

第 I 章 研究の概要

1. 背景・目的

1-1. 背景

(1) 地震の発生から建物応答に至るプロセス

地震時の建物の変形（建物応答）は、大きく分けると、震源断層の破壊により発生した波動の伝播（過程①）、表層地盤での地震動の増幅（過程②）、基礎を介した地震動の建物への入力と地下への振動エネルギーの逸散（過程③）、建物内での地震動の増幅（過程④）、の4つのプロセスを経て生じると考えられる。

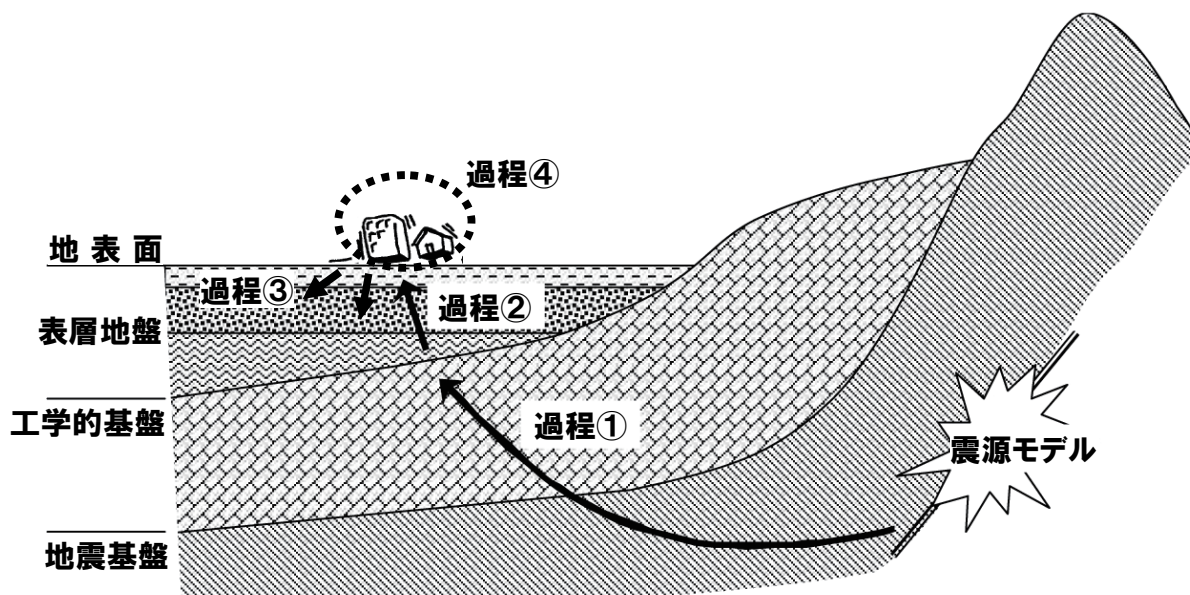


図 I-1-1 地震の発生から建物応答に至るプロセス(岩手県(2004))に加筆

建物は地盤に支持されており、地震時には、揺れは基礎を介して建物に入力されるとともに、逆に建物の揺れはそれを支持する周辺地盤への入力としても働き、地盤を通じてそのエネルギーは逸散する。それが過程③であり、地盤と建物の相互作用効果（以下、「相互作用効果」と略す場合もある）と呼ばれるものである。

一方、建物応答を数値計算で求める際には、図 I-1-2のように、建物基礎部を固定したモデル（基礎固定モデル）が用いられることが多い。基礎固定モデルでは通常、過程①・②を経て評価した地震動を建物に入力させ、地盤や基礎を考慮せずに計算を行うため、過

程③が評価されない。

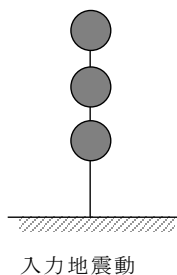


図 I-1-2 基礎固定モデル

上記の影響は、特に非木造建物で大きく、基礎固定の場合に比べると多くの場合建物応答は小さくなるのが専門家により指摘されている。

一例として、図 I-1-3に、1995年兵庫県南部地震において地表面上と建物の基礎上で同時観測された地震観測記録の最大加速度値の関係（安井・他（1998））を示す。基礎位置で観測された地震動は地表面上のものよりも、最大加速度で30%、最大速度で10%程度小さくなるが示されている。ただし、サンプルとなった建物は、比較的相互作用効果を期待しやすい規模の大きな建物である。

