

地震観測に基づく地中送電用洞道の地震時挙動

土山茂希*・中村 晋**・奥田宏明***

濃尾平野における軟弱地盤中に構築された地中送電用洞道およびその周辺地盤で実施した地震観測により得られた記録を基に洞道軸方向の地震時変形挙動、それを支配する波動特性および洞道～地盤間の地盤ばね特性について検討を行った。その結果、洞道軸方向の地震時挙動は地震動に含まれる表面波の影響を選択的に受け、軸方向の伸縮変形が曲げ変形に比べ卓越していることを明らかにし、また、地震記録から算定した地盤ばね定数は既往の指針による値の65%程度の値であった。

Keywords : underground transmission line, seismic observation, axial strain, surface wave spring constant

1. はじめに

地中送電用洞道の様な地中線状構造物の耐震設計は、1974年に石油パイプライン技術基準¹⁾が定められて以来最近のガス導管耐震設計指針²⁾や共同溝設計指針³⁾に至るまで共通して応答変位法を基本的設計手法としている。しかし、現行の耐震設計指針類による設計の信頼性を向上させるためには構造物に作用する地震動、地盤ばね特性および構造物軸剛性の評価手法等の検討課題が残されている⁴⁾。それらの課題を解決するためには、構造物軸方向に発生するひずみ、あるいはその発生要因である地盤中に発生する構造物軸方向のひずみのいずれか一方に重点をおいた従来の研究⁵⁾ではなく、両者の性質をともに把握すると同時に両者を適切に関係づけることが重要となる。

地盤ひずみの生じる原因には、次の2つが考えられる。

(1) 表面波が伝播する場合

(2) 構造物の軸方向に沿って地盤構造が変化するか、または構造物の軸心の深度が変化する場合

指針類では、(1)の場合について構造物の周辺地盤が水平成層構造となっている時の表面波に対する地盤ひずみ分布を求める手法を示し、(2)の場合について地震応答解析等により構造物軸方向の地盤ひずみを別途求めることを要求している。指針類で示されている地盤ひずみの評価パラメーターは、既知地盤情報である表層地盤構造と定数のみに基づいて定められている。しかし、平野部で観測される表面波に関する最近の研究によれば、表面波は地震基盤までのかなり深い地盤中を伝播することが指摘⁶⁾されていることから、現行の指針類による設

計では表面波の評価が十分に適切であるとはいえない。一方、表面波の予測に関する研究は地盤構造の不確定性等により定量的予測を行える段階には至っていないものの、表面波の諸特性を地震諸元と関連づけ設計への有効活用が期待できる手法⁷⁾の提案もみられる。

指針あるいは既往の研究によるいずれの手法も地震観測に基づく検証を行い、その適用性を明かにすることが必要である。しかし、設計の対象となる大規模地震による記録が不足していることから、それは容易ではない。このため、構造物自体と合わせて地盤の地震観測を継続的に実施し記録を蓄積し、地中の線状構造物と地盤に対する地震観測や実験等を通じた実証的研究により耐震設計上の課題の解決を図ることが重要であると考えられる。しかし、地震観測は、桜井ら⁸⁾による埋設管を対象とした観測以来、沈埋トンネル⁹⁾の様な比較的断面形状の大きな構造物やガス導管¹⁰⁾のような断面形状の小さい構造物を主体として実施されているが、地中送電用洞道の様な両者の中間の形状を有する構造物では地震観測はあまり実施されていない。さらに、構造物に作用する地震動の特性を適切に把握するためのアレー観測を地盤の地震観測として実施しているものも少ない。

本論では、濃尾平野における軟弱地盤中に構築された地中送電用洞道（開削工法による）およびその周辺地盤で観測された地震記録を用いて、まず洞道の変形挙動と地震動の特性をそれぞれを明らかにし、それらの結果を踏まえて洞道の応答を支配する地震動特性および洞道～地盤間の相互作用を表す地盤ばね特性について洞道の応答という観点で明かにした結果を示す。

2. 地震観測の概要

(1) 地震観測の概要

地震観測は、愛知県津島市における東名阪自動車道に近接する洞道と地盤について昭和56年2月から昭和60

*正会員 工修 中部電力(株)土木建築部 担当副長
(〒461-91 名古屋市東区東新町1番地)

**正会員 工博 佐藤工業(株)中央技術研究所 研究員

***正会員 中部電力(株)電力技術研究所 担当課長

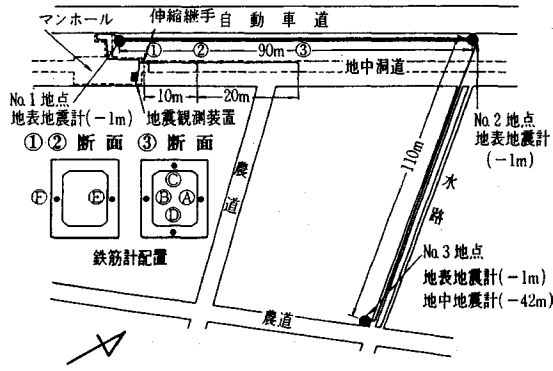


図-1 地震計の配置

表-1 地震諸元

観測番号	観測発生日時	地震名称	震源位置		震源深さ (km)	M	最大振幅 (km)
			緯度	経度			
1	1981. 4. 27	Ise Bay Region	34° 51'	136° 54'	40	4.4	33
2	1981. 8. 11	Ise Bay Region	35° 4'	137° 35'	10	4.0	7
3	1981. 8. 18	Southern chubu	35° 17'	137° 35'	50	5.0	76
4	1981. 10. 30	Chubu-kinki border	35° 12'	136° 30'	40	3.7	25
5	1982. 6. 21	S Coast of Chubu	34° 41'	137° 3'	40	4.9	56
6	1982. 6. 22	Southern kinki	33° 52'	135° 26'	60	5.2	186
7	1982. 7. 23	E off Kanto	36° 11'	141° 57'	30	7.0	482
8	1982. 12. 28	Near Miyakejima	33° 52'	139° 27'	20	6.4	283
9	1983. 3. 6	NW Coast of Chubu	35° 42'	136° 2'	8	5.0	91
10	1983. 3. 16	S Coast of Chubu	34° 47'	137° 37'	40	5.7	86
11	1983. 8. 8	Kanto-Chubu border	35° 31'	139° 2'	22	6.0	210
12	1983. 8. 26	W Setonaikai Region	33° 33'	131° 36'	116	6.8	505
13	1983. 10. 31	W Coast of Chugoku	35° 25'	133° 56'	15	6.2	259
14	1983. 10. 31	N Coast of Chugoku	35° 26'	134° 00'	13	5.7	253
15	1983. 11. 24	S Coast of Chubu	34° 44'	137° 43'	36	5.0	97
16	1984. 1. 1	S off kinki	33° 37'	136° 51'	388	7.3	168
17	1984. 2. 11	Southern kinki	34° 3'	135° 43'	67	5.5	154
18	1984. 3. 6	Near Torishima	29° 20'	139° 12'	452	7.9	684
19	1984. 5. 30	Northern kinki	34° 58'	134° 36'	17	5.6	198
20	1984. 9. 14	Central Chubu	35° 49'	137° 34'	2	6.8	104
21	1984. 9. 14	Central Chubu	35° 50'	137° 36'	8	5.1	108
22	1984. 9. 14	Central Chubu	35° 48'	137° 30'	8	5.0	99
23	1984. 9. 15	Central Chubu	35° 47'	137° 28'	6	6.2	96
24	1984. 9. 15	Central Chubu	35° 47'	137° 29'	9	5.6	97
25	1984. 9. 15	Central Chubu	35° 48'	137° 30'	10	5.1	99
26	1984. 10. 3	Central Chubu	35° 50'	137° 37'	5	5.3	109
27	1985. 1. 6	NE Wakayama Pref.	34° 11'	135° 33'	70	5.9	153
28	1985. 1. 6	NE Wakayama Pref.	34° 9'	135° 34'	69	5.5	154
29	1985. 2. 26	Western Nagano Pref.	35° 50'	137° 35'	8	5.0	107

