

地中構造物の耐震設計に用いられる見かけの波長と 弾性波動論に基づく表面波の波長との比較

A COMPARISON BETWEEN WAVE LENGTH OF SURFACE WAVES BASED ON ELASTO-DYNAMICS
AND APPARENT WAVE LENGTH USED IN ENGINEERING PRACTICE

野津 厚¹

¹ 独立行政法人港湾空港技術研究所

Atsushi Nozu, Port and Airport Research Institute, nozu@pari.go.jp

SUMMARY

Two methods have been used to determine apparent seismic wave length for the design of underground structures, namely, the harmonic-mean method and the gas-standard method. These methods give different wave length for the same soil profile. For the purpose of providing a theoretical viewpoint of the methods, the wave lengths given by the methods are compared with the wave lengths of surface waves for several layered half-space models. As a result of the comparison, it could be pointed out that the two methods do not necessarily capture some of the features of surface waves appropriately.

キーワード：地中構造物，波長，調和平均，表面波

Key words: Underground structure, Wave length, Harmonic mean, Surface wave

1 はじめに

地中構造物の縦断方向の耐震設計では，地震動の変位振幅と地表に沿った見かけの波長を与えて設計を行うことが普通である。各種地中構造物の耐震規定における波長の設定方法には，現在，調和平均による方法^{1), 2), 3), 4)}と高圧ガス導管の方法⁵⁾がある。これらの方法は2で述べるように同一の地盤に対して相異なる波長を与える。各種地中構造物の耐震規定では，変位振幅と波長をセットで与えることにより構造物の安全性を保証しようとしているので，変位振幅の与え方が構造物毎に異なる以上，波長の設定方法が構造物毎に異なっていたとしても，けしておかしいことではない。しかしながら，最近，構造物の耐震設計にあたり，想定する地震の震源特性・伝播経路特性・サイト特性などを考慮して，物理的にあり得る地震動を想定し，これを設計に用いようとする動きがある⁶⁾。地中構造物の耐震設計においても，このような考え方で変位振幅を設定する方向に向かうことが想定される。その際，波長についても，物理的に意味のある値を用いる方向に向かうのでなければ，設計におけるロジックの一貫性を保つことができなくなる。波長の設定方法について，弾性波動論的な位置づけを明確化する

ことが従来以上に求められてくるものと思われる。

現在用いられている波長設定方法のうち，調和平均法は，弾性波動論の観点からの位置づけが必ずしも明確でない。また，高圧ガス導管の方法は，レイリー波を対象とすることを明記している点で画期的であるが，表層地盤の固有周期と等しい周期のレイリー波だけを対象としている点など，弾性波動論の立場から見た場合には課題と思われる点も残されている。そこで，本研究では，いくつかのモデル地盤に対し，調和平均法および高圧ガス導管の方法で設定される見かけの波長を表面波の波長と比較することにより，弾性波動論の立場からこれらの方法を眺めるための一つの視点を提示することを試みる。

なお，ここでは，水平方向の不均質性が無視できるような地盤を対象として検討を行う。このような地盤では，地表に沿った隣り合う二点間の相対変位は主に表面波の伝播によってもたらされると考えられるので，ここでは比較の対象として表面波の波長を取り上げた。

2 調和平均法と高圧ガス導管の方法

調和平均法では地表に沿った見かけの波長()は表層地盤での地震波の波長()と基盤での地震波の波

長 (c_2) の調和平均として算定される。すなわち

$$c = 2 c_1 c_2 / (c_1 + c_2) \quad (1)$$

である。ここに、表層地盤での地震波の波長 (λ_1) と基盤での地震波の波長 (λ_2) はそれぞれ次式で算定される。

$$\lambda_1 = c_1 T_g \quad (2)$$

$$\lambda_2 = c_2 T_g \quad (3)$$

ここに c_1 は表層地盤の S 波速度、 c_2 は基盤の S 波速度、 T_g は表層地盤の固有周期である。調和平均法では地表に沿った見かけの伝播速度 c は表層地盤の固有周期によらず次式で与えられる。