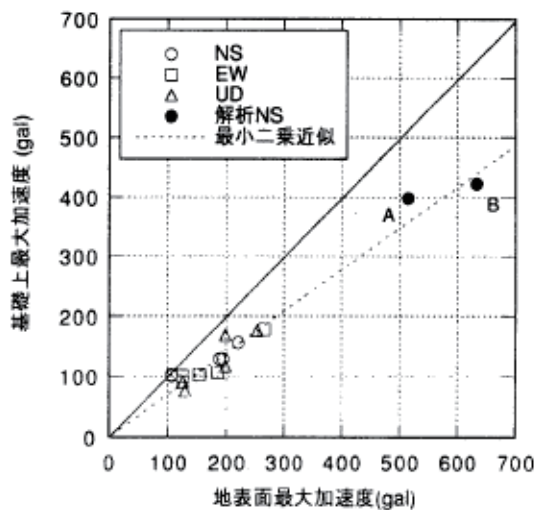


図2 地表面と基礎の最大加速度

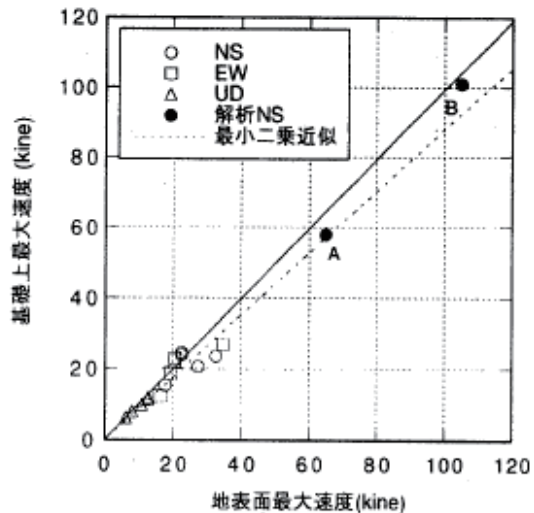


図3 地表面と基礎の最大速度

図 I-1-3 1995年兵庫県南部地震で観測された基礎と地表面の地震動との関係（安井・他（1998））

(2) 相互作用効果が建物応答におよぼす影響に関する既往の研究

相互作用効果に関する研究は1950～60年代にはじまり徐々に発展し、1970年代以降には積極的に行われるようになった。それらの研究成果の蓄積によって相互作用効果に関する理解が進み、現時点では、地盤や建物のパラメータを適切に設定することができれば、地震応答解析により実際の建物応答の再現計算を行うことがある程度可能になってきている。以下に、相互作用効果が建物応答に及ぼす影響に関して分析している近年の研究を例示する。

高橋・林（2004）は、相互作用効果による建物の地震応答低減について、近年の地震観測記録を用いて検討を行っている。RC造建物を対象として、建物階数、建物耐力を解析パラメータとして地震応答解析を行い、相互作用効果による地震応答低減効果について分析している。基礎固定モデルとSRモデル（相互作用効果を考慮できるモデル）の最大応答変形角を比較し、相互作用効果による地震応答低減は、建物耐力が高い場合に大きくなる事や、建物への入力地震動のスペクトル特性によって大きく変化することなどを示している。

伊藤・他（2010）は、基礎固定モデルに対するSRモデルの入力地震動の割合を地震動入力倍率と定義し、地盤と建物の相互作用効果が建物応答に及ぼす影響を検討している。平面規模が40m×40mの大規模建物を対象とし、建物周期、建物耐力、埋込深さ、地盤のS波速度を解析パラメータとして分析している。その結果、建物の弾性1次固有周期が短い領域では、地盤逸散減衰効果による応答の低減が大きいのに対し、建物の弾性1次固有周期が比較的長い領域では、地盤と建物の相互作用効果を考慮することで、基礎固定モデルの応答よりも建物応答が大きくなる場合が多数見られることを示している。