年6月までの約4年間実施した。洞道では軸方向鉄筋のひずみ、地盤では地震動の速度成分を測定した。それらの測定に用いた地震計およびひずみ計の配置を図-1に示す。地震計は地表 (GL-1m) の3点に一辺が90~120mの三角形の頂点位置となるように配置し、No.3地点では設計基盤に相当するGL-42mにも地中地震計を設置した。各点では水平2成分および鉛直成分の3成分の測定を行い、水平2成分の設置方位は東西、南北方向よりそれぞれ30度半時計方向に回転させた洞道軸・軸直交方向について実施した。地震計は電磁型速度計 (アンプを含む固有周期25秒) であり、短周期 (20Hz) から比較的長い周期 (10秒程度) まで一様な感度で測定可能である。測定は0.01秒のサンプリング間隔

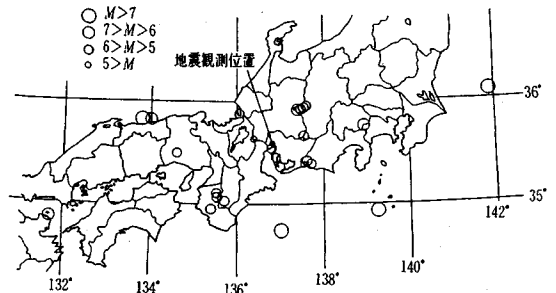


図-2 震源位置分布

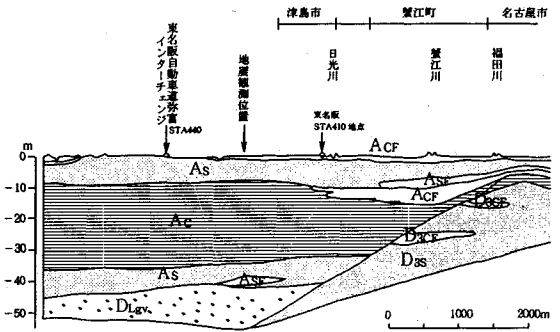


図-3 表層地盤の地質縦断面図

で行い、所定の振幅レベル以上の震動が60秒以上継続しても60秒で計測を終了し再度別地震として測定を行う。また、洞道のひずみは、図-1に示した様に人孔より2m離れた位置にあるカラー方式の継手構造を有する伸縮継手位置より1m, 10m, 30m (伸縮継手間中央) 離れた3断面において洞道軸方向鉄筋にひずみゲージを張り付けて測定を行った。

観測期間中に得られた100地震のうち、地震規模や地震記録の振幅の大きさにより29地震を本検討のために選定した。その地震諸元を表-1、震源位置を図-2に示す。

(2) 地盤構造

洞道軸方向に沿った表層地盤の地質構造を図-3に示す。地震観測位置の東側では名古屋市から津島市にかけて沖積層厚が厚くなっており、木曾三川までの西側ではほぼ成層構造となっている。ただし、名古屋市から津島市にかけての洪積層上面の傾斜は1度以下であるため、地震観測位置における地盤構造は水平成層構造と見なすことができる。地震観測位置における表層地盤の地盤構造や地盤定数はNo.3地点近傍で実施したボーリング調査、弾性波探査に基づいて定め、図-4に示す。洞道は埋設深度が1.5mでありN値が3~20程度の砂質土層中にあり、それ以深にN値が0程度の軟弱なシルト層、N値が3~50程度の砂質土および設計基盤と考えられるN値が50以上、せん断波速度が400m/s程度の層が

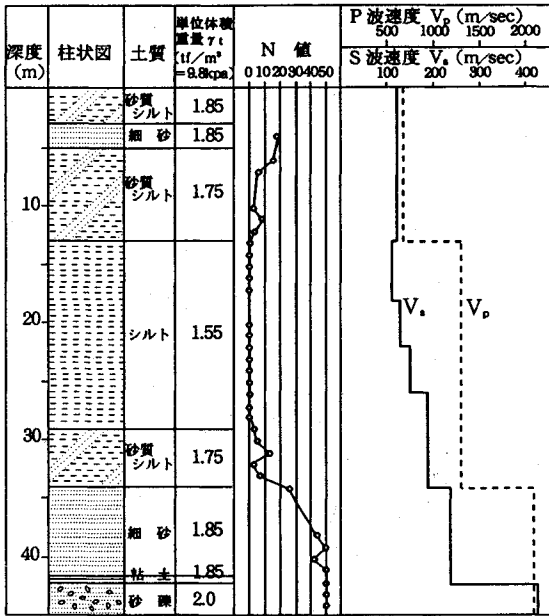


図-4 表層地盤構造および定数

表-2 深層地盤構造および定数

深度 (m)	層厚 (m)	単位体積重量 (t/m³) (=9.8kPa)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)
7	7	1.85	120	680
13	6	1.75	120	680
18	5	1.55	110	1310
22	4	1.55	130	1310
26	4	1.55	160	1310
29	3	1.55	190	1310
34	5	1.75	190	1310
42	8	1.85	240	1310
325	283	2.00	430	2110
1000	675	2.10	800	2110
1450	450	2.30	1600	3310
	-	2.60	2800	6010

存在している。

地震記録に含まれる表面波成分の検討などに必要な地震観測位置における地震震盤に相当する花こう岩層までの地盤構造や地盤定数は成瀬¹¹⁾、多賀ら¹²⁾が示した濃尾平野における深層地盤構造に基づき定めた。弾性波速度等の諸定数を表-2に示す。

3. 洞道の地震時挙動

(1) 軸方向最大ひずみの距離減衰特性

観測された洞道軸方向の最大ひずみ振幅と地震のマグニチュード M_j および震央距離 Δ (km) との関係を図-5に示す。また、図-5には回帰分析により得られた最大

