

想定南海地震津波における共振周期特性の重要性について

平石 哲也*・柴木 秀之**・原崎恵太郎***

1. はじめに

港湾・海岸の津波防災計画に用いる想定津波の条件選定は、計画を左右する重要な課題である。現行の防災計画では、既往最大津波を用いるのが一般的であった。しかしながら、北海道南西沖地震津波や、兵庫県南部地震による被災を契機に、既往最大規模を上回る条件を想定し、これに対する対策を立案することが求められるようになった。一方、過大な津波規模を想定すると、防災対策が社会・経済活動の障害となり、適正な防災計画の立案が困難になることも指摘されている。このような点を踏まえ、本研究では、既往最大規模の津波が発生することを前提条件とし、その上で、想定地震断層を決定する条件として、断層の位置・すべり量とともに、海域の共振周期に近い津波周期が生じる断層幅を想定することが重要である点を明らかにする。解析方法には、津波の数値シミュレーションを用い、解析対象には、紀伊水道・大阪湾に來襲する南海地震津波を取り上げる。

2. 想定南海地震の決定方法

(1) 地震断層の相似則の適用

既往の大規模な南海地震には、 $M=8.6$ の887年仁和、 $M=8.4$ の684年天武・1361年正平・1707年宝永・1854年安政と、 $M=8.0$ の1946年昭和の南海地震が挙げられる。このうち、既往最大の仁和は、情報不足のため、規模の妥当性に問題がある。したがって、既往の大規模津波から判断すると、 $M=8.0\sim 8.4$ または8.5程度が、想定する地震規模としては妥当で、 $M=8.6$ は過大と考えられる。一方、地震関連のデータの整理状況が良好で、精度の高い断層情報が得られているのは $M=8.0$ の昭和南海地震のみである。昭和南海地震の断層パラメータは、相田(1981)により提案されたモデルがあり、津波数値シミュレーションに数多く用いられている。この相田の昭和南海地震の断層モデルは、四国沖と紀伊水道沖の2断層により表現されており、各々の断層パラメータは異

なるという特徴がある。この特徴を生かす想定地震の設定案として、 $M=8.0$ に相当する昭和南海地震の断層パラメータから、 $M=8.0$ 以上の規模のパラメータを推定する方法が考えられる。

一方、地震関連の研究成果によれば、断層運動を近似的に表す断層パラメータのうちの断層面積とすべり量は、地震規模を表すマグニチュードを変数とする経験式で表現可能な関係があり、地震規模の増加に比例する相似性を有することが明らかにされている。この地震断層の相似則を利用すれば、 $M=8.0$ の断層パラメータから、 $M=8.1$ 以上のパラメータを推定することができる。

佐藤(1989)によれば、マグニチュード M と断層長さ L 及び面積 S の関係は、次式で表される。

$$\log L = 0.5M - 1.88, \quad \log S = M - 4.07 \quad \cdots (1)$$

この関係は、 L と $M^{1/2}$ が比例し、 S と M が比例することを表し、 S は L と断層幅 W の積で表される。これより、 W と $M^{1/2}$ は比例することが導かれる。また、すべり量 U とマグニチュード M の関係は次式で表される。

$$\log U = 0.5M + 1.40 \quad \cdots (2)$$

これらの関係を利用すると、マグニチュード M から、断層長さ L 、幅 W 、すべり量 U の3パラメータを求めることができる。すなわち、 $M=8.0$ の3パラメータと $M=8.1$ 以上の3パラメータの比率が求まる。

今、相田(1981)により提案された昭和南海地震の3パラメータを、南海道沖を震源とする $M=8.0$ の地震の代表的な断層パラメータと仮定し、これに、上記の相似則の関係から求められる $M=8.0$ と $M=8.1$ 以上のパラメータの比率を乗ずれば、任意の地震規模のパラメータの算定が可能となる。

(2) 想定地震の断層パラメータ

前述した地震断層の相似則を利用すると、例えば、 $M=8.4$ の断層長さ・幅・すべり量は、 $M=8.0$ の値の1.58倍となり、3つのパラメータを決定することができる。しかし、断層位置については、相似則のような明確な根拠がないため、客観的な決定が難しい。そこで、本研究では、南海地震の断層面の沖側の位置が、常に昭和南海地震のそれと一致し、断層の走行も一致すると仮定する。そして、相田にならい、四国沖と紀伊水道沖の2

