

軟弱地盤における交通振動の波動伝播性状に関する研究

A Study on Wave Propagation Characteristics of Traffic Vibration Obtained at Soft Soil

西阪理永*, 福和伸夫**, 多賀直恒***

Riei Nishizaka, Nobuo Fukuwa and Naotsune Taga

ABSTRACT

In order to estimate the dynamic characteristics of the soil due to a traffic vibration, a vibration test was carried out for a dump truck which was driven at midnight. This observation was conducted at the reclaimed land. The accelerations on the car, velocities on the surrounding soil surface were recorded. The smoothness of road surface were also surveyed. From Fourier spectrum and nonstationary spectrum of the dynamic load, it is recognized that the dynamic characteristics of the car differs from the smoothness of road surface, and weight and velocity of the car. On the soil response, it is clarified that the dynamic characteristics of the car, an effect of movement of the excitation and the wave propagation characteristics in a soil are important.

1. はじめに

振動を極度に嫌う施設が急増しつつある今日、これらを生活振動にさらされた場所で実現するには、微振動の性質を十分に理解した上での振動対策が重要である。特に、自動車交通振動は、今や日常的な環境振動であり、現在、最も身近な微振動問題の一つとして注目されている。よって、交通振動問題は、従来、主に人間の体感を対象とした環境工学的な研究として取り組まれることが多かったが、今後は、より精度の高い検討^{1)~4)}の必要性が高まると考えられる。

Fig.1に示すように、交通振動問題は、多数の要因が複雑に絡み合っており、その解明には各要因毎に現象を細かく分析して行く必要がある。交通振動の振源は車両であり、路面凹凸によって励起された車両動荷重が、移動しながら路盤を介して地盤に伝達されるという特徴を持つ。そこで、本論では、軟弱地盤における実測記録に基づき、車両、道路(路面凹凸)、地盤が交通振動問題に及ぼす影響について考察する。最初に、積載状況、走行速度および路面凹凸が車両動荷重に与える影響について考察する。次に、地盤の応答性状について考察する。地盤の応答性状に影響を与える要因としては、上述の振源特性(車両動荷重の特性)の他に、振源(車両)の移動効果と地盤の波動伝播特性が挙げられる。振源の移動効果は、交通振動問題特有の要因である。

著者らは従来より、加振力の移動効果に対する理論的研究³⁾、硬質地盤における交通振動実測記録の分析並びに薄層法によるシミュレーション解析⁴⁾を実施し

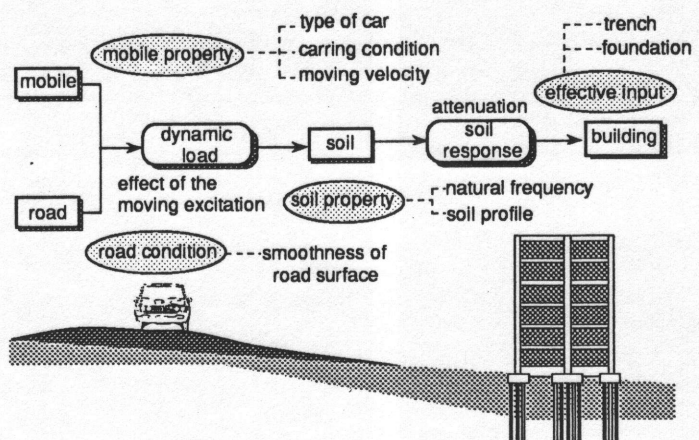


Fig.1 Factor of Traffic Vibration Problem

*名古屋大学大学院、工学研究科建築学専攻 (Graduate Student, Dept. of Architecture, School of Eng., Nagoya Univ., JSPS Research Fellow)

**名古屋大学助教授、工学部建築学科 (Assoc. Prof., Dept. of Architecture, School of Eng., Nagoya Univ.)

***名古屋大学教授、工学部建築学科 (Prof., Dept. of Architecture, School of Eng., Nagoya Univ.)

てきた。本論では、交通振動が励起されやすい軟弱地盤での実測の機会を得たので、その分析結果を報告する。

2. 計測概要

実測は名古屋港の金城埠頭で実施し、深夜に大型ダンプトラックを単独走行させた。測点はFig.2～3のように地盤上と車両上に設置し、併せて走行道路500mにわたってプロフィールメータによる路面平滑度調査を行った。車両は、空載(9t)と満載(20t)に対して、速度30, 60km/hで走行させた。金城埠頭は埋立地盤であり、Tab.1のように軟弱な表層を有している。また、走行車両各部の重量分布はTab.2のとおりである。

