

5. 地域係数 Z と地盤増幅係数 G_s の影響

文献 2), 3), 4), 5), 6) では、地域係数 Z を 1.0 として検討を行っている。本章では、保有水平耐力計算及び限界耐力計算において、地域係数 Z と地盤増幅係数 G_s が必要ベースシア係数 C_{BT} に与える影響について検討を行った。

5.1 地域係数 Z の影響

建物の必要ベースシア係数 C_{BT} は地域係数 Z 、すなわち入力地震動の大きさによって大きく異なる。ここでは、地域係数 Z を例として入力地震動の違いによる耐震性能について検討した。現行基準において地域係数 Z は、沖縄県で 0.7、北海道の一部の地域及び九州の一字の地域等では 0.8、日本海側や中国・四国地方の一部の地域等では 0.9 と定められている¹⁾。

4 章及び表 4.3、表 4.4 より、保有水平耐力計算の必要ベースシア係数 C_{BT} は(4.7)式（加速度一定領域）、(4.2)式（速度一定領域）で表せる。また、限界耐力計算の必要ベースシア係数 C_{BT} は(4.25)式（加速度一定領域）、(4.29)式（速度一定領域）で表せる。

図 5.1～図 5.3 に地域係数 Z を変えた場合の限界耐力計算の必要ベースシア係数 C_{BT} と塑性率 μ の関係を示す。なお、図中の実線は地域係数 $Z=1.0$ とした場合、破線は地域係数 $Z=0.8$ とした場合である。また、降伏変形角 R_y は図 4.7～図 4.9 と同様に 1/150 とした。さらに、第 1 種地盤には、地域係数 Z を変えた場合の保有水平耐力計算の必要ベースシア係数 C_{BT} と塑性率 μ の関係を併せて示す。

図 5.1～図 5.3 より、地域係数 Z を変えた場合の必要ベースシア係数 C_{BT} は、保有水平耐力計算と加速度一定領域における限界耐力計算では、 Z 倍必要ベースシア係数 C_{BT} が小さくなる。一方、速度一定領域における限界耐力計算では、 Z^2 倍必要ベースシア係数 C_{BT} が小さくなる。

