

## 地盤との連成効果を考慮した RC 造建物の震害に関する研究

望月 利男\* 松田 磐余\*\* 荏本 孝久†  
宮野 道雄†† 小泉 敏一††

### 要 約

中低層の RC 造建物は地震時にしばしば被害を受ける。特に、1968年十勝沖地震ならびに1978年宮城県沖地震時には近代的な RC 造建物が少なからず被害を受けた。これらの造建物の被害と地盤との関係については既往の被害調査に基づく検討結果から両者の相関性が比較的明瞭であり、その傾向を無視することができないと報告されている。しかしながら都市に多く分布している同様な中低層 RC 造建物の地震時の被害を地盤との相関性を考慮して解析的に検討された研究は、その重要性にもかかわらずまだ数少ない。そこで本研究では、主に Dynamical Ground Compliance 理論に基づいて地盤—建物連成効果を考慮した RC 造建物の振動モデルを作成する手法を用いて、表層地盤の地盤特性をパラメトリックに変化させた場合の地盤—建物連成系の質点モデルを作成し、次いで応答解析を実施することによって RC 造建物の地震時の被害についての解析的な研究を試みることにした。その結果、すでに調査報告された RC 造建物の地震時の被害と地盤の相関性に関する傾向が、応答計算によって解析的に検討された結果と比較的良好な対応関係を示したので報告する。

### 1. ま え が き

RC (鉄筋コンクリート) 造建物は大地震時にしばしば倒壊等の被害を受ける。例えば、1968年十勝沖地震では近代的な RC 造建物の振動被害が見られた。また、1978年宮城県沖地震においても少なからず RC 造建物の被害が発生している。これらの RC 造建物の被害については地震時の被害調査ならびに解析が各方面で行なわれ報告されている。例えば、1968年十勝沖地震時に災被災した RC 造建物のみならず被災地に存在したすべての RC 造学校建物を対象とした詳細な解析から被害の差異および原因を構造面から説明づけた研究 (青山ほか、1971)。また、志賀ほかは49棟の RC 造建物の壁・柱率などを調べ、それらの量と被害の相関性を明らかにした (志賀ほか、1975)。そして、これらの研究成果は耐震診断等に有益に活用されている。一方、RC 造建物の被害が地盤との関係を無視できないとの考えから、1968年十勝沖地震における被災地域内の主に RC 造学校建物に

ついて被害と地盤との関係を示している (望月ほか、1978)。また、同様な調査を1978年宮城県沖地震の被災地における RC 造建物についても実施し、RC 造建物の被害と地盤の性質との相関性が極めて高いことを指摘している (望月ほか、1979)。このことは木造建物とは別に RC 造建物のような重量構造物の被害については地盤と建物の相互作用を考慮した検討が必要であることを示していると考えられる。しかしながら、これらの RC 造建物の被害について、ある特定の建物の被害に着目して振動学的見地から解析的に検討された報告は見られるが、地盤との関係を考慮して全体的な RC 造建物の被害傾向を解析的に検討した研究は、これまでにあまり例がなく例えば都市の地震防災学的な立場から都市部に存在する多数の RC 造建物の地震時危険度や被害想定を実施するためには、まだ不十分な点がある。

一方、地盤と建物の相互作用を解析的に検討する手法は Dynamical Ground Compliance 理論としてまとめられている (小為・南井ほか、1965、1966)。この理論は地盤—建物系の相互作用を建物基礎周辺地盤のバネ効

\* 東京都立大学都市研究センター・工学部 (現在：福井工業大学工学部)

\*\* 東京都立大学都市研センター・理学部

† 神奈川大学工学部

†† 東京都立大学工学部

果と減衰効果として評価する方法で、この手法を用いて、地盤建物系の地震時の挙動を実測の強震計記録を用いて検討する研究結果が報告されている。その結果、実測結果と計算結果が比較的良好に対応していると報告している(石田・大沢, 1976)。

本研究は、これまでに調査・研究された貴重な資料ならびに結果に基づき、上記のことを考慮して1968年十勝沖地震ならびに1978年宮城県沖地震における RC 造建物の震害に関して、Dynamical Ground Compliance 理論に基づく地盤-建物系の連成効果を考慮した RC 造建物の振動モデルを作成し、RC 造建物の震害に関する解析的な検討を試みたものである。

## 2. 地盤の S 波速度の推定式

地盤の振動性状や地盤と建物の相互作用に関して弾性波動理論を用いて解析的な検討を実施するためには、弾性体と仮定される地盤の性質を示す物理定数としての S 波速度、P 波速度、ポアソン比および密度等の指標を必要とする。特に、地震工学・耐震工学の分野では S 波速度に関する情報を必要とする。これらの物理定数は弾性波探査 (P-S 検層) や同時に実施される標準貫入試験によって調査され、その数値が与えられる場合が多い。しかしながら、これらの弾性波探査の試験結果は地域的な調査密度として必ずしも満足のいく程度数得られていない。

そのために既存の弾性波探査資料を用いて地盤の S 波速度と他のより入手しやすい土性指標との関係式を求め地盤の地震応答計算などに供しようとする試みがこれまで

に多くなされている。その中で古くから実施され数も多いものは標準貫入試験の結果として得られる N 値を変数として S 波速度を求めようとする研究である。N 値は土の剛性あるいは強度に関係する土性指標として土木・建築工学の分野で広く活用され、しかも比較的容易に測定できる利点があるため既存の資料も豊富である。しかしながら、この値は土質毎に一律でなく例えば、砂質系の土の場合、同一の締り方であってもその土被り厚さにより深さの増加とともに N 値が増加することはよく知られている。また、粘性土の場合は粘着力を主とするその抵抗性状からみて同一の N 値であっても砂質土とは異った評価をすべきであると思われる。このような観点から従来の推定式を改良する目的をもって、筆者らはすでに N 値の他に各地層の存在深さを変数として加え、さらに地盤の形成年代および土質毎に区分した S 波速度推定式を線型関数の形で作成した(田治米・望月・松田, 1977)。一方、太田・後藤は同様に S 波速度を推定するために N 値の他に深さを変数に加え、更に数量化理論を用いて形成年代・土質をカテゴリー数量として数値的な重みで係数を表わす試みを行って S 波速度推定式を作成している(太田・後藤, 1976)。また、今井は各土質毎に S 波速度の推定値を示している(今井, 1976)。

本研究では、これまでの弾性波探査資料数の増加に伴って前述の S 波速度の推定式に若干の改良を行い新たな推定式を作成することとした。すなわち、筆者らが求めた前述の推定式の線型関数であったため、目的変数 (S 波速度) のとり得る値の全域を十分包含し得ない傾向があった。そこで、本研究では S 波速度の推定式を次式で示す指数関数型で表わすこととした。

表 1 静都圏における S 波速度推定式の各係数  
(沖積地盤)

Soil	Data	a	b	c	R	$\sigma$
Clay	73	55.56	0.2592	0.2381	0.88	39.9
Silty Clay	17	70.81	0.4259	0.0423	0.85	24.4
Sandy Clay	23	86.16	0.1057	0.1217	0.80	18.4
Silt	74	88.40	0.0241	0.1092	0.52	16.7
Sandy Silt	44	59.29	0.1333	0.2757	0.81	28.9
Sand	87	97.11	0.1993	0.0641	0.64	52.5
Fine Sand	48	72.53	0.1116	0.2855	0.85	45.8
Medium Sand	5	125.7	0.1470	0.0529	0.66	22.3
Clayey Sand	22	84.09	0.1894	0.2283	0.88	43.0
Silty Sand	48	66.37	0.1789	0.2313	0.84	32.4
Gravelly Sand	16	103.2	0.1794	0.1719	0.87	54.3
Gravel	30	83.62	0.1056	0.2945	0.81	59.1
Banking	72	86.34	0.1415	0.1210	0.67	30.0
Humus	20	43.41	0.0769	0.3982	0.93	38.1

R: Multiple Correlation Coefficient  
 $\sigma$ : Standard Deviation

表 2 首都圏における波速度推定式における各係数  
(洪積地盤)

Soil	Data	a	b	c	R	$\sigma$
Clay	84	111.7	0.2123	0.1071	0.73	68.8
Sandy Clay	37	83.59	0.1690	0.2340	0.87	48.5
Silt	21	101.2	0.1806	0.1493	0.68	71.6
Sandy Silt	38	81.53	0.2425	0.1453	0.89	44.5
Loam	48	132.9	0.0272	0.0952	0.64	14.6
Gravelly Loam	5	13.93	0.0942	1.0456	0.89	20.2
Sand	145	77.94	0.2306	0.1924	0.88	59.2
Fine Sand	178	108.4	0.1610	0.1928	0.78	63.9
Medium Sand	35	103.0	0.2571	0.1001	0.87	55.1
Silty Sand	59	75.52	0.2128	0.2185	0.82	68.2
Gravelly Sand	20	62.09	0.3115	0.1866	0.89	56.0
Gravel	126	160.9	0.1998	0.0546	0.72	54.7

