

(186) 地震時における構造物基礎の動的安定性の照査

京都大学防災研究所 正員 土岐憲三
若築建設(株) 正員〇酒井久和

1. はじめに

構造物基礎の耐震設計に際して、基礎の滑動、転倒、支持力に対する安全性の確認が要求されるが、いずれも地動を静的に作用させる震度法に基づいて行われている。この場合、転倒と滑動に関してはそれらの安全率は構造物の規模には無関係となり、高さとの比により定まる。しかるに、実際の構造物基礎の動的な応答には基礎構造物の慣性が関与し、慣性は規模により異なるから、動的な転倒安全率は規模に左右されることになる。そこで、構造物基礎と地盤との動的相互作用を含む系の動的解析を行い、転倒や動揺振動角がある基準値を越えることに対する動的な安全率と震度法による安全率との比較検討を実施した。

2. 検討方法

2.1. 解析方法 本検討では有限要素法を用いて、地盤の材料非線形性、系の構造的な非線形性を考慮した2次元平面ひずみ問題¹⁾として取り扱っている。系の構造的な非線形性に関しては、構造物と地盤(地表面)との間にジョイント要素を配置して、構造物・地盤間の剝離、滑動現象を表現した。ジョイント要素の構成関係においてせん断特性は完全弾塑性体としての挙動を示し、破壊条件はMohr-Coulombの降伏条件にしたがうと仮定した。

一方、地盤の非線形性は地盤を弾性-完全塑性体とし、破壊規準をMohr-Coulombの破壊規準にしたがうものと仮定した。破壊形態としては引張破壊、へき開破壊を考える。

解析は、時間領域の逐次積分法として、Newmarkの β 法($\beta = 1/4$)を採用し、非線形の収束計算は、荷重伝達法を用いた。時間間隔は1/1,000秒で継続時間は40秒間である。また、地盤境界部における反射を防ぎ、逸散減衰および外部加振も考慮するために、粘性境界を導入した²⁾。解析プログラムは7s-II¹⁾を改良したものである。

2.2. 構造物の転倒に関する検討方法 構造物の動的転倒に対する安定性は、構造物の位置エネルギー、運動エネルギーをもとにして評価する。図-1に示す構造物の重心 G が回転の中心 A の鉛直上方の点 G' にあるとき、転倒限界にあり、このときの位置エネルギーの増分を E' とすると、この E' は構造物が転倒するのに必要なエネルギーで、次式で示される。

$$E' = mgr(1 - \cos \alpha) \quad (1)$$

また、構造物の運動エネルギー E_k および A 点に対する位置エネルギーの増分 E_p は、構造物の回転の中心 A まわりの慣性モーメントを I_A とすると、それぞれ次のように表せる。

$$E_k = I_A \omega^2 / 2, \quad E_p = mg(h' - h) \quad (2), (3)$$

ここに、 h' は回転の中心 A に対する重心の相対高さを表し、 ω は構造物の角速度で A に対する重心の相対速度を V 、鉛直、水平方向の相対速度をそれぞれ v, u とすると $\omega = V/r = (v \cos \alpha + u \sin \alpha)/r$ と表せる。

構造物の転倒に対する安全率 F_s は上記のエネルギーを用いて、次式で定義される。

$$F_s = |E' / (E_k + E_p)|_{\min.T} \quad (4)$$

ここに、 $\min.T$ は、全解析ステップ中の最小値を示す。

2.3. 解析モデル 幅320m、深さ50mの広がりをもつ N 値30の等方均質な地盤上に表-1に示す規模の異なる直接基礎構造物を設置する場合を考える。メッシュは図-2のように分割し、*El Centro* (1940)の NS

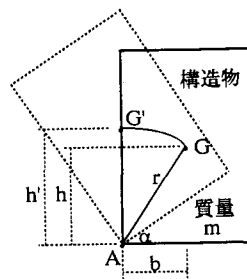


図-1 動的転倒限界状態

成分、*Taft* (1952) の *S69E*成分、八戸 (1968) の *NS*成分を最大加速度 200gal に調整したものを水平方向の入力地震波として、基盤面に入射させる。また、地盤条件は次式により算定^{3),4)}した。

$$V_s = 89.8N^{0.341} \quad \text{: 地盤のせん断波速度 (m/sec)} \quad , \quad \phi = 15 + \sqrt{15N} \quad \text{: 地盤の内部摩擦角 (度)}$$

$$\phi_J = \frac{2}{3}\phi \quad \text{: ジョイント要素の摩擦角 (度)} \quad , \quad h \approx 0.017 + 0.0002V_s \quad \text{: 地盤の減衰定数}$$

