

○ 武蔵工業大学 大学院 学生員 山崎 武文
武蔵工業大学 土木工学科 正会員 星谷 勝

1. まえがき

本研究では地盤と構造系を簡単な力学モデルで表現し，構造物の損傷を有効入力エネルギー，塑性歪エネルギー，塑性率でとらえて，それらに影響を及ぼす基本的な要因をさぐろうとするものである。力学モデルは図1に示すように均質な地盤上に存在する1自由度弾塑性系を採用し，地震動は鉛直に上昇するせん断波と仮定した。

2. 地盤-構造系の応答解析^{1), 2)}

自由地表面で観測された加速度記録 $\ddot{U}$ をある1自由度系モデルに入力する地震動とすると，その振動方程式は次式で与えられる。

$$M\ddot{X}_u + C\dot{X}_u + Q(X_u) = -M\ddot{U} \quad (1)$$

しかし，(1)式は地盤が完全剛体の場合であるので，厳密には地盤と構造物の相互作用を考慮した有効な加速度 $\ddot{Y}$ を入力地震動としなければならない。そこで $\ddot{Y}$ は次の3式から求める。

$$(1 + C/SPV)\ddot{X} + \{C/M + Q(x)/SPV\}\dot{X} + Q(x)/M = -2\ddot{F} = -\ddot{U} \quad (2)$$

$$(1 - C/SPV)\ddot{X} + \{C/M - Q(x)/SPV\}\dot{X} + Q(x)/M = -2\ddot{G} \quad (3)$$

$$\ddot{Y} = \ddot{F} + \ddot{G} \quad (4)$$

ここで， S = 構造物底面積， PV = 波動インピーダンス， $Q(x) = \alpha k$ ， α = 弾塑性傾斜率。
すなわち，(1)式に代わって，振動方程式は次式ようになる。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + Q(X) = -M\ddot{Y} \quad (5)$$

次にエネルギー量で応答をとらえると，(5)式に $\dot{X}dt$ を乗じ，積分することによって次式が得られる。

$$\int_0^T M\ddot{X}\dot{X}dt + \int_0^T C\dot{X}^2dt + \int_0^T Q(X)\dot{X}dt = -\int_0^T M\ddot{Y}\dot{X}dt \quad (6)$$

ここで左辺第1項は運動エネルギー K_k ，第2項は散逸エネルギー C_k ，第3項は歪エネルギー W_k である。 W_k は弾性歪エネルギー W_e と直接構造物の損傷に結びつく塑性歪エネルギー W_p とから成り，数値解析によらなければならない。右辺は $\ddot{Y}$ が有効入力加速度であるので有効入力エネルギー E_n とする。これに対して総入力エネルギー E_g を次式で定義する。

$$E_g = -\int_0^T M\ddot{U}\dot{X}_u dt$$

すなわち， E_g は自由地表面の地震加速度が全て有効に構造物の振動に寄与する場合のエネルギーである。そこで地盤と構造両特性が入力エネルギーにどのように効いてくるのかを示すパラメータとして「有効係数 η 」を提案する。

$$\eta = \int_0^T M\ddot{Y}\dot{X}dt / \int_0^T M\ddot{U}\dot{X}_u dt \quad ; \quad T = \text{地震動継続時間}$$

また非線形性の度合を示すパラメータ，塑性率(D.F.)は次式で与えられる。

$$\text{D.F.} = X_{\max}/X_y \quad ; \quad X_y = \text{降伏変位}$$

以上に基づいて，地盤-構造系モデルに対する数値解析を行なった1例を図2に示す。本解析で採用した地震加速度 $\ddot{U}$ は1968年十勝沖地震八戸記録E-W成分とした。継続時間は28秒間とし，非線形解析を対象とするために最大加速度を500 galとした。一方，地盤-構造系モデルとしては固有周期 $T_0 = 2.6 \text{ sec}$ ，減衰定数 $\beta_0 = 0.013$ ，弾塑性傾斜率 $\alpha = 0.31$ ，降伏変位 $X_y = 41.9 \text{ cm}$ ， $\theta = 2\beta_0\omega_0 M/SPV = 5.5 \times 10^{-4}$ ， $\beta_1 = \alpha\omega_0 M/SPV = 2.6 \times 10^{-3}$ ，を与えた。なお，図は全て無次元化表示である。図2の上から進行波加速度 $\ddot{Y}$ ，後退波加速度 $\ddot{Z}$ ，有効入力加速度 $\ddot{X}$ を示し，変位，速度，加速度応答を示した。次に履歴復元力特性とエネルギー応答図を示した。解析の結果，有効係数は

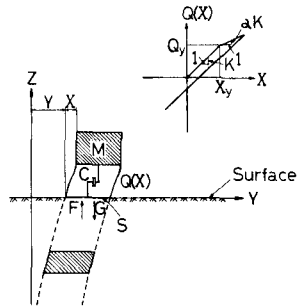


Fig.1 STRUCTURE-SOIL SYSTEM AND RESTORING FORCE CHARACTERISTICS

$\gamma=0.867$, 塑性歪エネルギーは $w_p=3.901 \times 0.872 \times 10^{10} = 3.480 \times 10^{10}$ g·cm , 塑性率は D.F.=1.79 となった。

3. Sensitivity Analysis

構造物の損傷量に密接に関係する量として上記の有効係数, 塑性歪エネルギー, 塑性率を採用し, これらを地震動タイプ T.E., 波動インピーダンス PV, 減衰定数 β , 固有周期 T , 単位面積質量 $P=M/S$, 弾塑性傾斜率 α , 降伏せん断力係数 Q_y/Mg の関数として表わした。これらの損傷量に影響を与える主な要因を評価するためにランダム化した100組の地盤-構造系に対して解析を行ない, その結果に対して数量化理論第1類を適用し, 表1にその結果を得た。なお, 地震動タイプは継続時間を28秒, 最大加速度を500 gal に正規化した3本の実地震データをアイテム, カテゴリーとした。