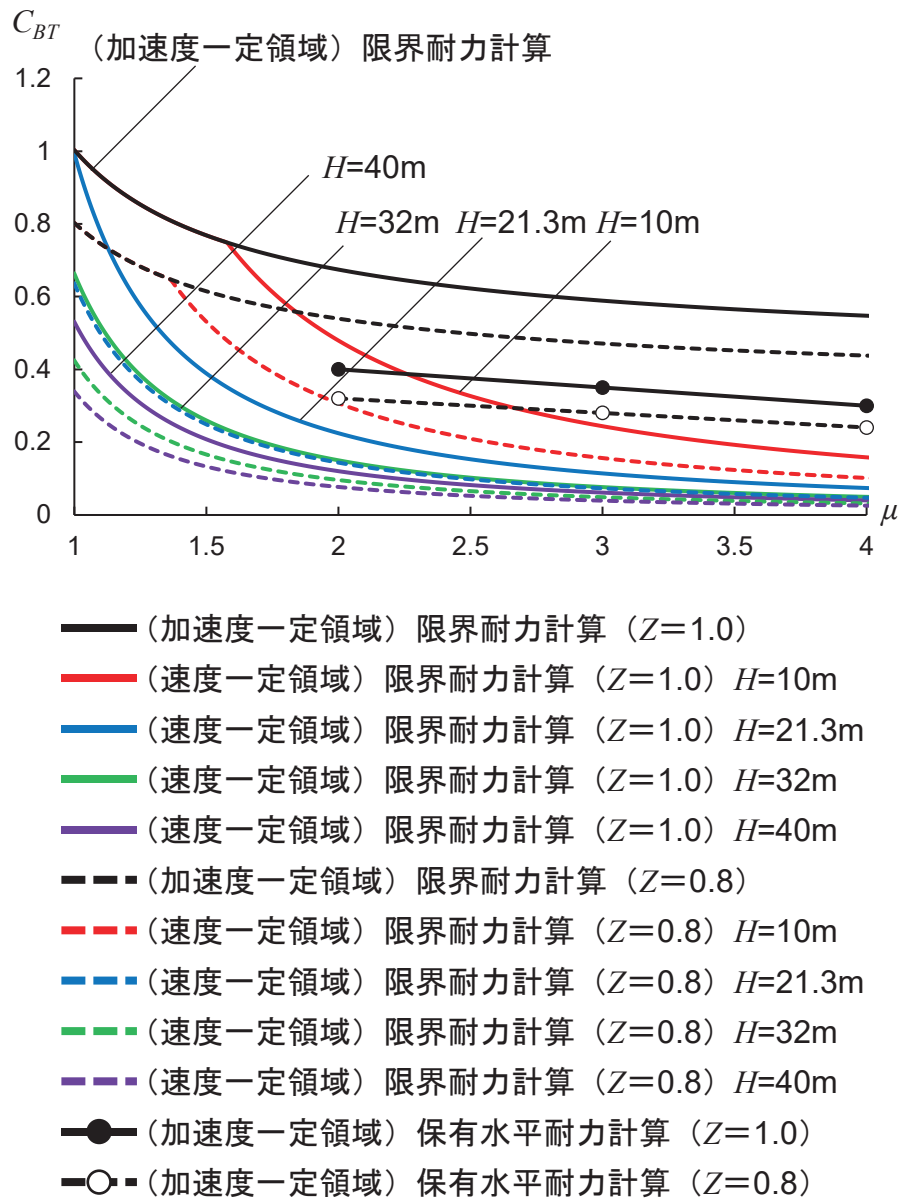


図 5.1 地域係数 Z が 1.0、0.8 の場合の必要ベースシア係数 C_{BT} (第 1 種地盤)