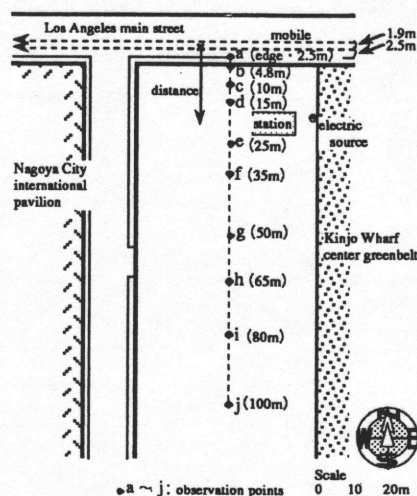


Fig.2 Observation Points on the Ground

Tab.1 Soil Profile

meters above the sea (m)	V_s (m/sec)	ν	ρ (t/m^3)
4.91	90	0.492	1.7
2.91	120	0.496	1.61
-5.09	150	0.494	1.8
-9.09	210	0.491	1.8
-13.09	270	0.485	1.8
-19.19	240	0.488	1.63
-26.99	320	0.479	1.8
-35.09	290	0.483	1.76
-43.04	310	0.483	1.8
-47.04	450	0.463	2.0
-55.09	300	0.484	1.75
-59.09	450	0.463	1.8

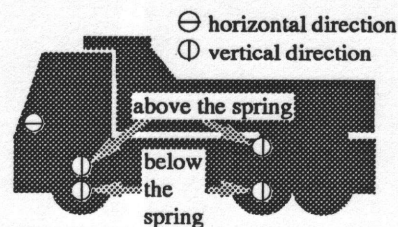


Fig.3 Observation Points on the Mobile

Tab.2 Weight of Each Part of the Mobile

	empty (t)	full (t)	weight below the spring (t)
front wheel	3.4	4.5	0.7
rear wheel	1.5	6.2	1.1
total	9.2	19.7	1.0

3. 車両動荷重

車両動荷重は、車両前後輪ばね上、ばね下の計4地点における慣性力の和として評価した。これは、厳密には「動的付加荷重」と呼ばれているものである。なお、「ばね」とはサスペンション部重ね板ばねのことである。

3.1 積載状況による影響

Tab.3に、各ケース毎の車両動荷重の最大値を比較する。満載時と空載時とでは車両動荷重の最大振幅の差は小さいことが分かる。Fig.4～5に満・空載時の後輪部ばね上、ばね下の加速度と車両動荷重のフーリエスペクトルを示す。Fig.4と5を比較すると、満載時は空載時に比べて、ばね上の固有振動数が減少している。これは、車両重量の増加によるものである。車両動荷重には、満載時にはばね上の固有振動数の影響が、空載時にはばね下の固有振動数の影響が強く現われている。以上より、積載状況の違いが車両動荷重の振幅特性に及ぼす影響は少ないが、その振動数特性には大きな影響を与えていることが分かる。

3.2 走行速度による影響

Tab.3より、走行速度の違いによる車両動荷重の最大値を比較する。走行速度が速いほど、車両動荷重は大きな値を示している。Fig.4～5には走行速度の違いによる後輪部ばね上、ばね下の加速度と車両動荷重のフーリエスペクトルを重ね描く。走行速度が上がるとばね上の固有振動数は低下している。これは、トラックのサスペンション(重ね板ばね)の剛性の振幅依存性によるものである。(トラックの重ね板ばねは、静荷重に対しては荷重の増大に伴い剛性も増大するが、動荷重に対しては振動振幅の増大に伴い剛性が低下するという特性がある)。車両動荷重については、車両