ここで、地盤の粘着力 C 、およびジョイント要素の粘着力 C_J はともに $0.0tf/m^2$ 、土の単位体積重量は $1.8tf/m^3$ 、ポアソン比 $1/3$ 、構造物は単位体積重量 $2.3tf/m^3$ 、ポアソン比 $1/6$ 、せん断波速度は $2,000m/sec$ 、減衰定数は 5% とした。

表-1 解析ケース

高さとの比	Case No. (構造物高さ(m), 幅(m))			
10:3	1 (100,30)	2 (80,24)	3 (60,18)	4 (40,12)
8:3	5 (80,30)	6 (64,24)	7 (48,18)	8 (32,12)
6:3	9 (60,30)	10 (48,24)	11 (36,18)	12 (24,12)
4:3	13 (40,30)	14 (32,24)	15 (24,18)	16 (16,12)

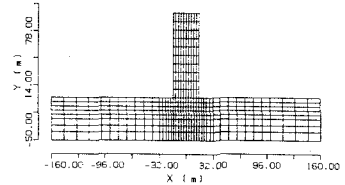


図-2 解析メッシュ

3. 解析結果

3.1. スペクトル解析による検討 非線形動的相互作用解析における振動数特性を調べるために、時間領域での応答解析結果をもとにフーリエスペクトルを求めた。Case.1 で地震波として *El Centro* 加震の場合の構造物の重心における水平方向の応答変位、速度、加速度の時刻歴を図-3 に、構造物の重心位置での応答加速度の最大値と規模の関係を 3 つの入力地震波 (*El Centro*、*Taft*、八戸) について示したものが図-4 である。図-4 ではいずれの入射波についても構造物規模が小さくなれば構造物の応答加速度が大きくなる傾向がみられる。

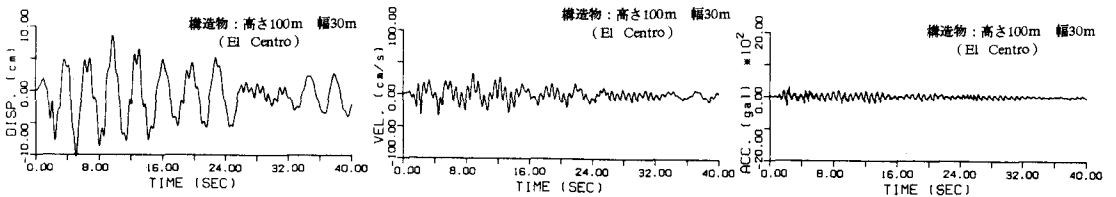


図-3 時刻歴応答

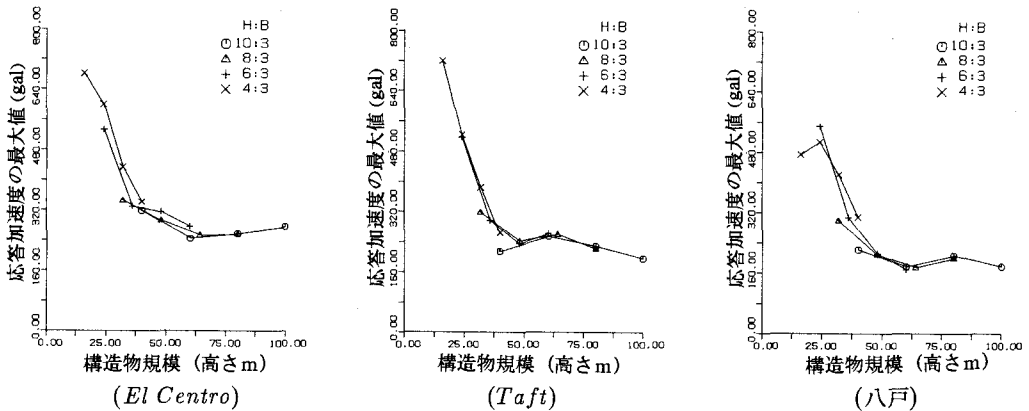


図-4 応答加速度の最大値

El Centro 入射による時刻歴応答のフーリエスペクトルに基づいて、構造物のロッキングの卓越振動数と構造物規模の関係を示したのが図-5 であり、構造物高さとの比のいくつかの場合について示した。図中