R: Multiple Correlation Coefficient  
 $\sigma$ : Standard Deviation

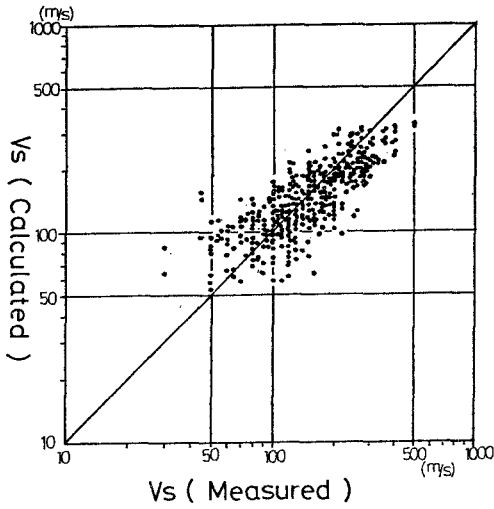


図 1 首都圏における S 波速度の実測値と計算値の比較 (沖積地盤)

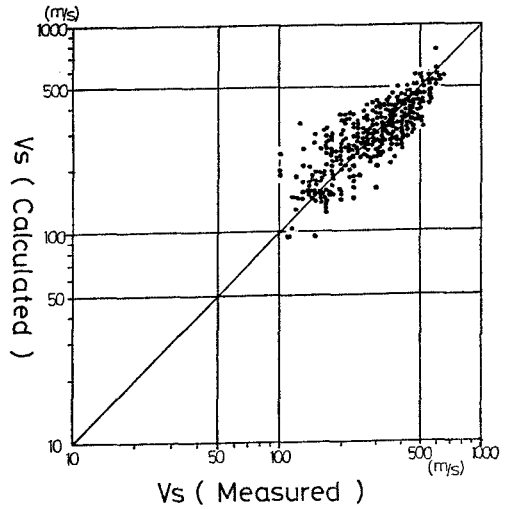


図 2 首都圏における波速度の実測値と計算値の比較 (洪積地盤)

表 3 全国 (首都圏と北海道を除く) の S 波速度推定式の各係数 (沖積地盤)

Soil	Data	a	b	c	R	$\sigma$
Clay	59	70.96	0.2300	0.1543	0.88	23.5
Silty Clay	35	28.23	0.3983	0.4698	0.88	47.6
Sandy Clay	26	147.0	0.1263	0.0160	0.81	27.8
Humus Clay	8	48.27	0.5211	0.0249	0.82	30.9
Silt	75	80.21	0.2555	0.1167	0.85	38.0
Clayly Silt	28	83.72	0.0556	0.1544	0.82	14.8
Sandy Silt	53	78.03	0.1030	0.2335	0.87	28.9
Humus Silt	12	44.24	0.3968	0.0812	0.88	10.1
Sand	78	84.91	0.1607	0.1661	0.93	23.8
Fine Sand	82	79.79	0.2055	0.1428	0.84	32.8
Medium Sand	30	56.12	0.3861	0.0557	0.86	68.8
Rough Sand	19	88.78	0.2184	0.1856	0.86	45.4
Clayly Sand	17	67.69	0.3298	0.1294	0.91	30.5
Silty Fine Sand	39	78.18	0.1778	0.1558	0.82	29.2
Silty Sand	43	70.56	0.2096	0.1941	0.86	30.9
Gravelly Sand	21	121.4	0.1546	0.0630	0.81	28.7
Gravel	86	74.39	0.3183	0.0498	0.85	47.5
Clay Gravel	14	138.1	0.2127	0.0032	0.87	39.9
Banking	72	109.5	0.1558	0.0760	0.71	36.8
Humus	8	42.11	0.3583	0.2218	0.95	83.5

R: Multiple Correlation Coefficient  
 $\sigma$ : Standard Deviation

表 4 全国 (首都圏と北海道を除く) の S 波速度推定式の各係数 (洪積地盤)

Soil	Data	a	b	c	R	$\sigma$
Clay	50	185.5	0.0637	0.0597	0.71	22.8
Silty Clay	37	106.7	0.3236	0.0086	0.80	40.8
Sandy Clay	32	155.7	0.1439	0.0556	0.68	54.2
Silt	18	226.6	0.0391	0.0325	0.47	19.4
Loam	12	87.74	0.0345	0.3467	0.74	50.8
Sand	82	108.0	0.1370	0.1575	0.85	32.9
Fine Sand	31	125.4	0.0681	0.1468	0.84	24.9
Clayly Sand	19	180.0	0.0763	0.1253	0.62	46.9
Silty Sand	54	116.7	0.1007	0.1950	0.80	47.0
Gravelly Sand	43	156.4	0.0318	0.2266	0.80	50.7
Gravel	118	155.0	0.0578	0.2192	0.81	55.3

R: Multiple Correlation Coefficient  
 $\sigma$ : Standard Deviation

$$V_s = a \cdot N^b \cdot D^c \quad \dots(1)$$

- $V_s$ : S 波速度 (m/sec)
- $N$ : 標準貫入試験による N 値
- $D$ : 土厚の存在深さ (地表面から土質の中間点までの深さ m)
- $a, b, c$ : 重回帰分析から土質および形成年代によって決まる係数

推定式作成にあたっては、実用上ならびに地域的な資料数の片寄りを考慮して、東京都を中心とする首都圏と首都圏および北海道を除く全国とに区分して (北海道を除くのは、他地域と比べて土質の形成過程がやや異なる

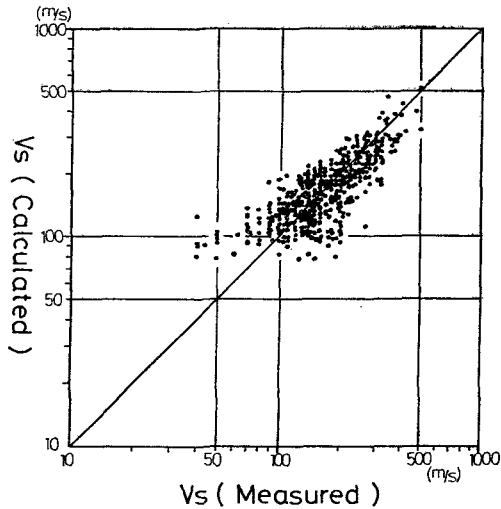


図3 全国(首都圏と北海道を除く)におけるS波速度の実測値と計算値の比較(沖積地盤)

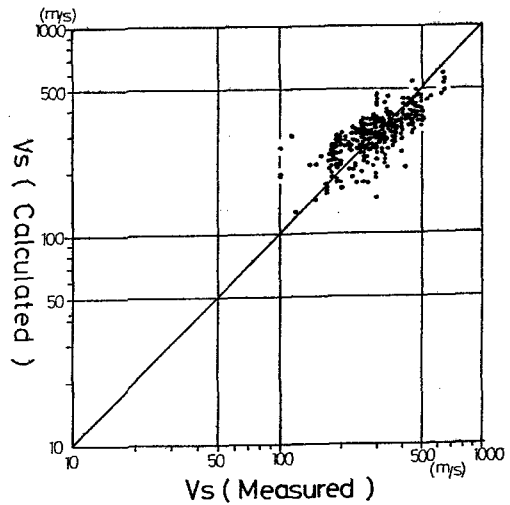


図4 全国(首都圏と北海道を除く)におけるS波速度の実測値と計算値の比較(洪積地盤)

ことによる。), 従来と同様に形成年代と土質により別々に推定式を求めた。

なお, 土質の形成年代による区分は沖積層と洪積層の2種類に区分し, 土質区分は大別して粘土, シルト, ローム, 砂, 砂礫, 腐食土とし, 砂についてはその粘土により細砂, 粗砂の区別を行い, 更に各土質が混合する場合は例えばシルト質砂(砂が主成分)のように分類を行っている。本解析に使用した弾性波探査の検層孔数は上記首都圏で153地点, 全国で121地点である。表1は, 首都圏の資料から作成した沖積地盤の各土質別のS波速度推定式の各係数であり, 表2は同じく洪積地盤の推定式の各係数である。表中にはデータ数, 重相関係数ならびに標準偏差も併記されている。また, 図1, 図2は各々表1, 表2の推定式作成に用いた資料のS波速度の実測値と推定式による計算値とを比較した結果を示している。同様に, 首都圏と北海道を除く全国の資料から求めた結果を表3, 表4および図3, 図4に示す。