速度が上がると、ばね上・ばね下の固有振動数を中心としたより広範囲の振動数成分が励起されてくる。結果として、走行速度の違いは、車両動荷重の振幅と振動数特性の双方に大きな影響を及ぼしていることが分かる。

3.3 路面凹凸による影響

Fig.6に走行道路の路面プロフィールと、そのパワースペクトルのISO路面入力基準⁵⁾との比較を示す。当該道路は、全体的にみて「良」レベルと判断される。Fig.7に、路面凹凸プロフィールを走行速度を考慮して時刻歴波形に変換した結果を非定常スペクトルと共に示す。併せて車両動荷重についても示す。ここでは、満載・60km/h 走行時を例とした。なお、路面凹凸時刻歴波形は、1.5Hz～20Hzのバンドパスフィルタを通したものをを用いている。Fig.7より、路面凹凸時刻歴波形と車両動荷重の対応は比較的良い。また、路面の凹凸変動の激しい所で車両動荷重の振幅が増大し、ほぼ全振動数域に渡る成分を励起している。以上の結果から、車両動荷重は、車両の定常振動的な成分と路面のガタによるインパルス的な性質の成分との和であることが推察される。

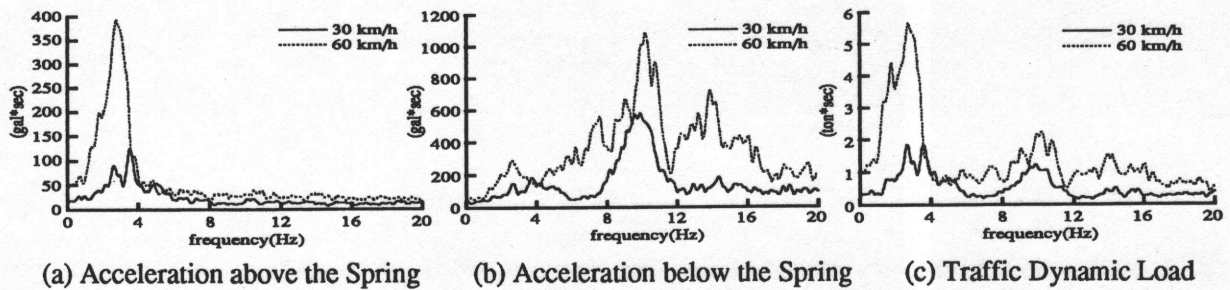


Fig.4 Fourier Spectrum in Case of Different Moving Velocities (full)

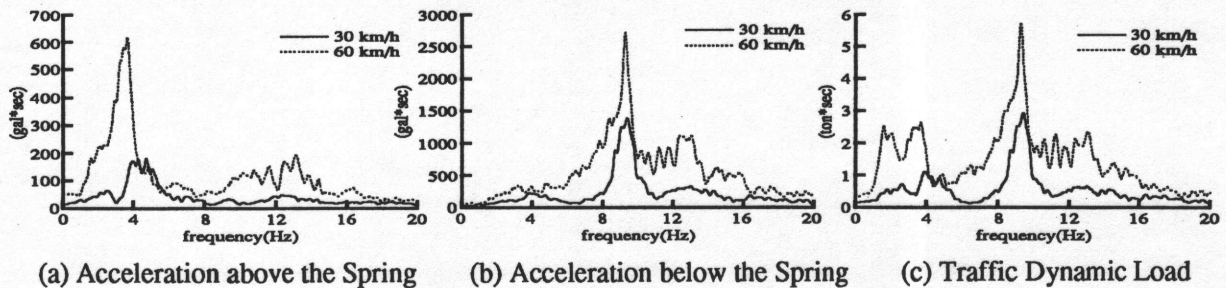
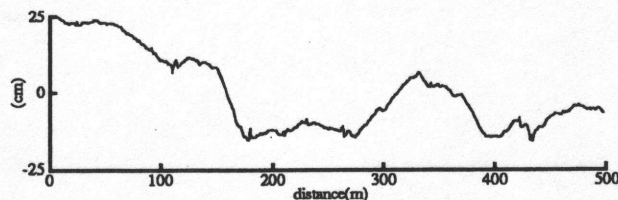


Fig.5 Fourier Spectrum in Case of Different Moving Velocities (Empty)

