地震被害想定に用いる平野地下構造のモデル化

森 伸一郎1・下村 博之2・岡部 隆宏3

¹フェロー 愛媛大学准教授 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3) E-mail: mori@ehime-u.ac.jp

²正会員 株式会社パスコ コンサルタント事業部防災技術部 (〒〒153-0043 東京都目黒区東山1-1-2) E-mail: hairru1717@pasco.co.jp

³正会員 株式会社パスコ コンサルタント事業部防災技術部 (〒〒153-0043 東京都目黒区東山1-1-2) E-mail: teabka2251@pasco.co.jp

2011年3月11日の東日本大震災を受けて、2012年8月、内閣府により南海トラフ巨大地震を対象として全 影響域にわたる地震被害想定結果が発表され、関連各県ではさらに地域特性を考慮した評価のための地震 被害想定が実施された.地震被害想定において震度評価の面で地盤構造のモデル化は重要である.東京な どの精密な地下構造が既知の大都市圏に対して、地方都市域の地下構造モデルは精粗さまざまであると推 察される.愛媛県でも2012年に地震被害想定に着手し、整合性確保のため内閣府モデルを採用した.その 結果、松山平野における震度は予想される震度より低く、地盤増幅率が過小評価される問題が浮上した. これを解決するため既往研究の平野を覆う高密度な微動観測の結果に基づいて地盤構造モデルを修正した. その結果、2001年芸予地震のシミュレーション結果は震度観測とアンケート震度分布に調和し、修正モデ ルの妥当性が検証できた.このような改良ができれば、各地方公共団体やその住民にとって有意義である.

Key Words : seismic intensity, basin structure, quake-tsunami estimate, Nankai-trough earthquake

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災を受けて、2012年8月, 内閣府により南海トラフ巨大地震を対象として全影響域 にわたる地震被害想定結果¹⁾が発表され,関連各県では さらに地域特性を考慮した評価のための地震被害想定が 実施された.

地震被害想定において震度評価の面で地盤構造のモデ ル化は重要である.東京ほかの精密な地下構造が既知の 大都市圏に対して,地方都市域の地下構造モデルは精粗 さまざまであると推察される.愛媛県でも2012年に地震 被害想定に着手し,整合性確保のため内閣府モデルを採 用した².その結果,松山平野における震度は予想され る震度より低く,地盤増幅率が過小評価されるという問 題が浮上した².

これを解決するため既往研究の平野を覆う高密度な微 動観測の結果に基づいて地盤構造モデルを修正した.そ の結果,2001年芸予地震のシミュレーション結果は震度 観測とアンケート震度分布に調和し,修正モデルの妥当 性が検証できた.本論文では,愛媛県の地震被害想定³⁾ における強震動評価の概要,地盤モデル作成上の問題点 とその解決法について述べる.

2. 地震被害想定の方針と方法

(1) 想定地震

平成13年度に実施した愛媛県地震被害想定調査³では, 既往の地震履歴や活断層調査等を基に,県内に存在する 中央構造線断層帯と四国沖合の南海トラフで発生する地 震から,5つの想定地震が設定された.

平成24年度の愛媛県地震被害想定調査³においては, 前回調査の選定基準を踏まえ,さらに最新の国の評価や 研究成果を反映し,想定地震を設定することとされた. 想定地震の設定方針及び設定基準は以下のとおりである. 〔設定方針〕

[1] 前回調査(平成13年度)の選定基準を踏襲する. (※前回調査:既往の地震履歴や活断層調査等を基に、 県内に存在する中央構造線断層帯と四国沖合いの南海ト

ラフで発生する地震)

[2] 国(地震調査研究推進本部)の最新評価や中央防 災会議等の新たな知見を反映する.

〔設定基準〕

[1] 地震調査研究推進本部が長期評価を行っている主要活断層帯と海溝で起こる地震とする.

[2] 地震規模及び愛媛県での震源距離から、発生した







図-1 愛媛県全域と松山平野の地形分類図4

際に愛媛県への影響が大きくなる想定震源

[3] 想定震源の想定ケースが複数になる場合,想定ケースのいずれもが発生し得ることを前提とした防災対策 検討が必要であることから,各想定ケースで推計した震 度分布等を重ね合わせ包絡させた最大クラスを設定する.

(2) 地盤モデルの作成方法

a) 概要

地震応答解析を行うために、地下構造を浅部地盤モデ ルと深部地盤モデルに分けて作成し、合体させている².

浅部地盤は、地震動の比較的短周期な成分を増幅させる効果のある未固結堆積物(第四紀層)からなる地表付近の地盤である.深部地盤は、工学的基盤と言われる十分に硬い地盤で、ここではVs(S波速度)=0.6 km/s 程度以上であり、かつ、浅部地盤より下方で地震基盤(Vs=3km/s程度以上)の上にある地盤である².

図-1に(a) 愛媛県全域と(b) 松山平野の地形分類図を示 す.大半は山地であるが,松山平野(重信川と石手川の 扇状地),周桑平野(中山川の扇状地),今治平野(蒼 社川と頓田川の扇状地)などの平野があり,大洲盆地な どの盆地が点在する.したがって,これらの平野と盆地 の浅層地盤のより詳細なモデル化が,全国を対象とする 内閣府想定よりも期待されるところである.

b) 浅部地盤モデルの作成方法

浅部地盤モデルは、以下の手順により作成した²⁾.

[1] 地形分類図4に基づく地形区分の特定:全14区分.

[2] ボーリングデータに基づく個々の地形区分域内の
 地下構造(地層層厚,地下水位等)の把握:最新の四国
 地盤情報DB⁵(6,061本)とkunijiban⁶(1,233本)等を使用.

[3] 個々の地形区分域の細分化による地盤タイプの設定:個別地形区分域内で,ボーリングデータに基づく地層断面図,旧版地形図等高線,土地利用状況を考慮して,同一の一次元地下構造としてモデル化できる領域に細分化してモデル化した.細分化された一つの一次元地盤モデルを「地盤タイプ」と呼ぶ.

