す。また、図-2に本研究で仮定するジョイント要素の構成関係を示す。図(a)はジョイント面に平行な方向(S方向)、図(b)は垂直な方向(n方向)に対するものである。降伏せん断応力 T_y は Mohr-Coulomb の破壊条件式で与えられると仮定している。

一方、垂直な方向に関しては、 $E_0 > 0$ (剝離) の場合には力の伝達を行なわず、 $E_0 < 0$ の場合には、 k_n を介して線形関係にあるものと仮定している。

2.2 地盤の構成関係 地盤の構成関係としては、弾性-完全塑性体として地盤の材料非線形性を仮定し、Mohr-Coulombの破壊条件に従うものと仮定する。地盤の破壊形態としては図-3に示すように、せん断破壊とへき開破壊が考えられ、せん断破壊の場合には平均主応力 σ_m を一定としてモールの応力円が破壊線に接するように、またへき開破壊の場合にはモールの応力円が点Tに収縮するまで反復計算を行っている。なお、反復計算は荷重伝達法によっている。

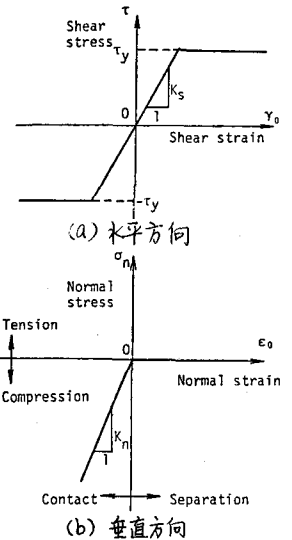


図-2. ジョイント要素の構成関係

3. 構造物の滑動と転倒に対する安全率の定義

3.1 滑動に対する安全率の定義 現行の構造物の滑動に対する安全率の算定式は静的に作用する外力に対して与えられており次式で表わされる。以下ににおいてはこれを S.S.F. (Static Safety Factor) と呼ぶことにする。

$$S.S.F. = \frac{T_y}{C} = (C_f + \frac{W}{L} \tan \phi_f) / (\frac{m\alpha}{L}) \quad (1)$$

ここに、 C_f 、 ϕ_f はそれぞれ接触面の粘着力および摩擦角であり、 W 、 m 、 L はそれぞれ構造物の重量、質量および底面の軟幅である。また α は構造物の重

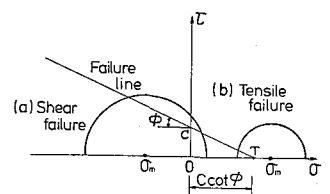


図-3 地盤の破壊形態

心に作用する加速度であり、ここではジョイント要素を用いた、線形モデルの構造物重心における最大応答加速度で与えられる。

一方、動的外力の作用下においては $|T_y/T_i|$ の値は接触面の場所によってもまた時間によっても変動する。したがって動的な滑動に対する安全率として、ここでは以下のように構造物全体の滑動に対する安全率と局所的な滑動に対する安全率の2通りの安全率を定義する。まず、構造物全体の安全率は式(2)で与えられるように、せん断力に対する降伏せん断力の比を各時間ステップごととに算定し、この値の全時刻歴中の最小値をもって定義し、以下 T.S.F. (Total Safety Factor) と呼ぶことにする。

$$T.S.F. = \left| \left(\frac{\sum_{i=1}^N T_{yi} l_i}{\sum_{i=1}^N T_i l_i} \right) \right|_{\min} \quad (2)$$

ここに、 N はジョイント要素数、 l_i 、 T_{yi} 、 T_i はそれぞれジョイント要素 i の要素長、降伏せん断応力およびせん断応力である。また、局所的な安全率は各ジョイント要素ごとに定まる $|T_{yi}/T_i|$ の時刻歴中の最小値の全ジョイント要素中の最小値をもって定義し、L.S.F. (Local Safety Factor) と呼ぶ。