その他、建物の地震被害を解釈するために地盤と建物の相互作用効果を考慮し、地震時の建物被害を検討している事例は、壇（1995）や新井（2004）の論文で見られている。

相互作用効果が建物応答に及ぼす影響に着目した研究の多くは、上記のような個別事例の研究である。相互作用効果が建物応答に与える影響は、地盤構造・建物条件などに依存して変化することがわかってきてはいるものの、それらの一般的・定量的な傾向は現時点では明らかになっていない。

1-2. 目的

地盤と建物の相互作用効果は地震時の建物応答に影響し、その影響は建物の応答評価において本来考慮すべきものである。しかしながら、現状では、地震応答解析には基礎固定モデルが用いられることが多く、相互作用効果の影響が考慮されていない。相互作用効果を考慮した地震応答解析は近年の研究の進展により可能になってきてはいるものの、その計算には、建物の基礎形状や地盤構造などの詳細なパラメータ設定が必要となる。それらの情報の不足から、今後も相互作用効果を考慮した地震応答解析の実施は難しく、基礎固定モデルによる地震応答解析に頼らざるを得ない局面は多いと考えられる。

従って、基礎固定モデルでは評価することができない相互作用効果の影響について、その特徴を定量的に把握しておくことは重要である。

既往の研究では、相互作用が建物応答に与える影響を検討するための個別事例での研究がいくつか行われており、建物の階数や耐力、地震動の周期特性などによりその影響が異なるということがわかってきてはいるものの、それらの各パラメータが相互作用効果におよぼす影響について一般的・定量的に把握されているわけではない。特に地震動の周期特性については、高橋・林（2004）などで相互作用効果への影響が大きいことが指摘されており、さまざまな周期特性を持った地震波による検討を行い、その影響を把握しておくことが重要である。

建物の高さ、耐力、そして地震動の周期特性などのさまざまな条件の違いが相互作用効果に与える影響を、定量的に把握することが本研究の目的である。

2. 検討の概要

2-1. 地盤と建物の相互作用効果について

まず、地盤と建物の相互作用効果とその性質について整理する。

地盤と建物の相互作用効果は、入力相互作用と慣性の相互作用の大きく2つに分けられる。入力の相互作用は、入力損失効果と呼ばれることもある。

入力の相互作用は、地震動が建物基礎に入力される際の建物基礎からの波の跳ね返りと位相差の影響、基礎の埋込みによる表層地盤増幅の低減により、建物へ入力される地震動（基礎入力動と呼ばれる）が地表面の地震動よりも一般に小さくなる作用を言う。建築面積が大きいほど、入力損失効果は大きくなると言われている。これは、建築面積が大きいほど波が平均化されやすくなるためであり、船が水面に浮かんでいるときに、同じ波の上でも大船よりも小船が大きく揺れるのと同じである。また、地盤増幅については、埋込があればその分地表面よりも地震動が低減されるので、埋込深さが深いほど入力損失効果は大きくなる傾向がある。なお、図 I-1-3に示した安井・他（1998）の成果は、入力の相互作用が実証された結果の一つであるといえる。

慣性の相互作用は、建物が振動する際に、建物が局所的に新たな震源として地盤中に振動エネルギーを逸散させる効果（地下逸散減衰）と、建物を支える地盤の復元力機構としてのばね的效果により地震時の建物応答が変化する作用を言い、地盤のかたさと建物のかたさの相対関係、杭の有無などにより異なって現れる。例えば、硬質地盤に立地する超高層建物では、建物が地盤に対して相対的に軟らかく、基礎と地盤の動きはあまり変わらないため、建物は図 I-2-1左に示すような変形の仕方をする。この場合には、建物の層間変形が基礎固定の場合とあまり変わらないため、慣性の相互作用効果は小さくなる。逆に、建物が平面的に大規模で剛性が高く地盤が軟弱な場合には、図 I-2-1右に示すような揺れ方をする。このときは、建物に比べて地盤の方が相対的に軟らかいので、建物の動きにつられて直下の地盤が大きく変形する。この変形によって、建物は剛体的に横に移動したり、回転したりするため、建物の層間変形については基礎固定の場合よりも小さくなり、地盤と建物の相互作用効果は大きくなる。なお、この横の動きをスウェイ動、回転の動きをロッキング動と呼ぶ。杭基礎の場合は直接基礎に比べてロッキング動が抑制されやすくなるため、直接基礎形式よりも相互作用効果が働きにくくなるといわれている（図 I-2-2）。

