

## 断層を考慮した木曽川橋の耐震設計におけるレベル2地震動の評価

## Assessment of strong ground motion of level 2 for aseismic design of Kisogawa-bridge assuming active fault

小松秀樹<sup>\*</sup>、酒井秀昭<sup>\*\*</sup>、水口和之<sup>\*\*\*</sup>  
 丹羽正徳<sup>\*\*\*\*</sup>、池浦友則<sup>\*\*\*\*</sup>、大保 直人<sup>\*\*\*\*</sup>

Hideki Komatsu、 Hideaki Sakai、 Kazuyuki Mizuguchi  
 Masanori Niwa、 Tomonori Ikeura、 Naoto Ohbo

\*日本道路公団 名古屋建設局 四日市工事事務所 (〒510-0832 四日市市伊倉 1-2-14)

\*\*日本道路公団 名古屋建設局 豊田工事事務所 (〒471-0831 豊田市司町 4-16)

\*\*\*日本道路公団 名古屋建設局 構造技術課 (〒460-0000 名古屋市中区栄 4-1-1)

\*\*\*\*工博 鹿島技術研究所 先端技術研究部 (〒182-0036 調布市飛田給 2-19-1)

This paper presents a methodology to assess the strong ground motions, assuming active faults for the aseismic design of the Kisogawa-bridge, which is a composite extradossed bridge. The strong motions at stiff diluvial layer are synthesized by following three methods: 1) semi-empirical method; 2) attenuation formula using equivalent hypocentral distance; and 3) normal mode method. The strong ground motions with body waves being predominant are obtained using semi-empirical method assuming Yoro-Isewan-Fault, and those with surface waves being predominant are generated using normal mode method assuming Ansei-Tokai earthquake.

*Key Words : level 2 ground motion, active fault, kisogawa-bridge*

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震で多大な被害が発生したことを教訓に「土木学会耐震基準等に関する提言集」<sup>1)</sup>が土木学会より発表された。これを受けて、各種土木構造物の耐震設計で用いられている地震動の扱いが見直された。例えば、港湾施設に対しては、「耐震強化施設は、レベル2地震動に対して、生じる被害が軽微であり、かつ、地震後の速やかな機能回復が可能なものとして、当該施設の所期の機能を保持するものとする。」<sup>2)</sup>。また、下水道施設の耐震対策指針と解説では、「レベル2地震動の設定においては、それぞれの地点において影響を受ける活断層を同定して地震規模を想定し、地震動の大きさを推定することが可能な場合には、これを用いるものとするが、活断層の特定には十分な地盤調査を行い、慎重に評価する必要がある。」<sup>3)</sup>等の記述がある。

具体的にレベル2地震動策定を実施する場合には、文献3)にも記載されているように、活断層の特定が大きな課題である。現状の研究レベルにおいても限られた活断層・歴史地震に関する情報を用いてレベル2地震動の評価法が各種提案されており、その評価フローの概念は、図-1のようになる。このフローによれば、まず、評価地点周辺の歴史地震や活断層を調べ、地震地体構造や最新

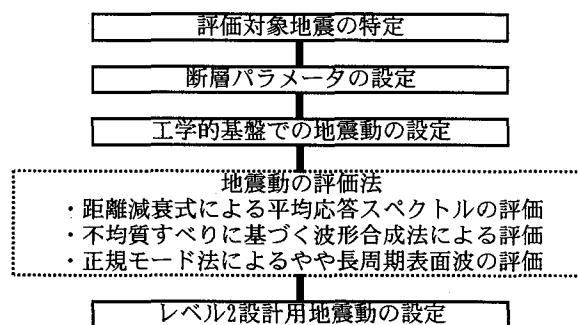


図-1 レベル2地震動の評価フローの概念

の研究結果等を参考に評価地点に大きな影響を及ぼすものを評価対象地震として特定する。さらに、特定した地震に対しては、既往研究に基づいてそれらの断層パラメータを設定する。次いで、断層モデルを基に震源の拡がりやを考慮することとして①等価震源距離を用いた平均応答スペクトルの距離減衰回帰式、②不均質すべりに基づく波形合成法、③正規モード法（やや長周期表面波の評価）を用いて工学的基盤における地震動を推定する。なお、波形合成法による検討のうち至近の活断層に対しては震源近傍の強震動特性に大きな影響を及ぼすとされるアスペリティを仮定した検討も必要となる。この工学的基盤で評価された地震動を用いて構造物の支持層で求めた地

震動がレベル2設計用基準地震動となる。

本文で対象とする第二名神高速道路の木曾川橋および揖斐川橋は、PC・鋼複合連続エクストラード橋で、新たな構造形式であることから耐震安全性の検討を合理的に行う必要がある。そこで当該橋梁が建設される地点近傍に存在する活断層および歴史地震を特定し、各種地震動評価手法を用いて検討したレベル2地震動評価結果についてまとめた。

2. 評価対象地震の特定と断層パラメータの設定

評価対象地震は、歴史地震と活断層の中から検討対象候補地震を選定する必要がある。歴史地震からの選定に際しては評価地点周辺で断層モデル<sup>4)</sup>が求められている地震を検索するとともに、既往の地震資料として宇佐美の資料(「新編日本被害地震総覧」)<sup>5)</sup>(有史～1884年)、宇津の資料<sup>6)</sup>(1885年～1925年)、および気象庁の資料(1926年～1993年)を参考にして、評価地点を中心に半径100kmの範囲の歴史地震を抽出し、金井式<sup>7)</sup>で推定される最大速度値を指標にして上位の地震を選定した。

一方、活断層による地震の候補は、活断層資料<sup>8),9)</sup>を参照し、活動度がAかB、確実度がIかIIの条件で評価地点から半径50kmの範囲にあるものを検索した。

以上の方法で検索した歴史地震や活断層を候補として地震地体構造<sup>10)</sup>を参照し、歴史地震から4地震、活断層から4断層を特定し、評価対象地震とした。