$$c = 2 c_1 c_2 / (c_1 + c_2) \quad (4)$$

以上のように調和平均法による見かけの伝播速度は表層地盤と基盤の S 波速度の中間的な値をとる。

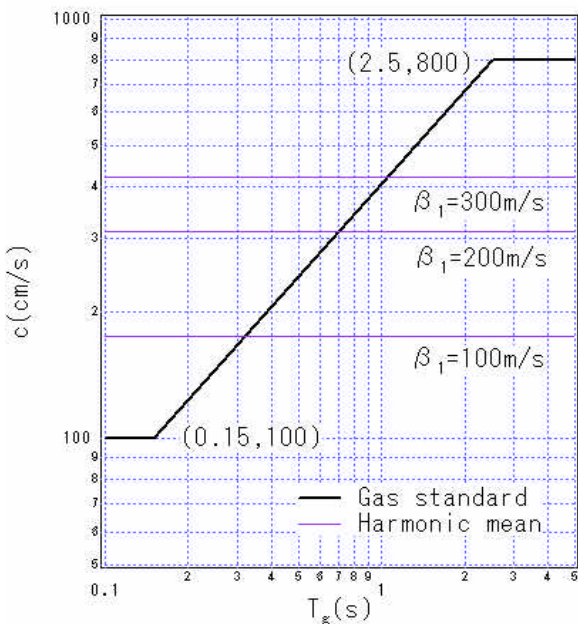


Fig.1. Apparent velocity along ground surface.

一方、高圧ガス導管の方法では、地表に沿った見かけの波長としてレイリー波によるものを考慮することが明記されている。表面波を対象とすることが明記されている耐震規定としてはこれが唯一のものである。高圧ガス導管の方法では見かけの波長 (λ) は次式で算定される。

$$\lambda = c T_g \quad (5)$$

ここに λ は見かけの波長、 c はレイリー波の位相速度、 T_g は表層地盤の固有周期である。 c は周期の関数として Fig.1 の太線で与えられる。

ここで、高圧ガス導管の方法と調和平均法との比較を行うため、 c_1 を 100、200、300m/s の三通り、 c_2 を 700m/s とし、式 (4) により c を求め、Fig.1 に細線で示している。同図から、周期の短い地盤では高圧ガス導管の方法が安全側の波長を与えること、周期の長い地盤では調和平均法が安全側の波長を与えることがわかる。

3 表層地盤と基盤の二層からなるモデル地盤

3.1 計算条件

ここでは、Table 1 に示すような表層地盤と基盤の二層からなる単純な構造に対し、調和平均法および高圧ガス導管の方法で設定される見かけの波長と、弾性波動論に基づく表面波の波長との比較を行う。表層地盤の S 波速度 c_1 の変域は 100m/s ~ 300m/s とし、表層地盤の固有周期 T_g の変域は 0.1s ~ 2s とした。表層地盤の層厚 H_1 は c_1 と T_g から計算した。表層地盤の P 波速度は 1600m/s とした。基盤の P 波速度 c_2 と S 波速度 c_2 の組み合わせは (c_2, c_2) = (2000, 700), (1600, 350) の 2 通りとした。基盤の P 波速度と S 波速度の組み合わせを決める際には既存の経験式⁷⁾を参照した。密度については、S 波速度や層厚と比べてあまり変域の大きな量ではないから、簡単のため、ここでは表層地盤、基盤とも 2ton/m³ に統一した。表面波の位相速度は文献 8) に掲載された方法に基づき、ラブとレイリー波のそれぞれの基本モードについて計算を行った。ここで基本モードについて計算を行うのは、同一の周期で比較すると、基本モードが最も位相速度が小さく、従って最も波長が短いからである。表面波の位相速度を計算する際の周期としては、表面波の卓越周期があらかじめわかっているならば、その周期を採用することが最も合理的である。これまで、表面波の卓越周期は表層地盤の固有周期に等しいと考えて議論を進めることも少なくなかった^{例えは 9)}。しかしながら、弾性波動論的には、表層地盤の固有周期に関わらず、表面波の周期は任意の値を取りうる。実際、既往の観測結果^{例えは 10)}によると、表層地盤の固有周期と表面波の卓越周期は無関係であると考えざるを得ない。このことについて詳しく議論することは本稿の趣旨ではないが、その理由として、表層地盤の下に存在する深層地盤の影響や、震源のサイズの影響などが考えられる。特定サイトについて表面波の卓越周期を推定するためには、想定する地震の震源特性・伝播経路特性・サイト特性などを総合的に勘案することが必要であると著者は考えている。しかし、ここではモデル地盤を想定しているので、こうした検討は不可能であり、検討対象とする表面波の卓越周期を特定することはできない。そこで、以下の検討においては、あるひとつの周期 (具体的には周期 1 秒) の表面波の位相速度と波長を計算し、図示することとした。周期が 1 秒より長い表面波は図示したものよりも大きな位相速度と波長を有し、周期が 1 秒より短い表面波についてはその逆のことが言える。一般に、周