* 正会員 工博 迎翰省港湾技術研究所水工部波浪研究室長

** 正会員 工修 (株)エコー 第一技術部

*** 正会員 工修 (株)エコー 第一技術部 解析調査課

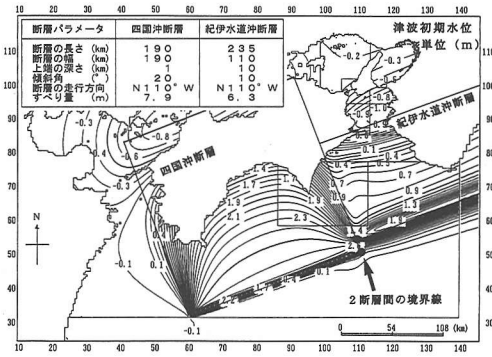


図-1 想定南海地震津波 ($M=8.4$) の初期水位分布

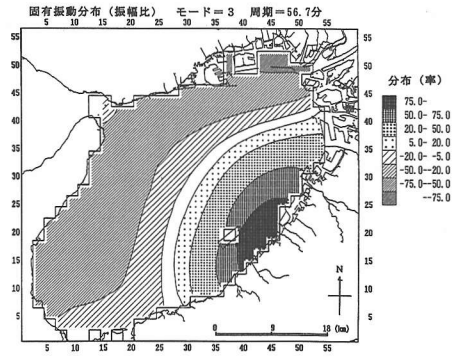


図-2 大阪湾・紀伊水道の津波周期に近いモードの固有周期の振幅比分布

断層を考え、2断層間の境界線は移動しないと仮定する。この仮定を裏付ける根拠はないが、昭和南海地震の2断層は、東西で断層パラメータ値が異なる点に着目し、2つの境界線を位置決定の基準線として扱う。境界線の位置を固定することにより、地震規模の増加に伴う断層面積の増大は、四国沖断層が北西側に広がり、紀伊水道沖が北東側に広がることで表現する。断層位置・断層長さ・幅・すべり量以外のパラメータについては、南海トラフ沿いの地震特有のものと考え、昭和南海地震のパラメータと同値を採用する。以上の考えに基づいて決定される想定南海地震津波 ($M=8.4$) の断層パラメータ及び初期水位分布は、図-1のように決定される。

3. 大阪湾・紀伊水道沿岸の共振周期

(1) 湾全体の固有振動周期の解析

津波の変形には、集中（屈折を含む）・回折・浅水効果と、入射波と反射波の重複に伴い生じる共振効果がある。このうち、共振効果は、湾内の固有周期に近い周期の津波が伝播すると、顕著な津波高を発生させる。ここでは、共振効果に着目し、大阪湾と紀伊水道の各々の海域全体を対象とする場合の固有周期を明らかにする。解析方法は、Loomis (1973) により提案された線形長波方程式に対する固有値問題を解く、固有振動モードの解析を適用する。

モード解析の入力データは、大阪湾と紀伊水道の形状を1.8 km格子により近似した格子点の水深値である。図-2は、大阪湾の解析範囲と、固有振動モード解のうち、昭和南海地震津波の周期（40～60分程度）に近い振動の振幅比の平面分布を表す。図中の右に表す振幅の階級分類の数値は、湾内の最大振幅（固有関数の最大値）を100とする百分率を意味し、平面分布では、各格子の百分率値を模様により階級分類して表示する。解析結果より、大阪湾については、第3モードとして周期56.7分が求められ、この固有振動は湾の短軸方向に生じる。一方、

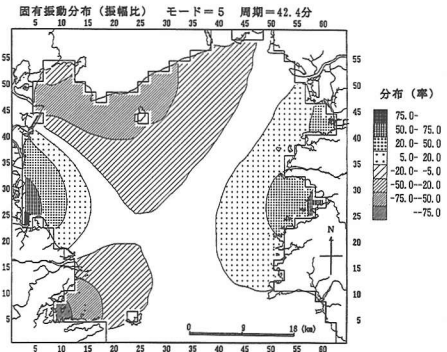


図-3 大阪湾・紀伊水道の津波周期に近いモードの固有周期の振幅比分布

図-3は、紀伊水道の解析範囲と、昭和南海地震津波の周期に近い振動の振幅比の平面分布を表す。解析結果より、紀伊水道については、第5モードとして周期42.4分が求められ、これは紀伊水道東西岸の4箇所V字型湾を腹、水道中央を節とする固有振動である。このように、対象海域では、昭和南海地震津波の周期に近い振動モードが抽出できる。