なお本検討では、原則として歴史地震は「新編日本被害地震総覧」<sup>5)</sup>、活断層の場合は「[新編]日本の活断層」<sup>8)</sup>を根拠としているが、これらとは別に、当該地域では1586年天正地震が養老断層と伊勢湾断層の連動によって発生したM8クラスの地震であったとの指摘<sup>11),12)</sup>があるため、これを⑨養老伊勢湾断層の地震(M8.1)として評

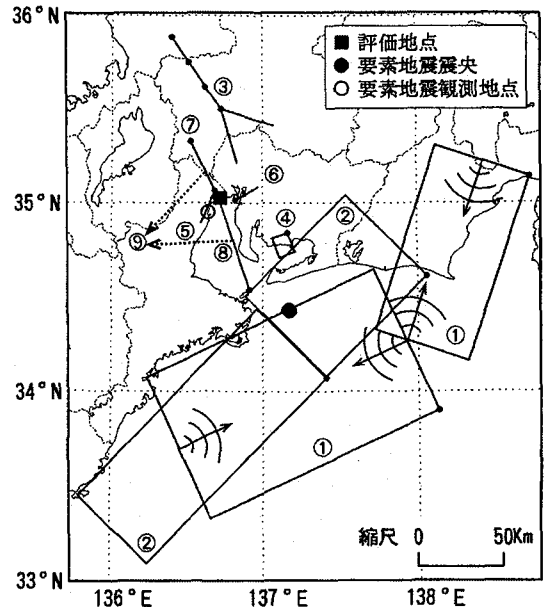


図-2 評価対象地震の断面図(①～⑨は表-1参照)

価対象地震に加えた。

以上の検討から特定した評価対象地震と評価地点との位置関係を図-2に示す。

これら評価地震の断層パラメータのうち、歴史地震による評価対象地震の断層モデルは、可能な限り既往研究で提案されているモデル<sup>13)～16)</sup>を採用した。また、既往研究で明らかでないパラメータについては対象地震と類似する他の地震の断層モデルを参照して仮定した。

一方、活断層による評価対象地震については、必ずしも既往研究で断層モデルが提案されていない。このため、原則として「[新編]日本の活断層」<sup>8)</sup>に従うとともに周辺で発生している過去の地震のモデルや断層パラメータの経験式<sup>4),17),18)</sup>を用いて仮定した。評価対象地震に設定した断層パラメータの一覧を表-1にまとめた。

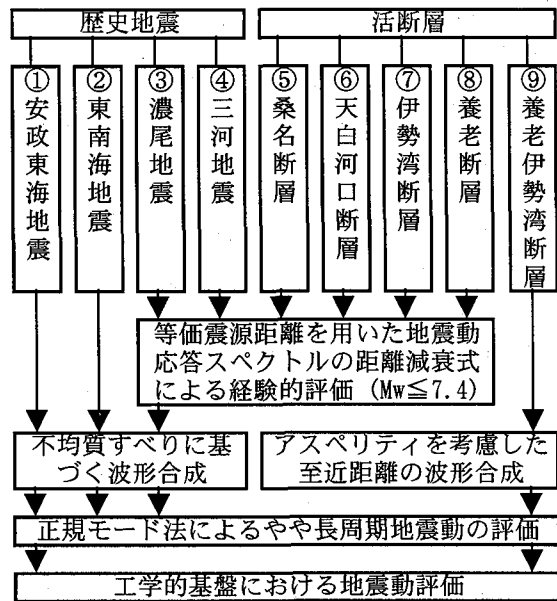
表-1 評価対象地震の主な断層パラメータ

| 評価対象地震 | 歴史地震による想定地震             |      |                        |      |                       |      |      |      |      |                       | 活断層による想定地震 |          |        |         |           |      |
|--------|-------------------------|------|------------------------|------|-----------------------|------|------|------|------|-----------------------|------------|----------|--------|---------|-----------|------|
|        | ① 安政東海地震 <sup>*11</sup> |      | ② 東南海地震 <sup>*12</sup> |      | ③ 濃尾地震 <sup>*13</sup> |      |      |      |      | ④ 三河地震 <sup>*14</sup> | ⑤ 桑名断層     | ⑥ 天白河口断層 | ⑦ 養老断層 | ⑧ 伊勢湾断層 | ⑨ 養老伊勢湾断層 |      |
|        | No.1                    | No.2 | No.1                   | No.2 | No.1                  | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 |                       |            |          |        |         | No.1      | No.2 |
| No.*0  | No.1                    | No.2 | No.1                   | No.2 | No.1                  | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 |                       |            |          |        |         |           |      |
| Mo*1   | 300                     | 160  | 110                    | 46   | 1.3                   | 3.3  | 5.5  | 2.8  | 1.9  | 1.0                   | 0.90       | 0.53     | 3.3    | 4.7     | 6.3       | 10   |
| φ*2    | 245                     | 198  | 225                    | 225  | 145                   | 145  | 145  | 107  | 163  | 160                   | 203        | 60       | 154    | 341     | 154       | 341  |
| δ*3    | 24                      | 34   | 30                     | 30   | 90                    | 90   | 90   | 90   | 90   | 30                    | 90         | 90       | 90     | 90      | 90        | 90   |
| h*4    | 3                       | 2    | 0                      | 0    | 1.8                   | 1.8  | 1.8  | 1.8  | 1.8  | 1.4                   | 1          | 1        | 2      | 2       | 2         | 2    |
| L*5    | 150                     | 115  | 154                    | 84   | 18                    | 18   | 16   | 33   | 34   | 12                    | 21         | 16       | 41     | 49      | 41        | 53   |
| W*6    | 100                     | 70   | 67                     | 78   | 15                    | 15   | 15   | 15   | 13   | 11                    | 19         | 19       | 18     | 23      | 18        | 23   |
| D*7    | 400                     | 400  | 215                    | 140  | 140                   | 425  | 700  | 250  | 140  | 300                   | 75         | 58       | 150    | 140     | 280       | 280  |
| τ*8    | 5.0                     | 5.0  | 2.7                    | 1.8  | 1.0                   | 2.0  | 3.5  | 1.5  | 1.0  | 2.0                   | 0.94       | 0.72     | 1.9    | 1.7     | 3.6       | 3.6  |
| Vr*9   | 2.6                     | 2.6  | 2.6                    | 2.6  | 2.5                   | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 2.5  | 2.4                   | 2.5        | 2.5      | 2.5    | 2.5     | 2.5       | 2.5  |
| Mw*10  | 8.4                     |      | 8.1                    |      | 7.4                   |      |      |      |      | 6.6                   | 6.6        | 6.4      | 7.0    | 7.1     | 7.4       |      |