4. 解析結果

有効係数に影響を与える主な要因は波動インピーダンスであった。すなわち地盤が剛であるほど地震動エネルギーは有効に入力される。

塑性歪エネルギーは単位面積重量が大きく, かつ固有周期が小さくなるほど蓄積されやすいことがわかった。

塑性率に対する主な要因は固有周期, 降伏せん断力係数であった。

また上記の3種のどの量に対しても地震動タイプは大きく影響していることがわかった。

以上の結論は単純な地盤-構造系モデルに対して行なった解析から言えることであり, 地盤の非線形性は考慮に入れてない。さらに地震動特性が重要な支配的要因であることが明らかにされたがそれらに関する検討は不十分である。今後は入力特性要因を抽出して検討することが望まれる。

参考文献 1) 山原浩, エネルギーの平衡を考えた構造物の地震応答, 日本建築学会論文報告集 No.187, 9B, 1971. 2) 加藤 勉, 秋山 宏, 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, No.235, 9B, 1975.

Table 1

外的基準		有効係数 γ		塑性歪エネルギー w_p		塑性率 D.F.	
ITEM	CATEGORY	CATEGORY SCORE	RANGE/ORDER	CATEGORY SCORE (g·cm)	RANGE/ORDER	CATEGORY SCORE	RANGE/ORDER
T.E.	TAFT	0.482		0.147 $\times 10^{10}$		3.283	
	HACHINOHE	0.621	1.289 3	0.538 $\times 10^{10}$	3.662 3	4.555	1.388 3
	PASADENA	0.595		0.259 $\times 10^{10}$		3.766	
PV (gsec/cm ²)	10.0 - 50.0	1.000		1.000		1.000	
	50.0 - 90.0	1.137	1.482 1	1.093	1.258 7	1.037	1.153 5
	90.0 - 130.0	1.482		1.258		0.899	
β	0.0 - 0.025	1.000		1.000		1.000	
	0.025 - 0.05	1.091	1.091 6	0.701	1.426 6	0.914	1.094 6
	0.1 - 0.34	1.000		1.000		1.000	
T (sec)	3.4 - 6.7	1.236	1.264 4	0.115	15.667 1	0.372	3.337 1
	6.7 - 10.0	1.264		0.064		0.300	
	0.1 - 0.4	1.000		1.000		1.000	
P (gsec/cm ²)	0.4 - 0.7	0.974	1.050 7	2.849	4.105 2	0.821	1.290 4
	0.7 - 1.0	0.952		4.105		0.775	
	0.0 - 0.33	1.000		1.000		1.000	
α	0.33 - 0.66	0.898	1.113 5	0.547	1.829 4	1.073	1.077 7
	0.66 - 1.00	0.934		0.698		0.936	
	0.1 - 0.27	1.000		1.000		1.000	
a	0.27 - 0.44	0.976	1.344 2	0.664	1.631 5	0.661	1.690 2
	0.44 - 0.60	0.744		0.983		0.592	

T.E.=Type of Earthquake, PV=Input Impedance of Wave, β =Damping Coefficient, T =Natural Period, P=Mass per Unit Foundation Area, α =Ratio of Elastic and Plastic Moduli, a =Yield Shear Coefficient

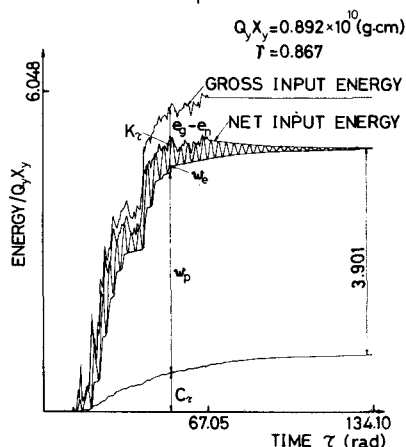
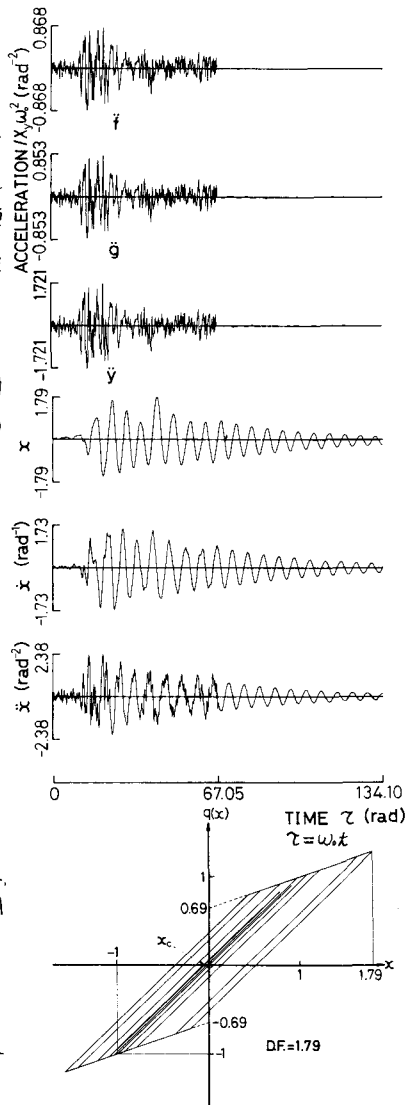


Fig. 2.

(HACHINOHE RECORD, $T=2.6$ sec, $\beta=0.013$, $\theta=5.5 \times 10^{-4}$, $\alpha=0.0026$, $a=0.31$, $X_y=419$ cm)