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え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<sup>82)</sup>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。

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

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

$$t_{ij} = \frac{r_{ij} - r_0}{V_S} + \frac{\xi_{ij}}{V_r}$$
(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<sub>ii</sub>* :*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<sub>0</sub> : アスペリティ等の破壊開始点から対象地点までの距離
- *ε<sub>ii</sub>*: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<sub>r</sub>* :破壞伝播速度

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により、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<sup>38)</sup>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。

$$g_n(t) = g(t) \qquad (t < t_0)$$
  

$$g_n(t_0^+(t - t_0) / v_1) = g(t) \exp(-v_2 \omega(t - t_0)) \qquad (t > t_0)$$
  
(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、 $v_1$ は堆積層における平均的なS波速度の低下率、 $v_2$ 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ことにより、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タは $v_1$ =0.84、  $v_2$ =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ことにより、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<sup>82)</sup>。

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

$$M_{0a}/M_{0e} = CN^{3}$$
  
 $S_{a}/S_{e} = N^{2}$   
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

る必要がある。小地震の地震モーメント $M_{0e}$ についてはCMT 解<sup>83)</sup> (例えば防災科学技術研究所のF-netによるもの)を参考にすることができる。小地震の破壊領域の面積 $S_e$ は、小地震のコーナー周波数 $f_c$ から式(1.3.7)により求めることができる。小地震のコーナー周波数を求めるには、近傍で発生した規模の異なる地震とのスペクトル比をとる方法<sup>2) 84)</sup>を用いることができる。

経験的グリーン関数法を適用する際の他の注意点としてラディエーション係数の設定の問題がある。震源 からの地震波のラディエーション係数は理論上方位依存性があり<sup>83)85)</sup>、小地震の発震機構(走向・傾斜・滑り角) によっては、観測点がたまたまラディエーション係数の小さい方位に相当していることも考えられる。その場合、 得られた記録をそのまま重ね合わせると、大地震による揺れを過小評価してしまう可能性がある。したがって、 採用する小地震の発震機構には十分に注意を払う必要がある。

以上のように、経験的グリーン関数法による地震動の評価には専門的な判断を要する部分も少なくないた め注意が必要である。

#### 1.3.6 表層地盤の地震応答計算

表層地盤の地震応答計算については、本章1.2.3 表層地盤の地震応答計算の例によることができる。ただし、 レベル2地震動の作用時には、表層地盤のひずみレベルが特に大きくなる傾向があるので、解析手法の選定 には特に留意する必要がある。

#### 1.4 施設の性能照査で考慮する地震動の空間的変動

#### (1) 概要

埋設パイプラインや沈埋トンネルなどのように比較的延長の大きい施設では、施設の各部分に異なる地震 動が作用することが耐震設計上問題となる。

一般に地震動の空間的変動とは、地震動が水平方向に一様でないことを指す場合が多い。空間的変動が生 じる場合としては、そもそも地盤が水平方向に一様でないために地震動が場所毎に異なる場合がまず考えら れるが、それだけではなく、地盤が水平方向にほぼ一様であっても、地震波が水平方向に見かけ上伝播する ために、施設の各部分に地震動が位相差を伴って作用する場合もある。本項ではその両者の評価方法につい て述べている。

ただし、施設の各部分に異なる地震動が作用する原因は、いわゆる地震動の空間的変動だけではない。沈 埋トンネルなどのように延長方向に深度が著しく変化する施設では、地盤の浅部と深部で地震動が異なるこ とがむしろ問題となる場合もあり、その影響を適切に考慮することが必要である。

### (2) 地盤の水平方向の不均質性が著しい場合

構造物の占める範囲内において、地盤の水平方向の不均質性が著しい場合には、それによって地震動の空間 的変動がもたらされる場合がある。したがって、構造物の占める範囲内において、地盤の水平方向の不均質性 を適切に評価し、不均質性が著しい場合には、その影響を考慮して地震動の空間的変動を評価することが望ま しい。その際、工学的基盤面よりも下方における地盤の水平方向の不均質性の影響も考慮することが望ましい。

地盤の水平方向の不均質性が著しい場合に、地震動の空間的変動を評価するための具体的方法としては、 複数地点に設置された地震計の記録をもとに、本章1.3.5 強震波形計算(2)及び(3)に述べた方法で複数地 点の地震動を評価する方法が最も有効である。また、それ以外の方法として、地下構造が十分把握できてい る場合には、有限要素法・有限差分法などの適切な数値解析手法により評価することもできる。なお、本章1.3.5 強震波形計算(2)で述べた方法を適用する場合、複数地点で評価された地震動の位相差の物理的意味が失わ れないよう、十分注意する必要がある。本章1.3.5 強震波形計算(2)に述べた方法で評価された地震動の位 相差の物理的意味が失われる場合としては、複数地点の地震基盤における統計的グリーン関数が個別に評価 され、かつ、統計的グリーン関数の位相が乱数を用いて生成されている場合<sup>75)</sup>や、式(1.3.8)で用いる中小 地震記録の時間軸の原点が地点間でずれている場合(例えばトリガー時刻が地点間で異なる場合)などが考