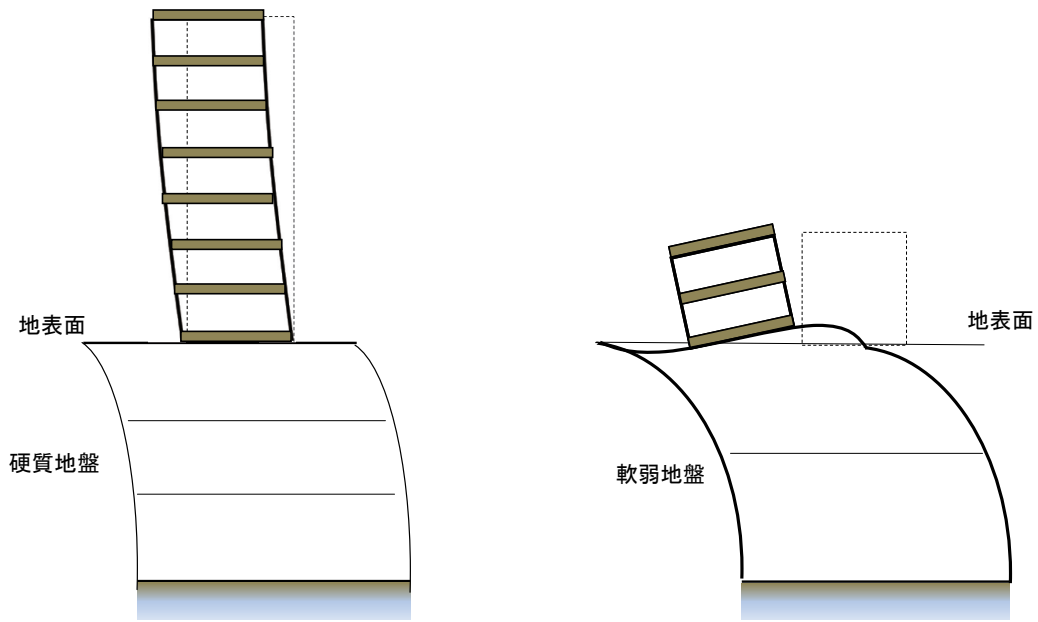


図 I -2-1 慣性の相互作用の例（1）

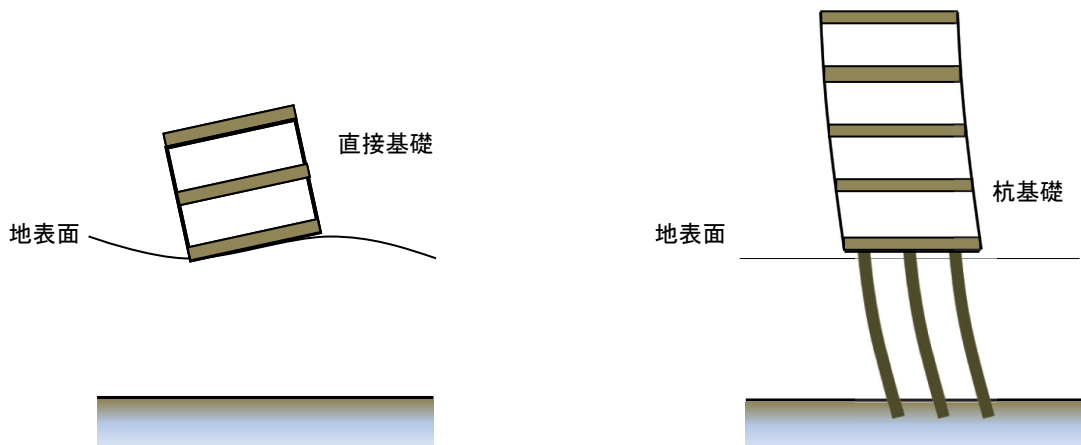


図 I -2-2 慣性の相互作用の例（2）

このように、相互作用効果は、地盤と建物の相対的なかたさの違い、埋め込みの有無、建物階数等により複雑に変化する。

2-2. 研究の方針

本研究における相互作用効果の定量的把握の方針および前提条件について示す。

- 日本全国の住宅建物として想定される範囲をおおむねカバーするよう設定した地盤・建物モデルと多様な地震波を用いて、相互作用を考慮しないモデル（基礎固定モデル）と相互作用を考慮したモデル（SRモデル）の2パターンの地震応答解析をそれぞれ実施する。なお、入力はせん断波の鉛直入射のみを考慮する。
- 地震の応答解析モデルは、基礎固定モデルとSRモデル（スウェイ・ロッキングモデル）を用いる。