注\*0)断層面番号、\*1)地震モーメント(×E 26dyn.cm)、\*2)断層走行(北から時計回りの方位角°)、\*3)断層傾斜(°)、\*4)上端深さ(km)、\*5)断層長さ(km)、\*6)断層幅(km)、\*7)平均すべり量(cm)、\*8)立ち上がり時間(s)、\*9)破壊伝播速度(km/s)、\*10)モーメントマグニチュード(Kanamori(1977))、\*11)相田(1981)を参照、\*12)相田(1979)参照、\*13)Mikumo-Ando(1976)を参照、\*14)Takehi-Iwata(1992)を参照

3. 地震動評価

特定した9つの評価対象地震に対する地震動評価の具体的な手順を図-3に示す。まず、6内陸地震を対象(図-3参照)に、等価震源距離を用いた経験的地震動評価法を適用して至近距離の内陸地震の地震動強さを検討した(表-1参照)。次いで、規模がより大きい安政東海地震、東南海地震、および養老伊勢湾断層の地震といった巨大地震に対して不均質すべり(一様でないすべり)に基づく波形合成法を適用した。なおこのうちの養老伊勢湾断層については、特に至近距離の地震動評価となるため、震源近傍の地震動特性に大きな影響を及ぼすアスぺリティ(強い地震波を放出する領域)を考慮した波形合成により地震動特性を検討した。また、表面波の励起が大きい巨大地震として安政東海地震・東南海地震・濃尾地震・養老伊勢湾断層を取り上げ、正規モード法によってやや長周期地震動の評価を行った。



(1) 地震動平均応答スペクトルの距離減衰式による  
6内陸地震の地震動評価

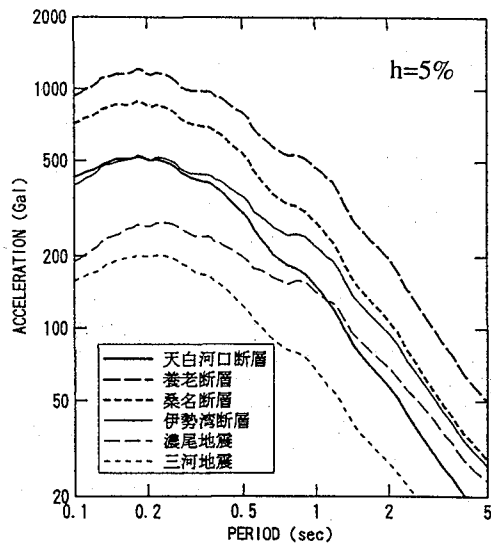
6内陸地震の検討にあたっては地震動スペクトルを簡便に評価できる距離減衰回帰式を用いた。その際に震源近傍での評価精度が問題となることから、本検討では、至近距離において断層面の拡がりの効果を考慮した等価震源距離を採用し、震源近傍のデータを含むカリフォルニアの強震記録から求められた岩盤( $V_s \geq 600\text{m/s}$ 程度)上の地震動に関する平均応答スペクトル( $h=5\%$ )の距離減衰式<sup>19)</sup>を適用した。

この距離減衰式では  $h=5\%$ の平均加速度応答スペクトル  $S(T)$ が次式で与えられる。

$$\log S(T) = a(T)M_w - \log X_{eq} - b(T)X_{eq} + c(T)$$

ここに、 $T$ は周期、 $M_w$ はモーメントマグニチュード、 $X_{eq}$ は等価震源距離であり、 $a(T)$ 、 $b(T)$ 、 $c(T)$ は回帰係数である。なお、 $M_w$ と $X_{eq}$ の適用範囲は回帰分析に用いたデータの条件から  $M_w=5.0 \sim 7.4$ 程度、 $X_{eq}=7 \sim 100\text{km}$ 程度である。

図-4は6内陸地震に対して上記の距離減衰式を適用した結果を示す。なお、各評価地震の  $M_w$ は地震モーメント  $M_0$ から  $M_w$ の定義式<sup>20)</sup>で求め、また等価震源距離  $X_{eq}$ は個々の地震毎に断層面上で一様なすべり分布を想定して算定した。同図で構造物の1次固有周期1~2s付近に注目すると、養老断層>桑名断層>伊勢湾断層>濃尾地震>天白河口断層>三河地震の順序でスペクトルレベルが高く、養老断層が評価地点に最も大きな影響を及ぼす地震動となる。



(2) 波形合成法による地震動評価

より規模の大きな地震に対しては波形合成法<sup>21)</sup>を適用して地震動特性を検討した。この方法は、大地震の断層運動を断層長さ・幅・すべり量に関して分割した小地震(要素地震)の連続として考え、大地震の破壊の進展に伴って断層面から放出される波の到達に合わせて小地震の地震動波形を足し合わせ大地震の地震動波形を求めるものである。

波形合成法では適切な小地震の観測記録があれば比較的単純な計算にもかかわらず実地震の特徴を良く捉えたシミュレーションが可能である。このため、これまで多くの手法が提案されているが、ここでは断層面上の不均質すべりを考慮することにより短周期地震波の励起特性を表現した手法<sup>22)</sup>を用いる。

(a) 海溝沿いの巨大地震の地震動評価

東海地震と東南海地震の波形合成では、震源域周辺に発生した小地震(図-2中の●)が評価地点に近い四日市港(図-2中の○)で観測されていることから、この地震を要素地震とした。その地震諸元を表-2に示す。なお、四