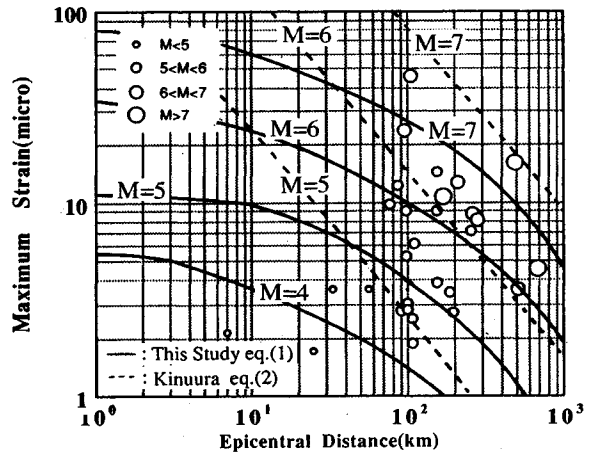


図-5 最大ひずみ振幅の距離減衰特性

ひずみ振幅の距離減衰式(1)(重相関係数は0.7)に基づいて得られるマグニチュードごとの最大ひずみ振幅と震央距離の関係も合わせて示す。さらに、図-5には洞道と同様の構造形式を有する構造物における最大ひずみの特性と比較するため、式(2)に示す衣浦港水底沈埋トンネルにおける最大ひずみ振幅の距離減衰特性¹³⁾も合わせて示す。

$$\text{Log}(\varepsilon_{\text{MAX}}) = 0.42M_j - 0.81\text{Log}(\Delta + 30) + 0.17 \quad (1)$$

$$\text{Log}(\varepsilon_{\text{MAX}}) = 0.75M_j - 0.94\text{Log}(\Delta) - 1.44 \dots \dots (2)$$

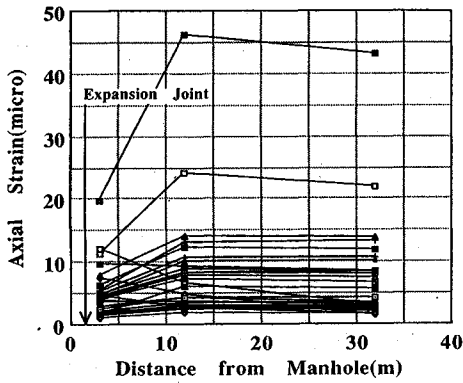
ここで、 ε_{MAX} はひずみの最大値 ($\times 10^{-6}$) を表す。

両式の分析で用いた地震データの7割程度を占める M_j が6以下の場合について2つの距離減衰特性を比較すると、両者の差異は距離減衰式2項中の震源からの距離に関するパラメータが震央距離 Δ のみか否かの差異による程度であり、構造形式による発生ひずみの距離減衰特性には差異がみられないと考えられる。ただし、このような構造物に発生するひずみの距離減衰特性は地域により異なるとの報告¹³⁾もあり、ひずみの距離減衰式(1)を他地域の洞道へ適用するには検討が必要である。

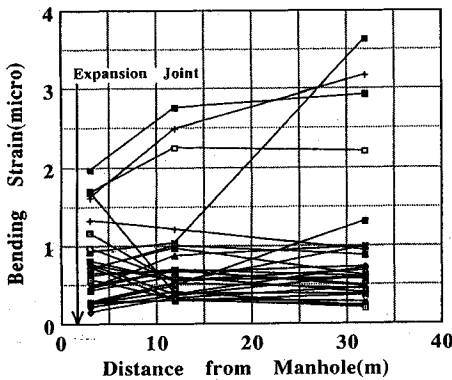
(2) 軸方向ひずみに基づく洞道の変形状

洞道の軸方向変形挙動を伸縮変形と曲げ変形に分ける。洞道の軸方向鉄筋で観測されたひずみは、伸縮変形による軸ひずみ $\varepsilon_a(t)$ と曲げ変形により生じる軸方向のひずみ $\varepsilon_b(t)$ (以後曲げひずみと呼ぶ) の和として得られる。ここでは洞道の各断面における2つの側壁で得られた軸方向ひずみ $\{\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)\}$ より軸・曲げひずみを求め、各断面におけるそれらの最大振幅分布を図-6に示す。軸ひずみ $\varepsilon_a(t)$ は2つのひずみの平均 $\{=(\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t))/2\}$ 、曲げひずみ $\varepsilon_b(t)$ は2つのひずみの差の平均 $\{=(\varepsilon_1(t) - \varepsilon_2(t))/2\}$ として求めている。

これより、ひずみの振幅が大きくなるにつれ継手近傍の軸ひずみは③断面(伸縮継手設置位置間の中央)におけるひずみ振幅に比べて小さく、継手の効果が表れたと



a) 軸ひずみ



b) 曲げひずみ

図-6 軸・曲げひずみの最大振幅分布

考えられる。曲げひずみについては、継手近傍におけるひずみの低下が顕著ではないことから軸ひずみに比べ継手の影響は少ないと考えられる。

次に、曲げひずみと軸ひずみの比およびマグニチュードと震央距離の関係を図-7, 8に示す。図より、マグニチュードが5.5以上の場合、また震央距離が100 km以遠の場合には曲げひずみは軸ひずみの30%以下とかなり小さな値となっている。すなわち、通常設計で対象となる地震に対する洞道の応答として、軸方向の伸縮変形が卓越していることが分かる。

地震観測期間中で最もひずみの大きかった長野県西部地震について、図-9, 10に洞道の軸方向ひずみ(③断面)より算出した軸・曲げひずみ、地震動の速度・加速度成分(速度記録の周波数領域での微分により算出)のフーリエスペクトルを示す。ここで、地震動はNo.3地点の地表における洞道軸方向成分の記録を用いている。

図-9, 10を対比することにより洞道の軸ひずみは地震動の速度成分と、洞道の曲げひずみは地震動の加速度成分とスペクトル形状に対応がみられる。他の地震記録においても同様な傾向が見られた。このことは、洞道~地盤系を弾性床上の梁にモデル化し、洞道に沿って伝播

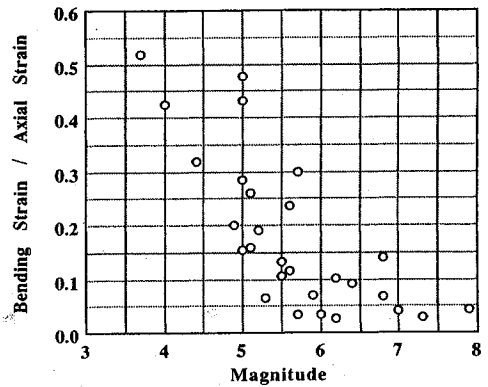


図-7 曲げひずみと軸ひずみの比とマグニチュード

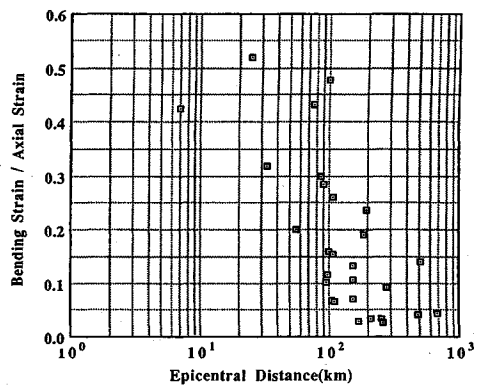


図-8 曲げひずみと軸ひずみの比と震央距離

する波動がばね端より作用した際に洞道に発生する軸・曲げひずみと地震動特性の関係とも対応している。

4. 洞道周辺地盤の地震時挙動

(1) 水平方向に伝播する地震動の識別

まず、洞道の軸方向変形が生じる地盤ひずみは、次の2つの理由から主に表面波の様に水平方向に伝播する地震動に支配されて発生するものと考えられる。さらに、洞道周辺の表層地盤の構造は、水平成層構造と見なせると考えられる。