SRモデルは、図 I-2-3の右の図のように基礎固定モデルに水平方向からの力を表すスウェイばねと回転方向からの力を表すロッキングばねを付随したモデルであり、相互作用効果を考慮した地震応答解析に一般的に用いられている。本研究で用いるこれらの地震応答解析モデルの条件について、表 I-2-1に比較して示す。
- 算出した基礎固定モデルによる最大層間変形角 R_{fix} とSRモデルによる最大層間変形角 R_{SR} の比 R_{SR}/R_{fix} を建物応答倍率と定義し、地盤と建物の相互作用効果が建物応答に与える影響を定量的に把握するための指標として整理する（図 I-2-3）。

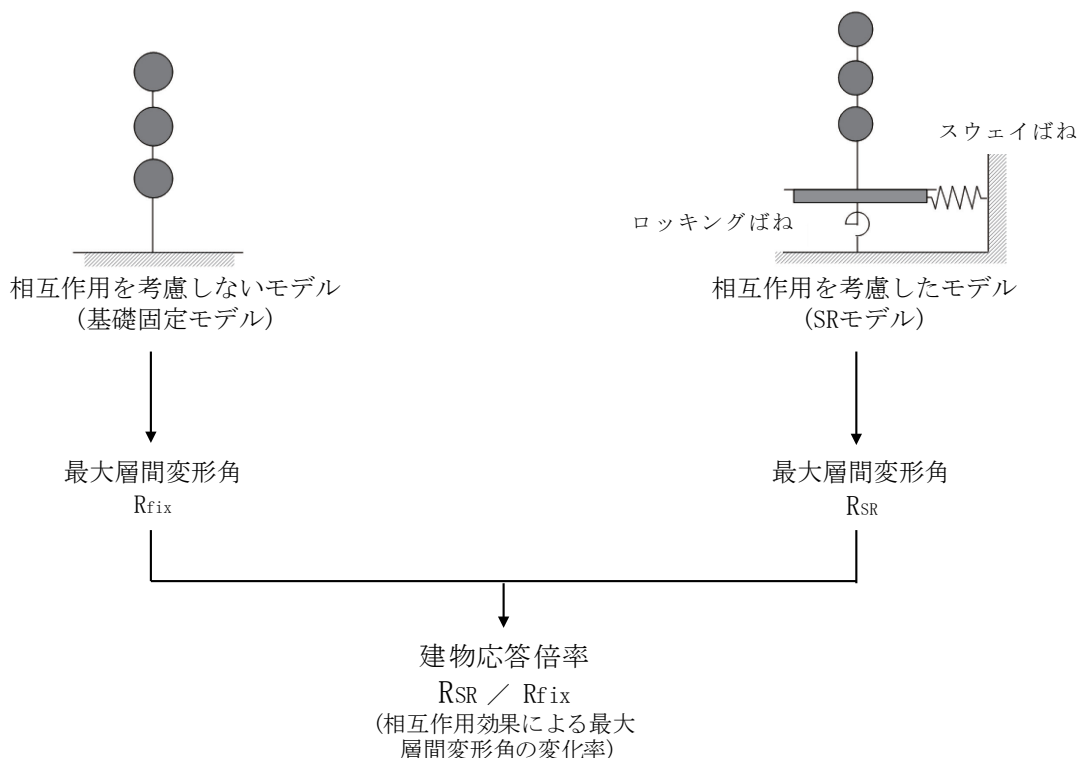
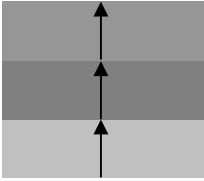
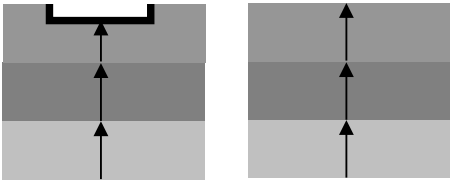
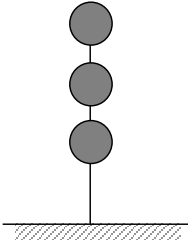
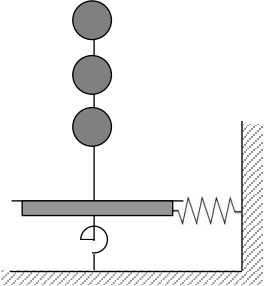