期の短い表面波を想定するほど、想定する波長は短くなるので、振幅のことを考えなければ構造物にとっては厳しい条件となる。しかしながら、あまりに周期の短い表面波は変位振幅が小さいから、設計上考慮する必要がない。地盤のひずみは地動速度と相関がある^(例えば 11))ことを考慮すると、設計上、周期が1秒より短い表面波を考慮する必要のある場合は少ないものと思われる。そこで、以下に図示する表面波の位相速度と波長は、設計上考慮する必要のある位相速度と波長の下限值に関する一つの目安になるものと思われる。

Table 1. A simplified layered half-space model.

	P 波速度 (m/s)	S 波速度 (m/s)	密度 (ton/m ³)	層厚 (m)
表層	1600	100-300	2.0	H ₁
基盤	2	2	2.0	

(注) H₁ は β_1 と T_g から計算。 2 と 2 は本文参照。

3.2 計算結果

Fig.2 ~ Fig.5 に計算結果を示す。まず Fig.2 では $\beta_2 = 700\text{m/s}$ の場合の位相速度を示す。上から順にラブ波基本モードの位相速度(周期 1 秒), レイリー波基本モードの位相速度(周期 1 秒), 調和平均法による見かけの伝播速度(式 4), 高圧ガス導管の方法による位相速度(Fig.1)を示す。周期 1 秒の表面波の位相速度は表層地盤の S 波速度と固有周期の双方に依存する。一方, 調和平均法による見かけの伝播速度は定義により T_g には無関係である。その値は, T_g の大きな領域では周期 1 秒の表面波の位相速度に比較的近いが, T_g の小さな領域では周期 1 秒の表面波の位相速度よりかなり小さい。高圧ガス導管の方法は T_g が大きな領域では周期 1 秒のレイリー波よりも大きな位相速度を与える。

次に, Fig.3 に $\beta_2 = 700\text{m/s}$ の場合の波長を示す。波長を計算するにあたり, 表面波の波長は当該表面波の周期(この場合には 1 秒)から計算し, 調和平均法および高圧ガス導管の方法による波長は, それらの方法に忠実に従うこととして, 表層地盤の固有周期から計算した。調和平均法および高圧ガス導管の方法は, 波長を計算する際に表層地盤の固有周期 T_g を用いるので, Fig.3 に示すように T_g が大きな領域では周期 1 秒の表面波よりも大きな波長を与える。

以上は $\beta_2 = 700\text{m/s}$ の場合の検討結果であるが, $\beta_2 = 350\text{m/s}$ の場合(Fig.4, Fig.5)も, 計算される位相速度や波長の絶対値は異なるものの, $\beta_2 = 700\text{m/s}$ の場合について指摘したことはそのままあてはまる。

さて, 調和平均法による見かけの伝播速度は T_g の大きな領域では周期 1 秒の表面波の位相速度に比較的近いことが前記の検討からわかるが, 検討結果が β_1 と T_g の関数として曲面で示されているので詳しい比較には不便である。そこで, 曲面と $c = \beta_1$ 平面の交線を Fig.6 に示す。 $\beta_2 = 700\text{m/s}$ と 350m/s の各ケース(表層地盤の固