3.2 転倒に対する安全率の定義 構造物に転倒モーメント M が作用する際の偏心距離 e は、 $e = M/W$ で与えられるが、設計指針によればこの偏心距離 e は地震時においては構造物底面敷幅の $1/3$ より小さくなければならぬとしているから、ここでは $1/3$ と e の比、 $1/3e$ をもって転倒に対する安全率を定義する。転倒モーメントは以下のごとく静的および動的に算定し、その時の安全率をそれぞれ静的な、および動的な転倒に対する安全率と呼ぶことにする。

まず、構造物の重心に静的に加速度 a を作用させることにより、生じる転倒モーメント M_s は次式で与えられる。

$$M_s = m a h \quad \text{ここに、} h \text{ は構造物の重心高} \quad (3)$$

次に、動的外力下における転倒モーメント M_d は図-4 に示すように、次の(4)式を用いてジョイント要素に生じている垂直応力から算定する。構造物に根入れがある場合も同様の考え方により M_d を算定する。

$$M_d = \sum_{i=1}^N O_{ni} l_i d_i \quad (4)$$

ここに、 n_i 、 d_i はそれぞれ垂直応力および構造物底面中心からの距離である。

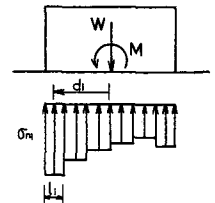


図-4 M_d の算定方法

4. 強震時における構造物の滑動および転倒に対する安全性の検討

4.1 解析モデル 解析に用いる地盤-構造物系のモデルを図-5に示す。CASE 1, 2, 3 のモデルは地表面上に構造物が建設されている場合であり、CASE 4~7 は構造物の地盤内に10m根入れされている場合である。構造物の高さはCASE 1が10m、CASE 2, 4, 5が40m、CASE 3, 6, 7, が80mであり、底面の敷幅は全て40mで一定である。またCASE 1, 2, 3, 4, 6の構造物の重量は等しく、CASE 5とCASE 7の構造物はCASE 1のそれと同一の単位体積重量である。全てのモデルに

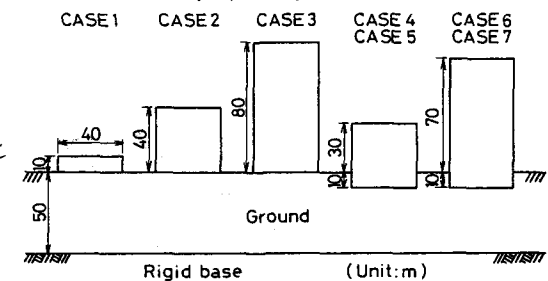


図-5 モデル図

表-1 モデルの諸元

	単位体積重量 (t/m^3)	横波速度 (m/s)	ポアソン比	粘着力 (t/m^2)	摩擦角 (度)
地盤	1.8	400	0.4	0	35
構造物	CASE 1, 5, 7	2.4	1600	0.17	—
	CASE 2, 4	1.2	1600	0.17	—
	CASE 3, 6	0.3	1600	0.17	—
ジョイント要素	$K_s = K_n = 300,000 \text{ t}/\text{m}^2$			0	30

ついで地盤と構造物の接触面にはジョイント要素の粘着力 G 、摩擦角 μ および地盤の粘着力 C および内部摩擦角 ϕ は実験より得られた値を用いている。各モデルの物理定数を表-1に示して示す。またCASE 1の有限要素網を図-6に示す。

CASE 1

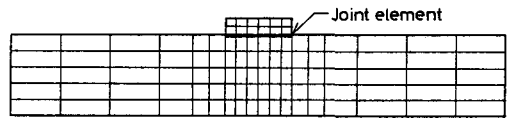


図-6 有限要素網 (CASE 1)

表-2に上記7通りのモデルの固有振動数を1次から5次まで示す。表には、地盤のせん断振動の卓越する振動数には実線で、構造物の動揺振動の卓越する振動数には破線でアンダーラインが引いて示してある。