の破線は固有値解析より求めたロッキングの固有振動数であり、これは非相互作用系、すなわち構造物がその底面においてばねで支持されているとし、そのばね定数などは道路橋示方書にしたがって定めた。そのときの算定式および数値は次に示すものを採用した。

$$G_D = \gamma_t V_{SD}^2 / g \quad , \quad V_{SD} = c_V V_s$$

$$E_D = 2(1 + \nu_D) G_D \quad , \quad k_{H0} = 10 E_D / 3 \quad , \quad k_{V0} = 10 E_D / 3$$

ここに、 G_D 、 V_{SD} 、 E_D 、 k_{H0} 、 k_{V0} はそれぞれ、地盤の動的せん断変形係数 (tf/m^3)、地盤バネの算出に用いる地盤のせん断弾性波速度 (m/sec)、地盤の動的変形係数 (tf/m^2)、横方向と鉛直方向の地盤反力係数の基準値 (tf/m^3) であり、 γ_t 、 g 、 c_V 、 V_s 、 ν_D は地盤の単位重量 ($1.8tf/m^3$)、重力加速度 ($9.8m/sec^2$)、地盤ひずみの大きさに基づく補正係数 (0.8)、地盤のせん断弾性波速度 (m/sec)、地盤の動的ポアソン比 (0.45) である。

図-5 とほぼ同じ図が *Taft*、八戸についても得られた。図では、非相互作用系のロッキングの卓越振動数は構造物規模が大きい場合は相互作用系と良く似た値を示しているのに対し、構造物規模が小さくなると相互作用系の値より大きくなってしまふ。これは図-4 に示すように、相互作用系では構造物規模が小さい場合には応答加速度が大きくなり、周辺地盤の非線形性が強まって地盤の剛性が低下したことによりロッキングの卓越周期が長くなったためであると考えられる。

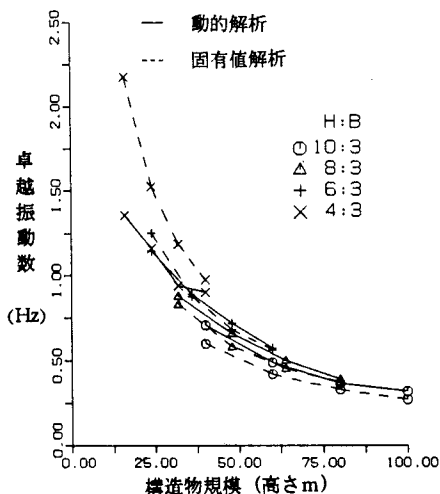


図-5 卓越振動数
(El Centro)

3.2. 転倒の検討 構造物の規模と転倒安全率との関係を3つの入力地震波 (*El Centro*、*Taft*、八戸) について示したものが図-6である。図中には、時刻歴中の構造物重心位置での水平応答加速度の最大値を設計震度としたときの、震度法による安全率を破線で示してある。