1) 図-11に示す洞道に沿った2地点(No.1,2)における洞道軸方向成分の地震記録のコヒーレンスが周期1.0秒より長周期側でほぼ1と高いことからその周期帯域における地盤の震動振幅は洞道に沿って同程度の値と考えられ、地盤構造の不整形性の影響を受けていない。他の地震にも、図に示した速度振幅の最も大きい長野県西部地震(No.20)と同様な傾向がみられた。

2) 洞道軸ひずみの卓越周期は、図-9の例と同様にほとんどの地震で周期1.0秒以上である。

次に、水平方向に伝播する地震動は、斜め方向に伝播する実体波と表面波の2つがあり、その伝播方向、また

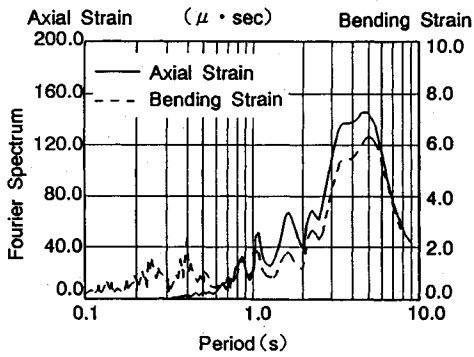


図-9 軸・曲げひずみのフーリエスペクトル

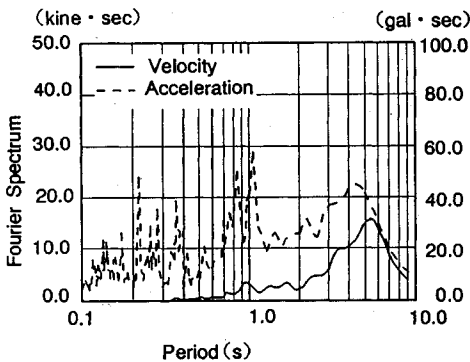


図-10 加速度・速度成分のフーリエスペクトル

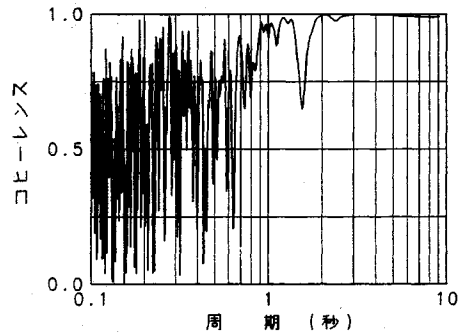


図-11 洞道に沿った2地点のコヒーレンス

は伝播直交方向に変位成分が卓越する性質を有している。表-1に示した29地震について、水平面における変位成分の粒子軌跡が楕円の様に卓越方向を有する形状となるかを座標軸を回転させながら求めた水平2成分の相互相関係数の最大値が0.3以上(楕円に換算して長軸半径が短軸半径の1.4倍以上)となる地震動を水平方向に伝播する地震動と判別した。その結果、そのような性質を有する地震は15認められた。さらに、その判別した地震について算出した地震動の伝播・伝播直交方向成分の非定常スペクトル、地震動の伝播方向成分の水平成分と鉛直成分の積であるモーションプロダクトが次の条件を満たしている場合に地震記録に表面波が含まれると判

断した。ここで、伝播方向は、伝播性の評価に用いた水平2成分間の相互相関係数が0となる方向のうち最大振幅の小さい方向とした。

条件1: No.3地点における地表・地中の地震記録の非定常スペクトルに表面波の特徴的な性質である分散性が同様に含まれている。

条件2: 分散性の有する波群の最大スペクトル強度を与える周期が地震観測点における地盤構造に基づいて算出した表面波の理論群速度のAiry相を与える周期と対応している。

条件3: No.3地点の地表における地震記録のモーションプロダクトの値が正負交互に生じる(伝播方向成分のみ)。

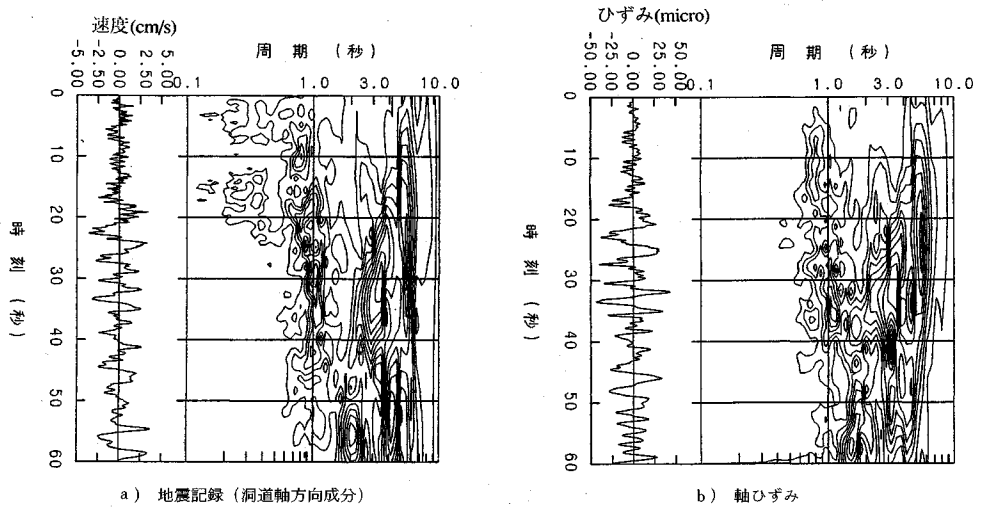
ここで、条件2において必要な表面波のAiry相を与える周期は、表-2に示した地盤構造に基づいて算出したLove波、Rayleigh波の理論群速度特性より求めた。

その結果、7つの地震(No.3, 8, 11, 14, 20, 23, 27)に表面波が含まれていると判断した。ここでLove波とRayleigh波成分の存在が顕著に認められる地震は長野県西部地震による記録であり、他の地震にはRayleigh波の存在が顕著に認められた。ただし、地震記録に表面波の影響が小さい場合にはこのような手法での表面波の識別は困難であるため、他の地震による地震記録にも表面波の影響が含まれている可能性がある。