以上の結果によれば, いくつかの例外を除けば全般的に可成り良好な相関性を示しており, 実用上満足できるS波速度の推定式が得られたものと考えられる。

### 3. RC造建物の被害

地震時におけるRC造建物の倒壊等の顕著な被害は, 1968年十勝沖地震ならびに1978年宮城県沖地震時にも認められた(日本建築学会, 1968, 1980)。本研究を実施するにあたって, これらの地震時のRC造建物の被害のうち調査が実施された建物棟数は無被害の建物も含めて十勝沖地震では71棟, 宮城県沖地震では154棟であ

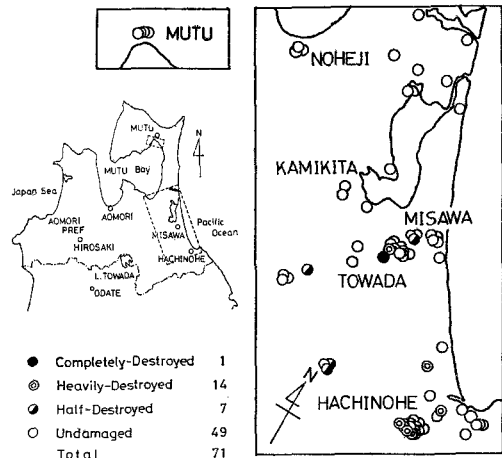


図5 1968年十勝沖地震におけるRC造建物の被害分布

る。図5～図7に調査建物の被害程度とその分布を示す。なお, 調査対象建物は主に3～4階建程度の低層の学校建築および事務所建築である。

図より, 1968年十勝沖地震では青森県八戸市, 三沢市および十和田市周辺に被害が集中し, 1978年宮城県沖地震では2月20日の地震の際には宮城県北部地域に, 6月12日の地震の際には仙台市内の苦竹, 卸町, 長町および原町付近に被害が集中している。また, その構造的な被害の形態としては, 建物の長手方向の柱のせん断破壊あるいは柱および壁のせん断亀裂などの構造部材の破損による被害が両地震におけるRC造建物被害に多く見ら

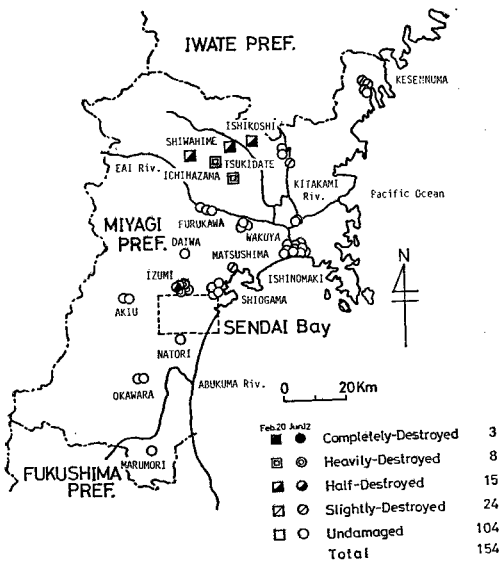


図 6 1978年宮城県沖地震における RC 造建物の被害分布（仙台市を除く）

れた。

#### 4. RC 造建物の被害と地盤の関係

RC 造建物の被害が地盤性状と相関性が高いことは、すでに望月らによって十勝沖地震時の RC 造建物被害についての報告がなされている。

本研究では、前章で示された十勝沖地震ならびに宮城県沖地震における RC 造建物の被害について、上述とほぼ同様な地盤性状との相関性について、次章以降の解析的な検討結果との対比を考慮して、より一般的な地盤種区分に対して被害棟数分布をまとめることとした。

地盤種の区分は建設省総プロによる第1種地盤から第4種地盤とし、すでに調査が実施され資料が収集されている両地震時の RC 造建物の分布ならびにボーリング柱状図に基づいて地盤種別区分の判定ならびに各地盤種毎の被害建物棟数の分布を算定した。その結果を図8に示す。

図より、十勝沖地震では第2種および第3種地盤に被害建物が多く分布し、宮城県沖地震では第1種および

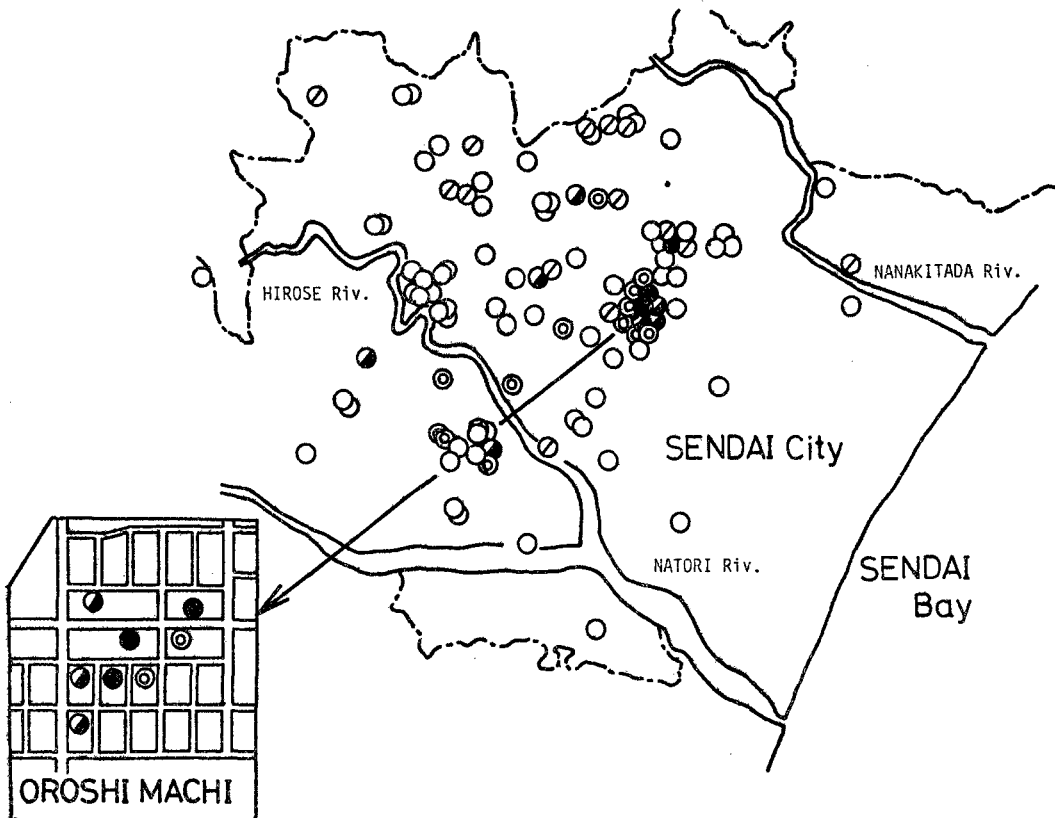


図 7 1978年宮城県沖地震における RC 造建物の被害分布（仙台市）

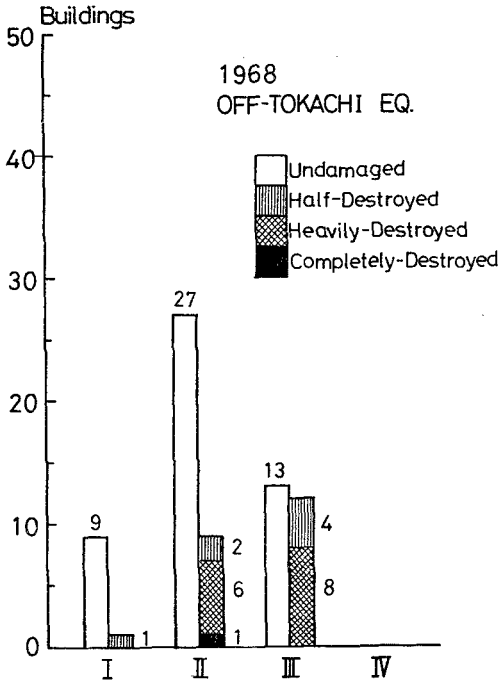


図 8-(a) RC 造建物の被害と地盤の関係 (1968年十勝沖地震)

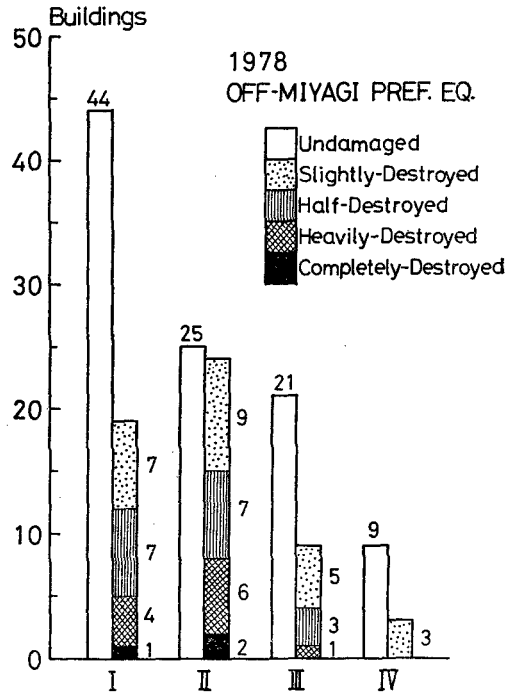


図 8-(b) RC 造建物の被害と地盤の関係 (1978年宮城県沖地震)