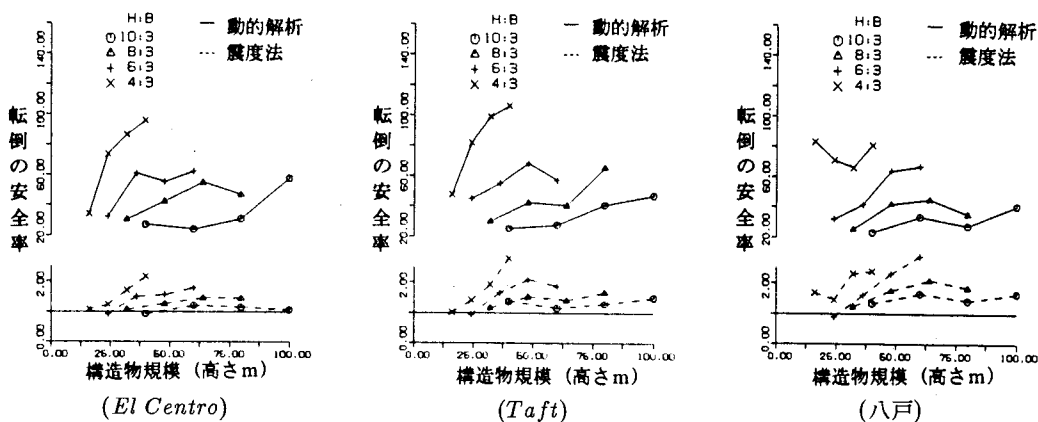


図-6 転倒の安全率

図-6 によれば動的解析の転倒安全率がどの地震波でも震度法の数十倍あり、震度法で考えるほど容易に転倒しないことがわかる。さらに、構造物規模が大きくなれば転倒安全率も大きくなる傾向がみられる。

これまでは転倒に対する安全率で論じてきたが、構造物基礎の耐震安全性の評価基準を構造物が3°傾斜

したときを限界として上と同様の検討を行った。この3°傾斜の安全率と構造物の規模との関係を *El Centro* 波形入射について示したものが図-7である。図中には図-6同様、震度法による安全率を破線で示している。図-7より、この評価基準の動的解析の安全率は破線で示す震度法の数倍大きい値を示している。ただし、震度法では構造物がわずかに傾くような水平震度がかかった場合でも転倒に至ると考えることから、この評価基準の安全率は転倒安全率と等しい値となる。

参考のために *El Centro* 入射時の構造物の高さと幅の比が10:3の場合について、構造物高さ30m、幅9m、高さ20m、幅6mの2ケースを追加し、構造物規模と安全率の関係を図-8に示した。

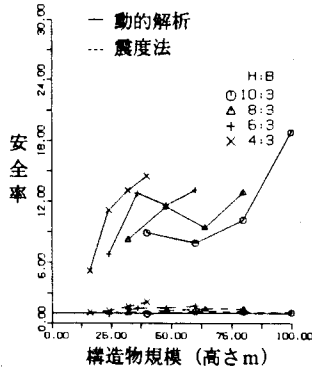


図-7 安全率
(*El Centro*)

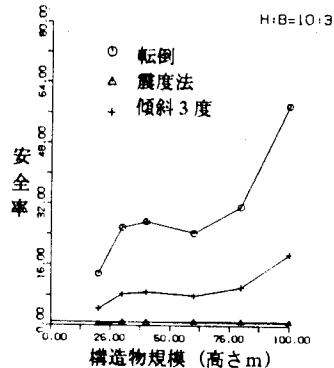


図-8 安全率
(*El Centro*)

4. 結論

本解析により以下に述べることが明らかになった。

- 1) 構造物の転倒の安全率は規模の大きい構造物では重心における応答の最大加速度を設計震度とした震度法によるものの数十倍大きく、震度法で考えるほど容易に転倒しない。また、大略的に見れば、構造物の規模が大きくなれば転倒の安全率が大きくなると考えられる。
- 2) 構造物が3°傾斜した状態を限界状態と定義し、これに対する安全率で耐震安定性を評価しても、なおこの安全率は4程度以上あり、前述の震度法による安全率の数倍大きな値である。

今回の研究から、動的相互作用解析では、地盤の基盤面までの深さ50m、*N*値30、最大入力加速度200galという限られたケースについてしか検討していないが、震度法による転倒の安全率は構造物の形状、地盤条件によっては、過大な設計を要求するものと考えられる。なお、滑動についても同様の検討を行ったが、その結果は発表時に譲る。

参考文献

- 1) Kenzo Toki and Fusanori Miura: Nonlinear Seismic Analysis of Soil-Structure Interaction System, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.11, pp.77-89, 1983
- 2) 三浦房紀・沖中宏志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法、土木学会論文集、第404号/I-11、1989年4月
- 3) 道路橋示方書・同解説、日本道路協会、1990年2月
- 4) 土岐憲三: 構造物の耐震解析、技報堂出版、1985年5月