表-2 海溝地震に対する要素地震の諸元

|          |                           |
|----------|---------------------------|
| 発震時      | 1971年1月5日06時08分           |
| マグニチュード  | 6.1                       |
| 震源地      | 愛知県沖                      |
| 震源位置     | N34.43°, E137.17°, 深さ40km |
| 震源(震央)距離 | 85km(75km)                |

日市港<sup>23)</sup>の記録は表層26mの軟弱層上で観測されたものであるため、波形合成を行う際に、観測記録から一次元重複反射理論によってGL-26mの工学的基盤の自由地表面における地震動を求め要素地震の波形とした。その加速度波形を図-5に示す。

表-3の条件に従う波形合成によって得られる地震動の平均加速度応答スペクトル(h=5%)と加速度波形の代表例を図-6に示す。なお、安政東海地震については破壊伝

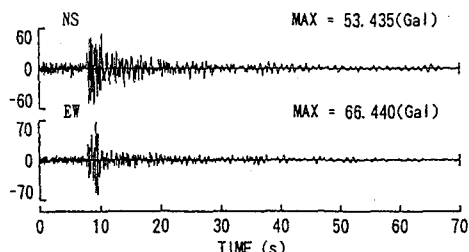


図-5 要素地震加速度記録

表-3 波形合成の条件

| 評価対象地震     | 安政東海地震     |         | 東南海地震   |         |
|------------|------------|---------|---------|---------|
| 目標Mo       | 4600       |         | 1560    |         |
| 要素Mo       | 2.24       |         | 2.24    |         |
| 断層面        | No. 1      | No. 2   | No. 1   | No. 2   |
| NL, MW, ND | 11, 11, 11 | 9, 9, 9 | 8, 8, 8 | 6, 6, 6 |
| 合成Mo       | 4600       |         | 1630    |         |

注：Moは地震モーメント(×E 25dyn. cm)、NL, NW, NDはそれぞれ断層長さ・断層幅・すべり量の重ね合わせ数を表す。

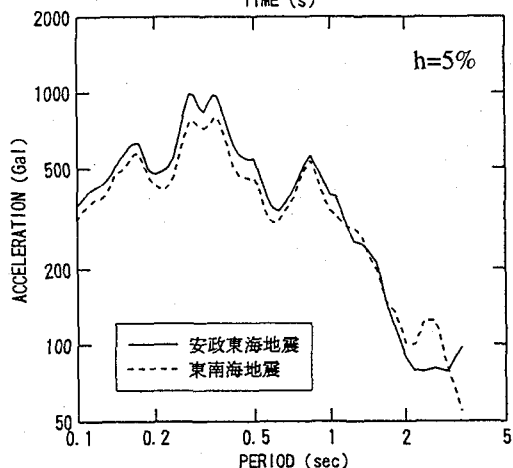
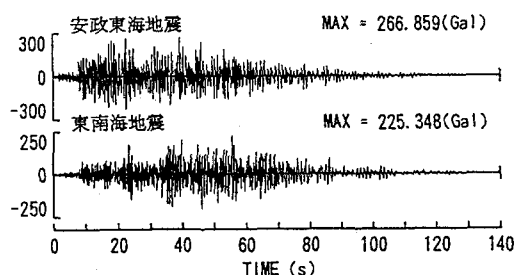


図-6 海溝地震の合成結果

播に関する情報がなかったため、北東向き破壊・南西向き破壊・両方向破壊伝播の3通りについて検討し、その中で最大のスペクトルを与えた両方向破壊伝播の場合における結果を示している。これらによれば、両地震の地震動強さはそれほど変わらないが、最大加速度振幅と加速度応答スペクトルのいずれについても安政東海地震の方がやや大きな地震動になることがわかる。

#### b) 内陸の巨大地震の地震動評価

前節の海溝沿いの巨大地震の検討では、単純に断層面上で一様に不均質な破壊特性を仮定し、断層面の全域から均等に放出されるという考え方で地震動評価を行った。遠方の地震については、このような不均質性を仮定した震源モデルでも観測記録を概ね説明することが確認されている<sup>22)</sup>。しかしながら、震源過程に関する最近の研究<sup>24)</sup>によれば、断層面上では強い地震波を放出する領域(アスぺリティ)とそうでない領域とが混在しており、震源近傍では強い地震波を放出するアスぺリティが至近に位置するかどうかで地震動の強さが大きく異なる。このため、特に震源近傍において現実的な地震動評価を行うためにはアスぺリティの影響を考慮することが必要である<sup>25)</sup>。そこで、至近距離の巨大地震である養老伊勢湾断層に対してはアスぺリティの存在を仮定した波形合成による地震動評価を行った。なお、3(1)の検討では養老断層が最も大きな地震動になることが明らかにされているが、養老伊勢湾断層はこれを包含する地震動を発生させる可能性が高いことから、波形合成法による詳細な地震動評価は養老伊勢湾断層についてのみ行った。

養老伊勢湾断層に対しては要素地震波形としての条件を満足する実地震記録(養老断層・伊勢湾断層沿いの小地震による評価地点での地震動記録)がないため、先に述べた米国カリフォルニアの地震動平均スペクトルの距離減衰式<sup>17)</sup>で小地震の地震動スペクトルを求め、それに適合する人工地震波を作成して要素地震記録とした。具体的には、図-7に示すように養老伊勢湾断層の断層面をA～Eの区間に区切り、それぞれ図中の●の位置に要素地震を設けた。これらの要素地震A～Eの地震動スペクトルとそれらに適合するように作成した人工地震波の例を図-8に示す。

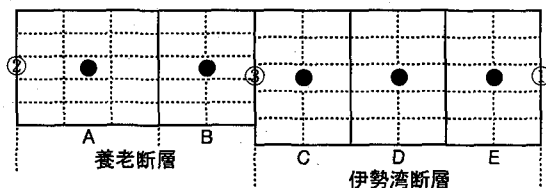


図-7 断層面の分割と要素地震の位置

一方、アスぺリティのモデル化に際しては、現状ではその詳細な特性を予測することが困難であるため、ここでは既往の震源不均質性に関する統計的検討<sup>26)</sup>による平均的なアスぺリティの特徴：(i)アスぺリティの総面積が全断層面の約40%、(ii)アスぺリティの平均すべり量