[4] 地盤タイプのモデル化:地盤タイプの特性をモデル化する対象属性は、地層の数、地層の深度、土質種別、 層厚、N値、単位体積重量、Vs,繰り返し地盤変形特性であり、ボーリングデータに基づいた.ボーリングデータがない領域では近接する同一地形区分の地盤タイプを適用した.個別の地形区分域内にボーリングデータが 1点のみであっても、近隣の同一地形区分域のボーリングデータに基づく推定地下構造が異なると考えられる場合は、異なる地盤タイプを設定した.最終的に設定した地盤タイプの数は、最大は氾濫平野で144、最小は扇状地で3、全地形区分の合計で533となった.一つの地盤タイプは一つの一次元モデルである.

[5] メッシュへの地盤タイプの割り当て:地盤の地震 応答解析を行う約125 m×125 m 四方の格子域(1/8地域 メッシュ⁷⁾)に、メッシュ内で面積が卓越する地盤タイ プを割り当てた.

[6] 3次元モデルの作成:隣接する各一次元地盤モデル を接続させた.

c) 浅部地盤モデル(地盤タイプ)の物性設定方法

浅部地盤モデルを構成する各メッシュに割り当てられる一次元地盤モデルである「地盤タイプ」を構成する各 地層(25種類)には代表物性値を設定する².

[1] 標準貫入試験打撃数:N値



図-2 深部地盤 Vs=0.6 km/s 層(D3層)上面の深度分布²⁾ 「全国1次地下構造モデル(暫定版)」¹²より作成

代表的なボーリングデータに基づいて、各地層内での 平均値を代表値として設定した.

[2] 単位体積重量: γ_t (g/cm³)

前回調査での採用値や道路橋示方書⁸の土質分類に対応する代表値を参考に設定した.

[3] せん断波速度: Vs(m/s)

N値とVsの経験式(中央防災会議⁹)を採用し,愛媛 県内でのPS検層などのVsの少ない実測データが採用経 験式と調和することを確認した. (110~340 m/s)

[4] 土の繰り返し変形特性(動的変形特性)

古山田ほか¹⁰の提案モデルを採用し,砂質土と粘性 土の2種類の特性を当てはめた.

d) 深部地盤モデルの作成方法

2012年1月に地震調査研究推進本部より公表された 「長周期地震動予測地図2012年試作版」¹¹⁾では付録とし て「全国1次地下構造モデル(暫定版)」¹²⁾が公表され た.愛媛県の想定では、この弾性波速度構造モデルを用 いた²⁾.

この地下構造モデルは、日本全国を覆う広域にわたっ て、プレートを含む地殻を対象にモデル化したものであ る¹³⁾. S 波速度層として深部地盤をVs=0.35 km/s 相当から Vs=4.6 km/s 相当まで23層に区分している.現時点で利用 可能な最良の深部地盤モデルと考えられる.県内の1 km メッシュごとに深部地盤構造を設定した.図-2に深部地 盤Vs=0.6 km/s 層(D3層)上面の深度分布を示す.

e) 浅部・深部地盤モデルの接合方法

工学的基盤最上部層をVs=600 m/sとし、それより浅い 部分を浅部地盤とする²⁾. すなわち、「全国1 次地下構 造モデル(暫定版)」¹²のD3層を深部地盤モデルの最上 層として、浅部地盤モデルは、ボーリングデータを基に 設定した表層部分(20~45mの深さまで)の下に、「全 国1 次地下構造モデル(暫定版)」のD1層(350 m/s), D2層(500 m/s)を接続するというものである. この2つ の速度層の層厚については、原モデルの層厚を不足層厚 に対して比例配分することでモデル化した.

最新の地震調査研究推進本部の報告書¹³⁾の結論では,

「深部地盤モデルのみではなく,浅部・深部統合地盤モ デルを用いることにより,特に周期0.5から2秒の地震動 評価の精度が向上し,海溝型巨大地震の広帯域化にも資 することが確かめられた.ただし,このようなモデルの 作成は,関東平野および新潟県地域と日本全国の一部地 域にとどまっている.今後全国的に展開するためには, ボーリングデータをはじめとする地下構造に関する調査 やデータ収集を行うことはもちろんであるが,地質層序 を考慮した浅部地盤の初期モデルの構築が重要とな る.」と報告されている.

周期0.5から2秒の地震動評価は計測震度や被害に最も 影響の大きい成分であり,浅部地盤モデルが特に重要と なる.

(3) 地震動の計算方法

a) 計算方法の概要

震源から地震基盤面までは3次元地盤構造で計算し, 地震基盤面から工学的基盤面までは一次元線形応答解析 で,工学的基盤面から地表面までは等価線形化法による 一次元応答解析で応答を計算した²⁾.したがって,地震 基盤面より上方については,3次元地盤構造が考慮され ているが,波動の3次元応答は評価されていない.

b) 地震基盤での地震動

統計的グリーン関数を用いてスペクトル合成により強 震動を推定する原田ら(1995,1998)¹⁰の手法を用いた²⁾. 震源断層を格子状に小断層に分割し,震源断層を一様破 壊として破壊を考慮して足し合わせるもので,分割した 小断層の破壊パターンは破壊開始点から同心円状に均等 速度で拡がっていくものとした.強震動生成域と背景領 域のそれぞれの領域では,領域間,領域内の破壊伝播は 一方向に伝播するものとした.

b) 工学的基盤での地震動

地震基盤面から工学的基盤面までの深部地盤を一次元 モデルとし、線形応答解析により工学的基盤面での地震 動を算出した²⁾.1kmメッシュの格子点で得られた地震 動を,補間により125mメッシュの格子点の地震動を求 めた.すなわち、1kmメッシュの格子点4点より、125m メッシュの格子点77点を補間により算定した.

c) 地表での地震動

地表面の地震動は、浅部地盤モデルの土の繰り返し変 形特性を考慮するため、非線形性応答を等価線形化法に より考慮した.計算の負荷を低減させるため、地盤タイ プごとに工学的基盤での地震動の振幅を変化させて地表 の非線形応答をあらかじめ求めておき、これらの非線形 増幅関係を利用して変換し、1kmメッシュの格子点で得





られている工学的基盤面での地震動を用いて125 mメッシュの地表格子点での地震動を求めた².