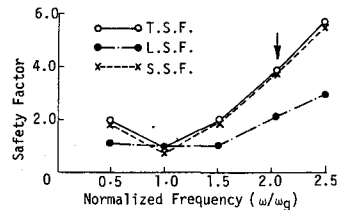
表-2 固有振動数

CASE 次数	1	2	3	4	5	6	7
1	1.92	1.90	1.54	1.98	1.68	1.78	0.89
2	2.38	2.37	2.06	2.41	2.40	2.18	1.97
3	3.00	2.84	2.37	3.11	2.54	2.39	2.21
4	3.57	3.19	3.10	3.72	3.08	3.20	2.56
5	3.97	3.57	3.51	3.83	3.12	3.78	2.91

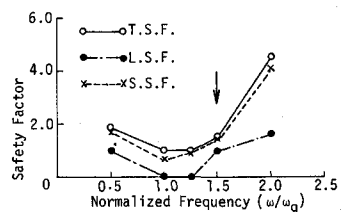
入力としては水平方向に1gを考慮しており、正弦波およびE1 Centra (1940) NS成分を基礎から入力している。

4.2 正弦波入力時の滑動に対する安全性 図-7に

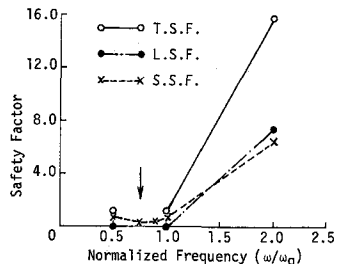
速度振幅200galの正弦波を入力した際のCASE 1, 2, 3の滑動に対する安全率を順に図(a), (b), (c)に示す。振動数は地盤のせん断振動の卓越する振動数で正規化してあり、構造物全体の滑動に対する安全率T.S.F.を実線で、局所的な安全率L.S.F.を一点鎖線で、静的な安全率S.S.F.を破線で示してある。また図中、矢印で示してある振動数は構造物の動揺運動の卓越する振動数である。なお、CASE 3の無次元振動数が0.75と0.89の場合には構造物の転倒が生じており、動的な安全率は示されていない。このような場合には(偏心距離 e は構造物底面の数倍40m以上となり、数値解析上の解が発散して求まらない。



(a) CASE 1



(b) CASE 2



(c) CASE 3

図-7より以下のことが判る。まず安全率の大小関係は、大略T.S.F. > S.S.F. > L.S.F.といえよう。次に、T.S.F.とS.S.F.とは比較的近い値となっており、構造物の重心高さと振幅 L の比 L/ω が大きくなる程、すなわちCASE 2, CASE 3となるほど両者の間の差が増大していく傾向が認められる。

この図では滑動が生じると安全率は1、剝離現象が生じると安全率は0として示されている。すなわち、CASE 2, CASE 3においてL.S.F. = 0の場合があり、これは構造物底面が地盤から局所的に浮き上がっていることを意味している。またCASE 3では転倒が生じていることは上述の通りであるが、CASE 1では構造物全体の滑動、局所的な滑動は生じているが、地盤からの浮き上がりの現象は生じていない。

次に、滑動に対して最も危険となる振動数はCASE 1では地盤の卓越振動数であるが、 L/ω が大きくなるCASE 2, CASE 3となるにつれ構造物の動揺運動の卓越する振動数に移行する様子が見られる。

図-8は構造物の浮入れる有する場合であるCASE 4とCASE 6に対して同様の解析を行った結果を示したものであり、CASE 2とCASE 4およびCASE 3とCASE 6を比較することによって構造物の根入れの滑動に対する安全性に及ぼす影響が見ることが出来る。まず、CASE 2とCASE 4を比較すると、滑動に対して最も危険と

図-7 正弦波入力時の滑動に対する安全率

思われる無次元振動数が1.0~1.5においては両者の間にほとんど差はなく、この振動数領域においては根入れの影響はほとんど認められない。次にCASE3とCASE6を比較すると、滑動に対して最も危険である無次元振動数0.5~1.0の振動数領域においては根入れのあるCASE6の方が安全率は高くなっており、この場合には根入れによる安全率増大の効果が認められる。また、単位体積重量がCASE1と同じであるCASE5とCASE7に対して同様の検討を行うと、CASE5ではCASE4とほぼ同じ結果が得られ、CASE7ではCASE6よりもさらに高い安全率が得られている。