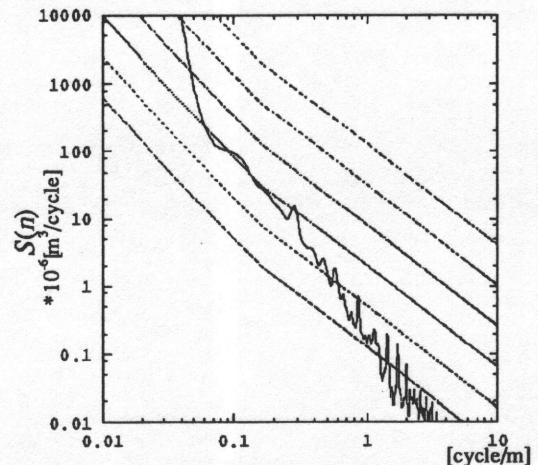
Tab.3 Maximum Traffic Dynamic Load

		30 (km/h)	60 (km/h)
Kinjo Wharf	full	4.389	13.34
	empty	5.954	13.99

unit (ton)



(a) Surface Profile of the Road



(b) ISO Standard

Fig.6 Surface Profile of the Road and ISO standard

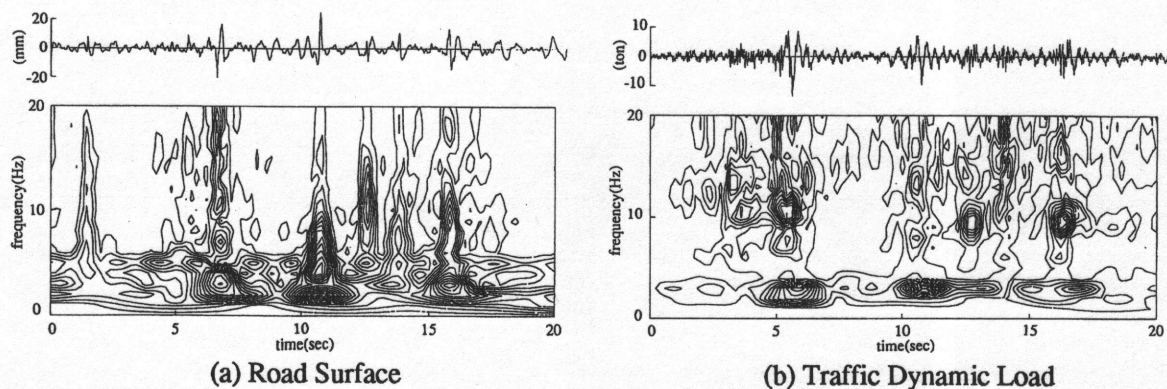


Fig.7 Time History and Nonstationary Spectrum of Road Surface Profile and Traffic Dynamic Load

4. 地盤応答

最初に、地盤の固有振動特性について考察する。Fig. 8 に地盤上 10 地点における昼間と夜間の常時微動記録の平均フーリエスペクトルを示す。当該地盤の夜間静寂時の固有振動数は 2.5 Hz 付近であるが、昼間は 4.5, 8~10 Hz や 11 Hz 付近にも卓越している振動数帯域がみられる。Tab.1 に示された PS 検層データに基づき表層地盤の固有振動数を略算した結果、2.5 Hz 付近の卓越振動数は比較的深くまでの地盤構造による固有振動数に対応し、11 Hz の卓越振動数は最表層の固有振動数に対応することから、夜間の振動数は比較的深い地盤構造で決まっているが、昼間はそれに比べて浅い地盤構造で決まっていると推察できる。これは、昼間の振動源が地表に多く存在するためであると思われる。