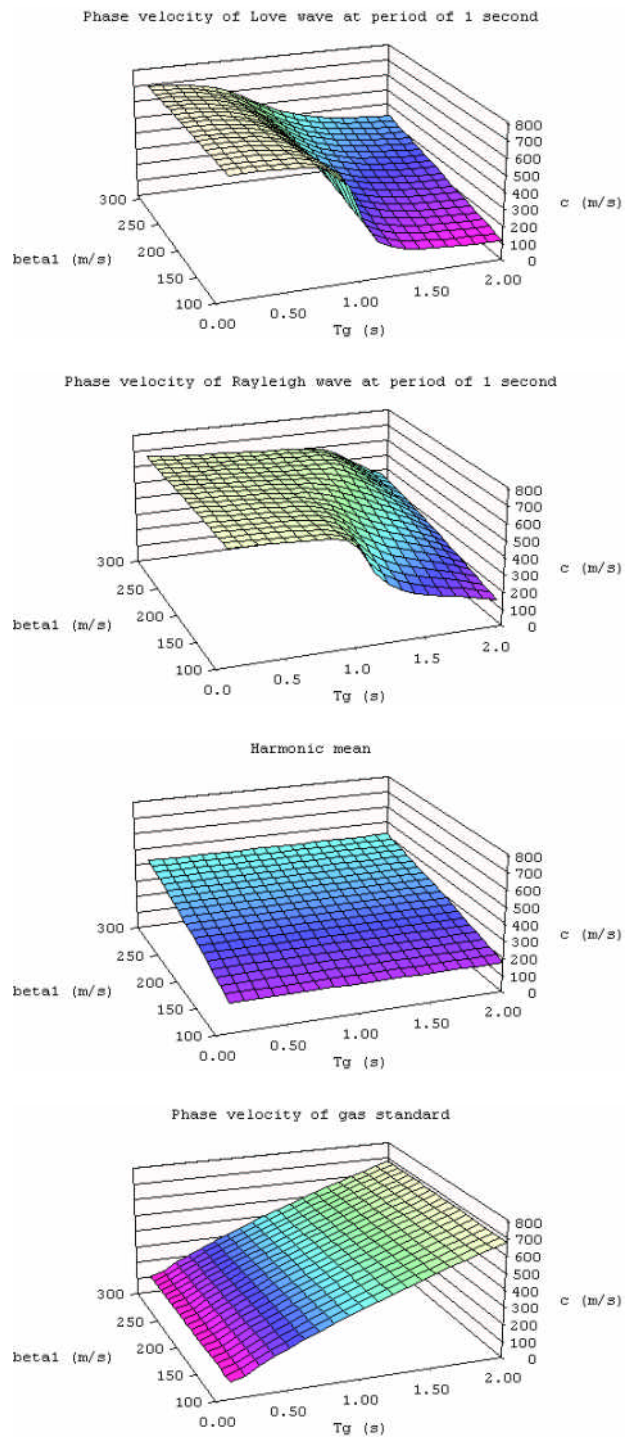


Fig.2. A comparison between phase velocity of surface waves and phase velocity assumed in engineering practice for the simplified layered half-space model shown in Table 1. β_2 is assumed to be 700m/s.

有周期は 2s) について調和平均法による見かけの伝播速度を太線で, ラブ波とレイリー波の位相速度(周期 1s, 1.5s, 2s) を細線で示している。

Fig.6 によれば, 調和平均法による見かけの伝播速度は, $T_g=2\text{s}$ の地盤の場合, 周期 1.0s のラブ波の位相速度よりはやや大きく, 周期 1.5s のラブ波の位相速度に極

