

得された中小地震記録の群遅延時間にはS波の寄与と表面波の寄与が渾然一体となっていることから、振幅についても両者の寄与を考慮することが必要となる。

アスペリティ等からの地震動は、地表におけるグリーン関数を次式⁸²⁾により重ね合わせることで算定できる(図-1.3.6)。この重ね合わせを行うことにより、破壊伝播方向で揺れの強い指向性の効果が考慮される。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(r/r_{ij} \right) f(t) * u(t-t_{ij}) \quad (1.3.9)$$

$$f(t) = \delta(t) + \frac{1}{n' \left(1 - \frac{1}{e} \right)} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[e^{-(k-1)/(N-1)/n'} \delta \left\{ t - \frac{(k-1)\tau}{(N-1)n'} \right\} \right] \quad (1.3.10)$$

$$t_{ij} = \frac{r_{ij} - r_0}{V_S} + \frac{\xi_{ij}}{V_r} \quad (1.3.11)$$

ここに、

$U(t)$: アスペリティ等からの地震動

$u(t)$: 地表におけるグリーン関数

$f(t)$: 大地震と小地震の滑り速度時間関数の違いを補正するための関数

r : 小地震の震源距離

r_{ij} : ij 要素から対象地点までの距離

N : 分割数(図-1.3.6)

τ : ライズタイム

n' : 波形の重ね合わせの際に現れる見かけの周期性を除去するための整数

r_0 : アスペリティ等の破壊開始点から対象地点までの距離

ξ_{ij} : 破壊開始点から ij 要素までの距離

V_S : 地震基盤のS波速度

V_r : 破壊伝播速度

アスペリティ等が複数あるときには、各アスペリティ等について同様の作業を行い、各アスペリティ等からの寄与を加え合わせることで、地表における(線形時の)レベル2地震動を算定する。最後に、表層地盤の地震応答計算により、工学的基盤におけるレベル2地震動(2E波)を算定する。背景領域(アスペリティ等以外の部分)からの寄与は一般的な港湾施設の性能照査が目的の場合には無視しても差し支えない。

上記の算定の過程で、地表における(線形時の)レベル2地震動が算定されるが、これは大地震時の表層地盤の非線形挙動の影響を含まないため、一般には過大評価となっていることに注意が必要である。本来の地表におけるレベル2地震動を算定するためには、いったん工学的基盤におけるレベル2地震動を求めた後で、表層地盤の非線形挙動を考慮した地震応答計算により、あらためて求めることが一般的である。

また、上記においては地表でのグリーン関数を用いる手順を説明したが、式(1.3.9)で工学的基盤におけるグリーン関数(2E波)を用いることにより、直接、工学的基盤におけるレベル2地震動(2E波)を算定することもできる。ただしその場合、式(1.3.8)において、サイト増幅特性として地震基盤～工学的基盤のものをを用いるだけでなく、中小地震記録も工学的基盤の2E波に変換したものをを用いる必要がある。

なお、ここで述べた強震波形計算手法により既往の大地震記録の再現を試みた事例が文献38)で紹介されている。また、ここで述べた強震波形計算手法による計算プログラムが文献38)の付録CD及び港湾空港技術研究所のホームページ(http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/sourcemodel/somodel_program.html)で公開されている。

最後に、多重非線形効果(本章1.1.4表層地盤の非線形挙動参照)を考慮して対象地点における地震動を評価するための方法³⁸⁾について述べる。まず、式(1.3.8)において $G(f)$ として地震基盤から工学的基盤までのサイト増幅特性を用意する。また、対象地点で得られた中小地震記録を工学的基盤に引き戻し、これを

式 (1.3.8) で $O(f)$ として用いる。そして式 (1.3.8) をフーリエ逆変換すると、工学的基盤における2E波とみなすことのできるグリーン関数が得られる。次に、式 (1.3.11-1) により多重非線形効果の影響を考慮してグリーン関数の補正を行う。

$$\begin{aligned} g_n(t) &= g(t) & (t < t_0) \\ g_n(t_0 + (t - t_0)/\nu_1) &= g(t) \exp(-\nu_2 \omega(t - t_0)) & (t > t_0) \end{aligned} \quad (1.3.11-1)$$

ここに、 $g(t)$ は補正前のグリーン関数、 $g_n(t)$ は補正後のグリーン関数、 t_0 はグリーン関数上での直達S波到来時刻、 ν_1 は堆積層における平均的なS波速度の低下率、 ν_2 は堆積層における平均的な減衰定数の増分を表す。そして、補正後のグリーン関数を重ね合わせるにより、工学的基盤における大地震時の地震動(2E波)を計算する。なお、グリーン関数上での直達S波到来時刻を読み取る際は、変位波形がピークを示す時刻(速度波形が0となる時刻)を読み取るのが良い。大地震発生時に多重非線形効果がどの程度強く現れるかという点については、まだ多くのデータで検証されているとは言えず、研究途上の課題でもあるが、地震動が強くなるほど現れやすいことは既往の地震で確認されており、図-1.1.12に示すように堆積層による後続位相の発達が見られる地点で、かつ、多重非線形効果を見込まない場合に計算結果のPSI値(速度波形の自乗の積分値の平方根)が200程度あるいはそれ以上と極めて大きな値となる場合は、多重非線形効果を見込んでレベル2地震動を設定することができる。その場合、多重非線形効果を表すパラメータは $\nu_1=0.84$ 、 $\nu_2=0.027$ とすることができる。これらの値は、過去に観測された大振幅地震動の再現解析において用いられた値の平均値である。

(3) 経験的グリーン関数法

経験的グリーン関数法は、対象地震の震源断層のそばで発生した小地震の記録が対象地点で取得できている場合に、これを重ね合わせるにより、大地震による対象地点の揺れを評価する方法である。このとき重ね合わせに用いられる小地震記録は経験的グリーン関数と呼ばれる。対象地点で取得された記録には伝播経路特性とサイト特性の影響が自然に含まれているため、それらに関する評価を行うこと無しに、大地震による揺れを精度良く評価できる点が大きな特徴であるが、対象地点で適切な小地震記録が取得できていない場合には適用できない。また、以下に述べるように、やや専門的配慮を必要とする事項もある。

波形の重ね合わせには、修正経験的グリーン関数法の式 (1.3.9) ～式 (1.3.11) をほぼそのまま用いることができる。ただし式 (1.3.9) については、小地震の特性を適切に反映できるよう、補正係数 C を含む次式に置き換える必要がある⁸²⁾。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (r/r_{ij}) f(t) * (Cu(t-t_{ij})) \quad (1.3.12)$$

重ね合わせに関連するパラメータ N と C は次式を満足するように定める。

$$\begin{aligned} M_{0a}/M_{0e} &= CN^3 \\ S_a/S_e &= N^2 \end{aligned} \quad (1.3.13)$$

ここに、

M_{0a} : アスペリティ等の地震モーメント

M_{0e} : 小地震の地震モーメント

S_a : アスペリティ等の面積

S_e : 小地震の破壊領域の面積

以上からわかるように、経験的グリーン関数法の適用にあたっては、小地震のパラメータを適切に見積も