4.1 振源特性による影響

Tab.4 に、各ケース毎の地盤上各点における速度波形の最大値を一覧する。空載時は満載時に比べ地盤応答値が大きくなっている。この結果は、直感的に想像する「満載時を検討すれば安全側である」という認識は必ずしも正しくないことを示している。道路建設技術者の経験談によれば、道路構造が比較的薄く、地盤が軟弱な場合にこういった現象が生じることがあると言われている。本結果は、この経験談を実証的に裏付ける結果となっている。Fig.9~10 に、b 地点における積載状況、走行速度の違いによる地盤応答波形のフーリエスペクトル、並びに地盤応答波形と車両動荷重とのフーリエスペクトル比を重ね描く。Fig.9 より、振源に比較的近い b 地点での地盤応答特性は、積載状況の違いにより異なっているが、これはあくまでも振源特性のみによって決まるものであり、地盤の波動伝播性状はほとんど変化していないことが分かる。一方、Fig.10 より、振源近傍の地盤応答特性は、走行速度の違いによっても異なるが、これは振源特性のみによって決まるものではなく、振源の移動により地盤内波動伝播性状も変化しており、当該地盤においては、走行速度が減少すると地盤の卓越振動数をより励起させていることが分かる。

4.2 振源の移動効果による影響

加振力の移動効果に対する理論的な検討⁹⁾ から、走行速度の増大と共に振動数の推移や継続時間の距離依存性が顕著になることが明らかになっているが、本計測例では、走行速度が高速ではないため、振動数の推移は認められていない。しかし、継続時間の距離依存性については Fig.11 から読み取ることができる。Fig.11 は、走行速度の違いによる地盤上 2 地点の速度波形である。振源か

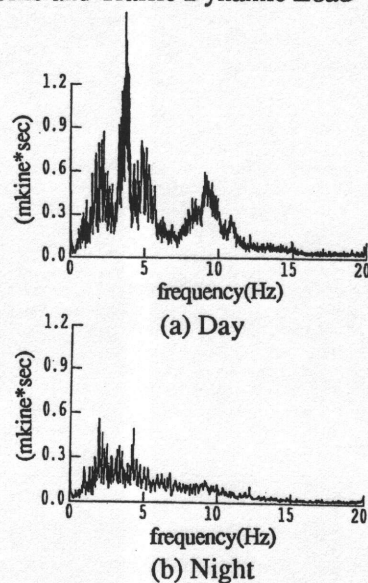


Fig.8 Fourier Spectrum of Microtremor

らの距離の増大により、波形の最大振幅が減少し、継続時間は増加している。また、振源から等距離の位置では、走行速度の増加により継続時間は減少している。このように、振源の移動効果による影響は、継続時間に反映されている。

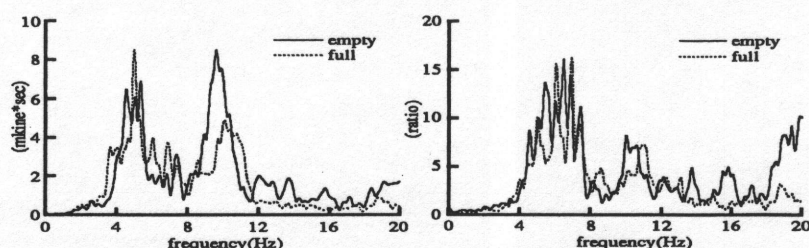
4.3 地盤の波動伝播特性による影響

Fig.9～10より、車両走行時の振源近傍の地盤におけるフーリエスペクトルの卓越振動数帯域は、前述した当該地盤の昼間のものと比較的良好に対応している。よってこの振動数帯域は、地表に振源がある場合に卓越する振動数であることが推測される。Fig.12には、各ケースのフーリエスペクトルの距離変化を3次元的に示す。Fig.4～5とFig.12を比較することにより、車両動荷重によって発生する地盤振動は、振源近傍では振源の特性を多分に含むが、振源から離れるに従い4 Hz付近の振動数（昼間の常時微動の卓越振動数）のみが卓越して来ていることが分かる。また、車両動荷重に含まれる8～15Hzの成分は、距離減衰が比較的大きく、振源での車両ばね下振動数成分のパワーがよほど大きくない限り、遠い距離までは反映されない。Fig.13には、Tab.1に基づいて計算した当該地盤のレーリー波の理論分散曲線を示す。Fig.12で現われた4 Hz付近の振動数は、Fig.13におけるレーリー波基本モードの群速度が極小となる振動数とも対応していることから、距離が離れるに従って励起されてきた表面波成分であると推察される。また一般に、地盤が軟弱であるほど交通振