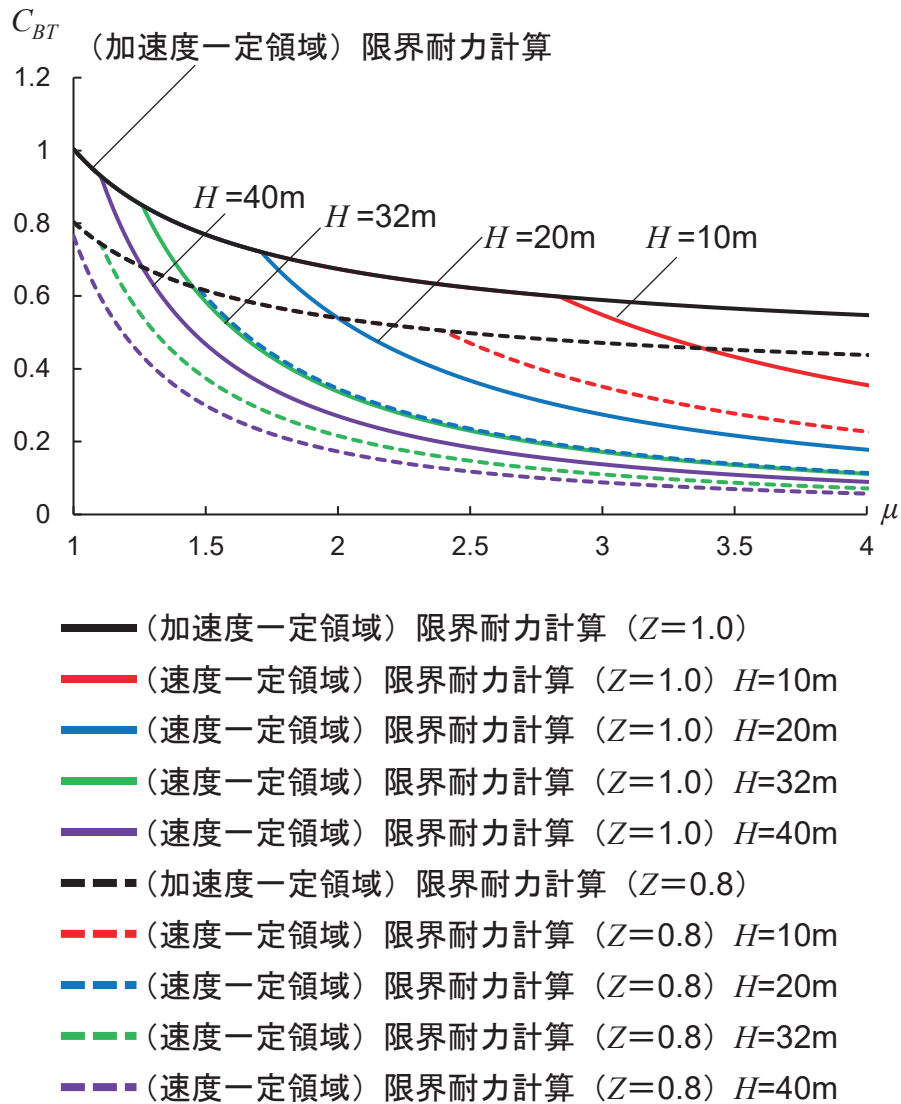


図 5.2 地域係数 Z が 1.0、0.8 の場合の必要ベースシア係数 C_{BT} (第 2 種地盤)

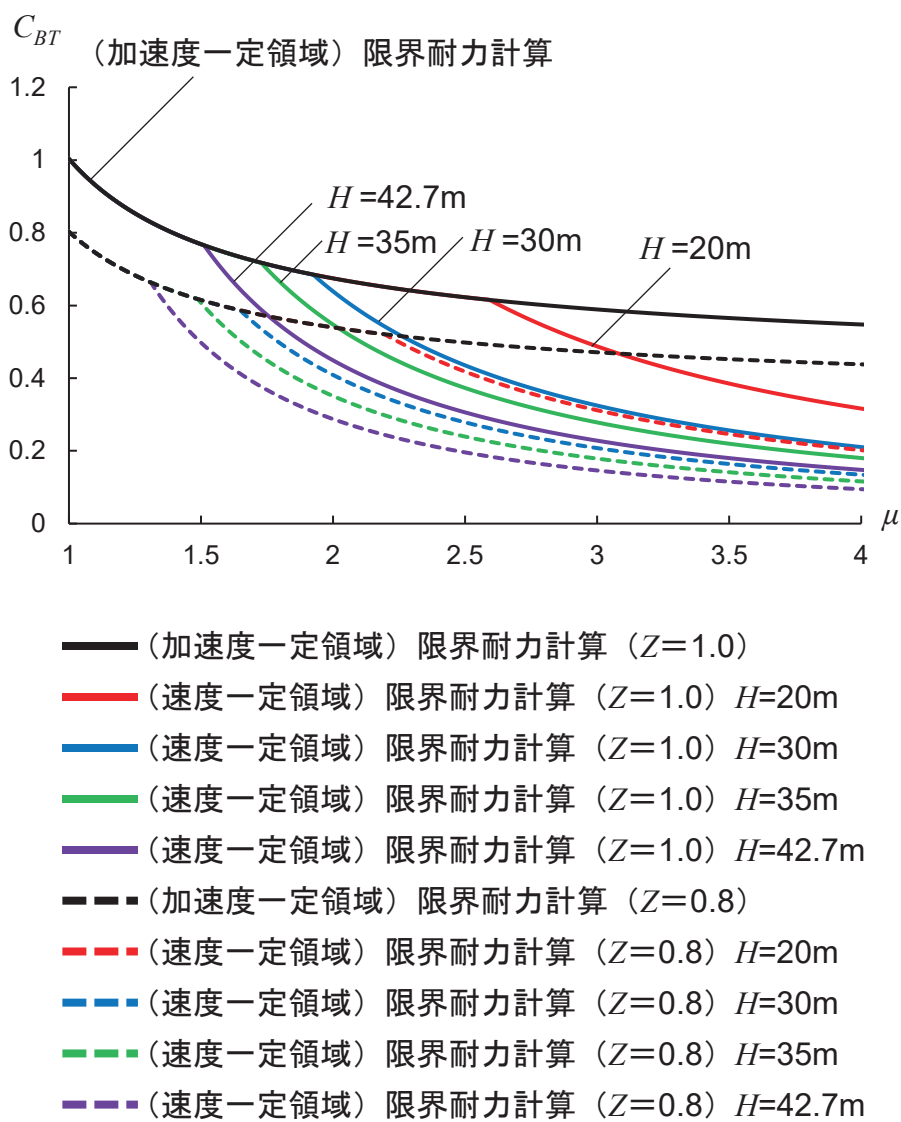


図 5.3 地域係数 Z が 1.0、0.8 の場合の必要ベースシア係数 C_{BT} (第 3 種地盤)

