

(11) 軟弱地盤における地震動の高密度観測

国鉄・鉄道技術研究所 正員 中村 豊
 国鉄・鉄道技術研究所 正員 有藤 明夫

1. はじめに 鉄道構造物のように線状に長い構造物の耐震性や列車の走行安全性を検討する際、地震時の地盤の動きを1点で捉えるだけでなく、3次元的な位置関係の中で捉えることが必要になる。国鉄では、構造物に沿う方向の地盤各点が互いに異なる位相で震動するいわゆる蛇行地動現象の実態と特性を把握することを目的として、このような地動が発生しやすいと考えられる軟弱地盤において地震動の高密度配列観測を実施している。ここでは、観測の結果明らかになった観測地点における蛇行地動の実態について報告する。

2. 観測地点と測点配置 観測地点は東北本線三沢-小川原間の姉沼高架橋近傍である。付近の地盤は姉沼側を除いた三方が洪積地盤に囲まれた沖積はんらん原である。姉沼高架橋は1984年勝沖地震の際、地盤の振動破壊による変化した経歴がある。測点は図1に示すように、東北本線に

平行に設定した主測線上に50m~50mの間隔でNo.1~No.8の観測点を設置し、さらに波動の到来方向を確認したり主測線以外の地動を検討したりするため主測線から約420m離れたところにNo.9, No.10の観測点を、約50m離れたところにNo.11の観測点を設置した。No.9, No.10測点は主測線上の点と1辺約400mの三角網を形成し、No.11測点はNo.2, No.3測点と1辺50mの三角網を形成している。図2は主測線に沿った地層縦断面を示したものである。これによるとNo.1~No.5の観測点は約20mの厚さの軟弱な沖積地盤上にある。No.5とNo.6測点の間で層厚が急変しており、No.6とNo.7測点ではその層厚は約7mとなっている。この軟弱な表面層の下にはせん断波速度が200~300m/sの洪積層が10~20mあり、さらにその下はせん断波速度が500m/s程度の洪積地盤が数100m続いている。

地震波形は主測線に直交する水平変位波形を主体として記録しているが一部の測点では主測線方向の水平変位波形及び上下方向変位波形をも併せて記録している。なお、せん断波速度が500m/sまでの地中地盤の動きを捉える目的でNo.3地点において地下10mと地下30mの地点に加速度計を埋設している。

3. 観測結果と考察 これまでに観測された地震は約70ヶで、震央は図3に示すように分布している。この図には主測線の方角を以てこれに直交する方向を概略的に示した。ここでは、蛇行地動の形態と震央位置の関連を調べるために、震央がほぼ主測線方向にあるもの(Bゲル-7°)4ヶと主測線とはほぼ直交する方向にあるもの(Aゲル-7°)4ヶを中心に取扱う。これらの地震の震央は図3中に○印で示されており、表-1にその諸元を示す。

(1) 波動の伝播と卓越振動数 地震観測と同一の測線上で起振機による波動の発生伝播実験を実施した。図2に○印で記した位置を最大加振力2tonの小型起振機で紙面と直交する方向に加振した場合に生ずる波動をNo.1からNo.4測点にかけて5m間隔で測定してNo.1~No.2