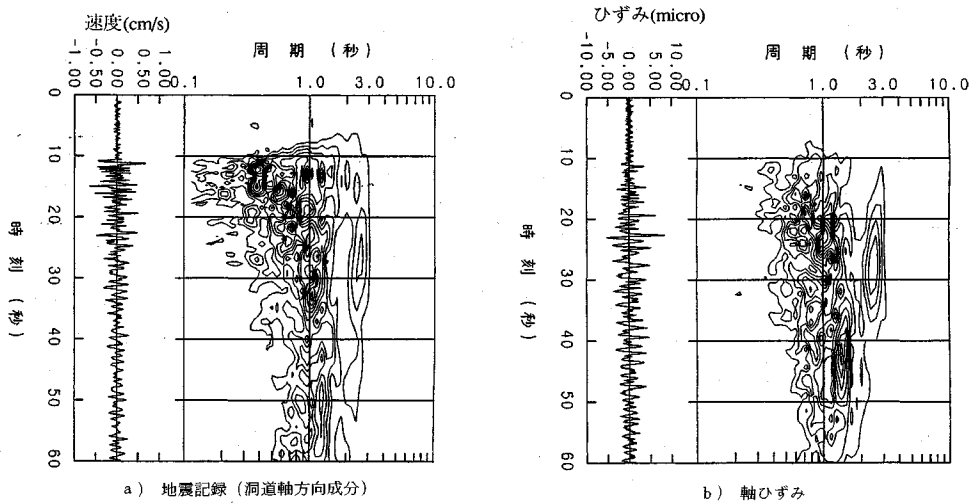
Love波、Rayleigh波の影響が顕著な長野県西部地震、Rayleigh波の顕著な南中部地震(No.3)のNo.3地点における地震動の洞道軸方向成分および洞道③断面における軸ひずみの非定常スペクトルを図-12, 13に示す。長野県西部地震では周期4.0~7.0秒、時刻15.0~35.0秒にLove波の影響、周期2.0~4.0秒、時刻20.0~45.0秒にRayleigh波の影響がみられ、軸ひずみにもほぼ同様な周期と時間帯域にその影響が顕著にみられる。南中部地震では洞道軸方向成分において周期2.0~3.0秒、時刻20.0~40.0秒にRayleigh波の影響がみられ、軸ひずみにもほぼ同様な周期と時間帯域にその影響が顕著にみられる。

(2) 水平方向位相速度

表面波を含むと判断した地震について、地震動の伝播および伝播直交方向成分より水平方向伝播速度を算出し、表-2に示した深層地盤構造に基づいて算出した理論位相速度との比較を図-14に示す。観測値は、地表における地震観測位置3点のうち2地点間の地震動の相互相関係数が最大となる時間遅れを伝播時間とし、2地点間の距離をその伝播時間で割ることにより算出した。ここで、伝播時間は表面波成分の顕著にみられる周期1.0秒から5.0秒の間で0.5秒間隔に設定した中心周期の±0.25秒の周期帯を地震記録より抽出し、それぞれの周期帯に対して算出した相互相関係数に基づき求め



図—12 長野県西部地震の非正常スペクトル



図—13 南中部地震の非正常スペクトル

た。中心周期毎の水平方向の伝播速度の平均値 (以後、平均観測値) と $\pm\sigma$ (標準偏差) を伝播直交方向成分については Love 波、伝播方向成分については Rayleigh 波の理論位相速度特性と合わせて図—14 に示す。

Love 波の平均観測値は周期 4.0~5.0 秒において基本モードの理論値と同様に周期とともに減少傾向があるが、理論値の 2 倍程度となり、4.0 秒より短周期側では 2000 m/s と理論値に比べ大きな値となっている。しかし、Rayleigh 波の平均観測値は、1, 2 次モードの Airy 相を与える周期近傍の 3.0 秒から 5.0 秒において理論値とよく一致しているが、周期 3.0 秒より短周期側では 2000 m/s と理論値に比べ大きな値となっている。観測値と理論値の比較からも、表面波の含まれると判断した地震に Rayleigh 波が顕著に含まれていることが分かる。

5. 地盤と洞道の地震時挙動の関係

(1) 最大地震動と最大ひずみ

洞道軸方向の最大ひずみ振幅と観測された地震動の最大値の関係を図—15 に示す。ここで地震動の最大値として、No. 3 地点の地表で観測された速度記録の最大振幅と、速度記録をフーリエ微分することにより得られた加速度記録の最大振幅を用いた。地震動の最大速度と最大ひずみの間にはよい相関がみられ、速度が大きくなるにつれて最大ひずみが大きくなっている。最大ひずみ (絶対値) と最大速度 (m/s) の関係を直線で回帰分析すると次式となる。

$$\varepsilon_{\text{MAX}} = V_{\text{MAX}}/980 + 0.69 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (3)$$

地中構造物に発生するひずみ ε は、地震動の速度成分 V と地震動の水平方向の位相速度 c の比として得られる地盤ひずみに近似的に等しいとの関係⁸⁾がある。式 (3)

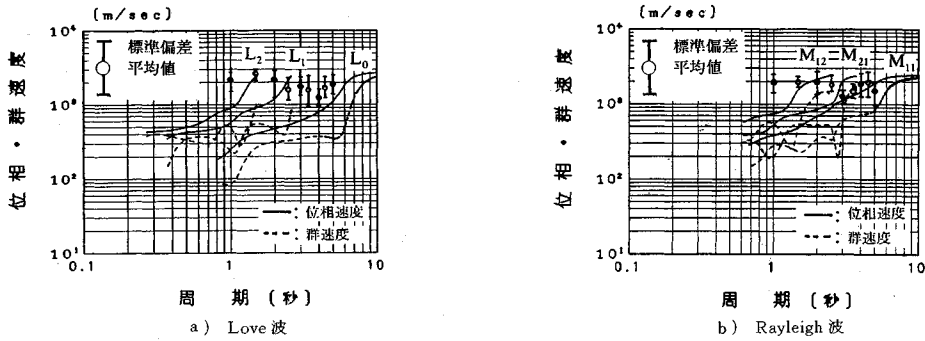


図-14 地震動の水平方向伝播速度と表面波の理論伝播速度の比較

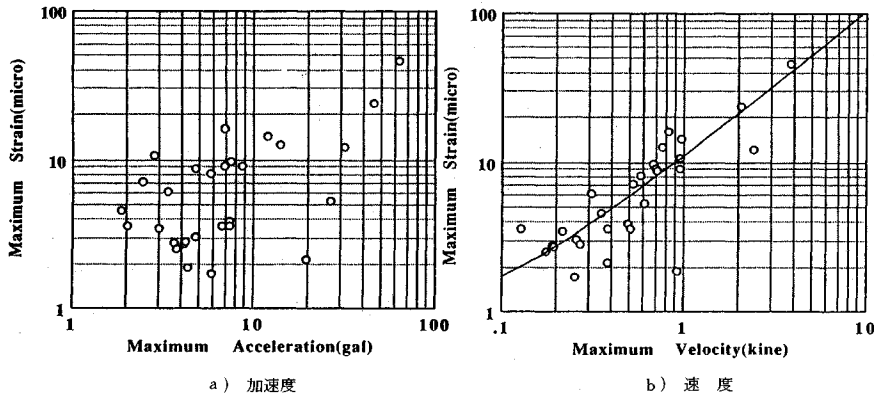


図-15 最大ひずみ振幅と地震動の最大振幅の関係

の定数項が 1μ 以下と小さいことから無視すると、洞道に発生するひずみと地動速度との近似関係より地震動の水平方向の位相速度 c は 980 m/s に相当する。洞道に発生するひずみと地動速度の最大値の関係は洞道の応答に影響を及ぼす地震波動の卓越周期近傍における位相速度特性に関連していると考えられ、両者の関係より得られる位相速度は図-14 に示した Rayleigh 波の 1, 2 次モードの Airy 相 (1 次: 2.6 秒, 2 次: 2.8 秒) つまり表面波の振幅が極大となる周期の理論位相速度とよく一致している。これより、地震観測地点における洞道の応答には地震動に含まれる表面波、特に Rayleigh 波の影響が大きいと推定できる。さらに地震動の最大速度と表面波の位相速度が分かれば近似的に洞道の軸方向ひずみの最大値を求めることができる。ただし、式 (3) は最大速度が 5 kine 以下の地震に対する分析結果なので洞道とその周辺地盤の間に滑動が生じる様な規模の大きな地震への適用は、今後の課題と考えている。