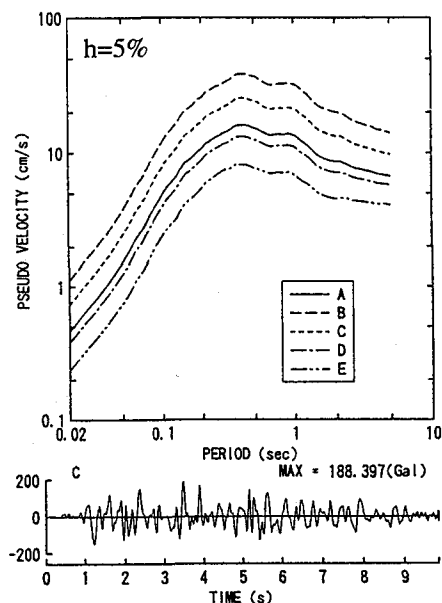


図-8 要素地震の人工地震波

が全断層面の平均すべり量の約 1.5 倍、(iii) 最大アスペリティの面積がアスペリティ総面積の約 60% を条件に仮定した。また、仮定したアスペリティモデルに対応する波形合成を行うため、断層面全体にわたって均質に破壊して長周期地震波のみを放出する部分と、不規則な破壊によって短周期地震波も多く放出するアスペリティ部分の足し合わせによって、全体として非一様な地震波放出特性を持つ断層モデルを考えた。

具体的には、図-7 のとおり養老断層側を  $5 \times 5$  個、伊勢湾断層側を  $6 \times 5$  個、合計 55 個の小領域に分割し、まず、上記(i)の条件に従って全体の約 40% に当たる 24 個の小領域をアスペリティ部分に当てた。また(iii)の条件で最大アスペリティの面積がアスペリティ総面積の 60% 程度とされることから大きなアスペリティを 2 個設定し、長さ方向 4 個、幅(深さ)方向 3 個、合計 12 個の小領域からなるアスペリティを養老断層側と伊勢湾断層側にそれぞれ 1 個ずつ配置した。アスペリティ配置の例を図-9 に示す。

なお、アスペリティの位置は予測不可能であるため、解析に際しては図-9 に示した小領域の分割に従って養老・伊勢湾断層のそれぞれについて、アスペリティ位置として設定し得るすべてのケースを扱った。この場合、アスペリティの配置は、養老断層側では長さ方向、幅(深さ)方向の位置に関して  $2 \times 3$  通り、一方伊勢湾断層側では同じく  $3 \times 3$  通りあり、総ケース数は  $2 \times 3 \times 3 \times 3 = 54$  通りである。この他、破壊伝播形式について図中の①～③を破壊開始点として北向き破壊・南向き破壊・両方向破壊の 3 通りを考えた。また、アスペリティ部分からの短周期地震波の励起を表現するために導入したランダムな不均質すべり分布<sup>22)</sup>について 5 通り、さらに要素地震波形の作成で乱数位相を仮定していることを考慮して要素地震波形について 2 通りの乱数ケースを設定し、総計