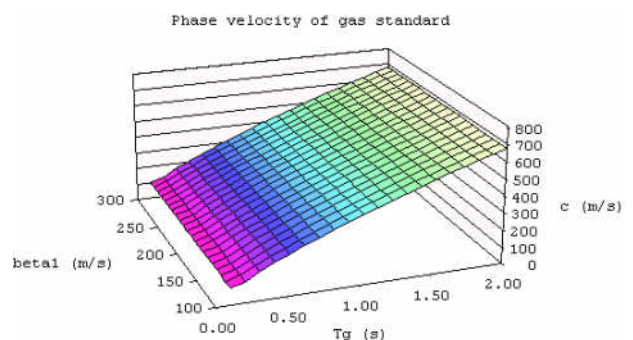
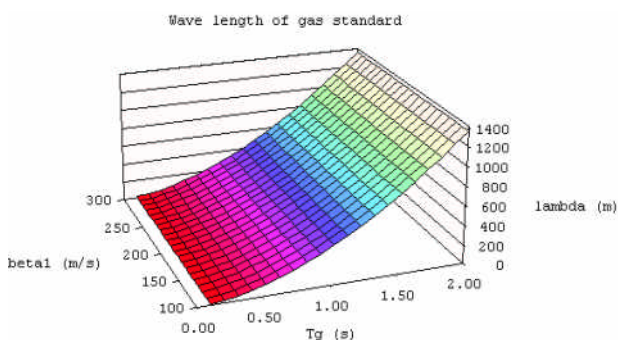
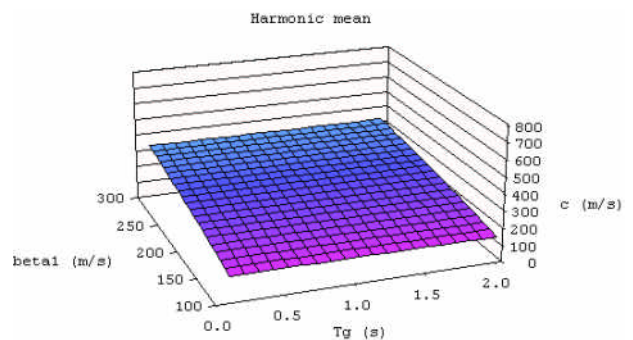
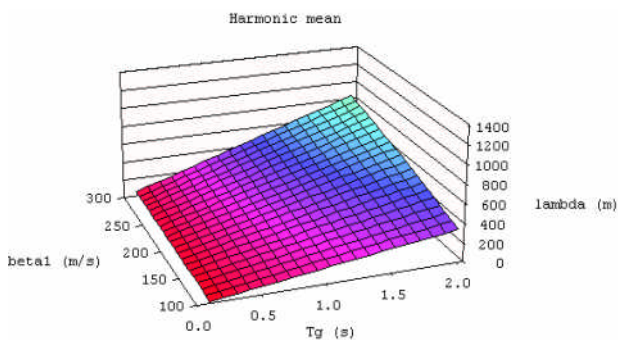
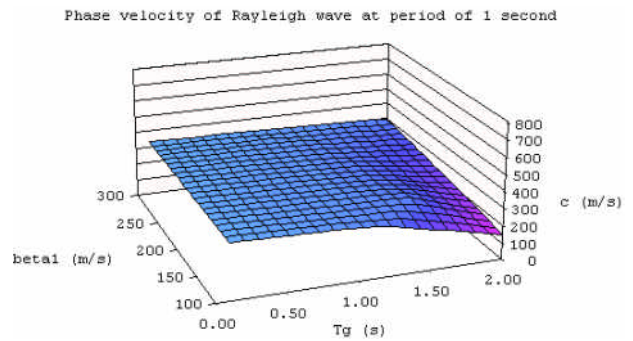
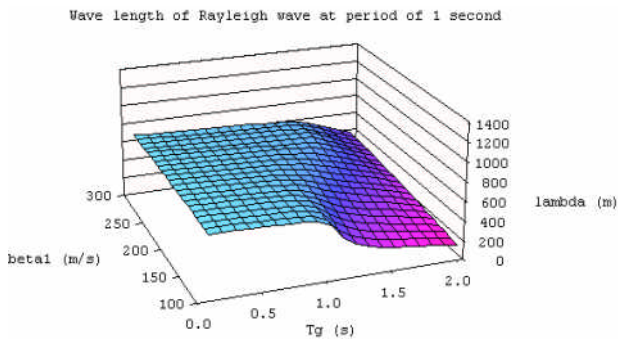
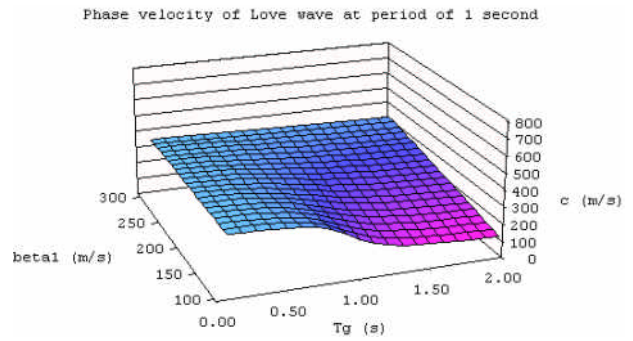
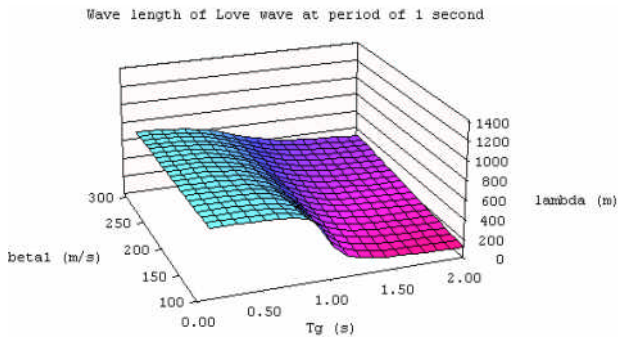


Fig.3. A comparison between wave length of surface waves and wave length assumed in engineering practice for the simplified layered half-space model shown in Table 1. β_2 is assumed to be 700m/s.