(2) 地盤ひずみと洞道の軸ひずみの関係

地盤ひずみは、地表の地震観測点 3 点を三角形の頂点とする内部のひずみが一定であるとし、3 点の観測速度成分をフーリエ積分することにより得られた変位成分をひずみ～変マトリックスに乗じるにより求めた。

洞道軸ひずみと地盤ひずみの時刻歴を長野県西

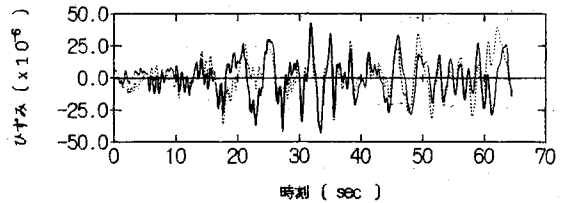
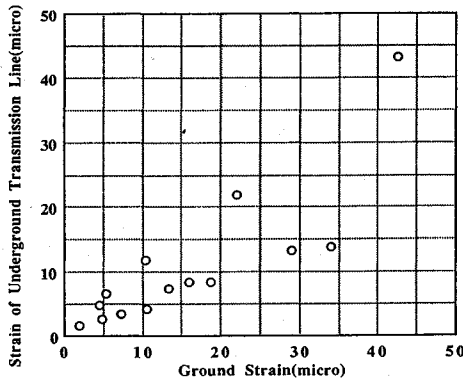


図-16 洞道、地盤ひずみ時刻歴(—: 洞道,: 地盤)

部地震 (No. 20) について図-16 に示す。両者はよく一致している。さらに、29 地震のうち水平方向に伝播性のあると判別された 15 地震について地盤ひずみと洞道の軸ひずみの最大振幅の比較を図-17 に示す。洞道の軸ひずみは地盤ひずみと 5 割ないし同程度の値であり、地盤ひずみがほぼ洞道に伝達していることが分かる。このことは洞道の様な地中線状構造物の軸方向ひずみは地盤のひずみに支配され、構造形状に依存しないという 3 章 1 節の結果と対応している。これらより、地盤ひずみに基づく地中構造物の耐震設計法である応答変位法の考え方が洞道にも適用出来ると考えられる。

(3) 地盤ばね特性

洞道の地震時挙動を応答変位法により評価した場合、表面波のように位相速度が円振動数 ω により異なる波動が洞道に作用した際の洞道軸方向の変位 $u(\omega)$ は、



図一七 洞道と地盤のひずみの関係

式(4)に示す弾性床上の梁理論に基づく支配方程式により得られる。ここで洞道軸方向をX軸方向とする。

$$EA \frac{\partial^2 u(\omega)}{\partial x^2} - K(\omega)(u_g(\omega) - u(\omega)) = 0 \dots\dots(4)$$

ここで $u_g(\omega)$ は地盤の洞道軸方向の変位、 $K(\omega)$ は地盤ばね定数を表す。 EA は洞道軸剛性を表し、断面形状より 7.0×10^6 tfである。

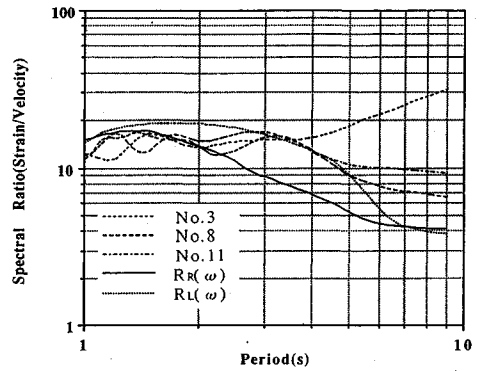
式(4)より得られる洞道の変位と洞道に作用する地盤変位の関係を洞道軸方向に微分することにより洞道の軸ひずみと地盤ひずみの関係式を得、地盤ひずみが地震動の速度成分と位相速度の比と等しいとの関係を用いると洞道の軸ひずみ $\epsilon_a(\omega)$ と地震動の速度成分 $V(\omega)$ の比 $R(\omega)$ に関する式(5)を得る。その際、洞道に作用する地盤変位は最大振幅を $U_0(\omega) (= \omega V(\omega))$ として位相速度 $C(\omega)$ で水平方向に伝播する調和波 $U_0(\omega) \exp\{i\omega(t - X/C(\omega))\}$ とした。ここで $L(\omega)$ は洞道に作用する地震動の波長を表す。

$$\frac{\epsilon_a(\omega)}{V(\omega)} = \frac{1}{1 + \frac{EA}{K(\omega)} \left(\frac{2\omega}{L(\omega)}\right)^2} \cdot \frac{1}{C(\omega)} = R(\omega) \dots\dots(5)$$

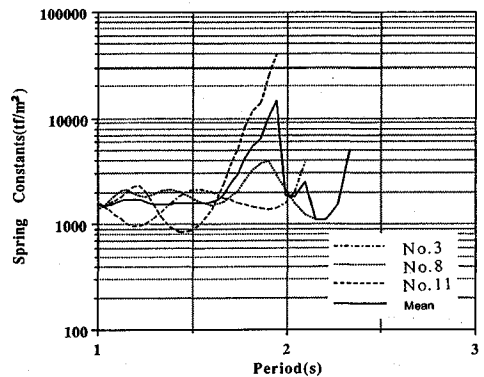
地盤ばね特性 $K(\omega)$ は、式(5)を変形することにより得られ式(6)となる。

$$K(\omega) = EA \left(\frac{2\omega}{L(\omega)}\right)^2 \frac{C(\omega)R(\omega)}{1 - C(\omega)R(\omega)} \dots\dots(6)$$

地盤ばね定数は、表面波の含まれる地震のうち Rayleigh 波が顕著に含まれている3地震 (No. 3, 8, 11) について算出した。ただし、No. 8, 11 地震には Love 波の影響も認められる。洞道の軸ひずみ (③断面) と地震記録 (No. 3 地点の地表における洞道軸方向成分) のフーリエスペクトル比として $R_0(\omega)$ を算出し、図一八に示す。フーリエスペクトルを算出する際、バンド巾 0.2 Hz の Parzen ウィンドウを用いた。それらを式(6)に代入することにより有意な値 (正の実数) として得られた地盤ばね定数 $K(\omega)$ とその平均を図一九に示す。



図一八 地震記録より求めた $R_0(\omega)$ と得られた地盤ばね定数により求めた $R_R(\omega)$, $R_L(\omega)$



図一九 地震記録より求めた地盤ばね定数

ここで、位相速度は図一四に示した Rayleigh 波の理論位相速度のうち実測値と対応のよい基本モードとし、波長は位相速度とその値を与える周期の積とした。各周期毎の平均地盤ばね定数の平均値は 2414 tf/m^2 である。