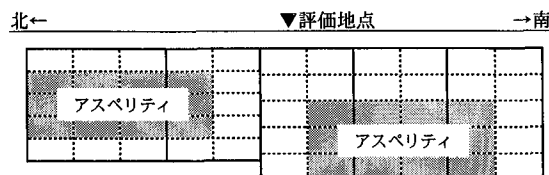


図-9 アスペリティ配置例

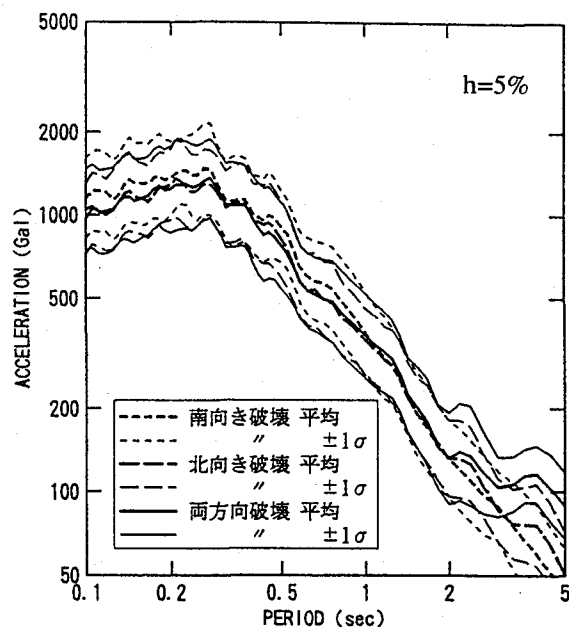


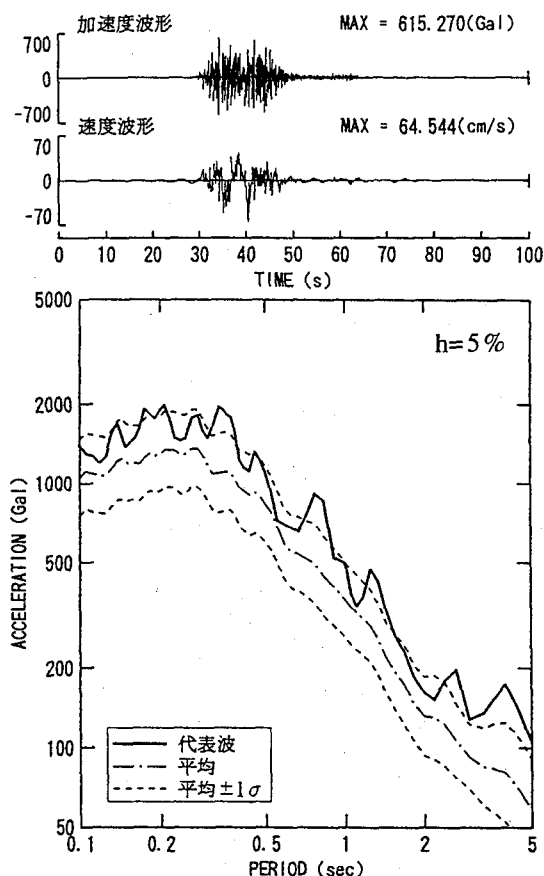
図-10 破壊伝播方向毎の平均スペクトル

$54 \times 3 \times 5 \times 2 = 1620$  個の波形合成を行った。

これらの合成波形をもとに、まず破壊伝播形式による違いを検討するため、破壊伝播形式毎の平均スペクトルを図-10 に示す。これによれば、破壊伝播形式によって微妙な違いはあるが、大まかに見ればこれらのスペクトルレベルは変わらず、±標準偏差の幅もほぼ同程度である。これは、断層至近距離における短周期地震動が評価地点に近い断層領域からの地震波のみに支配され、その他の断層領域からの寄与が相対的に小さくなることを反映したものと考えられる。

破壊伝播方向による違いがそれほど大きくないことから、全ケースの合成波をまとめて平均+標準偏差のスペクトルを求め、周期 0.1s～5s の帯域でこれに最も近い応答スペクトルを与える波形を選んで代表波とした。その加速度波形と速度波形、加速度応答スペクトル( $h=5\%$ )を図-11 に示す。スペクトルの図では参考のために、全ケースの合成波形による平均±標準偏差のレベルも示した。平均スペクトルのレベルは周期 0.1～0.3s 付近で 1000～1500Gal 程度であり、平均+標準偏差はその約 1.5 倍である。

(3) 正規モード法<sup>27)</sup>によるやや長周期表面波の評価  
正規モード法は、半無限成層地盤中の任意の 1 点に集中力が作用した場合の地表面における解のうち far-field 項に対する正規モード解に基づく理論的解析手法であり、3 次元成層地盤モデルの中に配置された断層面を小領域に分割し断層面の破壊伝播に合わせて各小領域からの寄



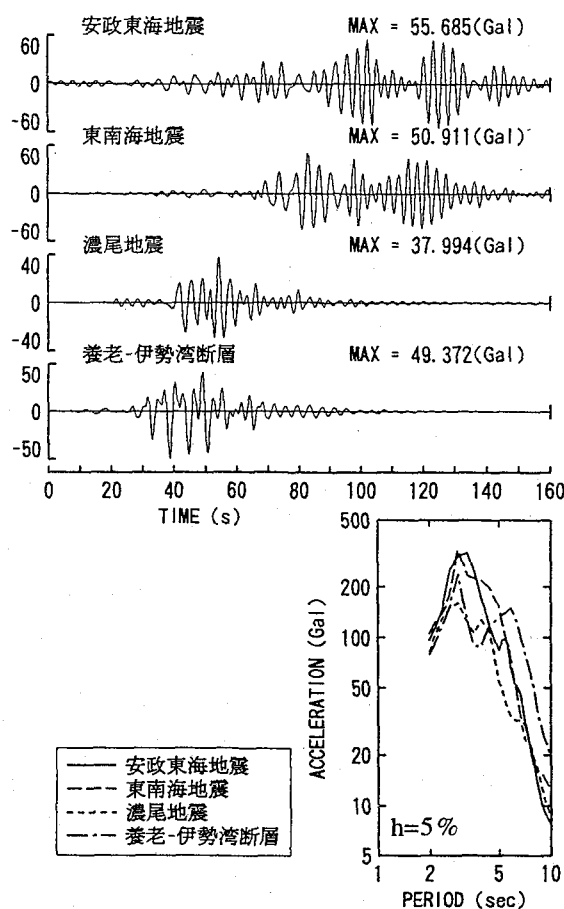
与による正規モード解を足し合わせるにより拡がりのある断層からの地震動を評価する。評価対象は主に表面波成分であり、周期帯域は周期数秒以上のやや長周期～長周期領域である。

一般に表面波の励起特性は、規模が大きくごく浅い地震ほど大きい。このため正規モード法によるやや長周期地震動の検討では安政東海地震(M8.4)、東南海地震(M7.9)、濃尾地震(M8.0)、養老伊勢湾断層(M8.1)の4地震を対象とした。本検討で用いた震源から評価地点に至る深い地下構造のモデルは中部日本および中京地区の速度構造<sup>28)~30)</sup>に基づいて仮定し、1961年北米濃地震(M7.0)による名古屋気象台の記録のシミュレーションで妥当性を検証後、その地盤構造モデルを用いた(表-4参照)。

上記4地震について正規モード法を適用し、求めた加速度波形と加速度応答スペクトル( $h=5\%$ )を図-12に示す。周期によって最大加速度を示す地震が異なっているが、対象構造物の地盤-構造物系の1次周期2~3s付近の振幅で比較すると、4地震とも同程度の応答レベルを示すが、安政東海地震がわずかながら他の3地震より大きい。また、より長周期側の周期5s以上では養老伊勢湾断層が最大となるが、この地震は既に短周期側で最大の地震動となるため、ここでは安政東海地震の結果がやや長周期帯域の代表とみなした。

表-4 深い地下構造のモデル

| 層厚 (km)  | 密度 ( $t/m^3$ ) | Vp (km/s) | Vs (km/s) |
|----------|----------------|-----------|-----------|
| 0.5      | 2.0            | 2.2       | 0.68      |
| 0.5      | 2.2            | 3.0       | 1.5       |
| 2.2      | 2.5            | 5.0       | 2.6       |
| 1.0      | 2.6            | 5.8       | 3.0       |
| 15.0     | 2.7            | 6.0       | 3.2       |
| 6.0      | 2.8            | 6.6       | 3.6       |
| $\infty$ | 3.3            | 7.9       | 4.3       |