(2) 大阪湾・紀伊水道沿岸の増幅率解析

大阪湾や紀伊水道の海域全体を対象に求められる固有振動周期も、局所的な地形の影響を受けて、卓越周期が変化し、卓越周期の振幅の大きさも変化する。そこで、大阪湾と紀伊水道沿岸の各地点において、周期別に、紀伊水道沖の振幅に対する増幅率を求め、増幅率曲線を作成する。そして、地点別の共振周期を明らかにする。解析では、複数の周期の規則波を紀伊水道沖から入射し、紀伊水道と大阪湾内の波の伝播を追跡する線形長波の数値シミュレーションを行う。その後、複数の周期の増幅率平面分布から、任意の沿岸地点における値を抽出することにより、地点毎の増幅率曲線を求める。この方法は、

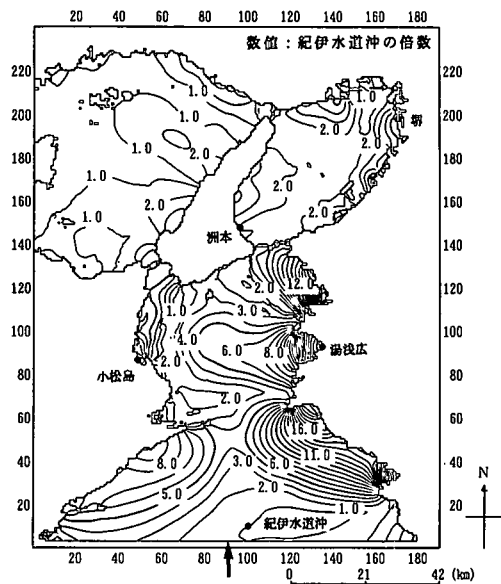


図-4 大阪湾・紀伊水道における周期42分の規則波の増幅率分布 (2波以降の波から計算される増幅率)

湾の形状と水深分布が考慮された増幅率分布を求められる利点がある。

数値シミュレーションにおいて、入射する規則波の周期は、前述した固有振動モード解析の結果と昭和南海地震津波の周期を参考に、10分から80分までとし、2分間隔の36ケースとする。波の伝播を追跡する時間は、大阪湾奥の水位時系列に10波以上の波が計算され、かつ振幅の準定常状態が確保されるように決定する。また、開境界においては、入射波の振幅を0.5mで与え、計算領域内からの反射波を自由透過させる。このような36ケースに及ぶ数値シミュレーションを行うためには、計算機能力から考えて、効率化を図ることが必要となる。そこで、図-4に表す範囲において、地形を600m格子により近似し、図中の矢印で表す沖側境界から波を入射させる。

なお、代表点の増幅率曲線を求めるに当たり、集中・浅水効果が変形の主要因となる第1波の増幅率と、共振効果が主要因となる2波目以降の平均増幅率を求め、これら2種類の増幅率曲線を作成する。図-4は、周期42分の規則波の2波目以降の振幅から求められる増幅率の平面分布である。ここで、増幅率の値は、図中の沖側境界付近に●印で表す、紀伊水道沖基準点の振幅(入射波境界の振幅とほぼ一致する)を1.0として求める。同様な増幅率の平面分布が全36周期について求められる。

図-5は、大阪湾の36周期毎の増幅率平面分布から、図-4中の●印で表す湾奥の堺と湾口の洲本における1波目と2波目以降の増幅率を抽出して求められる増幅率曲線である。図の横軸は波の周期を表し、縦軸は増幅率