表 5 周波数伝達関数のパターンによる地盤タイプの区分

TYPE for Pattern of Freq. Transfer Function				
TYPE	A-TYPE		B-TYPE	C-TYPE
PATTERN	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>		
Eminent Frequency $f_0$	one peak for $0 < f_0 < 3.2$ Hz	one peak for $3.2 \leq f_0$ Hz	more than one peak for $f_0$	no peak for $f_0$
	$0 < f \leq 10$ Hz	$0 < f \leq 10$ Hz	$0 < f \leq 10$ Hz	$0 < f \leq 10$ Hz
Shape				

第2種地盤に比較的被害建物が多く分布している。

また、地盤の振動特性を考慮した場合の地盤とRC造建物被害の相関性についての検討を実施するために、各調査建物位置におけるボーリング柱状図から第三紀層(本研究では基盤と定義する)までの地盤性状に基づいて表層地盤の層構造のモデルを作成した。そして、第2章で算定された地盤のS波速度の推定式に基づいて各地層のS波速度を算定し、その他の計算に必要な地盤の物理定数(密度、Q値など)を設定しSH波の重複反射理

論を用いて地盤の周波数伝達関数を算定した。なお、その周波数伝達関数のパターンにより地盤特性を分類した結果、表5に示すように4タイプに分類された。

以上の結果より、横軸に周波数伝達関数のタイプ別、縦軸にそれに対するRC造建物の被害および無被害棟数の頻度分布を示したものが図9である。一方、建物の被害程度(倒壊、大破、中破、小破ならびに無被害)を考慮して、全調査建物棟数に対する比率で示される被害率を算定し、地盤種別ならびに周波数伝達関数のパターンによる地盤のタイプ別の被害率を示した結果が図10である。

図9ならびに図10より、地盤の周波数伝達関数に基づくタイプ別ではA<sub>2</sub>タイプおよびBタイプに被害率が高くなる傾向が見られる。このことは、地盤種別区分で十勝沖地震では第2種、第3種地盤に宮城県沖地震では第1種、第2種地盤の両地震ともに比較的硬質の地盤に被害建物の棟数分布が多いことと対応している。すなわち、A<sub>2</sub>タイプは比較的高周波数(3.2 Hz以上)に卓越周波数が見られ、Bタイプでは表層地盤の層構造によって複数の周波数にピークが見られるが基盤までの平均的な性質としては比較的硬質であると考えられる。更にも、このことは地盤と建物の相互作用を考慮した場合、比較的剛性の高いRC造建物に対しては地下逸散減衰

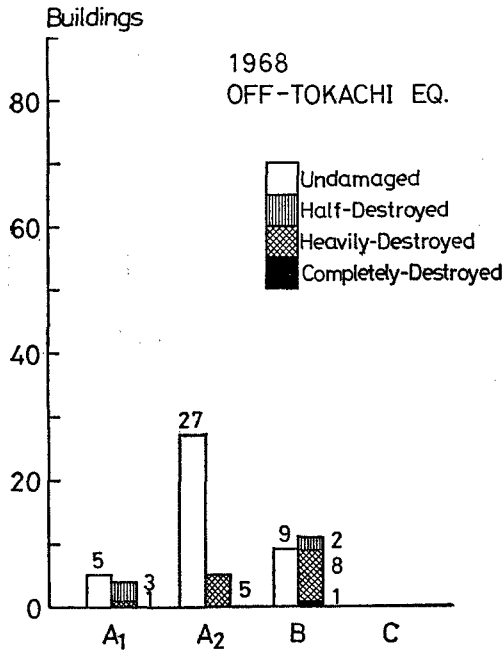


図 9—(a) RC 造建物の被害と地盤タイプの関係 (1968年十勝沖地震)

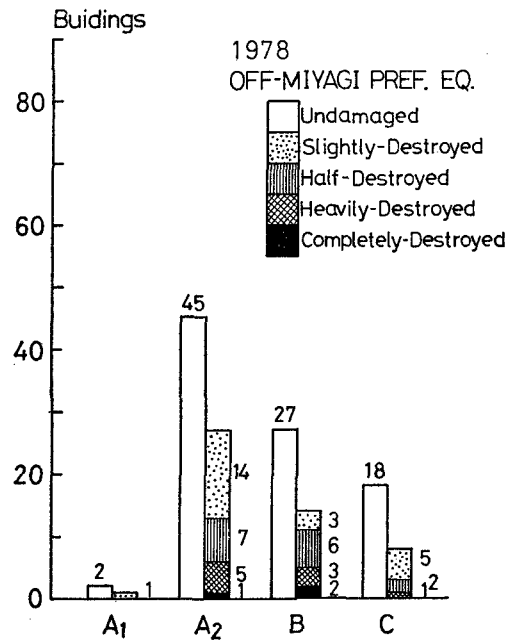


図 9—(b) RC 造建物の被害と地盤タイプの関係 (1978年宮城県沖地震)

$$P_1 = \frac{n_1 + n_2}{N} \quad \begin{cases} \bullet & n_1: \text{Completely-Destroyed Buildings} \\ \circ & n_2: \text{Heavily-Destroyed Buildings} \end{cases}$$

$$P_2 = \frac{n_1 + n_2 + n_3}{N} \quad \begin{cases} \blacktriangle & n_3: \text{Half-Destroyed Buildings} \\ \triangle & n_4: \text{Slightly-Destroyed Buildings} \end{cases}$$

$$P_3 = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + n_4}{N} \quad \begin{cases} \square & N: \text{Total Investigated Buildings} \end{cases}$$

$$P_1 = \frac{n_1 + n_2}{N} \quad \begin{cases} \bullet & n_1: \text{Completely-Destroyed Buildings} \\ \circ & n_2: \text{Heavily-Destroyed Buildings} \end{cases}$$

$$P_2 = \frac{n_1 + n_2 + n_3}{N} \quad \begin{cases} \blacktriangle & n_3: \text{Half-Destroyed Buildings} \\ \triangle & n_4: \text{Slightly-Destroyed Buildings} \end{cases}$$

$$P_3 = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + n_4}{N} \quad \begin{cases} \square & N: \text{Total Investigated Buildings} \end{cases}$$

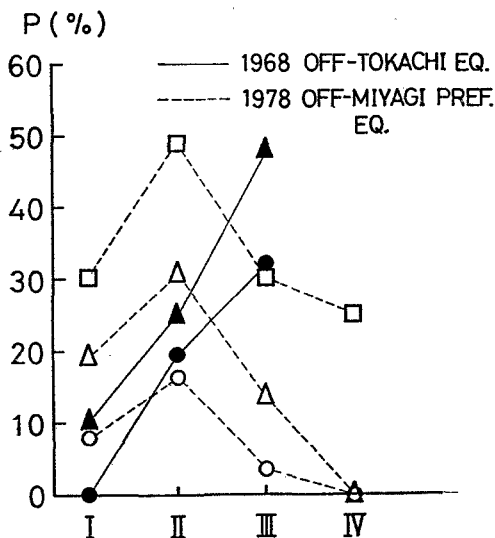


図 10—(a) 地盤種別区分による RC 造建物の被害率

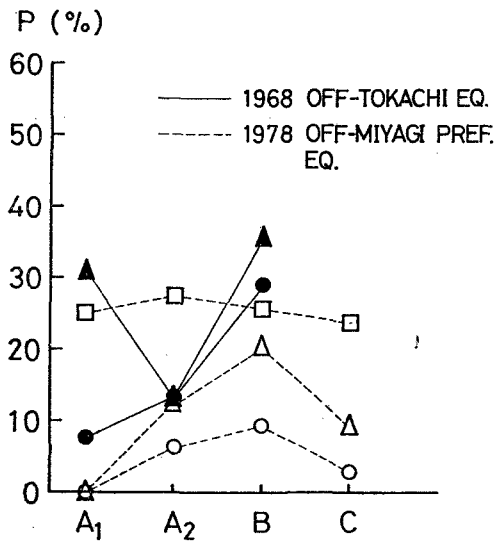


図 10—(b) 地盤タイプ区分による RC 造建物の被害率

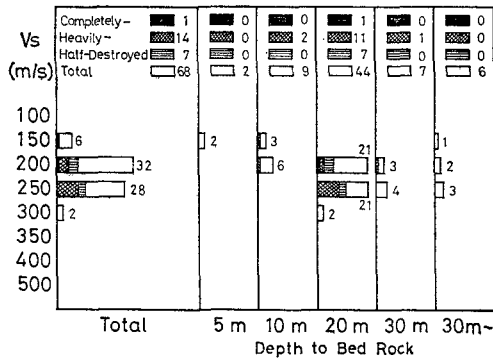


図 11-(a) RC 造建物の被害と表層の地盤性状との関係 (1968年十勝沖地震)

