

地盤連成を考慮した構造物の地震時エネルギー応答特性

Seismic Energy Response Characteristics of Structures Considering Soil-Structure Interaction

北海学園大学工学部土木工学科 正 員 佐々木康彦 (Yasuhiko Sasaki)

北海学園大学大学院工学研究科 ○学生員 川口 靖範 (Yasunori Kawaguchi)

1. まえがき

地震動によって構造物に入力されるエネルギー量は一般に運動エネルギー、減衰エネルギー、履歴エネルギーの各成分として振り分けられる。履歴エネルギーのうち塑性ひずみエネルギー量は、その大小によって構造物の損傷の程度を示すものである。したがって、地震によって加えられる塑性ひずみエネルギー量の適切な評価は、耐震安全性を照査する上で必要不可欠である。

本研究は、地震動を入力される構造物の非線形応答解析をおこない、構造物の内部に蓄積される塑性ひずみエネルギーが構造特性の変化に対応してどのように変化するかを検討した。その際、構造特性をパラメトリックにとる値の範囲を決定するために最大塑性率に着目し解析をおこなった。とくに、本研究では構造特性だけではなく地盤特性の影響も考慮に入れ、さらに地盤毎の有効入力地震動を用いて基礎-地盤-構造物系の相互作用を考慮に入れた検討をおこなった。

2. 解析モデルおよび解析理論

基礎-地盤-構造物系を図-1 に示すような上部構造物の水平 1 自由度と基礎の並進および回転の 2 自由度（基礎-地盤系はスウェー・ロッキングモデル）からなる合計 3 自由度系でモデル化した。基礎の重心点を入力地震動の作用位置と考えた場合、その振動方程式は、構造物が無い時の地表面の動きを z 、自由地盤の地表面に対する構造物および基礎の相対変位を x_1 および x_2 、基礎の回転角を θ とす

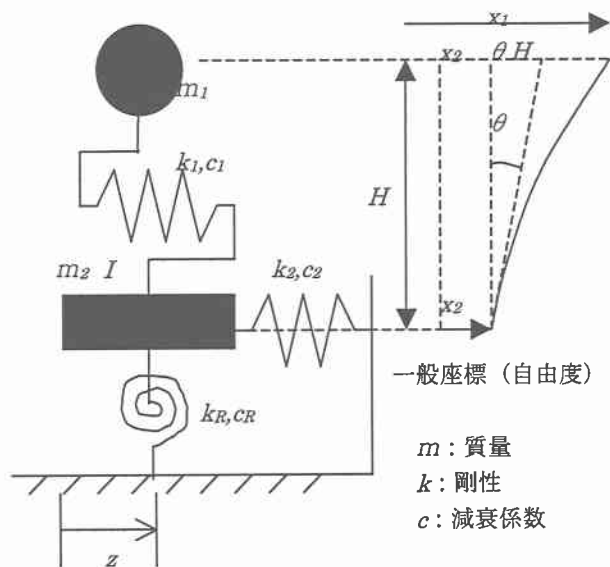


図-1 解析モデル(3自由度系モデル)

るとき、振動方程式は次式ようになる。

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = -[M]\ddot{z} \quad (1)$$

ここに、

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} c_1 & -c_2 & -c_1 H \\ -c_1 & c_1 + c_2 & c_1 H \\ -c_1 H & c_1 H & c_1 H^2 + c_R \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & -k_1 H \\ -k_1 & k_1 + k_2 & k_1 H \\ -k_1 H & k_1 H & k_1 H^2 + k_R \end{bmatrix}$$

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \theta \end{Bmatrix} \quad \{f\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

と表せる。

式(1)においては、復元力特性が線形の場合を示しており、本解析では非線形応答解析を行っているので、構造物のパネが図-2 に示すバイリニア型復元力特性を持つものとし、地盤のパネは線形モデルとして解析を行った。応答計算は数値積分法の1つである Newmark- β 法を用いて行った。