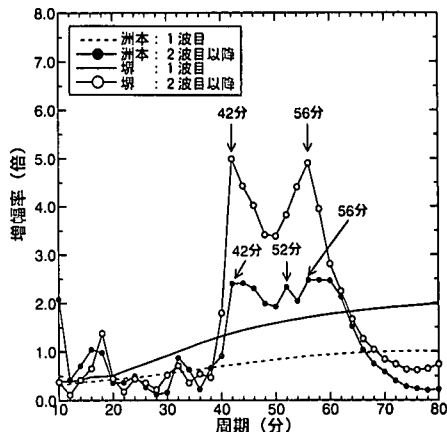


図-5 大阪湾沿岸の代表点における増幅率曲線

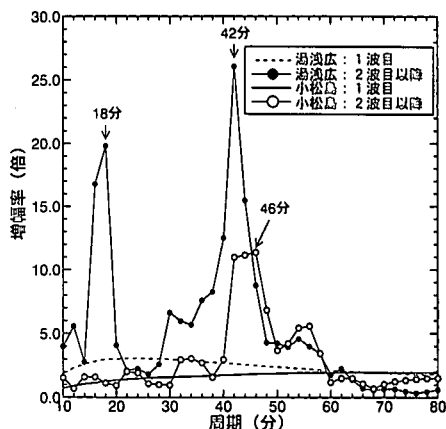


図-6 紀伊水道沿岸の代表点における増幅率曲線

を表す。一方、図-6は、図-4中に表す紀伊水道東岸の湯浅広と西岸の小松島において求められる増幅率曲線である。紀伊水道の2地点における2波目以降の増幅率には、10倍を超える場合が見られ、大阪湾の最大5倍程度の増幅率に比べて、大きな増幅率となり、紀伊水道の共振は大阪湾よりも生じ易いことがわかる。それに対し、大阪湾では、図-4の増幅率の平面分布にも見られるように、紀伊水道と大阪湾をつなぐ紀淡海峡を境に増幅率が低下しており、紀淡海峡による振幅の低減効果が、大阪湾の増幅率低下に影響している。

図-5、図-6の2波目以降の増幅率曲線を、津波の共振による増幅の視点から見ると、南海地震の津波周期は40～60分程度であるから、これに近い共振周期は、堺で54～58分、洲本で56～60分、湯浅広で40～44分、小松島で42～46分の周期帯となる。一方、集中・浅水効果を表す1波目の増幅率を見ると、湯浅広で20～24分の周期にわずかな極大が見られるが、極大値が明瞭でなく、そ

他の3点では、周期の増加とともに増幅率も次第に増加し、極大値が見られない。また、40～60分程度の津波周期の増幅率は2～3倍程度と小さい。津波は時間経過とともに減衰するため、1波目と2波目以降の増幅率が同程度の大阪湾では、1波目に最大値が発生することが多いが、2波目以降の増幅率が大い紀伊水道では、2波目以降に最大津波高が発生する可能性が高いと考えられる。

4. 想定南海地震津波の数値シミュレーション

(1) 数値シミュレーションの方法

前述した増幅率解析は、規則波を用いた結果であった。ここでは、波源から沿岸までの伝播過程で生じる津波の増幅と規則波の結果による共振との関連性を述べる。

解析には、 $M=8.0\sim 8.6$ まで0.1間隔の7規模の想定南海地震津波の数値シミュレーションを適用する。併せて、従来の津波予測計算に採用されている宝永・安政南海地震についても計算を行う。ここで、 $M=8.0$ 規模の地震は昭和南海地震となる。数値シミュレーションは、非線形長波理論式を用い、海岸境界では完全反射を仮定する。計算範囲は、図-1に表す波源から紀伊水道と大阪湾全域とし、大阪湾・紀伊水道の地形を200 m格子で近似する。また、津波の追跡時間は、地震発生後5時間とする。

数値シミュレーションを行う想定地震の断層パラメータは、前述した地震断層の決定方法による値を基本とするが、ここでは、2種類を考える。第1は、想定津波Aで、すべり量・断層長さ・断層幅を相似則から推定するものとし、第2は、想定津波Bで、すべり量のみを相似則から推定し、長さとは昭和南海地震の断層と一致させる。南海地震の場合、断層幅が大阪湾・紀伊水道に伝播する津波の周期を決定する主要因となることから、Aの津波周期は地震規模の増加に伴って増加し、Bの津波周期は地震規模に依存しないことになる。