【作】 第6章

えられる。前者に対する対処方法として、あまり距離の離れていない2点では、地震基盤における統計的グリーン関数を同一としておくなどの方法が考えられる。

# (3) 地盤の水平方向の不均質性が著しくない場合

地盤の水平方向の不均質性が著しくない場合にも上記の考え方は適用できるが、以下に述べるようにより 簡便な考え方<sup>31)</sup>も適用できる。

地盤の水平方向の不均質性が著しくない場合、水平方向の波動伝播効果が地震動の空間的変動の主たる要因となる。波動伝播効果により生じる地盤のひずみ  $\epsilon(\omega)$  は地動速度の振幅 $v(\omega)$  と見かけの伝播速度 $c(\omega)$ の関数である。ここに、 $\omega$  は角周波数である。

 $\varepsilon(\omega) = v(\omega)/c(\omega) \tag{1.4.1}$ 

式(1.4.1)からわかるように  $\varepsilon(\omega)$  は $c(\omega)$ の減少関数なので、 $c(\omega)$ が小さいほど、構造物にとっては 不利となることがわかる。波動伝播効果をもたらす地震波には表面波とS波があるが、任意の  $\omega$ に対して表 面波の位相速度はS波の位相速度よりも小さい。また、表面波の中では、ラブ波基本モードもしくはレイリー 波基本モードのいずれかの位相速度が最も小さい。したがって、 $c(\omega)$ としてラブ波基本モードもしくはレイリー 波基本モードの位相速度を考慮することが、構造物にとっては最も不利となる。

表面波の位相速度は周波数に依存する。一例として、図-1.4.1に東京湾岸のある場所でのラブ波の位相 速度と周波数との関係を示す。実線は表-1.4.1のS波速度構造モデルから計算される理論位相速度である (fundamental modeは基本モードを、higher modeは高次モードを意味する)。図-1.4.1の■はアレー観測 結果から求めた位相速度である。この対象地点ではラブ波基本モードの位相速度は周期1秒で約400 m/s、周 期3秒で約750 m/s であり、周波数に依存していることがわかる。



図-1.4.1 東京湾岸のある場所でのラブ波の位相速度と周波数との関係<sup>86)</sup>

層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (t/m <sup>3</sup> )
50	250	1.8
120	410	1.9
1580	800	1.9
1250	1200	2.1
3100	2600	2.6
_	3400	2.6

表-1.4.1 S波速度構造モデル<sup>86)</sup>

見かけの伝播速度 $c(\omega)$ は地域性が大きく、図-1.4.1に示したような数値は、任意の地点に適用可能な ものではない。施設の性能照査に用いる $c(\omega)$ は地点特性を考慮して設定することを標準とする。

一般に本章1.2 施設の性能照査に用いるレベル1地震動及び本章1.3 施設の性能照査に用いるレベル2地震動の方法で評価された地震動は表面波やS波など様々な種類の地震波を含んでいる。従って、施設の性能照査に用いるc(ω)は、評価された地震動に含まれる地震波の種類を考慮して定めることが理想であるが、それは必ずしも容易ではない。そこで、施設にとって最も不利となる条件を考え、ラブ波基本モードとレイリー波基本モードの位相速度の小さい方をc(ω)として用いることが一つの方法である。この場合の位相速度は、常時微動または地震動の現地アレー観測結果([参(作)]第1章3.8.4 微動アレー探査参照)に基づいて評価することが望ましい。

ただし、実際の地震動には表面波基本モード以外の成分も多く含まれており、地盤のひずみに関してより 実情に即した評価を行うためには、それらの影響も併せて考える必要があると考えられる。こうした観点から、 シールドトンネルでの地震観測結果に基づき、より実情に即した*c*(ω)の設定方法に関する研究も行われて おり、ラブ波基本モードの2倍の位相速度をもつ波がトンネル軸に対して斜め45度から入射するとした場合 にトンネルの軸ひずみを比較的良く再現したことが報告されている<sup>87)</sup>。