めて近い値となっている。周期 1.5s 以上の表面波の位相速度はさらに大きいので、調和平均法による見かけの伝播速度は、 $T_g=2s$ の地盤の場合、周期 1.5s 以上の表面波の位相速度を包絡する性質がある。固有周期の異なる地盤についても検討した結果、調和平均法による見かけの伝播速度は、周期が一定以上の表面波の位相速度を包

Fig.4. A comparison between phase velocity of surface waves and phase velocity assumed in engineering practice for the simplified layered half-space model shown in Table 1. β_2 is assumed to be 350m/s.

絡する性質が認められる。

4 多層からなるモデル地盤

4.1 計算条件

3 では表層地盤と基盤からなるモデル地盤について検

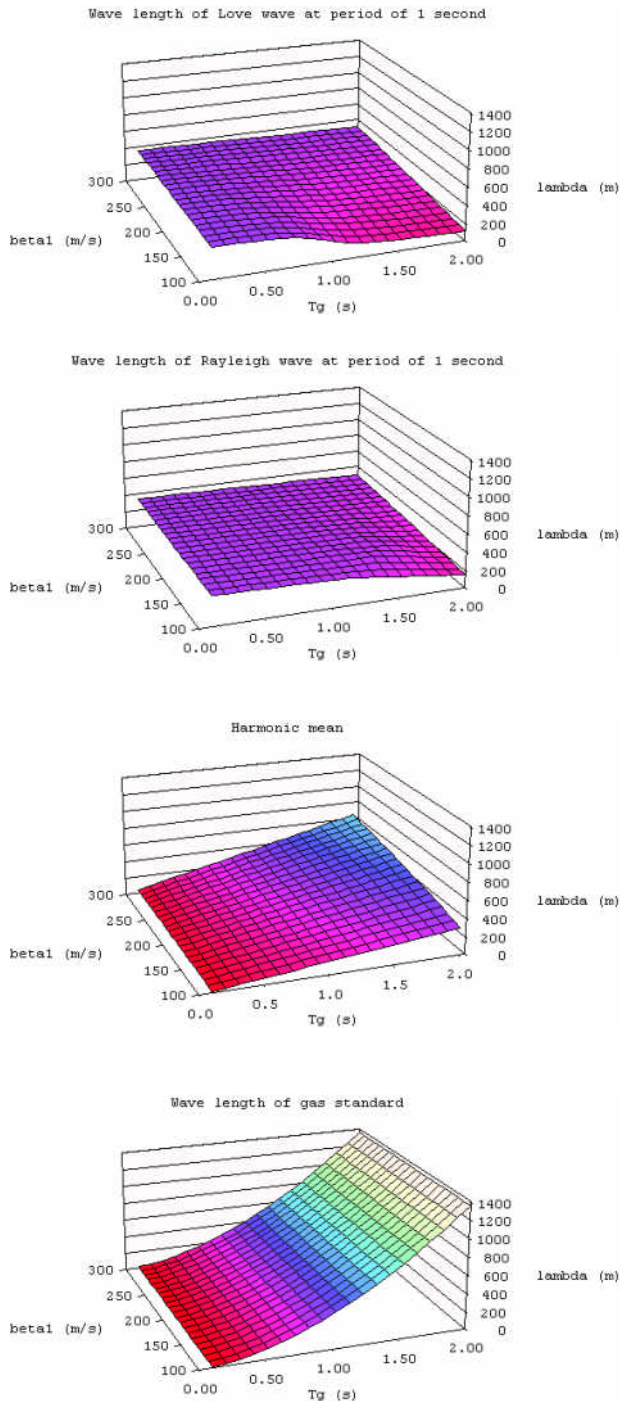


Fig.5. A comparison between wave length of surface waves and wave length assumed in engineering practice for the simplified layered half-space model shown in Table 1. β_2 is assumed to be 350m/s.