なお、等価線形化法による地盤の応答解析は、工学的 基盤内、浅部地盤の両方で、ひずみ依存を周波数ごとに 評価できる杉戸らによる方法^{ID}で、プログラムFDEL¹⁸ によった.

また,震度階級は,気象庁の計測震度算出法を適用して計算された計測震度に基づき算定した².

(4) 地震応答解析の結果と問題点

前述した方法で地震動の計算を実施した結果,松山平 野では平野周囲の山地・丘陵地より震度は大きくなると 予想されたが,地震動の大きさは周囲の山地と比べて震 度で1ランク上がる程度で,前回想定(2002)の結果と 比べても小さめであった.2001年の芸予地震でも松山平 野では,震度や被害は周囲の山地・丘陵地よりも大きか った.

震度分布は「全国1次地下構造モデル(暫定版)」¹⁰のD1層,D2層,D3層の深さ分布(図-2参照)に強く影響されているものと判断された.2.(2)e)で紹介した見解を斟酌すると,地方都市の平野については必ずしも十分な精度でモデル化されていない可能性がある.すなわち,少なくとも最も地震工学的情報が多い松山平野については,初期の地盤モデルを修正する必要があると判断した.愛媛県の県庁所在地である松山市が位置し,四国最大の人口の市が位置する松山平野の地震動評価は被害想定の精度を左右しかねない大きな問題と考えたからである.

図-3に浅層地盤作成に当たり用いた地盤ボーリングの ボーリング長の頻度分布を示す.約7,300本の内,93%は 長さ30 m以下であり、56%は15 m未満である.一方、50 m以上はわずか51本である.これは杭支持層で長さが決 定されるものもあるが、小規模構造物や下水道などの先 端支持層深さで規定されないためと推察される.

一方で、温泉ボーリングなどの深いボーリングもいく つかあり、市原ら¹⁹によれば、重信川河口部南方で172 m,下流部北方で200 m以上,重信川と石手川の合流地 点南で209 m,重信町見奈良西部で160 m以上,などと限 定されるが深いボーリングで確認された深い基盤岩深さ がわかっている.工学的に利用できる物性に関する情報 はないが,これらの盆地基盤構造の重要な知見を取り入 れる必要がある.「全国1 次地下構造モデル(暫定 版)」¹⁰は初期値として利用すれば良く,これより信頼 できる情報は導入して改良すればよい.

そこで、この問題を解決すべく、松山平野で実施され た平野を覆う微動観測結果や既存の基盤構造の情報など を利用して、松山平野の工学的基盤面上面深さと浅部地 盤構造を見直し、これにより地盤モデルを修正すること とした³.

3. 松山平野における浅層地盤モデルの修正

(1) 平野における浅層地盤モデル化の方法

深い地盤の重要性は地震動の長周期成分を考えるとき 重要であるが、家屋など多くの小規模構造物を対象にし た場合には地震動の短周期成分が重要である。そのこと は、低地と台地で木造家屋と土蔵の被害率に異なる差異 が生じた関東地震を初めとする多くの被害地震の経験に 加えて、1秒前後の人が感じやすいゆれや物・家屋の挙 動を基にして決められた震度(体感震度)が家屋や構造 物の被害と相関があることでも理解できる。

東京,大阪,名古屋など日本の主要都市圏は,大きな 平野に位置していることから地震基盤が深く基盤の上の 堆積層は厚い.一方,建物も高層建築物が多く,固有周 期が長くなるので地震動の長周期成分が問題となる.し たがって,これら都市圏では,深い地盤構造が長年にわ たり研究がなされ成果の蓄積が多い.また,これらの研 究成果が実務に反映できるようにならない内にも実務上 の必要性から,地盤の地震応答解析に適用できる工学上 の基盤という意味で「工学的基盤」という概念が我が国 で創出された.

一方,地方都市は小規模な平野や盆地に位置している ため,基盤は相対的に浅いはずである.しかし,固有周 期が長く大きな支持力を必要とする構造物が極めて少な い地方都市では、長尺ボーリングやPS検層などの地盤 の増幅特性を評価するための材料が極めて乏しい.した がって、微動測定による振動特性の把握、特に、平野を 横断する卓越周期の把握や平野を覆う高密度な卓越周期 分布を得ることは、地方都市にとって極めて効果的かつ 重要である.このような観点からの研究は少なくない.

たとえば、森・俵²⁰ は松山平野で微動測定により卓 越周期の平面分布を把握し、森ら²¹⁾ は高知平野で卓越 周期の平野横断分布を把握し、基盤より上方の卓越周期 の空間分布を例示している.しかし、工学的基盤面はお ろかボーリングによる支持層相当面の平面分布すら得られておらず、微動測定の結果は被害想定などの実務²⁰ではあまり取り入れられていないようである.

ここでは、工学的基盤面をVs=500 m/sの層の上面であ ると仮定して、それより上層の浅部地盤モデルの固有周 期が得られている卓越周期に合うように、ボーリングデ ータを基にした表層地盤モデル下端と工学的基盤面で挟 まれる部分の層厚を求めて、浅部地盤モデルとすること とした².

(2) 微動による固有周期を基準にする妥当性

2. (2) e)で述べた,最新の長周期地震動予測地図作成 支援事業の成果報告書の結論では,先名ら²³⁾の研究成 果を受けて浅部・深部統合地盤モデルの有用性と今後の 展開を述べている.先名ら²³⁾の手法は,微動アレー探 査と地震動観測の放射成分/鉛直成分(RV)比による 地盤構造逆解析およびS波増幅率とQ値の検討により地 震動の解析値と観測値が十分小さくなるまで地盤構造を 修正し,そのような地点の間の面的補間に微動の水平/ 上下成分(HV)比を利用するというものである.合理 的で精緻な検討方法であり,信頼性の高いものと思われ る.しかし,その展開を待つと同時に,各地方都市で行 われている微動測定の成果を実務に段階的に取り入れる ことも重要であると思われる.