図・12 正規モード法による加速度波形とスペクトル

#### 4. 総合的な検討

## (1) 短周期～やや長周期の地震動波形の合成

以上の検討により、主に実体波に支配される短周期領域では、海溝地震に比べて内陸地震が大きな地震動をもたらすことが明らかになり、その中でも養老伊勢湾断層が平均的に最強の地震動であることが分かった。一方、表面波が卓越するやや長周期帯域の代表としては安政東海地震とみなせるが、全周期帯域にわたり最強の地震動を与える想定地震はない。そこで、養老伊勢湾断層と安政東海地震の双方についてそれぞれ波形合成法による評価結果と正規モード法によるやや長周期帯域の評価結果を重ね合わせ、工学的基盤でのレベル2地震動として求めた地震動の加速度波形を図-13に示す。

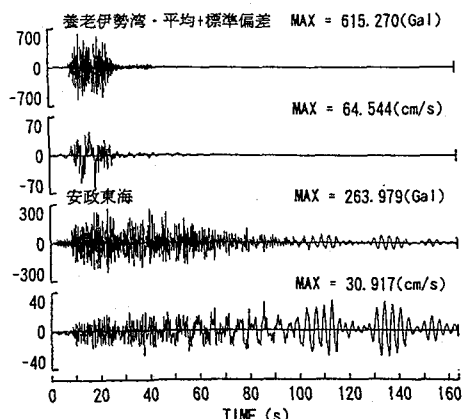


図-13 工学的基盤における地震動波形

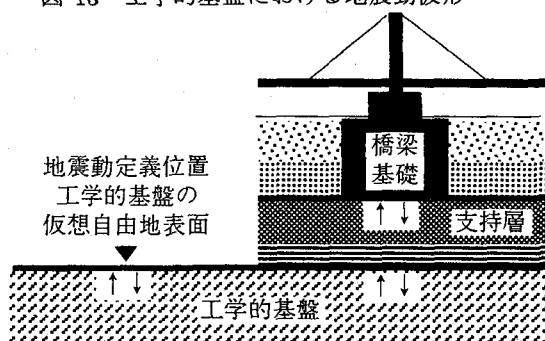


図-14 地震動の定義位置

## (2) 支持層における地震動評価

前節で評価した地震動は図-14 に示した地震動の定義位置での工学的基盤の仮想自由地表面で求めた。従って、支持地盤での地震動は、評価地点の地盤で支持層上面 (TP-50.8m) より上部の表層地盤を取り去った仮想の地盤モデルを考え、地盤応答解析によって支持層 ( $V_s=436\text{m/s}$ ) における地震動を作成する必要がある。

評価地点の工学的基盤までの地盤モデルを表-5 に示す。解析では、評価された工学的基盤 (硬質地盤) 上の地震動を TP-96.3m の位置に入力し、一次元波動論による等価線形化地盤応答解析 (SHAKE) によって TP-50.8m (支持層上面) の仮想自由地表面における応答波形を求めた。なお、地盤剛性および減衰定数のひずみ依存性は、計画地に近い長良川河口堰における検討結果<sup>31)</sup>をもとに仮定した。

安政東海地震と養老伊勢湾断層による支持層でのレベル2設計用地震動についてそれぞれ加速度波形と応答スペクトルを図-15 に示す。スペクトルの図は比較のため、道路橋示方書の1種地盤タイプI、IIのスペクトルも示している<sup>32)</sup>。これらによれば、養老伊勢湾断層による支持層の地震動強さは、最大加速度 521Gal、最大速度が 80cm/s 程度であるが、安政東海地震による支持層の地震動強さは最大加速度 285Gal、最大速度が 35cm/s 程度であり、短周期領域の瞬間的な地震動強さの点では養老伊勢湾断層が大きな影響を与える地震動であることがわか

表-5 検討対象地点の地盤モデル

| 層厚(m)    | 密度( $\text{t/m}^3$ ) | $V_s(\text{m/s})$ | 土質    |
|----------|----------------------|-------------------|-------|
| 9.1      | 2.0                  | 436               | 砂礫    |
| 3.9      | 2                    | 436               | 砂     |
| 3.9      | 1.8                  | 312               | シルト質砂 |
| 23.8     | 1.7                  | 287               | シルト   |
| 48.0     | 2                    | 347               | シルト   |
| $\infty$ | 2.1                  | 556               | 砂礫    |

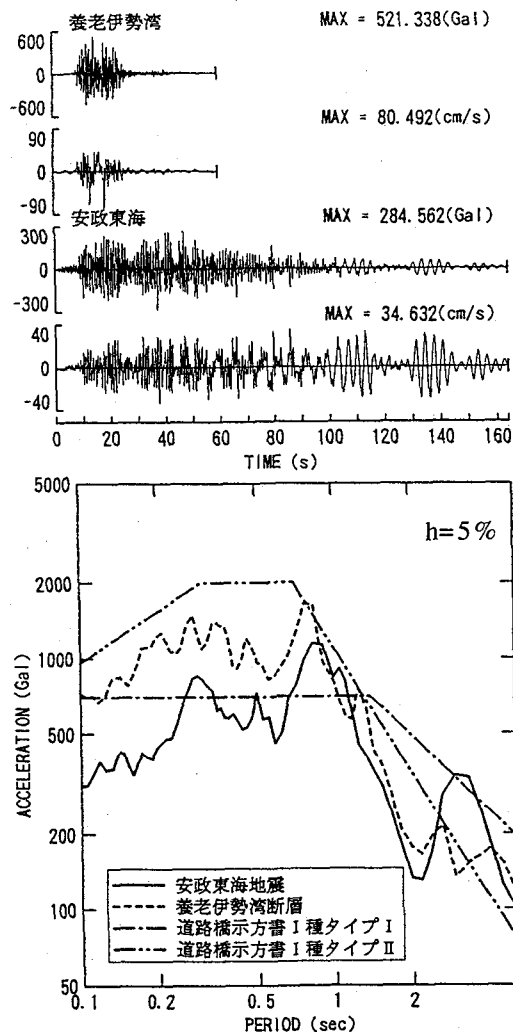


図-15 レベル2設計用地震動波形とスペクトル

る。しかしながら、加速度応答スペクトルの長周期側レベルや地震動波形の継続時間の点では安政東海地震の方が大きな影響を及ぼす可能性が高く、いずれか一方のみで耐震設計用地震動を代表させることは困難である。このため養老伊勢湾断層の評価結果と安政東海地震の評価結果をレベル2設計用基準地震動とした。