表 5.1 に必要ベースシア係数 C_{BT} が 0.6、0.4 の場合における塑性率 μ の値と塑性率 μ の比 ($\mu_{(Z=1.0)}/\mu_{(Z=0.8)}$) を示す。

図 5.1～図 5.3、表 5.1 より、速度一定領域における限界耐力計算では同じ必要ベースシア係数 C_{BT} で比較すると、建物高さ H が低く、必要ベースシア係数 C_{BT} が大きいほどその差異は大きくなる。例えば、本例において、地域係数 Z を 0.8 から 1.0 とした場合、第 2 種地盤で建物高さ H が 10(m) の建物では約 1.8 倍大きい変形となる。

以上より明白なように、加速度一定領域と速度一定領域で地域係数 Z の影響度合いには、差異が生じる。地域係数 Z については、近年の震災により、見直しの意見もある^{15), 16)}が、改正にあたってはこのような事象も十分反映されることが望まれる。

表 4.4 地域係数 Z を 0.8 から 1.0 とした場合の
同じ必要ベースシア係数 C_{BT} における塑性率 μ

C_{BT}	第1種地盤								
	$H=10\text{m}$			$H=21.3\text{m}$			$H=32\text{m}$		
	$Z=1.0$	$Z=0.8$	$\mu_{(Z=1.0)}/\mu_{(Z=0.8)}$	$Z=1.0$	$Z=0.8$	$\mu_{(Z=1.0)}/\mu_{(Z=0.8)}$	$Z=1.0$	$Z=0.8$	$\mu_{(Z=1.0)}/\mu_{(Z=0.8)}$
0.6	1.77	1.41	1.26	1.22	1.02	1.20	1.03	-	-
0.4	2.21	1.73	1.28	1.48	1.20	1.23	1.22	1.02	1.20
C_{BT}	第2種地盤								
	$H=10\text{m}$			$H=20\text{m}$			$H=32\text{m}$		
	$Z=1.0$	$Z=0.8$	$\mu_{(Z=1.0)}/\mu_{(Z=0.8)}$	$Z=1.0$	$Z=0.8$	$\mu_{(Z=1.0)}/\mu_{(Z=0.8)}$	$Z=1.0$	$Z=0.8$	$\mu_{(Z=1.0)}/\mu_{(Z=0.8)}$
0.6	2.81	1.57	1.79	1.88	1.49	1.26	1.48	1.20	1.23
0.4	3.69	2.76	1.34	2.37	1.84	1.29	1.82	1.45	1.26
C_{BT}	第3種地盤								
	$H=20\text{m}$			$H=30\text{m}$			$H=35\text{m}$		
	$Z=1.0$	$Z=0.8$	$\mu_{(Z=1.0)}/\mu_{(Z=0.8)}$	$Z=1.0$	$Z=0.8$	$\mu_{(Z=1.0)}/\mu_{(Z=0.8)}$	$Z=1.0$	$Z=0.8$	$\mu_{(Z=1.0)}/\mu_{(Z=0.8)}$
0.6	2.63	1.57	1.68	2.07	1.57	1.32	1.90	1.50	1.27
0.4	3.41	2.56	1.33	2.63	2.02	1.30	2.39	1.86	1.28

5.2 地盤増幅係数 G_s の影響

限界耐力計算における地盤増幅係数 G_s の算出方法は、略算法と精算法の2種類が規定されている¹⁾。文献¹⁷⁾では、限界耐力計算に基づいて設計された建物の中に、略算法により検討された建物と精算法により検討された建物があることが示されているが、地盤増幅係数 G_s の算出方法が建物の構造物に与える影響については検討されていない。また、文献^{5),6)}では、略算法及び精算法に基づく応答評価式を示しているが、地盤増幅係数 G_s の算出方法が建物の構造物に与える影響については、特定の建物モデルと地盤を想定した数値計算例に留まっている。そこで本章では、せん断波速度を介して、略算法と精算法の値の差異をより明確にかつ定量的に示すことで、地盤増幅係数 G_s の算出方法が建物の構造物に与える影響について検討した。