図 I-2-3 本研究における建物応答倍率の定義

表 I-2-1 本研究で用いる地震応答解析モデル

	相互作用効果を考慮しないモデル (基礎固定モデル)	相互作用効果を考慮したモデル (SRモデル)
基礎入力動の算定※	<p>○表層地盤の地盤増幅を考慮。 ×入力の相互作用は考慮されない。</p> <p>・工学的基礎の地震動を表層地盤の応答解析により求めた地表地震動を建物への入力とする。</p> 	<p>○表層地盤の地盤増幅を考慮。 ○入力の相互作用を埋込による地盤増幅の低減、基礎からの反射波の影響として考慮。</p> <p>・埋込がない場合は左記と同様。埋込がある場合は基礎底面までの地盤増幅を考慮した地震波と反射波を合成。</p> 
建物の地震応答解析	<p>○基礎固定モデルにより多質点系の時刻歴応答解析を実施。</p>  <p>・建物モデルは構造、階数、耐力の違いを考慮して設定。</p> <p>×慣性の相互作用は考慮されない。</p> <p>×基礎の浮き上がり・すべりは考慮されない。</p>	<p>○SRモデルにより多質点系の時刻歴応答解析を実施。</p>  <p>・建物モデルは構造、階数、耐力、基礎形状、埋込深さ、基礎形式(杭の有無)の違いを考慮して設定。</p> <p>○慣性の相互作用を地盤ばね(スウェイばね・ロッキングばね)により考慮。</p> <p>×基礎の浮き上がり・すべりは考慮されない。</p>

※ 建物の地震応答解析モデルへの入力地震動を基礎入力動と呼ぶ。

2-3. 研究の手順

本研究の手順をフローチャートとして図 I-2-4に示し、報告書の構成を以下に示す。図 I-2-4では、各ステップでの入出力関係もあわせて示している。

① 解析パラメータの設定<第II章>

本研究で用いる建物モデルと表層地盤モデルを現実的な範囲で設定するために、既存の建物データや実地盤データを調査する。建物データについては、主に住宅・土地統計調査をもとに、構造・建物階数・建築面積などの棟数分布を調査し、住宅・土地統計調査から把握できない基礎形式・埋込深さ等に関しては設計関連資料の調査を行う。地盤データについては、防災科学技術研究所の地盤データや都市部における平野でのボーリングデータを中心に収集して調査を行う。それらの結果に基づき、本研究の地震応答解析の対象とする建物モデル、地盤モデルの解析パラメータを設定する。

② 地震応答解析による建物応答倍率の算出<第III章>

①で設定した建物モデル・地盤モデルに基づき次の手順で地震応答解析を実施する。

まず、工学的基盤における模擬地震動を入力レベルに応じて与える。地盤モデルおよび建物モデルのパラメータのうち基礎形状、埋込深さの情報を用いて表層地盤の地震応答解析を実施し、建物の地震応答解析モデルへの入力となる基礎入力動を算定する。このとき、非線形時の地盤パラメータも一緒に出力される。次に、SRモデルの設定に必要な地盤ばね（スウェイばね・ロッキングばね）の剛性および減衰定数を、建物モデルの基礎形状、埋込深さ、基礎形式、および表層地盤の地震応答解析により出力された非線形時の地盤パラメータに基づき算定する。