解析モデルの物性値として、道路橋の耐震設計に関する資料¹⁾の中から引用する。上部構造の質量 1714(t)、基礎からの高さを 32.14(m)、減衰定数を 2%、復元力特性は完全弾塑性型($n=1$)とした。基礎の形状は高さ 3.5(m)、幅 11.6(m)、奥行き 14.0(m)、質量 1421(t) とし、これを固定値とする。更にパラメトリックな構造特性値として、基礎、地盤を考慮しない構造物の弾性時固有周期 T と降伏強度係数を導入し、それを $\gamma = Q_y / m \ddot{u}_{\max}$ とする。これは、

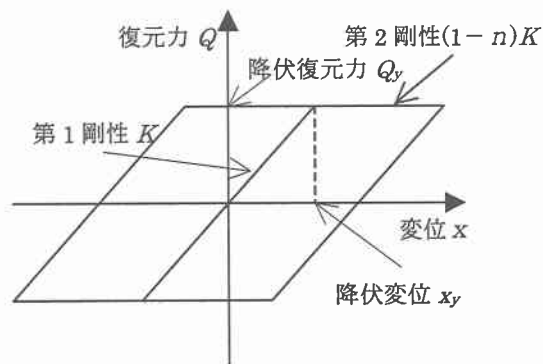


図-2 Bi-linear 型復元力特性

構造物の降伏強度に対する入力地震動による最大慣性力の比で、構造物の有する降伏強度レベルと地震力の大きさとの相対関係を表すパラメータである。

地盤の物性値は表-1 に示す。地盤の水平バネの剛性 k_2 、減衰係数 c_2 、回転バネの剛性 k_R 、減衰係数 c_R 、も3種類の地盤特性と基礎の寸法の関数として近似的に算出した値²⁾を解析に用いる。図-3 に示す想定地盤の側面と底面には粘性境界を設定し、逸散波を吸収し反射波を抑制した。

3. 入力地震動

入力地震動としては地表面の地震動だけでなく、地震動の空間的変動を考慮した有効入力地震動を地盤ごとに設定した。図-3 に示す想定地盤の地表面に 実際に観測された兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台（南北成分）の地表面地震波を設定し、図-3 の底面での加速度を重複反射理論³⁾より逆算する。逆算された地震波が、想定した物性値を与えた地盤中の、質量を零とし剛性を無限大にした基礎部重心位置に作用する時の加速度記録を、本解析では有効入力地震動として使用する。

図-4 にせん断波速度 250(m/s)時の有効入力地震動を示す。元のデータである神戸海洋気象台地表面地震波と比較して概観に大差は無いが加速度の最大値で約 60gal 程度

表-1 想定地盤の物性値

	完全剛体地盤	硬質地盤	軟質地盤
V_s	∞ (m/s)	341(m/s)	250(m/s)
ρ_t	18.6(t/m ³)	18.6(t/m ³)	16.7(t/m ³)
ν		0.45	0.45
h		2(%)	2(%)

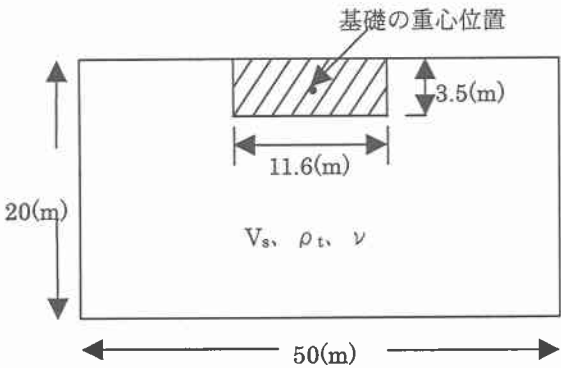


図-3 想定地盤

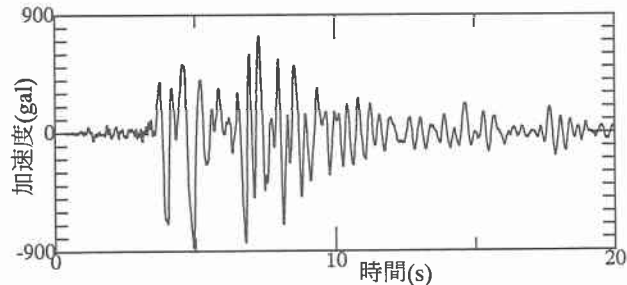


図-4 有効入力地震波($V_s=250\text{m/s}$)