討したが、実際に存在する地盤では表層地盤の下に多層からなる深層地盤が存在する。このような深層地盤の影響を考慮していないことにより、3 で得られた結果には非現実的な点もあるのではないかと懸念がある。そこで、ここではより現実的なモデル地盤 (Table 2) について検討を行うこととした。表層地盤の条件は 3 と同

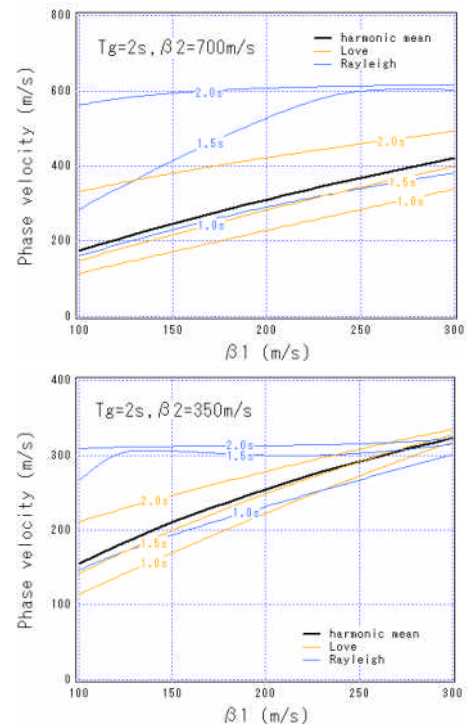


Fig.6. A comparison between phase velocity of surface waves (thin line) and phase velocity of harmonic-mean method (thick line) for the simplified layered half-space model shown in Table 1. T_g is assumed to be 2s. β_2 is assumed to be 700m/s (top) and 350m/s (bottom).

じである。表層地盤の下に多層からなる深層地盤を仮定した。その物性は Table 2 に示す通りとした。各層の層厚は $H_1:H_2:H_3:H_4=1:2:2:5$ を保つように定めた。調和平均法による場合には基盤の S 波速度として表層地盤直下の 350m/s を採用した。表面波はラブ波とレイリー波の基本モードを対象とした。

Table 2. A realistic layered half-space model.

	P 波速度 (m/s)	S 波速度 (m/s)	密度 (ton/m ³)	層厚 (m)
表層	1600	100-300	2.0	H_1
第二層	1600	350	2.0	H_2
第三層	2000	700	2.0	H_3
第四層	3200	1500	2.0	H_4
地震基盤	5000	3000	2.0	

4.2 計算結果

Fig.7 に計算結果を示す。上から順に、ラブ波基本モードの位相速度 (周期 1 秒), レイリー波基本モードの位相速度 (周期 1 秒), 調和平均法によるみかけの伝播速度 (式 4), 高压ガス導管の方法による位相速度 (Fig.1) を示す。Fig.7 から、表面波の位相速度は表層地盤の S 波速度と固有周期の双方に依存すること、調和平均法による見かけの伝播速度は T_g の大きな領域では周期 1 秒の表面波の位相速度に比較的近い値をとること、高压ガ