5.2.1 略算法による地盤増幅係数 G_s

4章より、限界耐力計算における加速度一定領域の必要ベースシア係数 C_{BT} は(4.23)式、速度一定領域の必要ベースシア係数 C_{BT} は(4.29)式で与えられる。

限界耐力計算の略算法において、地盤増幅係数 G_s は加速度一定領域で 1.5 と想定されている((2.13)式、(2.16)式、(2.19)式)。一方、前述のように建物崩壊時にはほとんどの建物が速度一定領域に存在し、この場合における地盤増幅係数 ${}_vG_s$ は表 5.2 のように設定されており、(4.29)式より、その2乗で必要ベースシア係数 C_{BT} に影響を与える。このため、建物の周期の考え方の違いにより、建物が属する応答スペクトルの領域が異なると、地盤増幅係数 G_s が必要ベースシア係数 C_{BT} に与える影響は(4.23)式、(4.29)式より、(5.1)式となる。表 5.2 に建物が属する応答スペクトルの領域の違いにより、地盤増幅係数 G_s が必要ベースシア係数 C_{BT} に与える影響を示す。建物が属する応答スペクトルの領域の違いにより、地盤増幅係数 G_s が必要ベースシア係数 C_{BT} に与える影響は、第1種地盤で 1.215、第2種地盤で 2.734、第3種地盤で 4.86 となり、特に第2種地盤、第3種地盤ではその影響は大きいと言える。

$$\begin{array}{l} \text{建物が属する応答スペクトルの領域の違いにより、} \\ \text{地盤増幅係数 } G_s \text{ が必要ベースシア係数 } C_{BT} \text{ に与える影響} \end{array} = \frac{{}_vG_s^2}{{}_aG_s} \quad (5.1)$$

${}_vG_s$: 地盤増幅係数 (速度一定領域)

${}_aG_s$: 地盤増幅係数 (加速度一定領域)

表 5.2 建物が属する応答スペクトルの領域の違いにより、
地盤増幅係数 G_s が必要ベースシア係数 C_{BT} に与える影響

	${}_a G_s$	${}_v G_s$	${}_v G_s^2 / {}_a G_s$
第1種地盤	1.5	1.35	1.215
第2種地盤	1.5	2.025	2.734
第3種地盤	1.5	2.7	4.86

5.2.2 精算法による地盤増幅係数 G_s

文献¹⁾より、地盤増幅係数 G_s は(5.2)式～(5.11)式で与えられる。

$$[T_e \leq 0.8 \cdot {}_gT_2] \quad [G_s \geq 1.23] \quad G_s = G_{s2} \cdot \frac{T_e}{0.8 \cdot {}_gT_2} \quad (5.2)$$

$$[0.8 \cdot {}_gT_2 < T_e \leq 0.8 \cdot {}_gT_1] \quad G_s = \frac{G_{s1} - G_{s2}}{0.8({}_gT_1 - {}_gT_2)} T_e + G_{s2} - 0.8 \frac{G_{s1} - G_{s2}}{0.8({}_gT_1 - {}_gT_2)} \cdot {}_gT_2 \quad (5.3)$$

$$[0.8 \cdot {}_gT_1 < T_e \leq 1.2 \cdot {}_gT_1] \quad G_s = G_{s1} \quad (5.4)$$

$$[1.2 \cdot {}_gT_1 < T_e] \quad G_s = \frac{G_{s1} - 1}{\frac{1}{1.2 \cdot {}_gT_1} - 0.1} \cdot \frac{1}{T_e} + G_{s1} - \frac{G_{s1} - 1}{\frac{1}{1.2 \cdot {}_gT_1} - 0.1} \cdot \frac{1}{1.2 \cdot {}_gT_1} \quad (5.5)$$

$${}_gT_1 = \frac{4(\sum H_i)^2}{\sum \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}} \cdot H_i} \quad (5.6)$$

$${}_gT_2 = \frac{{}_gT_1}{3} \quad (5.7)$$

$$G_{s1} = \frac{1}{1.57h_G + \alpha} \quad (5.8)$$

$$G_{s2} = \frac{1}{4.71h_G + \alpha} \quad (5.9)$$

$$\alpha = \frac{\sum \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}} \cdot H_i \cdot \sum \rho_i \cdot H_i}{(\sum H_i)^2} \cdot \frac{1}{\rho_B \cdot V_B} \quad (5.10)$$

$$V_{si} = \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}} \quad (5.11)$$