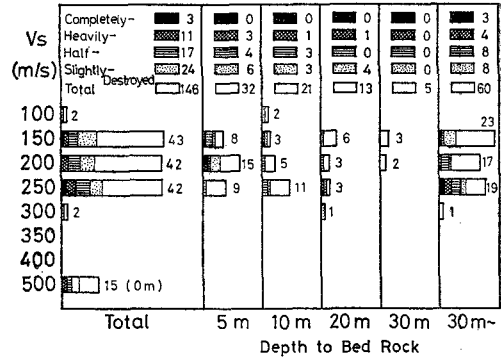


図 11-(b) RC 造建物の被害と表層の地盤性状との関係 (1978年宮城県沖地震)

効果の期待できない硬質地盤に被害建物の棟数分布が多くなるということに対応するものと考えられる。

そこで、RC 造建物の被害について、より地盤との関係を表層地盤の層厚と硬軟度（S波速度に対応する）とに関して検討するために、基盤までの深度とそれ以浅の表層の地盤内における各層のS波速度の単純な加算平均値として表層地盤の平均S波速度を算定し、その両者の組合せに対して RC 造建物の被害の棟数分布を検討した。結果を図11に示す。この結果、両地震において多少傾向が異なるが十勝沖地震では基盤までの深さ20m程度で平均S波速度250 m/s程度の地盤に、宮城県沖地震では基盤までの深さが30m以上で平均S波速度250 m/s程度の地盤に RC 造建物の被害棟数分布が多くなる傾向が認められた。

以上のことから、RC 造建物の被害と地盤性状との間の相関性が認識される。

### 5. 地盤との連成効果を考慮した地盤—建物系の伝達関数

1968年十勝沖地震ならびに1978年宮城県沖地震において RC 造建物の被害と地盤性状との相関関係が認められた。

一般に、RC 造建物の地震時の挙動を検討するためには地盤と建物の相互作用を考慮すべきであることが指摘され、地盤—建物連成系として振動解析が実施されている。これは基本的には建物の振動エネルギーが建物周辺地盤の弾性的なバネ作用を介して波動エネルギーとして地盤内に伝播し地下に逸散することによる減衰効果を考慮することであり、この種の基本的な理論は半無限弾性体上の矩形剛体基礎の場合の地盤との相互作用を考慮した基礎周辺地盤のバネ作用、ならびに減衰作用について Dynamical Ground Compliance 理論として、すでに解

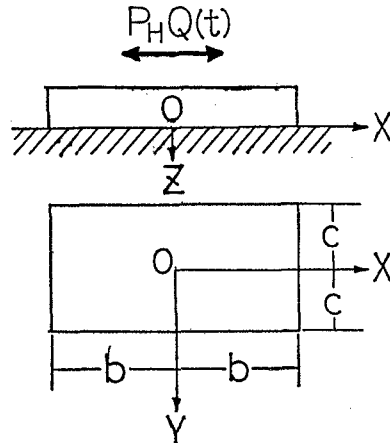


図 12 長方形剛体基と水平加振の条件

析解が導かれ、更に、その結果を用いて半無限弾性体上の地盤—建物系の伝達関数も導かれている。

本研究では、第4章で示された RC 造建物の地震時の被害を解析的に検討するために、地盤—建物系の連成効果を考慮した振動モデルを作成するために、上述の Dynamical Ground Compliance 理論に基づく地盤—建物系の伝達関数を算定し、それと等価な振動特性をもつ質点系の振動モデルを作成することを検討することとした。

Dynamical Ground Compliance 理論は、三次元の等方等質な半無限弾性地盤上の長方形剛体基礎に、水平方向の harmonic な加振力が作用した場合 (図12参照) の地盤内の任意な位置での運動方程式に対して、基礎自重を無視した基礎下の応力分布を仮定して三重フーリエ変換を導入して応力で統一された境界値問題として運動方程式を解き、基礎の応答変位を求めるものであり、このことによって基礎周辺地盤のバネ効果と減衰効果を解析





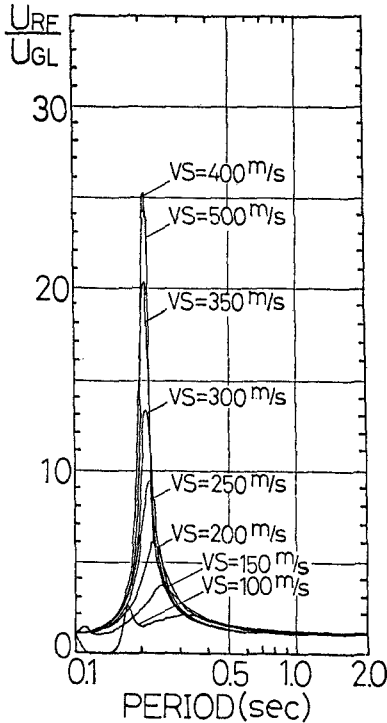


図 15 地盤—建物連成系の伝達特性

### 6. RC 造建物の振動モデル

前章で求められた地盤—建物連成系の伝達関数に基づいて、RC 造建物の応答解析を実施するための連成系と等価な振動特性を有する質点系の振動モデルを作成する。

振動モデルは3質点のせん断型質点モデルとし図17に示されるものとする。

一般に、質点系振動モデルの振動数方程式は次式で示される。

$$|[K] - \omega^2[M]| = \begin{vmatrix} 2k - \omega^2 M & -k & 0 \\ -k & 2k - \omega^2 M & -k \\ 0 & -k & k - \omega^2 M \end{vmatrix} \quad \dots(7)$$

- $\omega$  : 円振動数
- $k$  : バネ定数
- $M$  : 質点の質量
- $[K]$  : 剛性マトリックス
- $[M]$  : 質量マトリックス

(7)式の行列式から、 $M/k=X$  として  $X$  に関する3次方程式を求めると次式となる。

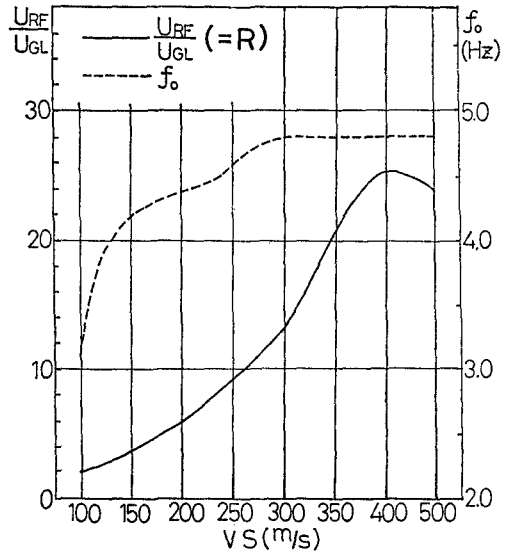


図 16 地盤—建物連成系の応答倍率と固有振動数

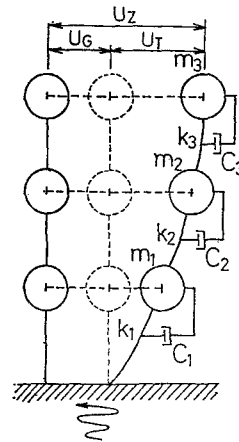


図 17 3質点系振動モデル

$$\omega^6 X^3 - 5\omega^4 X^2 + 6\omega^2 X - 1 = 0 \quad \dots(8)$$

ここで、質点系振動モデルに地盤—建物連成系と等価な振動特性を与えるために(8)式の $\omega$ に前章で求められた連成系の固有振動数を質点系振動モデルの1次固有振動数とみなして、その数値を代入し  $X$  の値を求める。一方、代入された $\omega$ の値に対して(8)式より  $X$  の根が3根求まるが、1次固有振動数が初期に仮定された連成系の固有振動数と一致するものを  $X$  の解として採用することとする。このようはすれば、質点系振動モデルの  $X (=M/k)$  と1次から3次の固有振動数 ( $\omega_1^*$ ,  $\omega_2^*$ ,  $\omega_3^*$ ) が決定される。また、同様に連成系の伝達関数が