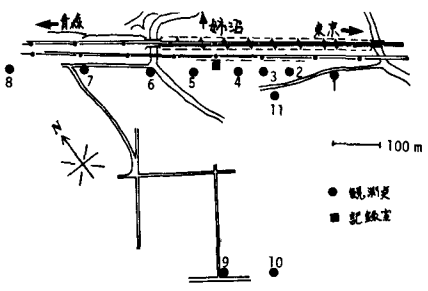


図1 観測点配置図

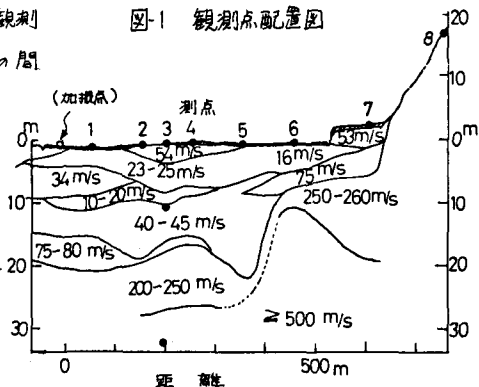


図2 地層縦断面図

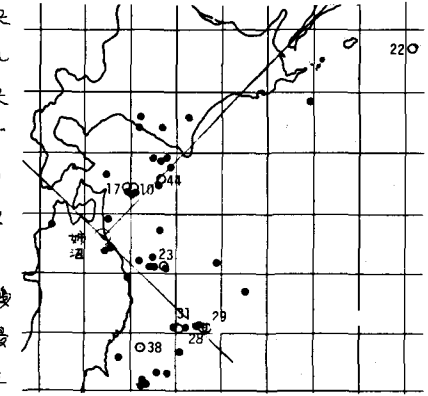


図3 震央分布

における平均的波動伝播速度を求めた。図4はその結果の一部を示したものでNo.29位置において1Hz~5Hzの振動数範囲ではほぼ30~50%であり、軟弱沖積層のせん断波速度に対応していることがわかる。このとき伝播している波動は表面波が卓越していると考えるのが妥当であるが、図4にみられるように明瞭な位相速度の分散現象は確認できなかった。図4に示したF, H₁及H₂の曲線はNo.2測点における地層構造から求められるLove波の理論分散曲線である。またこの実験では1~2Hzの振動が伝播しやすかった。

図5(a),(b)及び(c)はそれぞれNo.17 (Aゲル-7°), No.29 (Bゲル-7°) 及びNo.38の地震の際の記録波形を示したもので、いずれも主観測線に直交する水平変位波形である。波形の類似性から測点は3つに分類されるがこれは軟弱層の厚さと関係が深い。即ち、軟弱層厚が20m程度のNo.1~No.3測点、軟弱層厚が7m程度のNo.6~No.7, No.9測点及びこの中間に位置するNo.4, No.5測点である。図5によれば対応する波形相互の時間的なずれはいずれの場合も顕著ではない。No.17の地震の場合には震央が主観測線と直交する方向に位置しているため波動の到達時間の差はほとんど生じないと考えられるが、No.29の地震は主観測線方向に震央があるため波動の伝播時間だけのずれが生ずるはずである。波動の伝播速度が軟弱表層中のものと同程度であるとするとNo.2測点からNo.7測点まで450mの間に10秒前後の時間差が生ずることになる。しかし図5(b)によると波形の全体的なずれは1秒以下であり、観測点近傍では地震波動は500%以上の速度で伝播していることがわかる。

No.38の地震について測点No.2の波形を基準としてNo.3~No.7及びNo.9の測点の波形の相互相関関数を求め、これから波動の到達時間差を求めた。三角形を形成するNo.2, No.6及びNo.9への波動の到達時間差から波動の到来方向と伝播速度を計算すると、前者は震央の方向と10°程度の誤差でほぼ一致し、伝播速度は約900%と見積られた。図6は波動の到来方向を震央の方向と仮定して得た走時曲線である。相互相関関数をみると4秒前後の周期が卓越しており、この走時は周期4秒前後の波動についてのものであると思われる。

図7はNo.17及びNo.29の地震についてNo.1~No.7測点のフーリエスペクトルを示したものである。本観測点の地震動は1Hz以下が卓越し、時に1.5~2Hzや3Hz付近も

表1 地震諸元

地震 番号	発震時					震央地名	緯度 (E)			経度 (W)			M	M ₀
	年	月	日	時	分		度	分	度	分	度	分		
10	1976	6	2	14	49	曹康渠東方沖	142	02	41	27	60	5.0		
17	1977	2	18	13	08	曹康渠沖	141	58	41	27	60	5.4		
22		3	19	19	56	北津浦東方沖	148	09	43	44	60	5.7		
23		4	25	05	42	曹康渠沖	142	41	40	05	30	5.0		
28		12	23	07	17	東北東方沖	143	33	39	04	50	5.2		
29		12	24	06	02	〃	143	38	39	04	0	5.9		
31		12	24	06	14	〃	143	03	39	04	10	5.5		
44	1978	4	6	17	39	曹河沖	142	34	41	32	50	5.1		
38		2	20	13	36	曹康渠沖	142	12	38	45	50	6.7		