大堀ら²⁴⁾は、周期1秒前後までの短周期地震動の増幅 特性を左右する工学的基盤以浅の浅層地盤モデルを高精 度化することを目的にして、125 mメッシュの高分解能 の高知平野市街地域の3次元地盤構造モデルを構築した. そのモデルの妥当性評価には、森ら²¹⁾の平野を横断す る微動測定による卓越周期分布を基準としている.

図-4に大堀ら²⁴⁾は高知平野市街地域の3次元地盤モデ ルによる地盤の卓越周期分布を示す.この図には、森ら ²¹⁾が実施した微動観測点が記入されている.大堀ら²⁴⁾の 論文では卓越周期の分布は基盤の深さ分布と見事に調和 している図が示されている.図-5に、(a)基盤が浅く周期 0.5秒が卓越する測線(E-E'測線)と(b)基盤が相対的に深 く周期1秒程度が卓越する測線(F-F)測線)における卓 越周期分布を示す.高精度3次元地盤構造の計算された ものと測定で得られた卓越周期の分布が、周期0.5秒程 度の深さでも周期1秒程度の深さでも一致しているのが わかる.また、高知平野のようにボーリングで判明して いる深さと基盤面との深さの差が小さい場合には、卓越 周期分布は基盤深さ分布と相似であるのがわかる.

これらのことを併せ考えると、地盤の固有周期,特に 0.5~2秒の周期帯は、多くの構造物の固有周期帯にも相 当することから、安定した精度と空間的な解像度がある 程度確保できれば、地盤モデルに実際の地盤の卓越周期 を反映させることが、形式的に層序を仮定した地盤モデ







(図は大堀ら²⁴⁾より引用)

ルに固執するより重要であることを示唆している.

すなわち,浅部地盤モデルや深部地盤モデルの上部に ついては,地盤ボーリングを基にした表層地盤モデルと 工学的地盤上面との間の地層の深さや物性は,微動によ り得られた固有周期に適合するように設定することは, 一定の合理性がある.



図-6 森・俵²⁰による松山平野の微動観測点 (数字は測線番号,○は図-8で分布を示す測線)



図-7 愛媛県水理地質図²⁰に示された松山平野西部の
 基盤岩等深度線と森・俵²⁰の微動観測点(図に追記.数字は測線番号,〇は図-8 で分布を示す測線)²⁾

(3) 松山平野全域での微動測定結果の利用

森・俵²⁰は、松山平野では160~209mで着岩する長尺 ボーリングが3本しかなく、地震応答を支配する地下構 造の把握が極めて重要であるとの認識から、松山平野の 概略の地下構造を推定することを目的として、500mメ ッシュの領域中央で常時微動観測を行い、500mの間隔 で南北20測線で1測線当たり8~33点、総数339点の測定 を行い、平野全面の卓越周期の分布を得ている.

図-6に森・俵²⁰による松山平野の微動観測点を示す. 後に示す卓越周期分布の南北方向断面における南北方向 距離の基準は重信川河口での重信川の中心としている. 図-7に愛媛県水理地質図²⁵を示す.この図では、図-6の 測線25の最深部付近で、約200 mで基盤岩に到達するボ ーリング地点が掲載され、この測線より東の領域につい



 図-8 松山平野の南北測線(測線6,13,19,25)に沿う卓 越周期分布と換算したみかけの基盤深さ²⁰⁾

ては地質学的に推定された基盤面の等深度線が記入されている.図中には、地盤モデルの修正に用いた微動観測 点を赤点で示している.なお、松山平野の表層の平均 Vsを360 m/sとして、特定した卓越周期T(s)を4分の1波 長則を適用して得られる表層厚の算定式(1)により、見 かけの基盤深さが得られ、概略の3次元地盤構造を推定 している²⁰.

$$H = (V_s/4)T = 90T \tag{1}$$



図-9 松山平野の南北測線(測線6,13,19,25)に沿う卓越
 周期分布と換算したみかけの基盤深さ²⁾

図-8に、松山平野の南北測線(測線6,13,19,25)に沿う卓越周期分布と換算したみかけの基盤深さを示す.松山平野基盤最深部と推察される点を通る測線25は、最も長い卓越周期2.3秒を示し両側に1 km離れれば0.5~0.6秒以下となる.測線19,13,6については、いずれも伊予断層近傍で急激に卓越周期が長くなる様相を示す.測線19,13,については、河川付近で、その前後で卓越周期が0.3~0.5秒であるのに比べて卓越周期が0.6~1秒とやや長くなる.測線6では、距離が-2.5~4 kmと2.5~4.5 kmの区間で1.0~1.5秒とその周囲で安定的に0.5秒であるのに対して、階段状に長くなる.測線13については6 kmより遠方の堀江地溝帯に相当する区間では0.7~1秒と、その前後より長くなる.このように、卓越周期は、松山平野の地形を反映していると考えられる.

そこで、はじめに松山平野の全域にわたり卓越周期分 布を求め、浅層地盤モデルの一元モデルの固有周期が卓 越周期に合うように、工学的基盤面をVs = 600 m/sの層

(D3層)の上面と仮定して、それと「地盤タイプ」の 最下層下端との間に新たに浅部地盤モデルの最下層を追 加した.深部地盤モデルについては原モデルの層厚を維 持したまま上下させた.

ただし、測線25より東側の平野東部は、文献²⁰に卓 越周期断面が掲載されていないので、愛媛県水理地質図²⁵に示された地質学的に推定された基盤面の等深度線を 採用し、式(1)により卓越周期を逆算した²⁰. 測線25での 接続は、微動による基盤面を優先し、滑らかになるよう にした²⁰. 測定点間の補間はスプライン補間である.ま た、山地・丘陵地の領域縁では「全国1 次地下構造モデ ル(暫定版)」¹⁰を優先した.このような得られた松山 平野全体の卓越周期分布²⁰を図-9に示す.平野北西部に 南北に延びる堀江地溝帯もある程度表現できている.こ の図を基にして前述した方法で地盤モデルを修正した.