見かけの伝播速度*c*(ω)の周波数依存性については、これを考慮することは設計の合理化につながる。ただし、 設計上の簡便さを考慮し、周波数によらない見かけの伝播速度を与える方法も利用されている。シールドト ンネルでの地震観測結果を利用した上述の検討で得られた見かけの伝播速度は1km/sよりやや大きい程度で あった<sup>87)</sup>。

なお、 $c(\omega)$ の周波数依存性を考慮して地震動の空間変動を評価しようとする場合は次の方法によること ができる。本章1.2 施設の性能照査に用いるレベル1地震動及び本章1.3 施設の性能照査に用いるレベル2地 震動の方法に基づいて、水平成層地盤内の対象深度における基準点 (x=0, y=0) で評価された地震動の時刻 歴を $a_0(t)$ とする。また $c(\omega)$ を対象地点に応じた周波数依存の位相速度とする。このとき、同じ深度にお ける任意の点 (x,y)の地震動の時刻歴a(t)は次のように定めることができる。

 $①a_0(t)$ をフーリエ変換する。

②*a*(*t*)のフーリエ変換を次式で計算する。

$$A(\omega) = A_0(\omega) \exp\left\{-i(k_x x + k_y y)\right\}$$
(1.4.2)

 $k_x = \{\omega/c(\omega)\}\cos\theta \tag{1.4.3}$ 

$$k_{y} = \{\omega/c(\omega)\}\sin\theta$$
(1.4.4)

ここに、

 $A_0(\omega): a_0(t)$ のフーリエ変換  $A(\omega): a(t)のフーリエ変換$  *θ* : *x*軸の正方向と地震波の進行方向とのなす角

③A(ω)をフーリエ逆変換してa(t)を得る。

# [参考文献]

- 1) 土木学会:土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」解説, 2000.
- 2) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., Vol. 72, pp. 1217~1231, 1967.
- 3) Aki, K. : Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from G wave spectrum, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol.44, pp.23~88, 1966.
- 4)入倉孝次郎:阪神大震災を引き起こした強震動,京都大学防災研究所年報 No.39A, pp.229~245, 1996.
- 5) 纐纈一起:カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震,科学, Vol.66 No.2, pp.93~97, 1996.
- (6) 武村雅之,諸井孝文,八代和彦:明治以後の内陸浅発地震の被害からみた強震動の特徴,地震2, Vol.50, pp.485~ 505, 1998.
- Somerville, P.G., N.F. Smith, R.W. Graves and N.A. Abrahamson : Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, Seismological Research Letters 68, pp. 199~222, 1997.
- 8) 野津厚, 井合進, W.D. Iwan: 震源近傍の地震動の方向性に関する研究とその応用, 港湾技術研究所報告 Vol.40 No.1, pp. 107~167, 2001.
- 9) 野津厚, 池田薫: 直下型地震の揺れの向きを考慮した耐震強化岸壁の配置計画, 港湾, 第78巻 第9号, pp.48~51, 2001.
- 10) 国土交通省港湾局, 独立行政法人港湾空港技術研究所:港湾計画のための地震動の方向性ハンドブック, CD-ROM, 2003.
- 11) Lay, T., H. Kanamori, C.J. Ammon, K.D. Koper, A.R. Hutko, L. Ye, H. Yue and T.M. Rushing: Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults, *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, B04311, 2012.
- 12) 野津厚,山田雅行,長尾毅,入倉孝次郎:海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.4, pp.209-228, 2012.
- 13) 野津厚,長尾毅:海溝型巨大地震による地震動の予測のための震源パラメターの経験式-強震動パルスの生成に着目 して-,港湾空港技術研究所資料 No.1257, 2012.
- 14) Kurahashi, S. and K. Irikura : Short-period souce model of the 2011 Mw9.0 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.103, pp.1373~1393, 2013.
- 15) Street, R., R. Herrmann and O. Nuttli : Spectral characteristics of the Lg wave generated by central United States earthquakes, Geophys. J. R. Astr. Soc., Vol.41, pp.51~63, 1975.
- 16) 工藤一嘉: 強震動予測を中心とした地震工学研究のあゆみ, 地震2, Vol.46, pp.151~159, 1993.
- 17) 野津厚, 長尾毅:スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空 港技術研究所資料 No.1112, 2005.
- 18) Kinoshita, S. : Kyoshin Net (K-net), Seim. Res. Lett., Vol. 69, pp. 309~332, 1998.
- Aoi, S., K. Obara, S. Hori, K. Kasahara and S. Okada : New strong-motion observation network: KiK-net, EOS. Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 329, 2000.
- 20) 武村雅之: 関東大震災-大東京圏の揺れを知る, 鹿島出版会, 2003.
- 21) 野津厚, 菅野高弘:スペクトルインバージョンに基づく南西諸島の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港 技術研究所資料No.1149, 2007.
- 22) 野津厚, 菅野高弘: スペクトルインバージョンに基づく道北の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術 研究所資料No.1214, 2010.
- 22-1) 野津厚, 盛川仁: 表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法, 地震2, Vol.55, pp.361~374, 2003.
- 23) 土田肇, 井合進: 建設技術者のための耐震工学, 山海堂, 1991.
- 24) 竹信正寛, 野津厚, 宮田正史, 佐藤裕司, 浅井茂樹: 確率論的時刻歴波形として規定される港湾におけるレベル1地震動の設定に関する包括的整理, 国土技術政策総合研究所資料, No.812, 2014.
- 25) 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 26) 善功企,山崎浩之・梅原靖文:地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究,港湾技術研究所報告 Vol.26 No.1, pp.41~113, 1987.
- 27) 中村豊:常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定,鉄道総研報告, Vol.2, No.4, pp.18-27, 1988.
- 28) 野津厚, 若井淳: 東日本大震災で被災した港湾における地震動特性, 港湾空港技術研究所資料No.1244, 2011.
- 29) 長尾毅, 森下倫明, 野津厚:レベル1地震動の評価におけるサイト特性の影響に関する研究, 海洋開発論文集 第22巻, 2006.