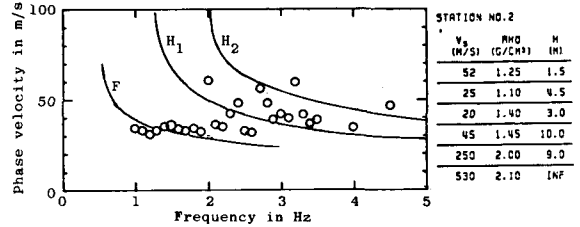


図4 波動伝播速度

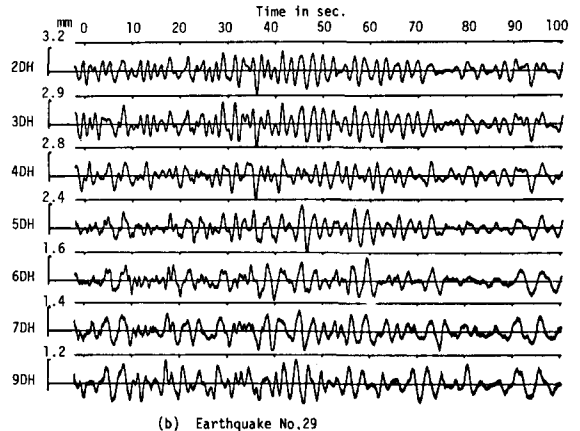
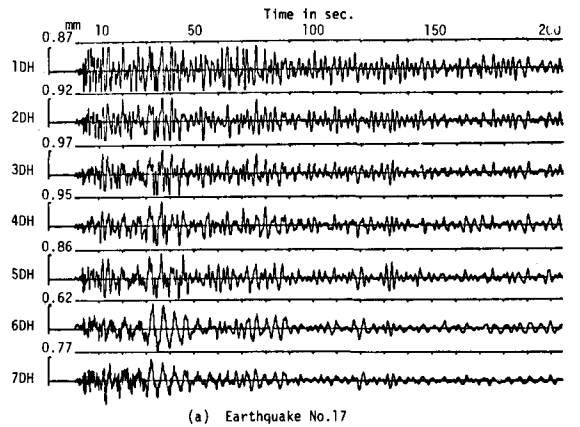


図5 地震観測波形

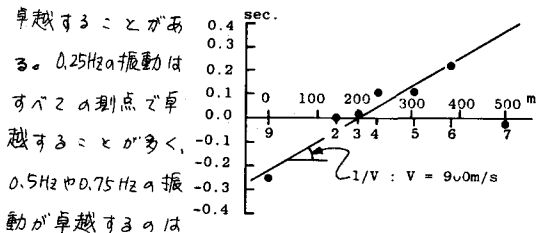
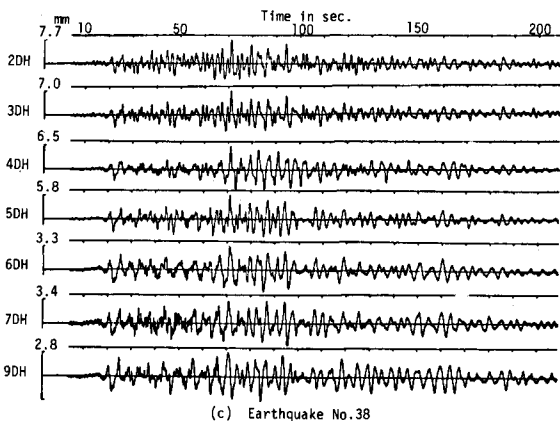


図6 No.38地震の走時

又はNo.5測点までである。No.1~No.4測点の常時微動観測によっても0.5Hzや0.75Hzの振動は卓越しており、これらa振動は軟弱表層に起因したものと考えることができる。これに対し0.25Hzは全点共通にみられること、この振動と対応する伝播速度は軟弱表層中のものにくらべてかなり速いことなどからも、と深い地質構造に起因するものと考えられる。