図-10 松山平野における lkm メッシュ格子点の分布とh 比較検討した地盤モデル断面の位置²⁾



図-11 松山平野を東西に横断する断面 1 における各層の 上面深さ分布²⁾

(4) 修正した松山平野での地盤モデル

図-10に松山平野における1 kmメッシュ格子点の分布 と比較検討した地盤モデル断面(断面1~5)の位置を示 す.

図-11に松山平野を東西に横断する断面1における各層 の上面深さ分布を示す.浅部地盤モデルの地層として D1層(Vs=350 m/s), D2層(Vs=500 m/s),工学的基盤 層最表層としたD3層(Vs=600 m/s),D4~D10層(700~ 1,700 m/s)などが示されている.この図からわかるよう に,D3層上面を工学的基盤として取り扱ったが,D2層 からD10層まで群として上下させたため,実質的には Vs=500 m/sのD2層が工学的基盤上面と見ることができる.

修正前後のモデルの変化は工学的基盤面の変化として 大きく,全く異なっている.特に,修正モデルでは松山 平野中心より東側が急激に深くなり200mに達して東方 に向かい浅くなっていくという形状をしている.この部 分は,伊予断層から川上断層に右横ずれ断層がステップ する際のプルアパートベイズンと考えられ,両断層を結 ぶように重信川断層があると考えられている.大野ら²⁰



図-12 松山平野を南北に横断する断面1における各層の上面深さ分布²⁾



図-13 松山平野の浅層・深層地盤モデルを修正して得られた地盤モデルメッシュの Vs=500m/sの D2 層の上面深さ分布²⁾

は、反射法地震探査により松山平野東部の地盤構造を調べているが、彼らによると東西方向に最深部で深度約900mに達するような向斜構造を呈し、基盤岩の上面は盆地状構造を呈しており、その上に、鮮新〜更新世堆積物および完新世堆積物が堆積しているとしているが、図-11に示した見かけの工学的基盤構造は傾向としてこれと整合する.

図-12に松山平野を南北に横断する断面2~5における 各層の上面深さ分布³を示す.いずれの断面も大きく変 わっている.断面2では,堀江地溝の深さが小さく評価 されている.また,伊予断層と平野南端で交差する断面 2,3,4では,断層近傍の卓越周期が長くなる様子は考慮さ れていない. 図-13に松山平野の浅層・深層地盤モデルを修正して 得られた地盤モデルメッシュのVs=500 m/sのD2層の上面 深さ分布(愛媛県中予地方)²を示す.図右上の周桑平 野およびその北東沖には深い領域だけであったが,修正 により松山平野についても深い基盤構造が考慮されたこ とになっている.

このようなモデルの大胆な変化は、先名ら²³⁾の事例でも提示されている.

4. 松山平野における浅部地盤モデルの検証

(1) 検証の方法

地盤モデルの深い地盤の重要性は地震動の長周期成分



図-14 震源断層の平面位置と震源断層面のすべり分布(筧²⁰, 筧²⁰を引用),およびこれを参考に設定した震源モデル³)

を考えるとき重要であるが、家屋など多くの小規模構造物を対象にしたとき、震度に大きな影響のある浅部地盤 モデルの影響が相対的に大きいと考えられる.

ここでは、2001年3月24日に発生した芸予地震 (Mjma=6.7) について、地震被害想定で用いる手法と同 様な方法で震源をモデル化し、修正した地盤モデルを用 いて再現解析を行い、観測された計測震度や地震直後に 実施された高密度アンケート震度調査の結果と比較する ことで浅部地盤モデルの妥当性について検証する³.

芸予地震の震源モデルは、 (2^{50}) により推定された震 源過程によった³. この地震はフィリピン海プレートの スラブ内地震である. **図-14**に震源断層の平面位置²⁸⁾ と 震源断層面のすべり分布²⁸⁾ を,およびこれを参考に設 定した震源モデルを示す. 断層面の傾斜角は、北側面で 60度、南側面で70度、地震モーメントM₀=3.10×10¹⁹ Nm, 平均すべり量D=1.8 m、静的応力降下量 $\Delta \sigma$ =5.7 MPaであ り、アスペリティー(強震動生成域)を各断層で2つ設 定し、それらの位置は震源断層のすべり分布を参考にし た².

(2) 物理指標から見た再現解析の妥当性の検討

上述した方法による再現解析の結果,愛媛県全域の地 表での最大加速度の距離減衰は、司・翠川²⁹⁾の距離減衰 式のμ-σ(平均-標準偏差)付近に平均が位置し、や や小さめの評価であるが、最大速度の場合には、司・翠 川²⁹⁾の距離減衰式のμ付近に平均が位置し、震度の評価





という観点からは、震度は最大加速度より最大速度の方 が相関が高いことを考慮すれば、おおよそ芸予地震の震 度分布の評価は大局的には妥当である².

そこで,推定された基盤地震動のスペクトル特性について検証する.図-15に震源断層の南方に位置して松山



図-16 修正した浅部・深部地盤モデルを用いた再現解析による震度分布と地震観測地点における計測震度の比較 (報告書掲載の図²⁾に加筆)

平野に近い砥部(EHMH05)と東方に位置する丹原 (EHMH04)における地中観測記録の加速度応答スペク トル(減衰定数5%)を示す.なお,地中地震計の埋設 深さのVsは,砥部では2,400 m/s,丹原では2,200 m/sであ る.砥部では,1秒付近で観測記録より解析の方が大き いが,その他の周期ではおおむね両者は同じである.丹 原では,1.5秒より長周期側では観測値より解析値がや や小さいが,おおむね同程度と言える^a.これらから, 工学的基盤では,地震観測地点の観測記録を,解析手法, 震源モデル,地盤モデルを組み合わせた手法の総合的に 再現できたと考えられるため,手法とモデルの総合的な 精度は確認できたと言える.