表 7 地盤建物連成系の伝達関数から計算された振動モデルの諸定数

No	VS (m/s)	Ps (g/cm <sup>3</sup> )	R	R/√2	ω <sub>0</sub> (rad/s)	ω <sub>1</sub> (rad/s)	ω <sub>2</sub> (rad/s)	h	χ=M/K
1	100	1.60	2.042	1.44	19.63	10.83	33.07	0.568	0.00051
2	150	1.70	3.720	2.63	26.18	20.60	31.73	0.213	0.00029
3	200	1.70	5.958	4.21	27.32	24.64	31.42	0.124	0.00027
4	250	1.80	9.461	6.69	28.56	26.74	*	0.082	0.00024
5	300	1.80	13.276	9.39	29.92	27.80	*	0.060	0.00022
6	350	1.90	20.25	14.32	*	28.82	31.11	0.038	*
7	400	1.90	25.258	17.86	*	28.96	*	0.036	*
8	500	2.00	24.306	17.19	*	29.09	31.89	0.047	*

Vs : S-Wave Velocity of Surface Ground  
 Ps : Density of Surface Ground  
 R : Magnification Factor Estimated by Transfer Function  
 ω<sub>0</sub> : Natural Circular Frequency Estimated by Transfer Function  
 ω<sub>1</sub>, ω<sub>2</sub> : Two Circular Frequencies Correspond to The Value of R/√2  
 h : Damping Constant Calculated by Half Power Band Width Method

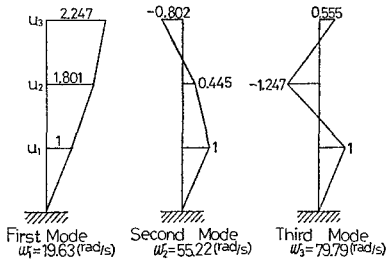


図 18 振動モード (No.1 の地盤条件の場合)

ら Half Power Band Width 法により 1 次減衰定数 ( $h_1^*$ ) を算定する。

従って、以上の数値が求められれば RC 造建物の振動モデルの内部粘性減衰係数が次に示す(9)式~(12)式で評価され、地盤との連成効果を考慮した地盤-建物系の等価な振動モデルが作成される。

$$h_1^* = \frac{|\omega_2 - \omega_1|}{2\omega_0} \quad \dots(9)$$

$$h_s^* = \frac{\omega_s^*}{\omega_1^*} \times h_1^* \quad \dots(10)$$

一方

$$h_s^* = \frac{C_s}{2M_s\omega_s^*} = \frac{\{u_s\}^T[C]\{u_s\}}{2M_s\omega_s^*} \quad \dots(11)$$

$$\therefore \{u_s\}^T[C]\{u_s\} = 2M_s\omega_s^*h_s^* \quad \dots(12)$$

- [M] : 質量マトリックス
- [C] : 減衰係数マトリックス
- $M_s = \{u_s\}^T[M]\{u_s\}$  : S 次の換算質量
- $C_s = \{u_s\}^T[C]\{u_s\}$  : S 次の換算減衰係数
- $\{u_s\}$  : S 次のモードベクトル
- $h_s^*$  : S 次の減衰定数

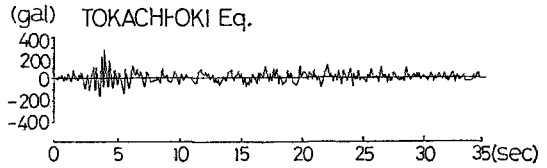


図 19 解析に用いた強震記録 (八戸港湾 N-S 成分)

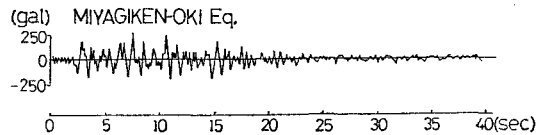
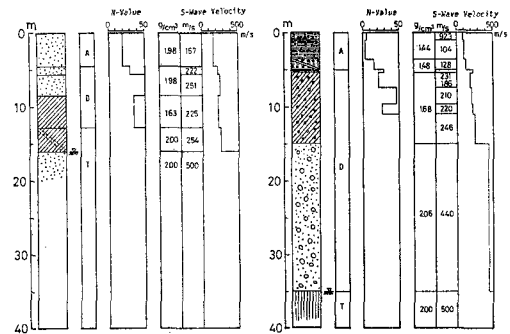


図 20 解析に用いた強震記録 (東北大学工学部建設系建物 1 階 N-S 成分)



(a) 八戸港湾 (d) 東北大学工学部建設系建物

図 21 各強震観測地点の地盤性状

- ω<sub>s</sub>\* : S 次の固有円振動数
- ω<sub>i</sub> (i=1,2) : 地盤-建物連成系の伝達関数から求まる円振動数
- ω<sub>0</sub> : 連成系の固有円振動数

以上の方法により算定された振動モデルの諸定数を表 7 に示し、結果の 1 例として No.1 の場合のモデル、すなわち、半無限弾性地盤の S 波速度を 100 m/s とした場合の振動モードを図 18 に示す。

従って、これらの応答解析用の振動モデルを用いれば、応答計算が比較的容易に実施できる。

## 7. 入力地震動の算定

本章では前章で算定された地盤-建物連成系の振動モデルを用いて応答解析を実施するための入力地震動を算定することとし、まず両地震において観測された代表的な強震記録を用いて、観測地点の地盤性状を考慮して基盤(第三紀層)での地震動を算定する。すなわち、1968 年十勝沖地震では八戸港湾強震記録 (N-S 成分)、1978 年

表 8 解析に用いた地盤条件

	$V_s$	$\rho$	$V_{sb}$	$\rho_b$	H	Q
1	150	1.70	500	2.0	5,10,20,30	20
2	200	"	"	"	"	"
3	250	1.80	"	"	"	"
4	300	"	"	"	"	50
5	350	1.90	"	"	"	"
6	400	"	"	"	"	"
7	500	2.0	—	—	0	100

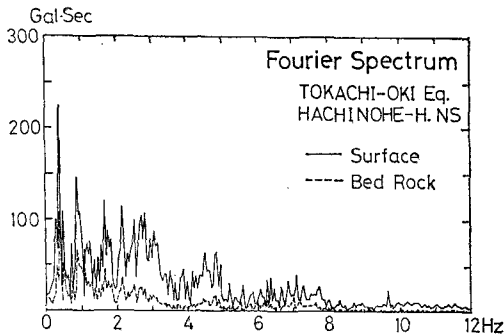
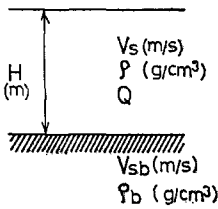


図 22-(a) 地震動のフーリエスペクトル (1968年十勝沖地震)

宮城県沖地震では東北大学工学部建設系建物 1 F での強震記録 (N-S 成分) の各強震記録 (図19および図20) を用いることとした。これらの強震記録が観測された各地点のボーリング柱状図を図21に示す。これに基づいて地盤のモデル化を行い SH 波の重複反射計算によって基盤における地震動特性を算定した。図22に観測された強震記録ならびに算定された基盤での地震動のフーリエスペクトルを示す。

一方、応答計算用の入力地震動を作成するにあたっては、表層の地盤性状に関して RC 造建物の被害調査の結果との対応を考慮して基盤までの深さ (H) および地盤の S 波速度 ( $V_s$ ) を表 8 に示すようにパラメトリックに変化させて各地盤性状に対して、前述の基盤での地震動のフーリエスペクトルから重複反射理論により地表面における応答計算用の入力地震動を次式によって26通り

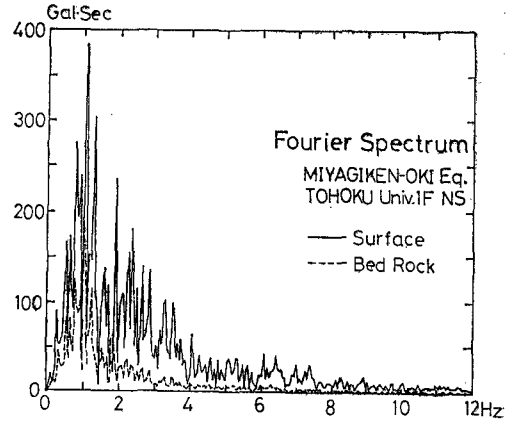


図 22-(b) 地震動のフーリエスペクトル (1978年宮城県沖地震)

Hysteresis Curve of Power Function System

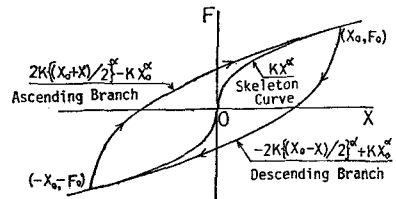


図 23 ベキ関数型復元力特性

算定した。

$$H_i(f) = O(f) \cdot G_i(f) \quad \dots(13)$$

$$Z_i(t) = \int_0^t H_i(f) \cdot e^{i(2\pi f)t} df \quad \dots(14)$$

- $O(f)$  : 基盤における地震動のフーリエスペクトル
- $H_i(f)$  :  $i$  地盤における地表面での地震動のフーリエスペクトル
- $G_i(f)$  :  $i$  地盤における周波数伝達関数
- $Z_i(t)$  :  $i$  地盤の地表面における入力地震動