(2) 蛇行地動の実態 蛇行地動の実態をみやすく表現する為にバンドパスフィルターを通した波形について時々刻々の主軸線の変位形態を図化した。バンドパスの中心振動数は振動数分析の結果を参考に、0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz, 1.0Hz, 1.25Hz, 1.5Hz, 2Hz, 2.5Hzの8種類とした。図7はこのうち0.5Hzから1.5Hzまでの振動数についてA, B両グループ8ヶの地震における変位形態を示したもので、中心振動数毎に振幅が大きくなる時刻付近を図示している。これによると振幅の小さな部分(以下O点と呼ぶ)が線状に連なって認められる。これをみかけ上の振動の伝播とみれば右下がりの場合はNo.2からNo.7への伝播をあらわし、左下がりの場合はその逆の伝播をあらわしていることになる。0.5Hzと0.75Hz及び1.5HzではO点が一方へ伝播する様子は明瞭で、1.0Hz及び1.25HzではO点の伝播が明瞭に認められる。このO点の伝播速度は500%を超えており、表層のせん断波速度よりはるかに速い。しかしO点が伝播する場合でも振幅の大きな部分が伝播している例は少ない。以上の現象は震央の位置が主軸線方向にあっても主軸線と直交する方向にあっても同様に認められる。図9は最大変位振幅の分布を示したものである。これによると振幅が大きくなる位置はA, Bグループが別なく各振動数毎に概ね一定していて、振動数が高くなるにつれてNo.2測点からNo.7測点へ移動する傾向が認められる。

以上のことは軟弱地盤における蛇行地動としては、軟弱表層中に水平に伝播する振動によるものより、もっと



(c) Earthquake No.38

図5 地震観測波形(フブキ)

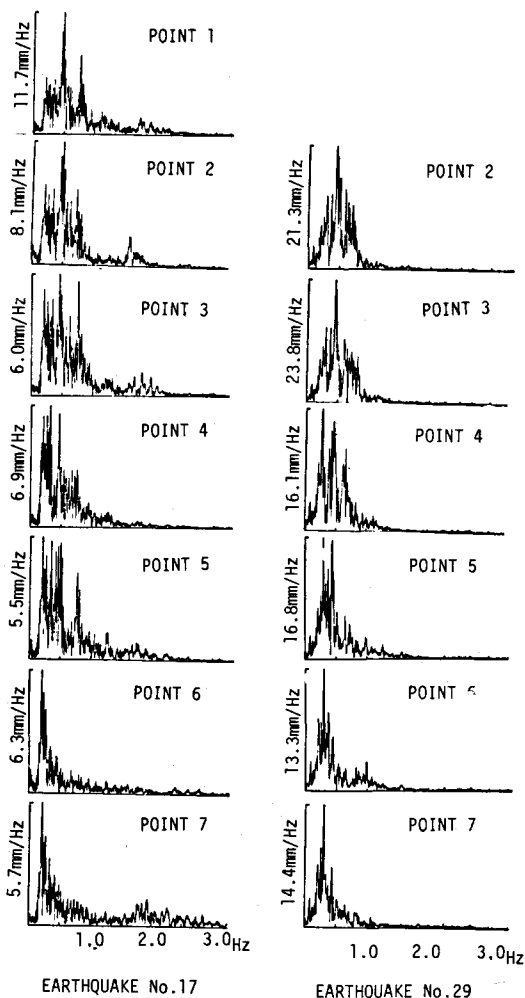


図7 観測波形のフーリエ変換

深く堅固な地盤内を水平に伝播してきた波動が軟弱地層下面から入射し軟弱地層内で重複反射した結果生ずるものの方がより主体的であることを示唆している。

4. まとめ 地震時の軟弱地盤表面の波動の伝播、卓越振動及び蛇行地動について検討した結果次のことが明らかになった。

- ① 振巾の小さい部分の移動は認められるが振巾の大きな部分はこれに関係せず振動数毎にほぼ一定して動かない。
- ② 振巾が大きくなる地点は振動数が高くなるにつれて軟弱層厚の薄いとこへ移動する。
- ③ 以上の現象は震央が主観線方向にあつても、主観線直交方向にあつても同様で震央位置による差異は認められない。