(2) 津波波形の周波数スペクトル解析

図-7の上図は、昭和南海地震津波時の紀伊水道沖、湯浅広、堺における津波波形から求められる周波数スペクトルを表し、下図は、紀伊水道沖のスペクトル密度を基準とする湯浅広と堺のスペクトル応答関数を表す。周波数スペクトルのピークは、3地点とも約50分となり、湯浅広、堺ともピークのエネルギー密度は増大する。図-7の下図に表す応答関数から、2地点の津波の増幅特性を見ると、湯浅広ではピーク周期50分よりも高周波側で、堺では低周波側でエネルギーの増幅が大きい。つまり、各地点の共振周期に近い周期帯のエネルギーが、相対的に大きくなっている。このように、津波波形から求められる応答関数にも、共振周期による増幅傾向が現れ、共

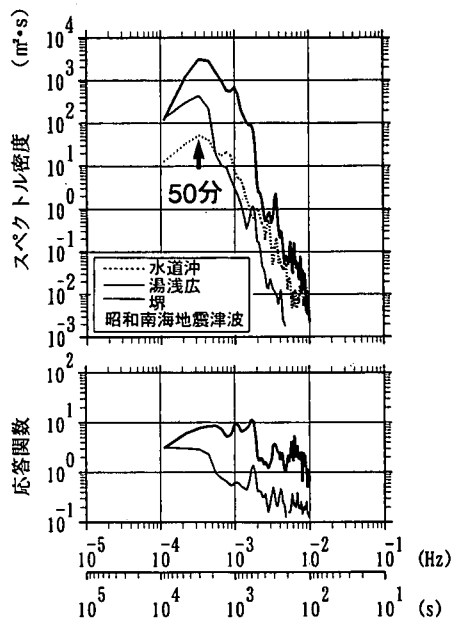


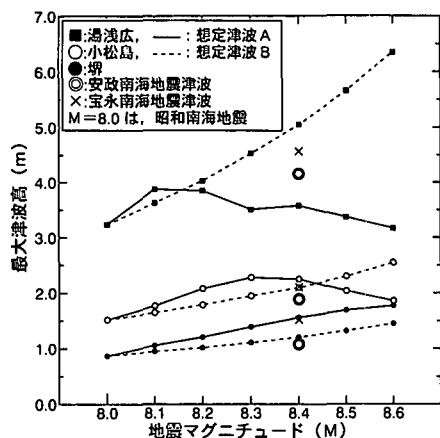
図-7 昭和南海地震津波の周波数スペクトルと沖側波形に対する応答関数

振周期の推定に利用できる。

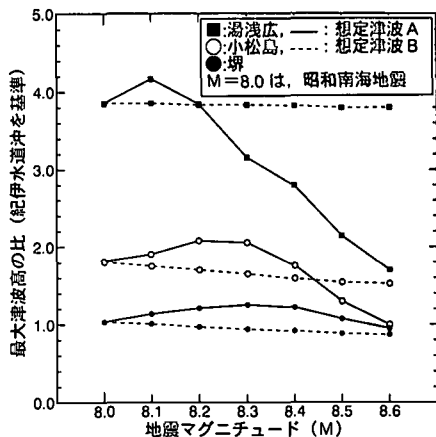
(3) 想定津波規模と共振周期の関係

次に、地震規模の変化に伴う、大阪湾・紀伊水道沿岸における津波高の変化を求め、津波高が共振周期に関係することを明らかにする。図-8は、想定津波A・Bの規模を順次大きくするに伴い、湯浅広、小松島、堺において予測される最大津波高の変化を表し、実線が想定津波Aを、破線がBを表す。また、図中には、宝永・安政南海地震（ともに、 $M=8.4$ ）による津波高も表す。ここで、宝永・安政南海地震津波の初期水位の推定には、相田（1981）が提案した断層パラメータを用いる。