- 30) Yoshida, N. and S. Iai : Nonlinear site response and its evaluation and prediction, The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani (eds), Balkema, 1998.
- International Organization for Standardization: ISO23469, Bases for design of structures Seismic actions for designing geotechnical works, 2005.
- 32) Shnabel, P.B., J. Lysmer and H.B. Seed : SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, University of California at Berkeley, 1972.
- 33) Lysmer, J., T. Udaka, C.F. Tsai and H.B. Seed : FLUSH, A computer program of approximate 3-D analysis of soilstructure interaction problems, Report No. EERC75-30, University of California at Berkeley, 1975.
- 34) 吉田望:実用プログラムSHAKEの適用性, 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集, 土質工学会軟弱 地盤における地震動増幅と被害に関する研究委員会, pp.14~31, 1994.
- 35) 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 493/III-27, pp.49~58, 1994.
- 36) 吉田望, 末富岩雄: DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株) 技術研究 所報, pp.61~70, 1996.
- 37) Iai, S., Y. Matsunaga and T. Kameoka : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, pp. 1~15, 1992.
- 38) 野津厚, 菅野高弘:経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法-因果性と多重非線形効果に着目した改良-, 港湾空港技術研究所資料 No.1173, 2008.
- 39) Iai, S., T. Morita, T. Kameoka, Y. Matsunaga and K. Abiko: Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro Oki earthquake, Soils and Foundations, Vol. 35, pp. 115~132, 1995.
- 40) 沿岸開発技術研究センター:埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), 1997.
- 41) Imai, T. and K. Tonouchi : Correlation of N value with S wave velocity and shear modulus, Proc. 2nd ESOPT, 1982.
- 42) 上部達生, 土田肇, 倉田栄一: 大型混成式防波堤の強震記録に基づく水-構造物連成系の地震応答解析, 港湾技術研究 所報告 Vol.22 No.2, pp.289~326, 1983.
- 43) 一井康二, 井合進, 森田年一: 有効応力解析によるケーソン式岸壁の被災原因分析, 土木学会, 阪神・淡路大震災に 関する学術講演会論文集, pp. 397~404, 1996.
- 44) 国生剛治, 桜井彰雄, 江刺靖行:三軸試験装置を用いた微小ひずみから大ひずみまでの土質動的試験法の開発と砂の 物性試験への適用, 第14回土質工学研究発表会発表講演集, pp.513~516, 1979.
- 45) 薄井治利, 風間基樹, 稲富隆昌:初期せん断剛性の拘束圧依存性が等価線形地震応答解析結果に及ぼす影響について, 土質工学会, 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, pp.219~224, 1989.
- 46) 国立天文台編:理科年表 (平成30年), 2017.
- 47) 宇佐美龍夫:最新版日本被害地震総覧[416]-2001, 東京大学出版会, 2003.
- 48) 佐藤良輔編:日本の地震断層パラメター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989.
- 49) 活断層研究会編: [新編]日本の活断層-分布図と資料,東京大学出版会, 1991.
- 50) 中田高, 今泉俊文編:活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 2002.
- 51) 武村雅之:日本列島における地殻内地震のスケーリング則-地震断層の影響および地震被害との関連,地震2, Vol.51, pp.211~228, 1998.
- 52) 宇津徳治:日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表:1885-1980年, 地震研究所彙報 Vol.57, pp.401~463, 1982.
- 53) 金森博雄編:地震の物理,岩波書店,1991.
- 54) 片岡正次郎, 日下部毅明, 村越潤, 田村敬一: 想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究, 国土技術政 策総合研究所研究報告 No.15, 2003.
- 55) Eshelby, J.D. : The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A 241, pp. 376~396, 1957.
- 56) 野津厚:東北地方太平洋沖地震を対象とするスーパーアスペリティモデルの提案,日本地震工学会論文集 Vol.12, No.2, pp.21-40, 2012.
- 57) 野津厚, 若井淳: 強震動を対象とした 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデル, 港湾空港技術研究所報告 Vo.51, No.1, pp.23-53, 2012.
- 58) 入倉孝次郎: 強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法-, 京都大学防災研究所年報 No.47 A, 2004.
- 59) Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, Vol. 70, pp. 59~80, 1999.
- 60) 入倉孝次郎, 三宅弘恵:シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌 Vol. 110, No.6, pp. 849~875, 2001.
- 61) 入倉孝次郎, 三宅弘恵:予測のための震源のモデル化, 月刊地球号外 No.37, pp.62-77, 2002.
- 62) 野津厚:南海トラフの地震(M<sub>w</sub>9.0)を対象としたSPGAモデルによる強震動評価事例,土木学会論文集A1(構造・ 地震工学) Vol.69, No.4, pp.I\_872-I\_888, 2013.
- 63) 野津厚, 若井淳: 南海トラフの地震 (M<sub>w</sub>9.0) を対象とした強震動評価への SPGA モデルの適用, 港湾空港技術研究