Tab.4 Maximum Soil Response

	full 60 (km/h)	full 30 (km/h)
point a (0 m)	27.66	29.06
point b (5 m)	20.39	27.16
point d (15 m)	12.80	18.21
point e (25 m)	14.92	12.71
point f (35 m)	10.36	9.72
point g (50 m)	8.45	6.58
point h (65 m)	6.66	5.23
point i (80 m)	7.04	5.14
point j (100 m)	7.33	5.57
	empty 60 (km/h)	empty 30 (km/h)
point a (0 m)	37.76	32.27
point b (5 m)	37.85	29.74
point d (15 m)	32.14	19.87
point e (25 m)	27.58	12.76
point f (35 m)	12.66	9.48
point g (50 m)	5.63	5.62
point h (65 m)		5.67
point i (80 m)	5.62	5.11
point j (100 m)	5.59	6.23

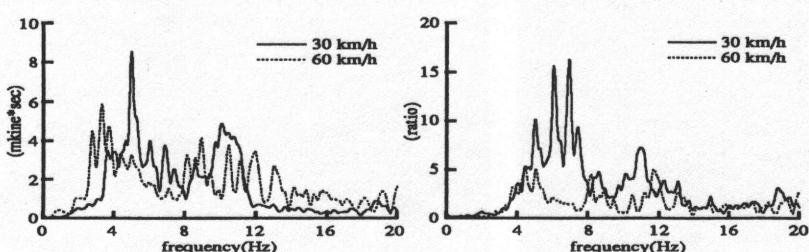
unit (mkine)



(a) Fourier Spectrum

(b) Spectrum Ratio

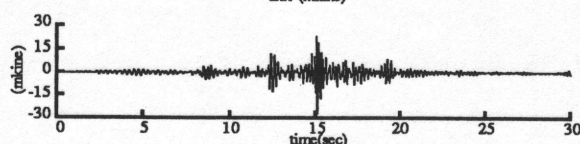
Fig.9 Comparison of Fourier Spectrum and Spectrum Ratio among Different Carryin Conditions (30 km/h)



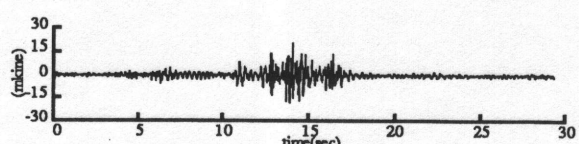
(a) Fourier Spectrum

(b) Spectrum Ratio

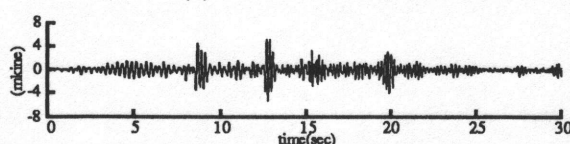
Fig.10 Comparison of Fourier Spectrum and Spectrum Ratio among Different Moving Velocities (Full)



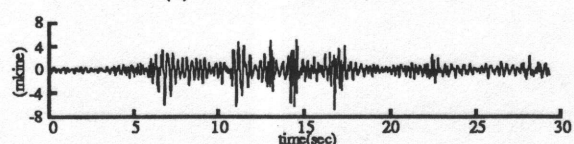
(a) Point-b 30 km/h



(c) Point-b 60 km/h



(b) Point-h 30 km/h



(d) Point-h 60 km/h

Fig.11 Comparison of Duration among Different Distances and Moving Velocities (Full)