- T_e : 建物の等価周期(s)
- ${}_gT_1$: 表層地盤の1次卓越周期(s)
- ${}_gT_2$: 表層地盤の2次卓越周期(s)
- G_{s1} : 表層地盤の1次卓越周期に対する増幅率
- G_{s2} : 表層地盤の2次卓越周期に対する増幅率
- H_i : 地盤調査によって求められた地盤の各層の層厚(m)
- G_i : 地盤調査の結果による地盤の各層のせん断剛性

- ρ_i : 地盤調査によって求められた地盤の各層の密度(ton/m³)
- h_G : 地震時の表層地盤によるエネルギー吸収
- α : 波動インピーダンス比
- ρ_B : 地盤調査によって求められた工学的基盤の密度(ton/m³)
- V_B : 地盤調査によって求められた工学的基盤のせん断波速度(m/s)
- V_{si} : i 層のせん断波速度(m/s)

文献¹⁸⁾では、精算法における工学的基盤の設定位置が地盤増幅係数 G_s に与える影響について検討しているが、文献¹⁾において、地盤面からの深さに応じた水平震度の算出式が地表面から 20(m)を境に変化することや、液状化の判定を行う飽和土層を地表面から 20(m)程度以浅としていることから、本報告では例示的に表層地盤を厚さ 20(m)の単層地盤と仮定した。このため、(5.6)式、(5.10)式、(5.11)式は(5.12)式、(5.13)式となる。

$${}_gT_1 = \frac{80}{V_s} \quad (5.12)$$

$$\alpha = \frac{\rho_E \cdot V_s}{\rho_B \cdot V_B} \quad (5.13)$$

- ρ_E : 層の密度(ton/m³)
- V_s : 表層地盤のせん断波速度(m/s)

文献¹⁾、(5.12)式より、地盤種と表層地盤の1次卓越周期 ${}_gT_1$ 及び地盤のせん断波速度の関係を表 5.3 に示す。

表 5.3 地盤種ごとの表層地盤の1次卓越周期 ${}_gT_1$ 及びせん断波速度 V_s

	${}_gT_1$ (s)	V_s (m/s)
第1種地盤	${}_gT_1 \leq 0.2$	$400 \leq V_s$
第2種地盤	$0.2 < {}_gT_1 \leq 0.75$	$106.7 \leq V_s < 400$
第3種地盤	$0.75 < {}_gT_1$	$V_s < 106.7$

5.2.3 略算法及び精算法による地盤増幅係数 G_s の比較

図 5.4 に以下の仮定で(5.2)式～(5.13)式より算定した精算法による地盤増幅係数 G_s と、(2.13)式～(2.21)式より算定した略算法による地盤増幅係数 G_s を示す。なお、以下は地盤増幅係数 G_s の計算手法の違いを明示するために行った一例である。

- ・ 地震時の表層地盤によるエネルギー吸収 $h_G=0.05$
- ・ 層の密度 $\rho_E=2(\text{ton/m}^3)$
- ・ 地盤調査によって求められた工学的基盤の密度 $\rho_B=2(\text{ton/m}^3)$
- ・ 地盤調査によって求められた工学的基盤のせん断波速度 $V_B=400(\text{m/s})$
- ・ 第 1 種地盤の表層地盤のせん断波速度 $V_s=400(\text{m/s})$ (表 5.3)
- ・ 第 2 種地盤の表層地盤のせん断波速度 $V_s=168.4(\text{m/s})$ (表 5.3)
- ・ 第 3 種地盤の表層地盤のせん断波速度 $V_s=106.7(\text{m/s})$ (表 5.3)