所資料 No.1271, 2013.

- 64) 内閣府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), http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/, 2012.
- 65) 野津厚, 若井淳, 長坂陽介:表層地盤の非線形挙動を考慮した2011年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション, 港湾空港技術研究所資料 No.1284, 2014.
- 66) 武村雅之: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, Vol.43, pp.257~265, 1990.
- 67) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., pp. 151~156, 1986.
- 68) Takemura, M. and T. Ikeura : A semi-empirical method using a hybrid stochastic and deterministic fault models: Simulation of strong ground motions during large earthquakes, J. Phys. Earth, 36, pp. 89~106, 1988.
- 69) Dan, K., T. Watanabe and T. Tanaka : A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement, J. Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), 396, pp.27~36, 1989.
- 70) 釜江克宏,入倉孝次郎,福知保長:地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測-統計的波形合成法によ る予測-,日本建築学会構造系論文報告集, No.430, pp.1~9, 1991.
- 71) Kamae, K., Irikura, K. and Pitarka, A. : A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 88, pp. 357~367, 1998.
- 72) 松島信一,川瀬博:1995年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集 Vol.534, pp.33~40, 2000.
- 73) 科学技術庁:第1回堆積平野地下構造調查報告会予稿集, 2000.
- 74) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎:経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集 Vol.514, pp.97~104, 1998.
- 75) Boore, D.M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 73, pp. 1865~1894, 1983.
- 76) Brune, J.N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, J. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 4997 ~5009, 1970.
- 77) Brune, J.N.: Correction, J. Geophys. Res., Vol. 76, p. 5002, 1971.
- 78) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系 論文集 第556号, pp.15~24, 2002.
- 79) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦勝: 関西地域におけるサイト増幅特性の再評価, 構造工学論文集 Vol.48A, pp.577~586, 2002.
- 80) 加藤研一: K-NET 強震記録に基づく 1997 年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価, 日本建築 学会構造系論文集 第543 号, pp.61~68, 2001.
- 81) 岩田知孝,入倉孝次郎:観測された地震波から震源特性,伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震2, Vol.39, pp.579~593, 1986.
- 82)入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子:経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
- 83) Aki, K. and P.B. Richards : Quantitative Seismology, Second Edition, University Science Books, 2002.
- 84) Miyake, H., Iwata, T. and Irikura, K. : Source characterization for broadband ground-motion simulation: kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.93, pp.2531~2545, 2003.
- 85) 理論地震動研究会編:地震動-その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994.
- 86) 野津厚, 安中正, 佐藤陽子, 菅野高弘:羽田空港の地震動特性に関する研究 (第1報) 表面波の特性, 港湾空港技術研 究所資料 No.1022, 2002.
- 87) 野津厚, 高橋英紀, 遠藤敏雄:シールドトンネルにおける地震観測結果から地震波の見かけの伝播速度を評価する試み, 土木学会論文集A1(構造・地震工学) Vol.66, No.1, pp.61-72, 2010.