以上の事柄は軟弱地盤の地震時蛇行地動の発生原因について重要な示唆を与えておりと考えられるのでさらに検討を続ける予定である。

蛇行地動のみかけ波長を0点から0点までの2倍の距離とすれば、現在の観測システムで数100mの波長までが捉えられている。現在の観測点間隔は最少でも50mであるので、検出できるみかけ波長は100m以上である。列車の走行安全からみた場合、1Hz前後のみかけ波長が20~80mの相対変位地動が角折れ等に関連して問題となる。このためこの範囲のみかけ波長の存在を確認し、その特性を検討すべくさらに観測点間隔をせまくして観測を継続する計画である。

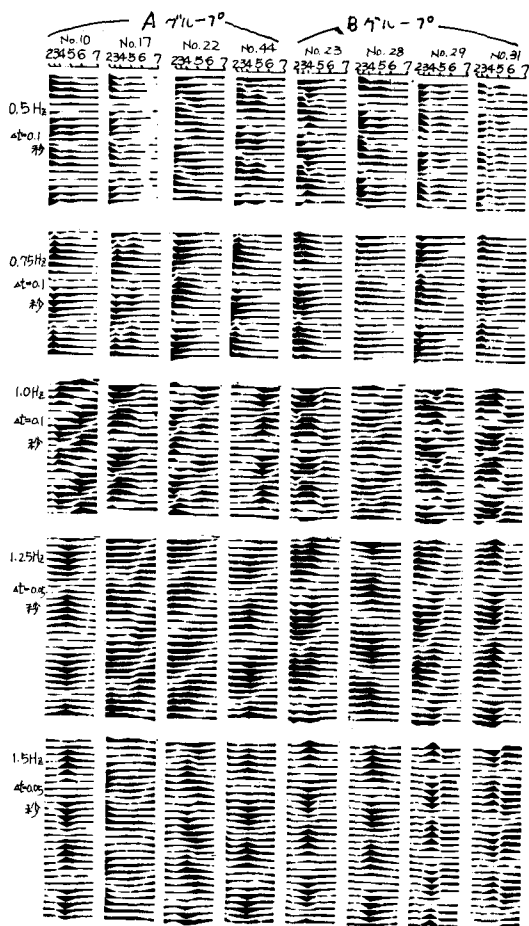
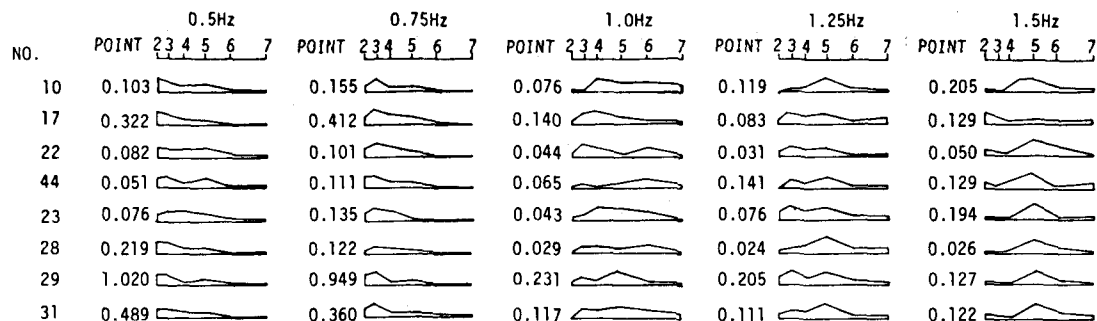


図-8 振動数毎の主観線変位形態



注) 各分布図の左側の数値は最大変位の値をmm単位で示したものである。

図-9 振動数毎の最大変位分布図

謝辞: 本研究は国鉄の耐震研究プロジェクト「鉄道土木構造物耐震強化の研究委員会(委員長: 田本益三 東大名誉教授)」の中で行われたものである。観測等に関して盛岡工事局技術管理課の協力を仰いでいる。関係の方々から謝意を表します。