地震時の表層地盤によるエネルギー吸収 h_G については、文献より、下限値である 0.05 とした。表 5.3 より、第 1 種地盤のせん断波速度 V_s は下限値である 400(m/s) とした。第 2 種地盤の表層地盤のせん断波速度 $V_s=168.4(\text{m/s})$ は、第 2 種地盤の表層地盤の 1 次卓越周期 ${}_gT_1$ の中間値である 0.475 秒より(5.12)式を用いて算定した。第 3 種地盤のせん断波速度 V_s は上限値である 106.7(m/s) とした。なお、第 3 種地盤の表層地盤のせん断波速度 V_s をこれ以上小さな値に設定すると、地盤増幅係数 G_s の影響はさらに大きくなる。

第 1 種地盤では、略算法による地盤増幅係数 G_s の方が大きい値を示した。第 2 種地盤、第 3 種地盤では、加速度一定領域では精算法による地盤増幅係数 G_s の方が大きい、速度一定領域では略算法による地盤増幅係数 G_s の方が大きい値を示した。

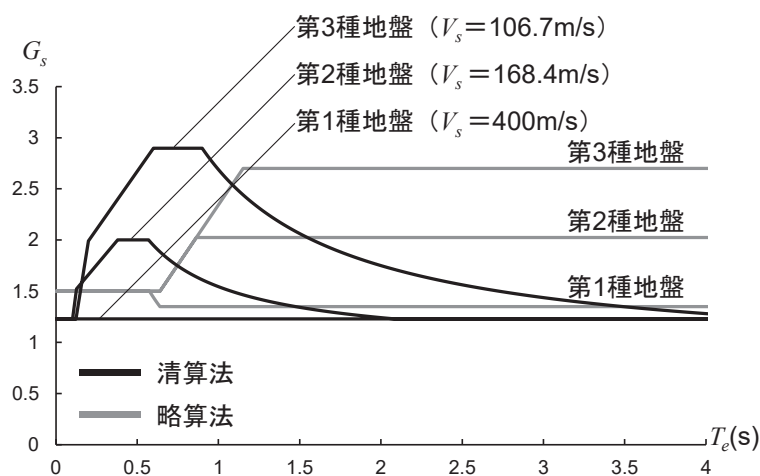


図 5.4 精算法及び略算法の地盤増幅係数 G_s

図 5.5 に精算法による地盤増幅係数 G_s と略算法による地盤増幅係数 G_s の比を示す。また、(2.22)式より、ベースシア係数 C_B を 0.3、地震時の応答変形角 R を $1/50(\text{rad.})$ とした場合において建物の有効高さ H_e を 3(m)、10(m)、30(m) とした場合の建物の等価周期 T_e を併せて示す。

建物の有効高さ H_e を 10(m)、30(m) とした場合では、建物の等価周期 T_e がそれぞれ 1.6 秒、2.8 秒となるため、精算法による地盤増幅係数 G_s の方が小さい値を示す。このため、(4.29)式より、速度一定領域の必要ベースシア係数 C_{BT} は地盤増幅係数 G_s の 2 乗で影響を受けるため、精算法による地盤増幅係数 G_s を用いた方が、略算法による地盤増幅係数 G_s を用いた必要ベースシア係数 C_{BT} に比べ、小さくなる。一方で、建物の有効高さ H_e を 3(m) とした場合では、建物の等価周期 T_e が 0.9 秒となるため、第 3 種地盤 (せん断波速度 $V_s=106.7(\text{m/s})$) では精算法による地盤増幅係数 G_s を用いた方が、略算法による地盤増幅係数 G_s を用いた必要ベースシア係数 C_{BT} に比べ、大きくなる。このため、建物の等価周期 T_e が 1.0 秒以下で、せん断波速度 V_s が小さい地盤上に建つ建物は、精算法よりも略算法による必要ベースシア係数 C_{BT} が小さい値となるため、精算法の方が実地盤の地盤増幅率に適合性が高いとすると、第 3 種地盤相当の地盤上に建つ周期 1 秒以下程度の建物を略算法により設計した場合には、地盤増幅率を過小評価する可能性がある。