次に、円振動数によらず一定値 2414 tf/m^2 とした地盤ばね定数、図一四に示した Rayleigh 波と Love 波の基本モードに関する理論位相速度特性およびそれぞれの波長を式(5)に代入して得られた $R_R(\omega)$, $R_L(\omega)$ を図一八に実測記録による $R_0(\omega)$ と合わせて示す。周期 1.1 秒から 2.0 秒にかけて $R_R(\omega)$ は各観測値 $R_0(\omega)$ の包絡値と良く一致し、1.3 秒近傍にて地盤震動の速度が最も洞道に伝達されていることが分かる。Rayleigh 波の卓越する周期と考えられる基本モードの Airy 相を与える周期 2.8 秒付近では観測値が $R_R(\omega)$ の 2 倍程度の値となっているが、Love 波に対する $R_L(\omega)$ と観測値が良く一致している。以上より、洞道の応答には地盤上で観測された速度記録の非定常スペクトル分析によりその存在が認められた Rayleigh 波のみならず Love 波の影響が含まれている可能性があることや地盤ばね定数を周期によらず一定値としても洞道の応答と洞道に作用する地震動の関係を評価できることが分かる。さらに、洞道の応答には Rayleigh 波のみならず Love 波の影響も含

まれているが、Rayleigh 波に対する位相速度より地盤ばね定数を算出したため周期 1.6~2.2 秒より長周期側で地盤ばね定数がかなり大きな値を示すと考えられる。

最後に、地震記録に基づく地盤ばね定数の平均値 2141 tf/m³ は、著者らが提案している有限要素法を用いた地盤ばね定数の算出手法⁴⁾を本地震観測地点に適用することにより得られた地盤ばね定数の値 2300~3300 tf/m² とよく一致しているが、共同溝設計指針に示された手法(強震時を想定した地盤定数の低下は考慮しない)により算出した地盤ばね定数の値 3700t/m² の 65% 程度である。著者らが提案している手法による地盤ばね定数は洞道の変位が 3 つ地震の最大地盤変位レベル (0.1~0.3 cm) に対する値であり、その値と指針による地盤ばね定数の算出には表-2 に示した地盤定数を用いた。

6. 考 察

ここでは、非定常スペクトル特性の分析では表面波の存在を識別できなかった地震も含む全ての地震を対象として、洞道の応答に基づきその応答を支配する波動特性について検討を行う。

洞道の軸ひずみと地震動の卓越周期との関係を図-20、軸ひずみの最大振幅と軸ひずみの卓越周期の関係を図-21 に示す。地震動の卓越周期は No.3 地点における洞道軸方向成分のフーリエスペクトルによる 1 次卓越周期軸ひずみの卓越周期は洞道の③断面における軸ひずみのフーリエスペクトルによる 1 次卓越周期とした。さらに、地震動の波動特性を知る上で地震動の卓越周期と地震動の増幅特性を支配する地盤構造との関係が重要であることから、洞道の軸ひずみと地震動の卓越周期の関係は、表層地盤の 1 次固有周期 1.0 秒 (表-2 の地盤構造・定数より 4 分の 1 波長則より算出) と地震動の卓越周期の関係に基づき次の 3 つのグループに大別される。ただし、洞道の応答に表面波の影響が顕著にみられる長野県西部地震によるものは両者の関係が明確であるためグループ分けから除く。

- ・グループ 1: 地震動の卓越周期が 1.1~6.0 秒でひずみの卓越周期が 1.5~3.0 秒
- ・グループ 2: 地震動の卓越周期が 1.1 秒でひずみの卓越周期が 1.0~1.5 秒
- ・グループ 3: 地震動および軸ひずみの卓越周期が 1.0 秒位下

また、軸ひずみの最大振幅と卓越周期の関係を上記グループ毎にみると、グループ 3 を除き、グループ 1, 2 とともに軸ひずみの最大振幅が 2 μ から数十 μ の範囲にある。今、図-14 に示した表面波の理論群速度特性より得られる各波動の卓越周期 (Airy 相を与える周期) は Love 波の 1, 2 次モードで 5.5, 2.2 秒, Rayleigh 波の 1, 2 次モードで 2.6, 2.8 秒である。また、図-18 に示

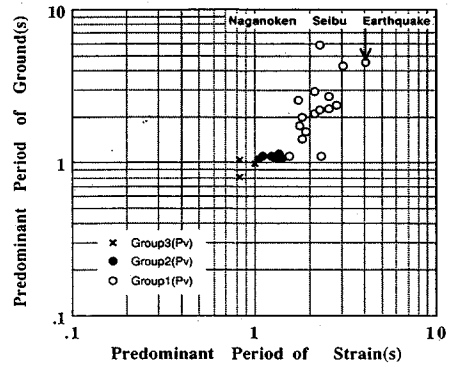


図-20 軸ひずみと地震動の卓越周期の比較

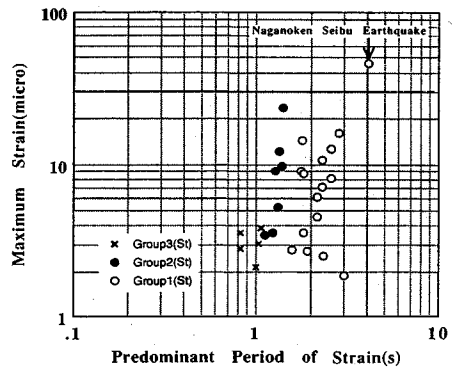


図-21 軸ひずみの最大振幅と卓越周期の比較

した地震動の速度成分に対する軸ひずみの周波数応答倍率は Rayleigh 波が 1.3 秒, Love 波が 1.9 秒で最大となる。軸ひずみの卓越周期は地震動に含まれる表面波の様に水平方向に伝播する地震動の卓越周期やその様な地震動に対して洞道の応答が卓越する周期にみられると考えられる。特に、後者は地震動に表面波が顕在化していない場合にみられると考えられる。このことから、グループ 1 では、軸ひずみの卓越周期が Love 波に対する周波数応答倍率の卓越する周期 1.9 秒と Rayleigh 波の卓越周期 2.6~2.8 秒の範囲にあるため、洞道の応答に Love 波成分と Rayleigh 波の影響が大きいと考えられる。グループ 2 では、Rayleigh 波に対する軸ひずみの周波数応答倍率の卓越する 1.3 秒近傍に軸ひずみの卓越がみられることから、洞道の応答は Rayleigh 波の影響により生じたものと考えられる。グループ 3 では地震動の卓越周期が表層地盤の 1 次固有周期 1.0 秒より短く、図-11 に示した洞道に沿った No.1, 2 地点のコヒーレンスが比較的小さな値となっていることから、洞道の応答は人孔や洞道周辺構造物の影響等に起因する地盤震動の差異により生じたものと考えられる。ただし、グループ 3 の地震はいずれも *Mj* 5.5 以下の内陸性地震であり設計で対象となる中・大規模地震と地震動の周波数特性等が異なり、ひずみ振幅がいずれも 4 μ 以下と小さいこ

とから本検討の対象としない。このように洞道の応答という観点で地震記録を見直すと、地震動に表面波が顕在的に含まれている場合のみならず顕在化していない場合についても洞道の応答は地震動に含まれる表面波成分の影響を受けていることが分かる。言い替えば、本地震観測点の様に地盤が水平成層構造を成している場合、構造物の応答には地震動に含まれる表面波成分の影響が選択的に生じると考えられる。