(3) 震度から見た再現解析の妥当性検討

a) 検討方法

次に, 震度から見た妥当性を検討する. 推定された基 盤地震動のスペクトル特性について検討する. 気象庁, 防災科学研究所ほか多くの機関で地震観測が行われてい る. 芸予地震では多くの観測記録が得られており, 震度 5強の記録だけでも上記2機関で32地点におよぶ30.

これら観測された計測震度はもちろん、地震直後に実施された高密度アンケート震度調査の結果と比較することで、浅部地盤モデルの影響が反映されると考えられる詳細な震度分布を比較することで浅部地盤モデルの妥当性を検討する.

b) 計測震度

図-16 に修正した浅部・深部地盤モデルを用いた再現 解析による震度分布と地震観測地点における計測震度 の比較²を示す.愛媛県には現在17市町であるが,合 併前は70市町村あり,全市町村に地震計が設置されて いた.図中には,芸予地震の記録が観測された58地点 が示されている.ここでは,解析による震度が観測さ れた計測震度より大きい場合は過大評価(O: Overestimate),両者が等しい場合には合致(E: Equal), 小さい場合には過小評価(U: Underestimate)と記した. Eが44,Oが6,Uが8である.過大評価地点は北東部 に,過小評価地点は南西部に主に見られる.合致する 地点は,観測点の76%に相当する.



-17 ス家庁の計測展度とス家庁の地震計が位直 9 る地区(町丁目大字)における地区アンケー ト震度の関係(森ら³⁰)

図では判別が困難な地点が少なくない。例として図 中に八幡浜市と伊方町の地震観測地点の周辺を抽出し たものを示した。八幡浜市,伊方町の地震計の設置地 点は地形分類図に示したように小規模氾濫平野に位置 しており,周囲は山地である。したがって,地震計の 周辺地域の震度が小さく,地震計位置の震度が突出し て見えるが、極めて狭い領域で地震動が増幅するため であると考えられる.同様に、周囲の震度の色と異な っていても非常に狭い領域において微地形の異なるた めであることに注意が必要である.

過大・過小評価している地点もあるが、76%の地点で 同じ震度として評価しており、総合的に解析手法と解析 モデルの双方が妥当であると言える.

c) 高密度アンケート震度調査^{30,31}

森ら³⁰は、中四国9県の全ての県立高校または中学校 (愛媛県のみ)を対象として、原則として1校あたり 125枚配布し、生徒の家族を対象として、アンケート震度 調査を行った.アンケート配布校数は563校、回収校数 は433(学校回収率は77%)であり、配布枚数は70,680 枚、返信枚数は39,287(用紙回収率は56%)であった. また、中四国9県の総市町村数は534であり、アンケー ト調査による回収市町村数は470であった.

町丁目大字単位の地域(地区と呼ぶ)を対象とし,ア ンケート震度の平均値を求めこれを地区震度として,中 四国9県の震度情報ネットワークシステム(219地点), 気象庁(192地点),防災科学技術研究所のK-NETと



図-18 アンケート震度調査による愛媛県全域の地区震度の分布³¹⁾

KIK-Net (77地点) のそれぞれの計測震度との相関を調べた. その結果,相関係数はそれぞれ,0.72,0.77,0.81 となり,アンケート震度の地区震度が有効であることが明らかにされた.

図-17に気象庁の計測震度と気象庁の地震計が位置す る地区(町丁目大字)における地区アンケート震度の関 係³⁰⁾を示す.相関係数は0.77であり高いと言える.特に, 計測震度が3以下のときに差異が大きく相関係数を下げ る原因となるが、3以上では相関は高く、両者はほぼ1:1 の関係にあると言える.したがって、アンケート震度調 査による地区震度は地区を代表する震度として見なすこ とができると考えられる.

図-18にアンケート震度調査による愛媛県全域の地区 震度の分布³¹⁾を示す.着色していない部分にあたる町 丁目大字は、中学校に通う生徒が不在または回答がなか ったところで、山間地に多い.逆に言えば、住居が疎ら であることを意味しているとも解釈できる.一方、計測 震度の議論でも述べたように、地震計の設置箇所は集落 の密集したところであるので、地区震度は地区の面積平 均的なものではなく地区の集落密集領域の平均震度であ ると解釈する必要がある.そのようなことを考慮しなが ら、図-16の再現解析の震度分布と比べてみると、大局 的にはアンケート震度の分布に近く、再現解析は地震計 のない地区でもおおむね良好に再現されている³と言え るものの、狭い領域の集落密集地のある地区を詳細に見 ると再現解析が過小評価している部分が少なくない.こ のことは浅部地盤モデルに改善の必要があると言える.

次に、本論で対象となる松山平野での震度分布を議論 する.図-19に松山平野とその周辺について再現解析³⁾ とアンケート震度調査の地区震度の震度分布³¹⁾の比較

を示す. 同程度かやや過大評価している傾向がある. 地 区震度で震度6弱の領域は2箇所見られる. これらを破線 の領域で示すが、平野の西部で北東とその南西の領域で ある. 前者は愛媛大学のある城北地域で、後者は市街地 中心部の南西部である.愛媛大学ではほとんどの校舎 (RC造, SRC造) で構造的な被害があり, 道後・祝谷 地区では、小学校校舎の半壊、瓦被害とブロック塀被害 があるなど、点線の領域の地区震度5強表示の地区でも 構造物被害の観点からは6弱のゆれがあったと考えられ る. また、もう一つの破線領域でも、RC構造物の外壁 のタイル脱落や隔壁には対角線上に伸びるせん断ひびわ れが多く見られ、構造的には震度6弱の被害の様相を呈 していた. このような特徴は再現解析にも現れている. さらに、震度が過大評価されているところについては浅 部地盤モデルに改良の余地を残すことを示唆しているが、 一方、隣接する震度の大小関係は、再現解析でも見られ ており、このことは浅部地盤モデルの相対的なモデル化 の適切性を表している.

何よりも松山平野の周辺では微地形によるわずかな違いが震度の差に現れている部分もあるが,圧倒的な部分は震度に地形による違いはほとんど無く,松山平野における浅部地盤モデルの修正は有効であったと言える.