## 8. 応答計算

第 6 章において、Dynamical Ground Compliance 理論に基づく地盤—建物連成系の伝達関数を用いて、それと等価な振動特性をもつ質点系の振動モデルを地盤性状を変化させた場合について作成した。また、第 7 章において、同様な各種の地盤性状に対して応答計算用の入力地震動を算定した。本章では、これらの結果を用いて地震時の RC 造建物の震害について、地盤性状をパラメトリックに変化させ、地盤との連成効果を考慮した振動モデルを用いて弾塑性の応答計算を実施し解析的な検討

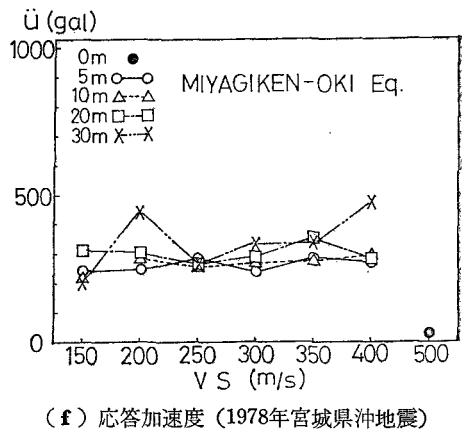
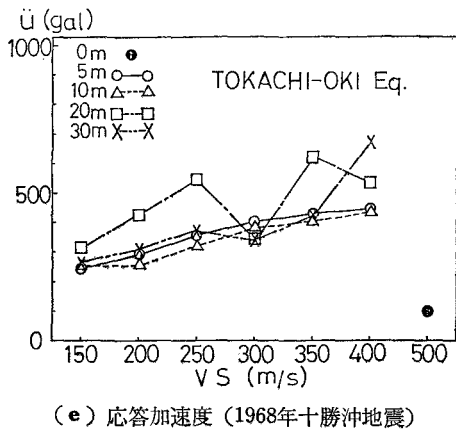
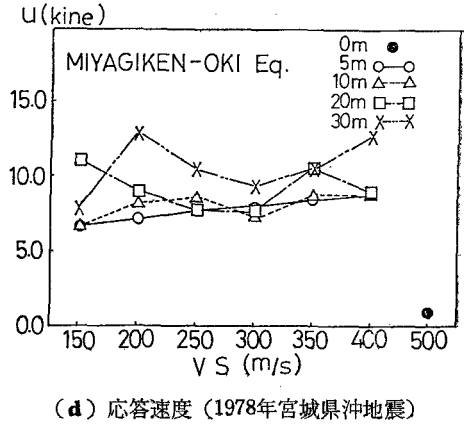
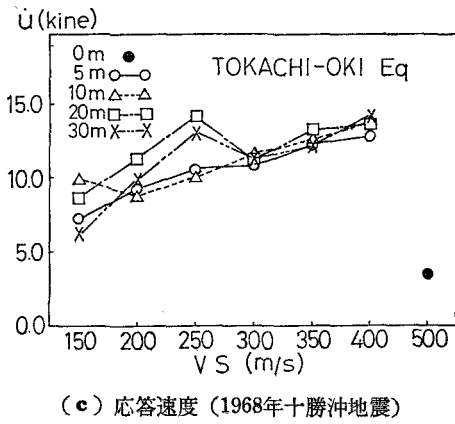
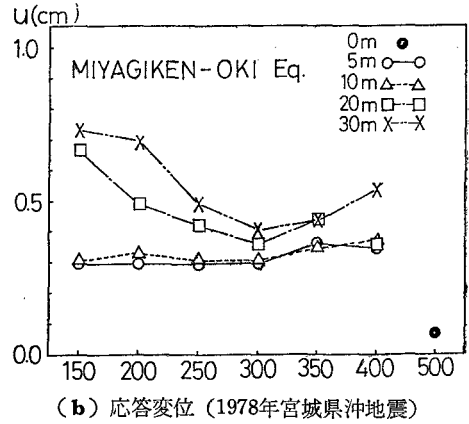
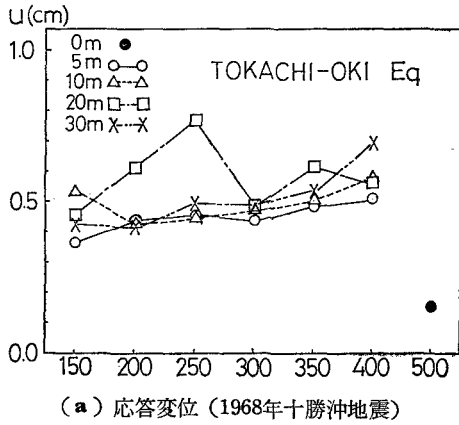


図 24 応答計算結果

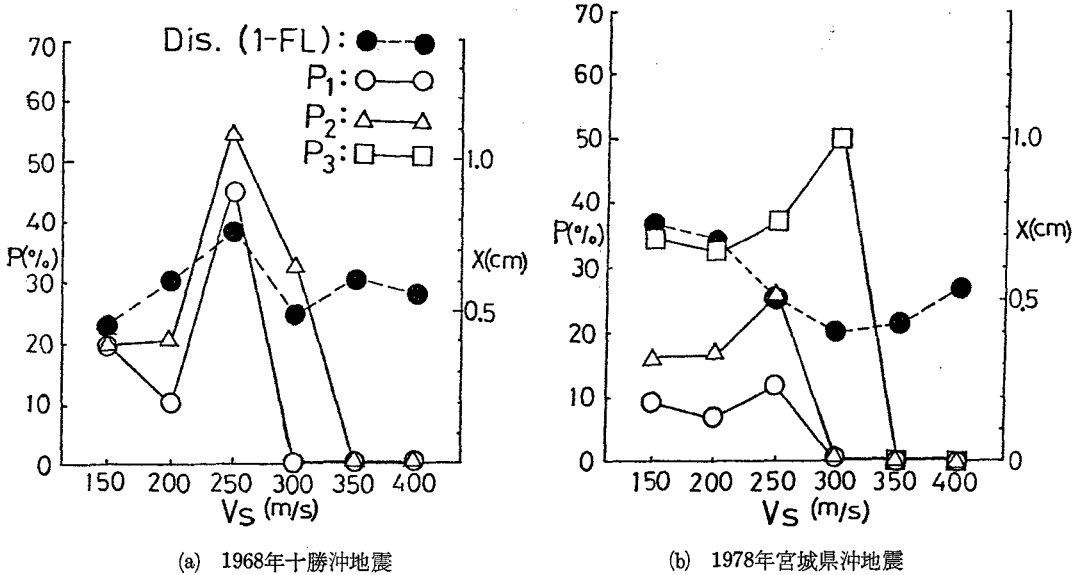


図 25 RC 造建物の被害と応答計算結果の比較

を試みることにした。

弾塑性の応答計算を実施するにあたっては、RC 造建物振動モデルの各層に図23に示されるベキ関数型の復元力特性を仮定し、降伏変位を 0.5 cm に仮定して線型加速度法によって応答計算を実施した。計算された応答値については、両地震の各振動モデルともに1層位置での応答変位、応答速度ならびに応答加速度の最大値を地盤性状ごとにプロットし図24に示す。

図より、十勝沖地震では各応答値ともに基盤までの深さ 20 m 程度の地盤において比較的大きな応答値を示している。また、宮城県沖地震では基盤までの深さ 30 m が程度で大きな応答値を示している。特に応答変位（1層の層間変位）では、基盤までの深さ 20 m で地盤の S 波速度 250 m/s の地盤条件で、また宮城県沖地震では基盤までの深さ 30 m で地盤の S 波速度 150~200 m/s の地盤条件で応答値が最大値を示し、仮定された降伏変位を大きく越えている。また、その他の応答速度ならびに加速度の最大応答値も同様な傾向を示している。このことは、地盤性状、建物振動モデルの振動特性ならびに入力地震動特性の相互関係によって、上述の条件のもとにおいて最大の応答値を示したものと考えられる。