大きくなっている。せん断波速度 341(m/s)時の有効入力地震動と地表面地震波を比較すると最大値で約 6gal 程度の変化しかなく、相当に硬い物性値を与えているがわかる。

4. 最大応答塑性率 M.D.F.の算出

地震時の構造物の弾塑性応答では、その強度の高低によって変形状やエネルギー性状も異なると考えられる。そこで、実構造物の耐震設計で規定される構造物の変形制限の条件、すなわち応答塑性率 D.F. (Ductility Factor) と許容塑性率を指標として、強度レベルと変形の関係から降伏強度係数 γ のとり得る値の範囲を検討する。

今、地震動を受ける構造物の地震継続時間内の最大の応答塑性率 M.D.F. (Maximum D.F.) を次式で定義する。

$$\text{M.D.F.} = |X|_{\max} / X_y$$

($|X|_{\max}$: 最大応答変位)

この M.D.F.を前述の3つの有効入力地震動記録を用いて、2つのパラメータ、降伏強度係数 γ ($=0.1\sim1.0$) および固有周期 T ($=0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ 秒) について求める。まず、固定値である上部構造物の質量、減衰定数とパラメトリックな値である固有周期、降伏強度係数から減衰係数 c 、剛性 K 、降伏変位 x_y を算出し、次に最大応答変位 $x_{\max}$ を求めるために3種類の地盤に対してそれぞれの有効入力地震動を用いて非線形応答解析をおこなった。例として構造パラメータが $T=1.2(\text{s})$ 、 $\gamma=0.4$ と $T=1.2(\text{s})$ 、 $\gamma=0.3$ でそれぞれ完全剛体地盤、軟質地盤時の時刻歴応答解析の結果を図-5、図-6 に示す。

パラメトリックな T 、 γ に対しての M.D.F.値を表-2、表-3、図-7 に示す。この表または図からわかるように M.D.F.は γ が小さくなるほど大きな値を示している。 γ というのは、地震による慣性力に対して構造物の降伏復元力の割合を示していることから、 γ の値が下がるという事は、系の応答が塑性域に達し、地震によって入力されるエ

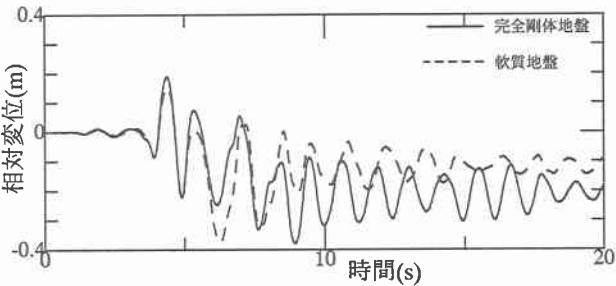


図-5 上部構造の相対変位 ($T=1.2$ $\gamma=0.4$)

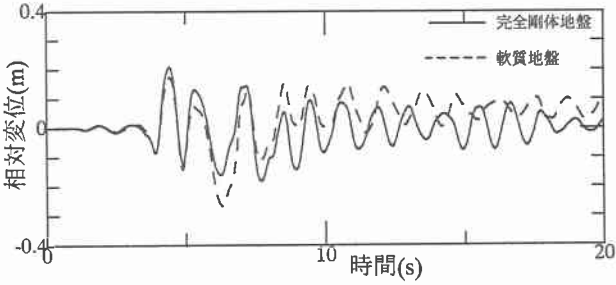


図-6 上部構造の相対変位 ($T=1.2$ $\gamma=0.3$)

エネルギーを履歴復元力によって大きく吸収し、その分大きな塑性変形を強制されることによるものである。さらに、M.D.F.は T が短くなるほど大きな値を示している。 γ が一定で T が短周期になるという事は剛性が増加し降伏変位が小さくなる事を示しており、その際、系が弾性変形している時間は短いはずで、復元力が一定であればその分塑性域に入ってからの変形量は大きくなると思われ、その結果 M.D.F.値は増加すると考えられる。

構造種別や構造様式によって異なるが、一般に実構造物の許容塑性率は約 8 程度までと考えられ、この値を考慮すれば本解析での工学的に妥当と判断できる強度レベルは、表-2、表-3 中の網掛けの部分である。