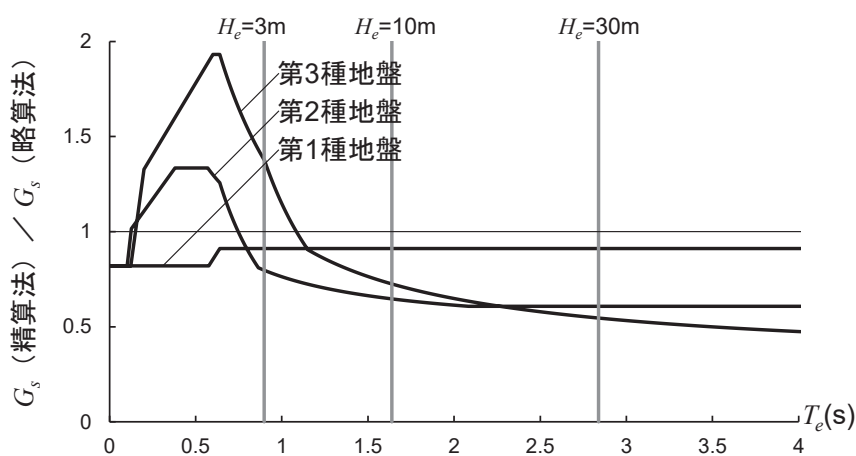


図 5.5 地盤増幅係数 G_s (精算法) / 地盤増幅係数 G_s (略算法)

図 5.6 に、図 5.4、(2.9)式～(2.21)式より算定した精算法及び略算法による加速応答スペクトル S_a を示す。

第 1 種地盤では、精算法による地盤増幅係数 G_s を用いた加速応答スペクトル S_a と、略算法による地盤増幅係数 G_s を用いた加速応答スペクトル S_a に顕著な差は見られなかった。第 2 種地盤では、加速度一定領域において、精算法による地盤増幅係数 G_s を用いた加速応答スペクトル S_a の方が大きい、速度一定領域においては、略算法による地盤増幅係数 G_s を用いた加速応答スペクトル S_a の方が大きい値を示した。第 3 種地盤では、加速度一定領域において、精算法による地盤増幅係数 G_s を用いた加速応答スペクトル S_a の方が顕著に大きい、速度一定領域においては、略算法による地盤増幅係数 G_s を用いた加速応答スペクトル S_a の方が大きい値を示した。精算法による地盤増幅係数 G_s を用いた加速応答スペクトル S_a では、建物の等価周期 T_e が大きくなるほど、急激に加速応答スペクトル S_a の値が小さくなる。

前述のように、速度一定領域では地盤増幅係数 G_s は必要ベースシア係数 C_{BT} に 2 乗で影響を与えるが、精算法のように周期と共に地盤増幅係数 G_s が減少し、結果として加速応答スペクトル S_a の値が、略算法と比較して建物の等価周期 T_e に対して、より急激に減少する場合は、地盤増幅係数 G_s による必要ベースシア係数 C_{BT} への影響はさらに大きくなる。

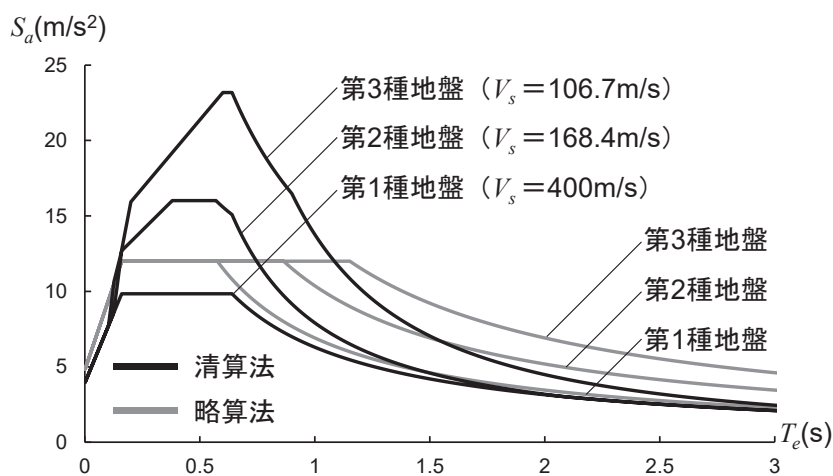


図 5.6 精算法及び略算法の地盤増幅係数 G_s による加速度応答スペクトル S_a