(4) 再現解析と浅部地盤モデルの妥当性

以上の議論より,(1)最大加速度は過小評価であるが 最大速度は解析と観測が合っている,(2)Vsの大きな工 学的基盤内での地震動の加速度応答スペクトルが解析は 観測とおおむね合致する,(3)地震観測地点では,計測 震度で過大・過小評価している地点もあるが,76%の地



```
(a) 再現解析<sup>2)</sup>
```

(b) アンケート震度調査³¹⁾

図-19 松山平野とその周辺についての再現解析とアンケート震度調査の地区震度の震度分布の比較

点で同じ震度として評価している,(4)計測震度との相 関からその精度が確認されたアンケート震度調査による 地区震度では、愛媛県全域について概ね傾向として合っ ている,(5)松山平野の詳細な地区震度では、震度6弱の 領域を再現できているほか過大・過小評価している領域 でも隣接する震度差については傾向に整合性が見られる, (6)一方で、周辺の無修正領域については集落のある低 地での震度増分などが表現できていない、ということが わかった.

以上の点から,震度が過大評価されているところについては浅部地盤モデルに改良の余地を残すことを示唆しているが,浅部地盤モデルの相対的なモデル化の適切性を表しており,松山平野における浅部地盤モデルの修正は有効で,その妥当性は検証できたと言える.

5. 結 論

愛媛県で2012年に地震被害想定に着手し、その結果、 松山平野における震度は予想される震度より低く、地盤 増幅率が過小評価されるという問題が浮上した.これを 解決するため既往研究の平野を覆う高密度な微動観測の 結果に基づいて地盤構造モデルを修正した.

2001年3月24日に発生した芸予地震(Mjma=6.7) について、地震被害想定で用いる手法と同様な方法で震源をモデル化し、修正した地盤モデルを用いて再現解析を行い、観測された計測震度や地震直後に実施された高密度アンケート震度調査の結果と比較することで浅部地盤モデルの妥当性について検討し、以下の結論を得た.

- (1) 最大加速度は過小評価であるが最大速度は解析と 観測がおよそ合致した. Vsの大きな工学的基盤内 での地震動の加速度応答スペクトルが解析は観測 とおおむね合致した.
- (2) 地震観測地点では、計測震度で過大・過小評価している地点もあるが、76%の地点で同じ震度として評価できた。特に、せまい範囲でも周辺とわずかに異なる微地形を反映した評価となった。
- (3) 計測震度との相関からその精度が確認されたアン ケート震度調査による地区震度では、愛媛県全域 について概ね傾向として合っていた.
- (4) 松山平野の詳細な地区震度では、震度6弱の領域を 再現できているほか過大過小評価している領域で も隣接する震度差については傾向に整合性が見ら れた。
- (5) 一方で、周辺の無修正領域については、集落のあ る低地での震度増分などが表現できていない.
- (6) 以上を総合して、震度が過大評価されているところについては浅部地盤モデルに改良の余地を残すものの、浅部地盤モデルの適切性を表しており、

松山平野における浅部地盤モデルの修正は有効で, その妥当性は検証できた.

以上の結論より、本論文で示したように、浅部地盤モ デルや深部地盤モデルの上部については、地盤ボーリン グを基にした表層地盤モデルと工学的地盤上面との間の 地層の深さや物性は、微動により得られた固有周期に適 合するように設定することは、一定の合理性がある.地 盤の固有周期、特に0.5~2秒の周期帯は、多くの構造物 の固有周期帯にも相当することから、安定した精度と空 間的な解像度がある程度確保できれば、地盤モデルに実 際の地盤の卓越周期を反映させることが重要である.

謝辞:本論文では、愛媛県により2012年度に実施された 愛媛県地震被害想定調査結果(第一次報告)の成果を利 用した.この被害想定調査は、愛媛県が株式会社パスコ に調査委託し、愛媛県地震被害想定調査検討委員会(委 員長:矢田部龍一愛媛大学副学長、教授)が学術的専 門的な立場から助言して遂行されたものである.第一著 者はこの委員会の委員であり、委員会で明らかとなった 地震動評価で生じた問題に対して助言し、解決案を提示 し、解析に協力した.第二、三著者は、受託した担当者 であり再現解析を実施した.公表された結果の利用に当 たっては愛媛県からは快諾して戴いた.また、委員会委 員の皆様には委員会で熱心な議論と貴重な意見を戴いた. ここに記して謝意を示します.

参考文献

- 南海トラフの巨大地震モデル検討会:南海トラフの 巨大地震による震度分布・津波高について(第一次 報告),2012.3.
 http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html (2013.9.18 閲覧)
- 2) 愛媛県:愛媛県地震被害想定調査結果(第一次報告)について,

http://www.pref.ehime.jp/bosai/higaisoutei/higaisoutei24.h tml (2013.9.18 閲覧)

- 愛媛県:愛媛県地震被害想定調査概要版報告書, 2002. http://www.pref.ehime.jp/h15350/4613/jisinhigaisoutei.html (2013. 9.18 閲覧)
- 社団法人全国国土調査協会:土地分類基本調査(5万 分の1)全県域1971~1981 愛媛県.
- 5) 四国地盤情報活用協議会:平成 22 年度版四国地盤情 報データベース,CD-ROM.
- Kunijijban (国土地盤情報検索サイト): URL http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html (2013. 9.18 閲覧)
- 総務省統計局:地域メッシュ統計の特質・沿革, pp.12, http://www.stat.go.jp/data/mesh/gaiyou.htm

(2013.9.18 閲覧)

- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, pp.110-119, 1996.
- 9) 内閣府:中央防災会議「東海地震に関する専門調査 会」(第10回)関連図表 2, 2001.
 http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/ (2013. 9.18 閲覧)
- 古山田耕司,宮本裕司,三浦賢治:多地点での現位 置採取資料から評価した表層地盤の非線形特性,第 38回地盤工学研究会発表講演集,pp.2077-2078,2003.
- 11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:「長周期地 震動予測地図」2012 年試作版— 南海地震(昭和型) の検討—, 2012.1., 59p. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.ht m (2013.9.18 閲覧)
 12) 地震調査研究推進者部本委員会 「長周期地
- 12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:「長周期地 震動予測地図」2012 年試作版 全国 1 次地下構造モ デル(暫定版), 2012.1. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/dat/ (2013.9.18 閲覧)
- 13) Koketsu, K., H. Miyake, H. Fujiwara, and T. Hashimoto: Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, Proc. 14WCEE, Paper No.S10–038, 2008.
- 14) 南海トラフの巨大地震モデル検討会:深い地盤構造
 モデルについて,第15回会合資料4,13p.,2012.
 http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/15/pdf/shiryo
 u_4.pdf (2013.9.18 閲覧)
- 15) 文部科学省研究開発局,国立大学法人東京大学地震研究所,独立行政法人防災科学技術研究所:平成 22 年度長周期地震動予測地図作成等支援事業成果報告書,2011.3.

http://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/choshuki_shi en/h22/index.htm (2013. 9.18 閲覧)

- 16) 原田ら (1995,1998)
- 17) 杉戸真太,合田尚義,増田民夫:周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察,土木学会論文集,No.493/II-27, pp.49-58、1994.
- 18) 古本吉倫:周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析プログラム FDEL http://www.cive.gifu-u.ac.jp/lab/ed2/fdel/ (2013.9.18 閲覧)
- 19) 市原寛,榊原正幸,大野一郎:重力異常およびボー リング資料による松山平野北部,堀江低地の地下構 造,地質学雑誌,110,12,pp.746-757,2004.
- 森伸一郎・俵 司:常時微動測定による松山平野の 三次元地盤構造の推定,構造工学論文集,土木学会, Vol. 47A, pp. 529-538, 2001.3.
- 森伸一郎,森直樹,俵司,岡本和泰:常時微動測 定による高知平野の卓越周期分布,第36回地盤工学

研究発表会講演集, pp. 2335-2336, 2001.6.

- 22) たとえば、愛媛県:愛媛県地震被害想定調査概要版報告書,2002.
 http://www.pref.ehime.jp/h15350/4613/jisinhigaisoutei.html (2013.9.18 閲覧)
- 23) 先名 重樹・前田 宜浩・稲垣 賢亮・鈴木 晴彦・神 薫・宮本 賢治・松山 尚典・森川 信之・河合 伸一・ 藤原 広行:強震動評価のための千葉県・茨城県にお ける浅部・深部統合地盤モデルの検討,防災科学技 術研究所研究資料, 379, pp.408, 2013.
- 24) 大堀 道広, チタク セチキン, 中村 武史, 坂上 実, 武村 俊介, 古村 孝志, 竹本 帝人, 岩井 一央, 久保 篤規, 川谷 和夫, 田嶋 佐和, 高橋 成実, 金田 義 行:高知市街地の浅層地盤モデルの構築, 日本地震 工学会論文集, Vol. 13, No. 1, pp. 52-70, 2013.
- 25) 中国四国農政局計画部:愛媛県水理地質図,1葉,同説 明書,56p.,1980.
- 26) 大野 裕記,西坂 直樹,池田 倫治,小林 修二,長谷 川 修一:物理探査による松山平野(重信地域)の地 下構造,日本応用地質学会中国四国支部平成 17 年度 研究発表会, P-6, 2005.
- 27) 筧 楽麿: 2001 年芸予地震の詳細な震源過程と強震動の関連,神戸大学都市安全研究センター研究報告, Vol. 7, pp. 195-201, 2003.
- 28) 筧 楽麿:スラブ内地震の強震過程と強震動,第1回成果報告会資料,I地震動(強い揺れ)の予測,「大都市圏地殻構造調査研究」文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成14年度成果報告書,4.2.3,2002. http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/daidai/20030408_pdf/kakehi.pdf(2013.9.18 閲覧)
- 29) 司 宏俊, 翠川 三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮 した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築 学会構造系論文集, 523, 63-70, 1999.
- 30) 森 伸一郎:四国主要都市の深い地盤構造を考慮した 地震危険度評価手法,第5回建設事業の技術開発に 関する助成事業成果報告集,四国建設弘済会,pp. 119-156,2002.6.
- 31) 森伸一郎,掛水 真一,俵 司,村上 ひとみ,河原 荘 一郎,向谷 光彦,重松 尚久,山下 祐一:2001 年芸 予地震におけるアンケート調査による推定震度の精 度とばらつき,第11回日本地震工学シンポジウム論 文集,pp.5-10,2002.11.
- 32) 森 伸一郎, 俵 司, 掛水 真一: 松山平野における 2001 年芸予地震の震度と被害の関係, 第11回日本地 震工学シンポジウム論文集, pp. 469-474, 2002.11.
- 33) 地盤工学会:全国電子地盤図 http://www.denshijiban.jp/ (2013.9.18 閲覧)

(2013.9.20受付)

MODELING OF GEOLOGICAL STRUCTURE IN PLAIN USED FOR EARTHQUAKE DAMAGE ESTIMATE

Shinichiro MORI, Hiroyuki SHIMOMURA and Takahiro OKABE

Following the announcement of the result of Nankai Trough Mega Earthquake-Tsunami Estimate from the Cabinet Office of Japan in August 2012, Ehime Prefecture has been carrying out a detailed estimate of damage to earthquakes and tsunamis including the Mega Earthquake-Tsunami from July 2012. In the result of the estimate of hazard, it was found that seismic intensities over Matsuyama Plain were much lower than expected intensities in consideration of anticipated amplification in the alluvial plain. A nation-wide geological model authorized though the Cabinet Office Estimate was used in the followed estimate by Ehime Prefecture. This model was modified in the part of the plain using the result of a previous research by microtremor measurement, and the modified model was verified by comparison between the measured and estimated seismic intensities during the 2001 Geiyo Earthquake, and the simulated ones by the modified model. Such modification would be beneficial in the future of local governments and their people. Therefore, microtremor measurement over a plain with a certain level of accuracy is expected to be used to estimate a geological basin structure below a plain for earthquake damage estimate before obtaining highly accurate structure.