表-2 と表-3 を比較する事でわかるように、構造物の特性が一定であっても地盤の違いによって最大応答変位 $x_{\max}$ が変化し、そのまま M.D.F.値に反映される。上部構造の基礎に対する相対変位は一般的なイメージでは、図-5 に示される様に軟質地盤の方が剛体地盤より小さくなると思われる。それは、地震動によって入力されるエネルギーが地盤の粘性によって吸収され、構造物に入力されるエネルギーが減少するためである。しかし、図-6 に示される様に軟質地盤の方が剛体地盤より大きくなる場合がある。これは、振動中に生じた残留変位によって結果的に応答変位の大小に影響を与えている場合や、構造系の T が同値であっても地盤を考慮することにより全体系の T が変化し、その値が入力地震波の卓越周期と共振した場合などが理由として考えられる。

5. エネルギー応答解析の基本式

エネルギー応答に関する基本式は、式(1)の各項に $\{\dot{x}\}dt$ を乗じ、求める時間 t まで積分を行うことにより次式が得られる。

$$\int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T \{F(t)\} dt = - \int_0^t \{\dot{x}\}^T \{P(t)\} dt \quad (2)$$

$P = [M] \ddot{x}$: 地震力、 $\{F(t)\} = [K] \{x\}$: 復元力

各項は左辺より運動エネルギー W_k 、減衰エネルギー W_D 、履歴エネルギー W_H を表し、右辺は地震動による全入力エネルギー E を表し、次式に書き換えることができる。

$$W_k + W_D + W_H = E \quad (3)$$

運動エネルギー W_k は、他のエネルギー W_D 、 W_H 、 E とは異なり、時刻の経過とともに累積する量ではなく、時々刻々系に運動を与えるエネルギーである。また、地震動の終わりになれば 0 に近づく。したがって、構造物の振動が終了する時点でのエネルギーの釣り合い関係は次式で表される。

$$W_D + W_H = E \quad (4)$$

履歴エネルギー W_H は、構造物の振動が継続している間では、弾性ひずみエネルギー W_E と塑性ひずみエネルギー W_p の和である。このエネルギーは、図-2 で示される復元力特性の履歴面積を算定することより得られる。一方、構造物の振動終了時まで系に累積する塑性ひずみエネルギー

表-2 M.D.F.と γ 、 T の関係 (完全剛体地盤)

	$\gamma=0.1$	$\gamma=0.2$	$\gamma=0.3$	$\gamma=0.4$	$\gamma=0.5$	$\gamma=0.6$	$\gamma=0.7$	$\gamma=0.8$	$\gamma=0.9$	$\gamma=1.0$
$T=0.4$	69.41	43.77	36.64	32.28	25.23	18.77	13.75	9.18	6.35	4.53
$T=0.6$	28.34	18.60	13.92	11.79	10.26	8.37	6.62	5.00	3.94	2.91
$T=0.8$	11.37	6.55	5.89	4.90	3.83	3.31	3.19	3.31	2.96	2.53
$T=1.0$	9.41	4.38	3.13	2.33	2.36	2.29	2.22	1.92	1.64	1.43
$T=1.2$	6.50	4.19	2.34	3.18	3.15	2.78	2.00	1.50	1.20	1.20

表-3 M.D.F.と γ 、 T の関係 (軟質地盤)

	$\gamma=0.1$	$\gamma=0.2$	$\gamma=0.3$	$\gamma=0.4$	$\gamma=0.5$	$\gamma=0.6$	$\gamma=0.7$	$\gamma=0.8$	$\gamma=0.9$	$\gamma=1.0$
$T=0.4$	54.76	29.83	24.05	21.95	17.76	14.69	12.38	11.62	10.93	9.28
$T=0.6$	20.80	8.90	6.90	5.88	5.16	4.44	3.95	3.62	3.25	2.85
$T=0.8$	14.36	7.14	4.66	3.79	3.05	2.99	2.92	2.76	2.26	1.89
$T=1.0$	9.33	5.83	3.20	3.85	4.05	3.49	2.67	1.89	1.56	1.44
$T=1.2$	10.48	4.74	2.95	3.13	2.68	2.13	1.75	1.57	1.38	1.24