図中、堺（大阪湾奥）は、想定津波A・Bともに、地震規模の増加に伴い津波高も増加する。それに対し、紀伊水道内の地点は、想定津波Aの場合に、湯浅広で $M=8.1$ 、小松島で $M=8.3$ で、最大津波高が極大となる。既往地震の代表である宝永・安政地震の最大津波高と、同規模の想定津波 $M=8.4$ の最大津波高を比較すると、3地点とも宝永の津波高が安政より高く、堺、小松島では、想定津波Aの場合に宝永よりも高くなる。それに対し、湯浅広では、Aの場合に宝永よりも低くなる。これは、既往津波よりも高い津波高の予測が期待される想定津波の必要条件を満足しないことを意味する。すなわち、すべり量を増加させても、断層幅が適切でないと、想定地震の条件としては問題があることになる。一方、想定津波Bのように断層幅が固定される場合は、すべり量が大きいほど、高い津波高が計算される。つまり、両者は比



図一8 地震規模と大阪湾・紀伊水道沿岸の最大津波高の関係



図一9 地震規模と紀伊水道沖の最大津波高に対する増幅率の関係

例関係にある。

図一8は、すべり量の増加が津波高の変化傾向を左右することも表しており、断層幅（津波周期）の効果や共振周期との関係を確認することは困難である。そこで、紀伊水道沖の津波高による正規化を行い、地震規模の増加に伴って生じる断層すべり量の増加効果を取り除き、断層幅の効果を強調する表示にする。図一9は、紀伊水道沖の最大津波高を基準とする3地点における最大津波高の比率（津波高の増幅率）を用いて、地震規模との関係を表すものである。想定津波Bの場合は、断層幅が昭和南海地震の断層幅で固定されているため、津波周期は変化せず、3地点とも津波高比はほぼ一定となる。それに対し、想定津波Aの津波高比は、堺で $M=8.3\sim 8.4$ 、湯浅広で $M=8.1$ 、小松島で $M=8.2$ の場合に、極大値が現れ、津波高は断層幅（津波周期）に依存することが確認できる。

上記の想定津波Aの傾向を、地震規模、断層幅及び津波周期の関係から整理すると、次のようにまとめられる。昭和南海地震（ $M=8.0$ ）の紀伊水道沖の断層幅は70 kmであり、波源域における津波周期は35分程度である。それに対し、湯浅広で極大値を持つ $M=8.1$ の断層幅は80 kmで津波周期は約40分、小松島の $M=8.2$ の断層幅は90 kmで津波周期は約45分、堺の $M=8.3\sim 8.4$ の断層幅は100～125 kmで津波周期は約50～55分となり、津波高比が極大となる津波周期は、前述した3地点の共振周期にほぼ一致する。すなわち、津波周期を決定する断層幅は、津波高（増幅率）を効率的に上げる重要な条件になる。このように、想定津波を考える場合、対象地点の共振周期に近い津波周期が生じるような断層幅を設定することが、大きな津波高を計算する条件となり得る。

5. おわりに

想定地震の規模及び断層条件を決定する場合、すべり量とともに、断層幅（津波周期）が、大きな津波高を生じる重要な条件となる。大阪湾と紀伊水道における南海地震津波の解析を行った結果、次のような成果が得られた。

① 地震規模の増加に伴うすべり量の増加と、計算される津波高の変化はほぼ比例する。

② 地震規模の増加に伴う断層幅の増加により、津波周期が変化する。この断層幅（津波周期）と沿岸地点の津波高は、比例しない。例えば、湯浅広では $M=8.1$ （断層幅80 km；津波周期約40分）、小松島では $M=8.2$ （幅90 km；周期45分）、堺では $M=8.3\sim 8.4$ （断層幅100～125 km；津波周期約50～55分）で津波高が極大となる。津波高が極大となる周期は、各地点の共振周期にほぼ一致する。

謝辞：本論文をまとめるに当たり、東海大学工学部 後藤教授より数々の御助言を頂いた。ここに謝意を表します。なお、本計算では、海上保安庁水路部の水深数値情報、国土地理院標高数値情報を利用したことを付記する。

参考文献

- 相田 勇(1981): 南海道沖の津波の数値実験, 地震研究所彙報, 第56号, pp. 713-730.
- 佐藤良輔編著 (1989): 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, pp. 82-92.
- Loomis, H. G. (1973): A new model for determining normal mode of irregular bodies of water with variable depth., Hawaii Institute of Geophysics, Report HIG-73-32, NOAA-JTRE-86.