## 7. まとめ

ここでは、第二名神高速道路の木曾川橋および揖斐川橋の耐震安全性検討に必要な評価地点の支持層でのレベル2設計用地震動を評価した結果を紹介した。検討に際しては、過去および将来を通じ評価地点に大きな影響を及ぼす可能性がある歴史地震および活断層を複数個

特定し、それらに震源断層の拡がりを考慮できる地震動評価手法を適用して、建設地点の工学的基盤における地震動を評価した。その結果、短周期領域では養老伊勢湾断層による地震、やや長周期領域では安政東海地震による地震動がそれぞれ最も大きな影響を及ぼす結果が得られた。これらの地震動の最大振幅は、養老伊勢湾断層によるものが最大加速度 615Gal、最大速度 65cm/s、安政東海地震がそれぞれ 264Gal、31cm/s であった。

本文で紹介した検討フローは、他の土木構造物の耐震設計で必要となるレベル 2 地震動策定の検討方法の一例である。本フローが今後の土木構造物のレベル 2 地震動策定の一助となれば幸いである。

謝辞：本検討の実施にあたり、第二名神高速道路木曾三川橋の設計施工に関する技術検討 耐震設計委員会(委員長 京都大学大学院工学研究科長 土岐憲三教授)のご指導を賜りました。記して感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会、土木学会耐震基準等に関する提言集、1996
- 2) 日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説、1999。
- 3) 日本下水道協会、下水道施設の耐震対策指針と解説、1997。
- 4) 佐藤良輔、1989、日本の地震断層パラメーター・ハンドブック、鹿島出版会。
- 5) 宇佐美龍夫、1996、新編 日本被害地震総覧、東京大学出版会。
- 6) 宇津徳治、1982、日本付近の M6.0 以上の地震および被害地震の表：1885 年～1980 年、東京大学地震研究所彙報、57。
- 7) Kanai, K. et al., 1966, Observation of strong earthquake motions in Matsushiro area, Part 1, Bull. Earthq. Res. Inst., 44, 1269-1296。
- 8) 活断層研究会、1991、[新編]日本の活断層-分布図と資料、東京大学出版会。
- 9) 建設省国土地理院、1996、1:25,000 都市圏活断層図、財団法人日本地図センター。
- 10) 垣見俊弘他、1994、日本列島の地震地体構造区分と最大地震規模、地球惑星科学関連学会合同大会予稿集、302。
- 11) 飯田汲事、1987、天正大地震誌、名古屋大学出版会。
- 12) 金折裕司、1996、敦賀湾-伊勢湾構造線について：総説、岐阜大学教養部研究報告、34、317-336。
- 13) 相田勇、1981、東海道沖におこった歴史津波の数値実験、震研彙報、56、367-390。
- 14) 相田勇、1979、1944 年東南海地震津波の波源モデル、震研彙報、54、329-341
- 15) Mikumo, T. and Ando, M., 1976, A search into the faulting mechanism of the 1891 Great Nobi Earthquake, J. Phys. Earth, 24, 63-87。
- 16) Kakehi, Y. and Iwata, T., 1992, Rupture process of the 1945 Mikawa Earthquake as determined from strong motion record, J. Phys. Earth, 40, 635-655。
- 17) 松田時彦、1975、活断層から発生する地震の規模と周期について、地震 2、28。
- 18) 武村雅之、1990、日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係、地震 2、43。
- 19) Ohno, S., M. Takemura, M. Niwa, and K. Takahashi, 1996, Intensity of strong ground motion on Pre-Quaternary stratum and surface soil amplifications during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan., J. Phys. Earth, 44, 623-648。
- 20) Kanamori, H., 1977, The energy release in great earthquakes, J. Geophys. Res., 82。
- 21) Irikura, K., 1983, Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 33, 63-104。
- 22) Takemura, M. and Ikeura, T., 1988, A semi-empirical method using a hybrid of stochastic and deterministic fault models: simulation of strong ground motions during large earthquake, J. Phys. Earth, 36, 89-106。
- 23) 倉田栄一他、1970、港湾技研資料、107。
- 24) 武村雅之、1996、どこまで解明されたか兵庫県南部地震の震源過程 その 1. 波形インバージョンによる結果、日本地震学会講演予稿集、No. 2、A49。
- 25) 入倉孝次郎、1996、大阪およびその周辺地域の地震防災のための想定地震と強震動の予測、第 24 回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、91-100。
- 26) Somerville, P. G., 入倉孝次郎、澤田純男、岩崎好規、田居優、伏見実、1993、地震断層のすべり変位量の空間分布の検討、地震工学研究発表会、291-294。
- 27) 工藤一嘉、1982、やや長周期の地震波形予測と周辺問題、日本建築学会地盤震動シンポジウム(第 10 回)、57-64
- 28) Aoki H. et al., 1972, Crustal structure in the profile across central Japan as derived from explosion seismic observations, J. Phys. Earth, 20, 197-223。
- 29) 正木和明・飯田汲事、1981、名古屋地域の深部地盤構造 I、愛知工業大学研究報告、165-173。
- 30) 正木和明他、1982、名古屋地域の深部地盤構造 II、愛知工業大学研究報告、159-171。
- 31) 水資源開発公団試験研究所、1996、1994 長良川河口堰地震観測記録解析、試験研究所報告第 95209 号。
- 32) (社)道路協会、1996、道路橋示方書・同解説、(社)日本道路協会

(1999 年 9 月 17 日受付)