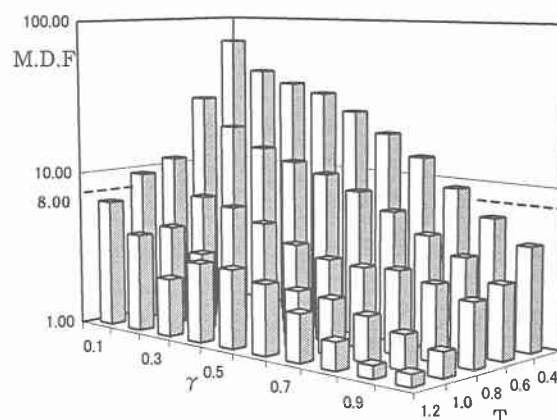


図-7 M.D.F.と γ 、 T の関係 (完全剛体地盤)

一は、履歴復元力によって吸収され、その量は復元力特性の履歴面積で示される。したがって、地震動を受ける構造物が弾塑性応答をした場合、振動終了時には $W_H = W_p$ となる。

6. 数値解析結果

ここでは、前述の有効入力地震動記録と 3 自由度の解析モデルを用いて数値解析を行い、地盤特性と構造特性が入力エネルギー量 E 、塑性ひずみエネルギー量 W_H に及ぼす影響を検討する。その際、本解析では 1 種類の地震動記録を用いているので、入力される地震動による固有な特性を低減するために無次元量 W_H/E を導入し検討を進める。解析に用いる構造特性のパラメータ (固有周期 T 、降伏強度係数 γ) は、4 章で行った M.D.F.の算出において工学的に妥当と判断される範囲のみを使用する。その値は、

$$\left(\begin{array}{l} T = 0.6, \quad \gamma = 0.7 \sim 1.0 \\ T = 0.8, \quad \gamma = 0.2 \sim 1.0 \\ T = 1.0, \quad \gamma = 0.2 \sim 1.0 \\ T = 1.2, \quad \gamma = 0.2 \sim 1.0 \end{array} \right)$$

とする。地盤モデルと有効入力地震動は表-1、図-3 に示した特性値をもつ 3 種類を使用する。

解析結果の例として、硬質地盤上の系での W_H/E と T 、 γ の関係を図-8 に示す。 T が短周期になる程、 γ が小さくなる程 W_H/E の値は大きくなっている事がわかる。これは γ の値が下がる事で、系の応答がより塑性域にある時間が長くなるためであり、さらに γ が一定であれば T が短周期になる程、系が塑性変形するまでの時間は短いのでこのような結果になる。この結果は他の地盤上でも同じような形状を示している。

次に、 W_H/E と想定地盤、 γ の関係の $T=0.8$ 秒の場合を図-9 に示す。図には示さないが $T=0.6$ 秒の場合も同じようなグラフ形状を示した。 T が一定の時 γ が小さくなる程 W_H/E が増加する事は前述したが、この図からは、想定地盤が軟らかくなる程 W_H/E が減少していることもわかる。これは一般的に上部構造の系の特性が一定で地盤が軟らかくなれば、入力されるエネルギーの振り分けのうち、地盤の粘性減衰によって消費されるエネルギー量は増加し、その分上部構造の系で消費される履歴エネルギーは減少すると考えられるためである。しかし、上部構造の系の特性が同一であっても地盤の特性が変われば、全体系としての特性も変化するので、入力されるエネルギー量自体が変化し、塑性ひずみエネルギー量との割合も刻々変化するので必ずしも図-9 のような傾向を示すわけではない。例えば本解析での $T=1.0$ 、 1.2 秒の場合には、パラメトリックな γ の変化による 18 通りの解析結果中、地盤の軟化によって W_H/E が減少したのは 2 通りだけであった。例として $T=1.2$ 秒の場合のみ図-10 に示す。

今回の場合、地盤による W_H/E を示す解析結果が、 $T=0.6$ 、 0.8 秒では地盤の軟化によって W_H/E が減少する傾向を示したのに対し、 $T=1.0$ 、 1.2 秒では同様な傾向をほとんど示していない。これは前述した全体系の特性変化によるものではなく、 $T=1.0$ 、 1.2 秒という周期を持つ剛性では、想定した 3 種類の地盤の剛性変化程度では地盤の粘性減衰による消費エネルギーが増加しない程、軟らかいためだと思われる。逆に $T=0.6$ 、 0.8 秒という周期を持つ剛性では、地盤の剛性変化に対して十分に硬いため、地盤の粘性減衰による消費エネルギーが増加し図-9 のような傾向になるとと思われる。