### 9. 結果および考察

地震時の RC 造建物の被害について、主に地盤と建物の相互作用に着目して解析的な検討を実施した。その結果十勝沖地震ならびに宮城県沖地のに両地において

て、傾向は異なるがともに地盤性状に対応して応答値が変化する傾向が認められた。そこで、両地震時の RC 造建物の被害の調査結果から地盤と被害との関係としてまとめられた、基盤までの深さと表層地盤の平均 S 波速度をパラメータとした RC 造建物の被害率（図11）と前章で求められた応答解析結果を比較検討するために、両者の結果を重ね合せて図25に示す。応答解析結果は、最大の応答変位値を示した基盤までの深さの場合の結果を図中に示してある。すなわち、十勝沖地震では基盤までの深さ 20 m、宮城県沖地震では基盤までの深さ 30 m の場合の応答計算結果を用いている。同図より、十勝沖地震では地盤の S 波速度 250 m/s で RC 造建物の被害率と応答計算結果による最大応答変位がともに大きい値を示しており、宮城県沖地震では地盤の S 波速度 150~200 m/s に応答計算結果が大きな値を示している。一方、被害率では平均 S 波速度 250~300 m/s に大きな値が認められ両者の対応関係は、それ程よくないように見受けられる。しかしながら、建物被害程度の小破を含めた被害率（□印）の平均 S 波速度 300 m/s の場合には、対象となる建物が 2 棟中 1 棟の小破によって計算上の被害率が 50% と高い値となっているが、母数が少なく被害率の数値としての精度に問題があり、特に考慮の対象外と考え、かつまた、建物の被害程度の高い倒壊、大破ならびに中破の建物に対する被害率の傾向（△印および○印）に着目すれば、被害率の傾向と応答解析結果の傾向は比較的良好に対応しているものと思われる。

以上の結果から考察されることは、地震時の RC 造

建物の被害に関して、種々の地盤条件で地盤—建物連成効果を考慮した RC 造建物の振動モデルを用い、対応する入力地震動も変化させて応答解析を実施した結果、詳細については更に検討の余地があるものの概略的な傾向については、実際の RC 造建物の被害の傾向との対応関係が比較的良好に認められたものと考えられる。また、このことは、上述のような条件のもとで入力地震動の主要な波動の中に含まれる振動数成分が、地盤—建物系成系の固有振動数に近接していることによるものと考えられる。

## 10. あとがき

本研究では、1968年十勝沖地震と1978年宮城県沖地震時に被害を受けた RC 造建物の被害について地盤との相関性を検討した結果、両者にある程度の相関性が認められた。そこで主に地盤と建物の連成効果を考慮した応答解析用の振動モデルを Dynamical Ground Compliance 理論に基づいて作成し、地盤性状に応じた入力地震動を算定して応答計算を実施した結果、実際の RC 造建物の被害の傾向と比較的良好な対応関係が認められた。

以下に本研究で得られた結果を簡単に要約する。

1) 通常のボーリング資料から地盤の各土質別の S 波速度を推定する実験式を次式のごとく作成した。

$$V_s = a \cdot N^b \cdot D^c$$

その結果、比較的簡単にかつ精度よく S 波速度を推定できることがわかった。

2) RC 造建物の地震時被害について地盤性状との相関性が認められた。すなわち、総プロによる地盤種区分によれば、十勝沖地震では第 2 種、第 3 種地盤に宮城県沖地震では第 1 種、第 2 種地盤に被害建物棟数が多く分布し、両地震では多少その傾向が相違するが概ね第 2 種地盤程度に被害を受ける建物の比率が高い。一方、地盤の周波数伝達関数のタイプ別による地盤分類に対しても被害建物の棟数分布に対応性が見られ比較的卓越周波数の高い硬質な地盤に被害率が高い。そして、基盤までの深さと基盤までの地盤の平均 S 波速度によって更に RC 造建物の被害を検討すると、地盤の平均 S 波速度が 250 m/s 程度で基盤までの深さが 20~30 m 程度の地盤に被害率が高くなる傾向が認められる。

3) Dynamical Ground Compliance 理論に基づいて地盤—建物連成効果を考慮した振動モデルを作成し弾塑性応答計算を実施した結果、RC 造建物の地震時被害に関する傾向を比較的良好に説明できることがわかった。

以上の結果を、RC 造建物の地震時の被害を検討する上での定性的な議論として一般化するためには更に、地盤—建物連成系の振動特性と入力地震動特性との関係な

らびに RC 造建物各々の構造特性の差異等に関する検討が必要であると考えられ、今後の課題として研究を進めたく考えている。末筆ながら、本研究を実施するにあたり多大な労力を提供して頂いた沼尻靖久氏（現 東京ソイルリサーチ(株)）に感謝致します。

## 文献一覧

青山博之・松下和徳

1971 「十勝沖地震における鉄筋コンクリート造校舎の耐震性について—被害建物と無被害建物の比較検討」『1968年十勝沖地震調査研究論文集』日本建築学会。

志賀敏男・高橋暉雄

1975 「鉄筋コンクリート構造建物の壁率と震害（続報）」『日本建築学会東北支部研究報告集』pp. 45~48。

日本建築学会

1968 『1968年十勝沖地震災害調査報告』

日本建築学会

1980 『1978年宮城県沖地震災害調査報告』

望月利男・宮野道雄・田村俊和

1979 「1968年十勝沖地震における鉄筋コンクリート造建物の被害と地盤の関係」『総合都市研究』第 8 号, pp. 145~163。

望月利男・宮野道雄・沼尻靖人・山田隆夫

1979 「1978年宮城県沖地震の被害の検討(その 3)」『日本建築学会大会学術講演梗概集』

小堀鐸二・南井良一郎・鈴木 有

1965 「弾性地盤上の構造物の動特性について」『京都大学防災研究所年報』Vol. 9, pp. 193~224。

小堀鐸二・南井良一郎・鈴木 有・日下部馨

1966 「長方形基礎の Dynamical Ground Compliance (その 1)—半無限弾性地盤の場合—」『京都大学防災研究所年報』Vol. 10, pp. 283~314。

石田勝彦・大沢 胖

1976 「地震動同時観測にもとづく地盤—建物系の伝達特性—その 1. 異なる基礎形態 2 例の場合」『日本建築学会論文報告集』, 第 249 号, pp. 41~52。

田治米辰雄・望月利男・松田磐生

1977 『地盤と震害—地域防災研究からのアプローチ』槇書店。

太田 裕・後藤典俊

1976 「S 波速度を他の土質的諸指標から推定する試み」『物理探査』, 第 29 巻第 1 号, pp. 31~41。

今井常夫

1976 「S 波測定値と他の物性量との関連」『地震波の生成・伝播に関する実験』pp. 77~84。

## INVESTIGATION ON THE EARTHQUAKE DAMAGE OF RC BUILDINGS BY CONSIDERING THE SOIL- STRUCTURE INTERACTION

Toshio Mochizuki\*, Iware Matsuda\*\*, Takahisa Enomoto\*\*\*,  
Michio Miyano<sup>+</sup> and Toshikazu Koizumi<sup>++</sup>

\* Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University (Fukui Technical Institute, present)

\*\* Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

\*\*\* Kanagawa University

<sup>+</sup> Research Student, Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University

<sup>++</sup> Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University

*Comprehensive Urban Studies*, No. 17, 1982, pp. 31-46

RC buildings of a few stories are in many cases heavily damaged by a strong earthquake motion. It is generally understood that the main reason for this kind of damage lies in the interaction between structure and ground condition caused by an incident seismic wave. This paper is an investigation about the damage of RC buildings caused by the 1968 OFF-TOKACHI EARTHQUAKE and the 1978 OFF-MIYAGI PREF. EARTHQUAKE by using the GROUND COMPLIANCE THEORY which considers the interaction between soil and structure. Various examinations were made about the structural properties (stories, scales, columns, walls etc.,) the grade (completely-, heavily-, half-, slightly-destroyed and undamaged) and the ground conditions of damaged and undamaged buildings in the disaster-stricken areas. So we made the experimental expression which calculates shear wave velocity from the data of soil exploration and produced an analytical vibration model of buildings by a spring-mass system which is considered the interaction of soil-structure system. By the CONVOLUTION INTEGRAL METHOD we evaluated the incident wave varying with the ground condition. And we made the response calculation by using the above model which has elasto-plastic restoring force characteristics called POWER FUNCTION TYPE. We report the result of this analysis because we could comparatively well explain the relationship between the damage of RC building and the ground conditions by using the model considered in this paper.

The results of this investigation can be summarized as follows.

- 1) The experimental expression for estimating the shear wave velocity of each soil which constitutes surface multilayered ground conditions from the data of soil exploration is

$$V_s = a \cdot N^b \cdot D^c \dots\dots\dots(1)$$

where  $V_s$  is shear wave velocity,  $N$  is the  $N$ -value of standard penetration test,  $D$  is the depth from the surface to the middle point of each soil layer and  $a$ ,  $b$  and  $c$  are three coefficients which we evaluated by MULTIPLE LINEAR REGRESSION ANALYSIS. This expression corresponds well to the measured value of shear wave velocity.

- 2) In both earthquakes mentioned above, the damage of RC buildings corresponds relatively well to the surface ground conditions which are grouped into four classes according to the aseismic design code for architectural structures in Japan. It is thought that this result indicates the influence of the soil-structure interaction.
- 3) It is also found that the actual earthquake damage grades of RC buildings are well explained by the results of elastoplastic response calculation of spring-mass analytical vibration model which is considered the soil-structure interaction by using the GROUND COMPLIANCE THEORY.