4.4 正弦波入力時の転倒に対する安全性

図-9は加速度振幅200galの正弦波を入力した際の転倒に対する安全率を滑動に対する安全率を調べた際に用いたものと同じ振動数について算定して最も低い値を各CASEについて示したものであり、動的な安全率を○印で、静的な安全率を×印で示したものである。また、図中のG.S.はその時の転倒数が地盤の卓越振動の卓越振動数であることを意味し、S.R.は構造物の動揺振動数であることを意味する。また前述したようにCASE3では転倒が生じているのでこの図には動的な安全率は示していないが、この値はその定義から1/3以下の値であることは明らかである。

また、安全率と α/L の関係は当然予定されるように α/L が大きい方が安全率は低下している。転倒に際して最も危険な振動数は滑動に対してもそうであったように、 α/L が大きくなるに従って地盤の卓越振動数から構造物の動揺振動の卓越振動数へと移行している。

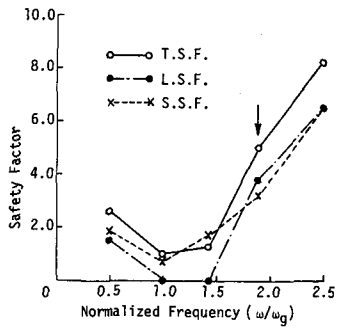
次に静的な安全率と動的な安全率とを比較すると構造物が地表面上にある場合には動的な安全率の方が高い値となっている。一方、根入れのある場合にはほぼ同じ値か、むしろ逆に静的な安全率の低い場合もある。根入れの有無による安全率の相違は静的、動的のいずれもあまり認められないが、現象的にはCASE3では転倒が生じ、CASE6では転倒は生じていないという大きな差違がある。

4.5 地震波入力時の滑動、転倒に対する安全性

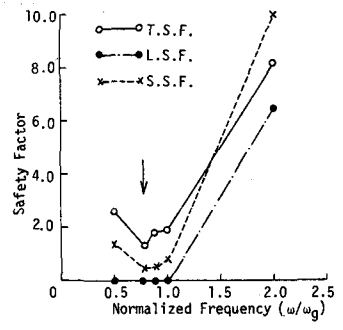
表-3はCASE1, CASE3, CASE6, CASE7についてEl Centro地震波(最大340gal)入力に対する安全率を示したものである。CASE3とCASE6では転倒が生じている。滑動に対する安全率に関してはCASE1は正弦波に対して得られた結果と同様にT.S.F.とS.S.F.とは同程度の値であるが、CASE7ではT.S.F.の方がS.S.F.の約3倍大きい値となり、正弦波の場合とは異なり、相対的に示している。

一方、転倒に対する静的および動的な安全率の大小関係は正弦波に対して得られた結果とほぼ一致するものである。

参考文献 1) 土岐 三浦; 強震時に於ける地震と構造物の間の剥離と滑動, 環学会論文報告集第302号, 1980.
2) 土岐 三浦; 地盤-構造物系の非線形地震応答解析, 環学会論文報告集投稿中.
3) 土岐 三浦, 石川; 構造物の動的滑動現象における摩擦特性, 環学会関西支部, 1981.



(a) CASE 4



(b) CASE 6

図-8 正弦波入力時の滑動に対する安全率

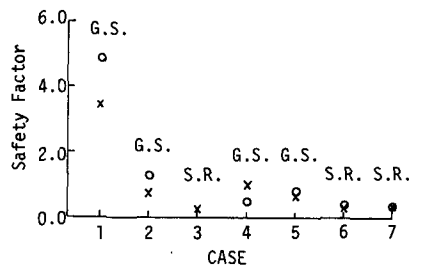


図-9 正弦波入力時の転倒に対する安全率

表-3 地震波入力時の安全率

安全率	CASE				
	1	3	6	7	
滑動	T.S.F.	1.0	-	-	3.84
	L.S.F.	1.0	-	-	1.0
	S.S.F.	1.0	0.78	0.73	1.27
転倒	動的	4.98	-	-	0.48
	静的	3.84	0.37	0.35	0.61