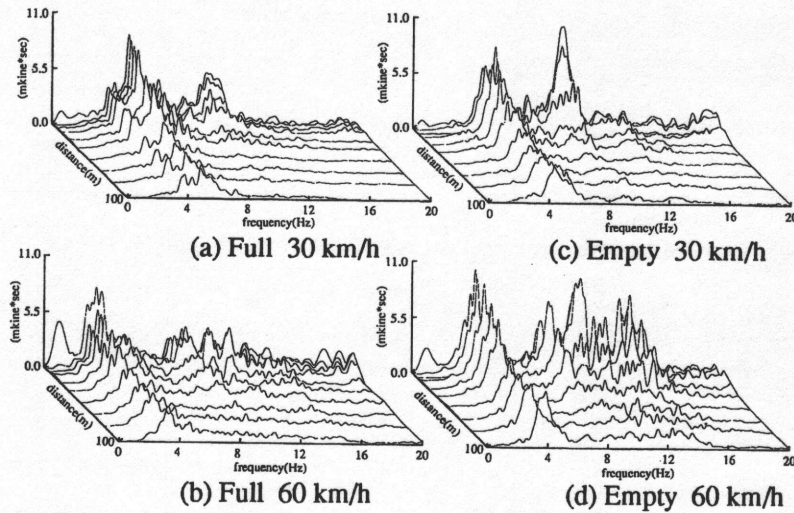


Fig.12 Dependency of Fourier Spectrum on Distance

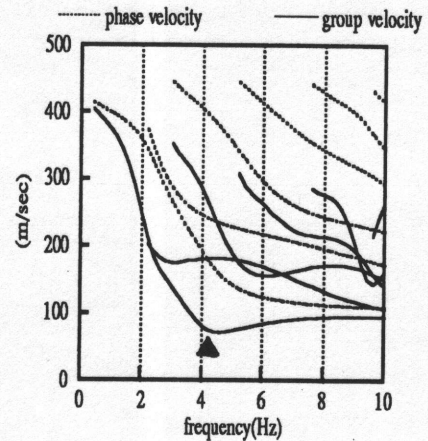


Fig.13 Dispersion Curve on This Soil (Rayleigh Wave)

動の距離減衰は小さいと言われている⁶⁾が、Tab.4に示した地盤上各点の速度波形の最大値の距離減衰が小さい理由として、Fig.12より4 Hz付近の振動数成分の距離減衰が小さいことが挙げられるため、層構造が明確な軟弱地盤と表面波の励起のされ易さとの関係が注目される。

5. まとめ

軟弱地盤における交通振動実測記録に基づき、車両動荷重の特性並びに地盤応答について考察した。車両動荷重に影響を与える要因のうち、積載状況の違いが車両動荷重の振幅に及ぼす影響は少ないが、その振動数特性に大きな影響を与え、満載時にはばね上の固有振動数、空載時にはばね下の固有振動数の影響が強く現われることが分かった。走行速度の違いは、車両動荷重の振幅に大きな影響を与え、速度が上がると、ばね上・ばね下の固有振動数を中心としたより広範囲の振動数成分が励起される。路面の凹凸変動の激しいところでは、車両動荷重の振幅が増大し、ほぼ全振動数域に渡る成分を励起している。車両動荷重は、車両の定常振動的な成分と路面のガタによるインパルスの性質の成分との和であることが推察された。振源から比較的近い地点での積載状況の違いによる地盤応答性状には、振源特性のみが影響するが、走行速度が変化すると振源特性のみならず振源の移動による地盤内波動伝播性状の変化も影響する。振源の移動効果による影響は、継続時間に反映されていることが認められた。振源から離れるに従い卓越が見られる4 Hz付近の振動数は、地表上の走行車両による地盤振動の主成分がレーリ波である⁶⁾ことの可能性を示している。

参考文献

- 1) Hanazato, T., Ugai, K., Mori, M., and Sakaguchi, R. : Three-Dimensional Analysis of Traffic-Induced Ground Vibrations J. Geotech. Eng., ASCE, Vol.117, No.8, pp.1133-1151, 1991
- 2) 横山功一：道路橋の設計自動車動荷重に関する研究，東京工業大学学位論文，1992
- 3) 福和伸夫，梅村建次，多賀直恒：等速移動点加振力に対する3次元均質等方弾性体の基本解に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第441号，pp.45-52，1992
- 4) 福和伸夫，西阪理永，浅野三男，多賀直恒，寺村彰：自動車走行外乱による地盤の振動性状に関する研究，構造工学論文集，Vol.39B，pp.95-104，1993
- 5) BSI : ISO/TC108/WG9 Document No.5, 1972
- 6) Taniguchi, E., and Sawada, K. : Attenuation with Distance of Traffic-Induced Ground Vibrations SOILS AND FOUNDATIONS Vol.19, No.2, pp.15-28, 1979