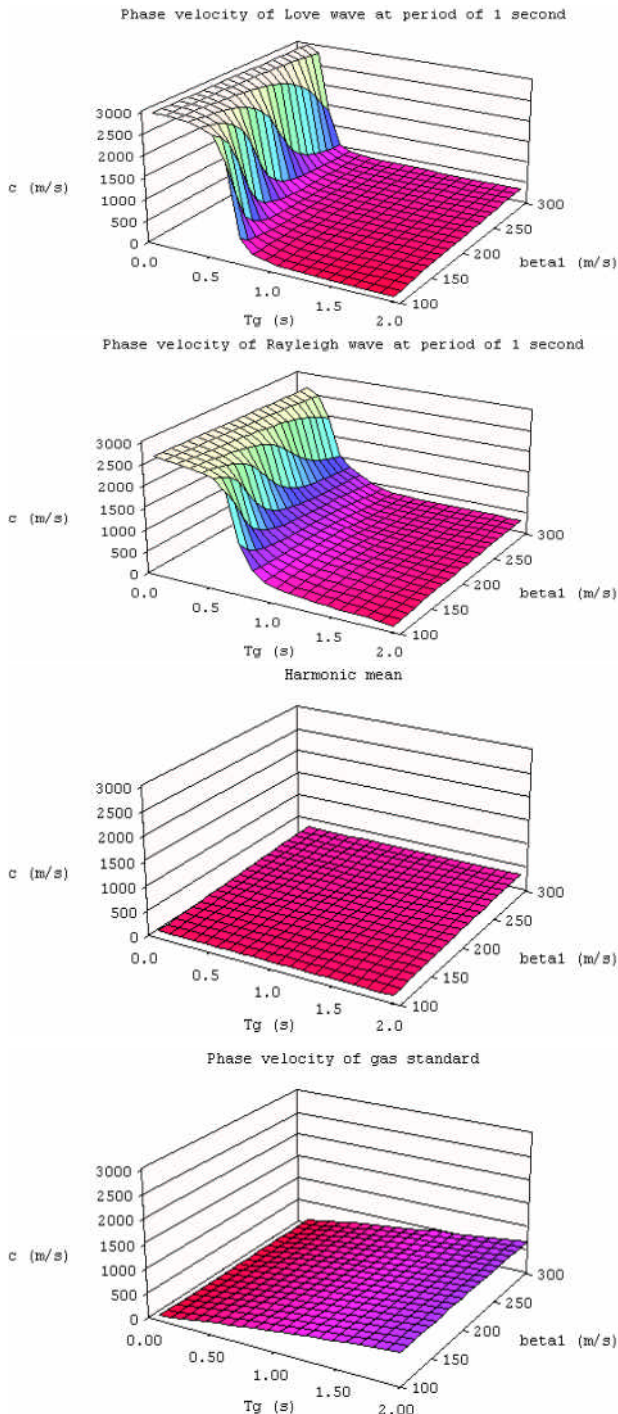


Fig.7. A comparison between phase velocity of surface waves and phase velocity assumed in engineering practice for the realistic layered half-space model shown in Table 2.

ス導管の方法は T_g が大きな領域では周期 1 秒のレイリー波よりも大きな位相速度を与えることなど、二層地盤を対象とした 3 での検討と類似した結果が得られた。

5 まとめ

以上の検討結果から次のことが指摘できる。
調和平均法による見かけの伝播速度は一定以上の周期

を有する表面波の位相速度を包絡する性質がある。

高圧ガス導管の方法は T_g が大きな領域では比較的大きな位相速度を与える。

調和平均法、高圧ガス導管の方法とも T_g が大きな領域では比較的大きな波長を与える。

このうち と は表層地盤の固有周期に等しい周期の地震波を想定しているためであるが、この想定を支持しない観測結果も得られており^{例えは¹⁰⁾}、再考の余地があると著者は考えている。

最近では、微動のアレー観測等により、原位置での表面波の位相速度を比較的容易に求めることができるようになってきた。現に、地中構造物の耐震設計のため、原位置での表面波の位相速度を微動のアレー観測により求めた事例が存在する¹²⁾。著者ら¹⁰⁾は、原位置での表面波の位相速度が既知であるという前提で、表層地盤の固有周期を用いることなく、設計に用いる波長を合理的に設定できる方法を提案している。特に重要性の高い地中構造物の場合、このような方法を用いることは一考の価値があると考えている。

謝辞

京都大学防災研究所の澤田純男助教授は本研究の必要性を示唆されました。(財)建設技術研究所の岩崎敏男博士には調和平均法が提案された当時の事情について丁寧に教えていただき、研究を進める上での動機づけを与えていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：石油パイプライン地震対策要綱・同解説，1974．
- 2) 日本道路協会：共同溝設計指針，1986．
- 3) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997．
- 4) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説，1997．
- 5) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，2000．
- 6) 土木学会：土木構造物の耐震設計法に関する第 3 次提言と解説，2000．
- 7) 太田外気晴，丹羽正徳，高橋克也，八幡夏恵子：物理探査と室内試験から評価される V_p 、 V_s およびポアソン比の関係，地震学会講演予稿集，No.1，B12，1985．
- 8) Aki, K. and Richards, P.G.: Quantitative Seismology, Theory and Methods, Vol.1, W.H. Freeman, 1980.
- 9) 土木学会編：動的解析と耐震設計，第 2 巻，動的解析の方法，技報堂出版，1989．
- 10) 野津厚，安中正，佐藤陽子，菅野高広：羽田空港の地震動特性に関する研究（その 1）表面波の特性，港湾空港技術研究所資料（印刷中），2002．
- 11) 高田至郎：ライフライン地震工学，共立出版，1991．
- 12) 足立幸郎，中本覚，鈴木直人：開削トンネルの縦断方向耐震設計に考慮する地震波長と構造目地間隔に関する研究，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，2001．