7. まとめ

本研究は、基礎・地盤・構造物系を連成させた 3 自由度モデルに対して地震動入力による非線形応答解析を行い、構造特性パラメータや地盤特性の変化による、構造物の最大塑性率 M.D.F に対する影響を検討し、さらに塑性ひずみエネルギーに対する影響を入力エネルギーとの比 W_H/E で検討した。

最大塑性率は、構造物の固有周期が短くなるほど、降伏強度係数が小さくなるほど高い値を示す傾向が見られた。この結果は理論的に妥当と判断できる一方、地盤特性による影響では、大略的には地盤剛性が高くなるほど最大塑性率は増加しているが、固有周期、降伏強度係数による影響ほどには顕著ではない。これは、基礎・地盤・構造物系の相互作用の影響で、地盤剛性の設定値に対して構造特性 $T=$

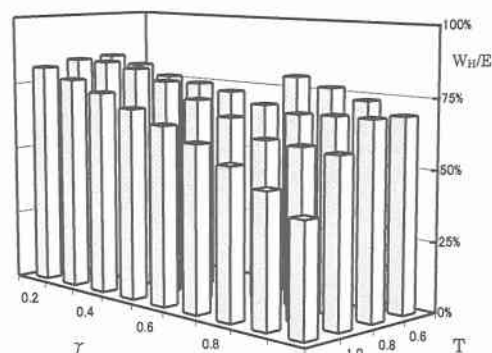


図-8 W_H/E と T 、 γ の関係(硬質地盤)

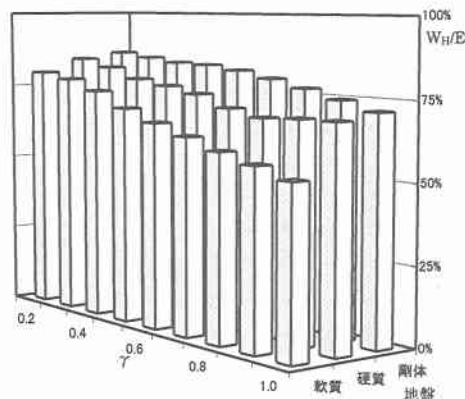


図-9 W_H/E と地盤、 γ の関係($T=0.8$ s)

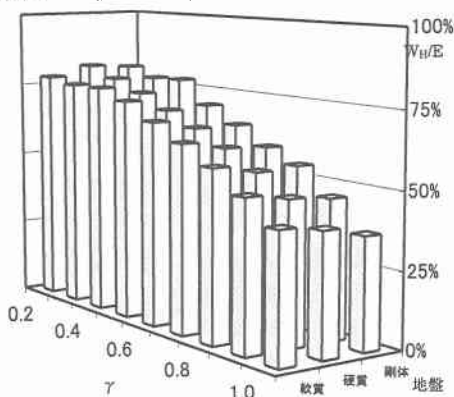


図-10 W_H/E と地盤、 γ の関係($T=1.2$ s)

1.0、1.2 秒として示される構造物の剛性が、割合として低く見積られる為であると考えられる。 W_H/E に着目した場合も、構造特性の変化による結果は妥当な値を示すが、地盤特性の変化による結果では $T=1.0$ 、 1.2 秒の範囲で前述した影響が見られた。

今回の研究では、構造物の最大塑性率と塑性ひずみエネルギーに着目し、構造特性、地盤特性の変化に対応してどのように変化するかを検討したが、今後は入力地震動特性もパラメータに入れ、より一般的な検討結果を示したい。

参考文献

- 1) 日本道路協会編：道路橋の耐震設計に関する資料、丸善、1998。
- 2) 土木学会：動的解析の方法、動的解析と耐震設計第 2 巻、技報堂出版、1989。
- 3) 石原研而・木村孟：土木工学体系 8 土質力学－土の力学的挙動と地盤の地震応答解析－、彰国社、1980。