以上の結果を利用して建物の地震応答解析を実施し、基礎固定モデルとSRモデルの最大層間変形角をそれぞれ求め、建物応答倍率を算出する。

③ 建物応答倍率の分析<第IV章>

②で算出した建物応答倍率について、各解析パラメータが及ぼす影響を定量的に分析する。

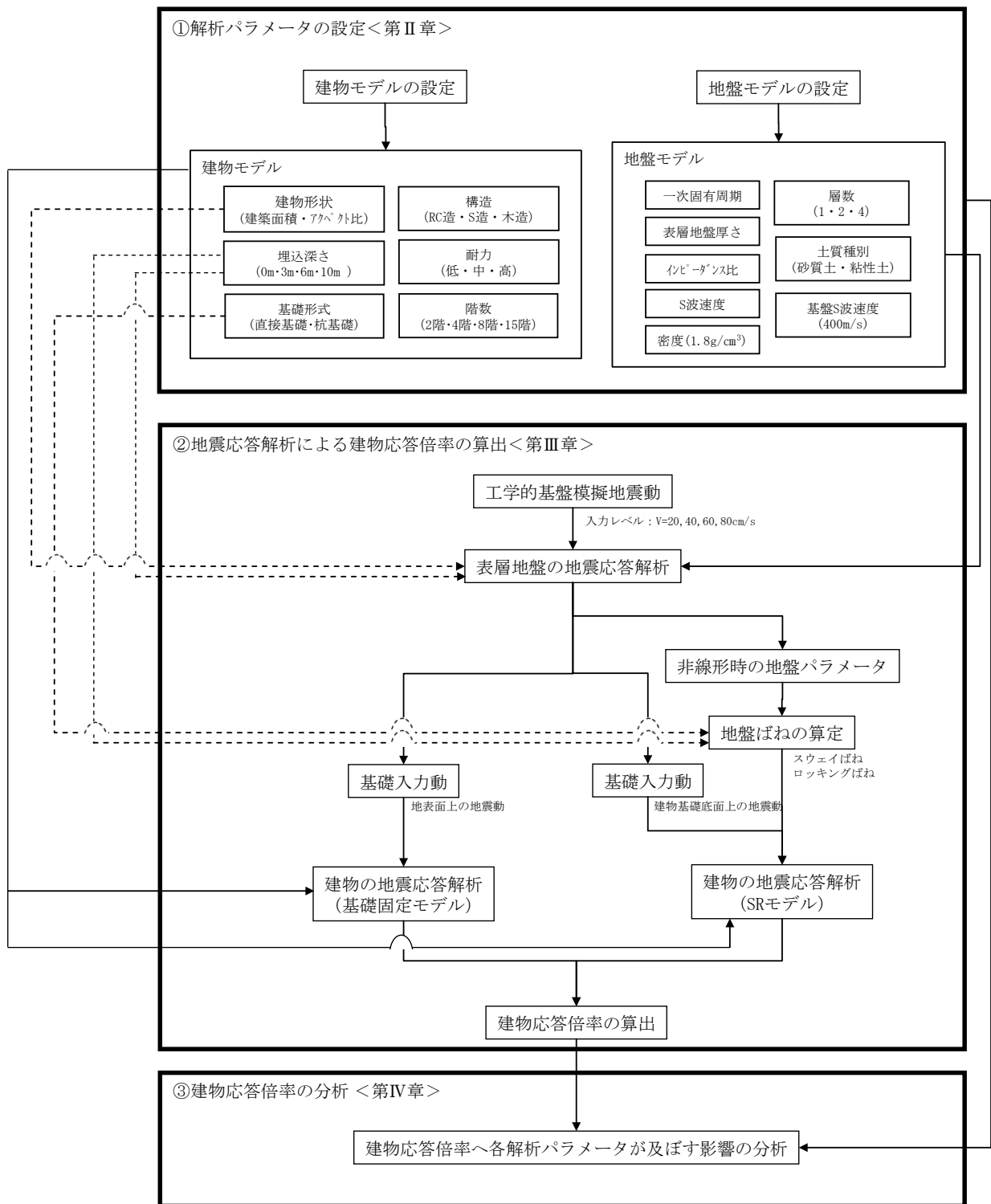


図 I -2-4 本検討の全体フロー