7. あとがき

本論では、濃尾平野における軟弱地盤にて実施した地震観測(昭和56年2月から昭和60年6月)により得られた地震記録を基に地中送電用洞道縦断方向の地震時変形挙動およびそれを支配する波動特性について検討を行った。さらに、洞道~地盤間の相互作用を表す地盤ばね特性についても検討を行った。その結果、以下の事が分った。ただし、これらの結果は通常の設計で対象となる地盤条件(水平成層と見なせる)に対するものである。

(1) 洞道の軸方向ひずみの最大振幅は、マグニチュードと震央距離に基づく距離減衰式(式(1))や地震動の速度成分との関係(式(3))によっても評価できる。ただし、いずれの関係式も最大速度が5kine以下の地震に対するものであり、強震時における洞道軸方向ひずみの最大振幅の評価への適用性は今後の課題である。

(2) 洞道の軸方向変形挙動は曲げ変形より卓越し、その変形による洞道軸ひずみのフーリエスペクトルは速度記録のフーリエスペクトルと形状が良く似ている。

(3) 地震記録より求めた地盤の洞道軸方向ひずみと洞道の軸ひずみはその最大振幅および波形とも良く一致していることから、現行の指針で用いられている応答変位法は洞道軸方向の軸力評価に対して適当である。

(4) 地震記録より求めた洞道~地盤間の地盤ばね定数は、既往の設計指針により得られる値の65%程度である。その値は、著者らが既に提案している地盤ばね定数の算出手法により得られた値とよく一致し、その算出手法の有効性を示している。

(5) 洞道の地震応答は地震動に表面波の影響が顕在

化しているか否かにかかわらず表面波成分が含まれている場合、その影響を選択的に受けると考えられる。このことは、本地震観測地点の様に表層地盤の構造が水平成層構造をなしている場合、洞道の応答を支配する地震波動は表面波であることを示している。

参考文献

- 1) 日本道路協会：石油パイプライン技術基準，1974.6.
- 2) 日本瓦斯協会：ガス導管耐震設計指針，1982.3.
- 3) 日本道路協会：共同溝設計指針，1986.3.
- 4) 土木学会編：動的解析と耐震設計第4巻ライフライン施設，pp.142~146，1989.
- 5) 中村正博・片山恒雄・久保慶三郎：地中構造物の実測地震時ひずみに関する定量的研究，土木学会論文報告集，第250号，pp.35~45，1982.
- 6) 瀬尾和大，地下深部の地盤構造が地表の地震動に及ぼす影響，東京工業大学博士論文，1981.
- 7) 中村晋・末富岩雄・吉田望：傾斜基盤の存在によって生じるLove波スペクトル特性の予測に関する考察，土木学会論文集，No.404/I-11，1989.
- 8) 桜井彰雄・高橋忠・栗原千鶴子・矢島浩：地震時土のひずみよりみた埋設パイプラインの耐震性，電力中央技術研究所報告，No.69087，1970.4.
- 9) Choshiro Tamura Shunzo Okamoto and Masanori Hamada ; DYNAMIC BEHAVIOR OF A SUBMERGED TUNNEL DURING EARTHQUAKE 第29号，5号，東京大学生産技術研究所報告，第24号，5号，1975.3.
- 10) 佐藤楊彦・片山恒雄・大保直人・中村正博・岩本利行：長野県西部地震における埋設管のひずみと波動伝播，第40回土木学会年次学術講演会梗概集，第1部門，pp.393~394，1986.
- 11) 成瀬聖慈・吉田厚司・正木和明・鏡味洋史・宮崎雅徳・久保寺章：やや長周期微動観測と地震工学への適用(9)，地震，第2輯，第37巻，pp.385~395，1984.
- 12) 多賀直恒・富樫豊・宮崎正：濃尾平野の長・短周期微動特性(5)~三角点同時観測による同時微動の伝播特性一，日本建築学会論文報告集，第320号，pp.91~101，1982.10.
- 13) 清宮理，西澤英雄，横田弘：川崎港海底トンネルでの地震応答観測と応答解析，港湾技術研究所報告，第22巻，第3号，pp.253~299，1983.
- 14) 土山茂希・中村晋：実験に基づいた洞道~地盤間の地盤ばね定数に関する研究，土木学会論文集(投稿中)

(1992.4.24受付)

DYNAMIC BEHAVIOR OF UNDERGROUND TRANSMISSION LINE BASED ON THE SEISMIC OBSERVATION

Shigeki TSUCHIYAMA, Susumu NAKAMURA and Hiroaki OKUDA

Seismic observation is carried out from February, 1981 to June, 1985 to evaluate the dynamic behavior of the underground transmission line constructed in soft ground in Noubi plane. Velocity of the ground and strain of the reinforcing bar along the axial direction of the structure are measured. It is found that the dynamic behavior of the structure which is constructed in horizontally layered ground structure has a selectivity of surface wave including in seismic wave ; axial deformation is predominant among the axial and bending deformation and that spring constant is 65% to the value obtained by the existing seismic code.

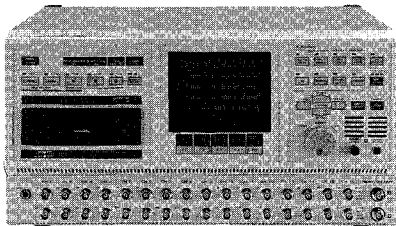
サヨナラ 紙記録。

- ★DATテープ1本に、最長120日間も連続記録。★#!
- ★それを、わずか2時間53分で高速再生。●*!!
- ★トリガ/タイマ記録で、異常現象だけの自動記録もOK。!!!

5881PCMデータレコーダは、DAT技術を応用したPCM(パルス符号変調)方式のデータレコーダで、★#! ●*!! !!!のほか、

- ▶ S/N比(信号対雑音比)は80dB(約10,000倍)を上回る素晴らしい精度。
- ▶ パワフル&ユニークなメモリ波形表示で外部計測器不要。
- ▶ テープ交換中でも次のテープに記録。
- ▶ 見たいデータがすぐ見つかる縦横無尽のサーチ機能。
- ▶ デジ・アナ混在記録。▶ 強力なGPIB。

などをはじめとする記録&解析にやさしい機能を、このスペースでは書ききれないほど満載しています。



5881 PCM DATA RECORDER



●お問い合わせはお気軽に。
045-545-8111

エヌエフ

株式会社 エヌエフ回路設計ブロック
横浜市港北区柳島東6-3-20 〒223 ☎045(545)8111(営業直通)

自動車交通問題解析ソフト

TRシリーズ

未来設計企業

CRC

自動車騒音解析システム

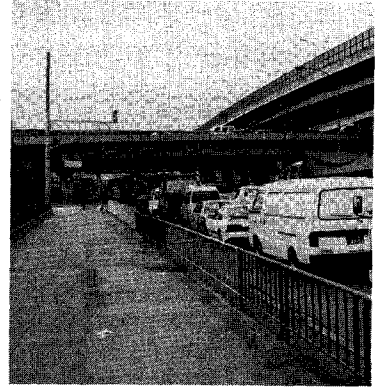
TRNOISE

パソコン用に開発された自動車騒音解析システムです。道路に直角な断面における騒音レベルの中央値を予測します。計算方法は、日本音響学会式によるもので、1970年の提案以来、最も広く利用されている方法です。

操作は、画面に表示されるメニューを選択し、指定されたデータを入力しますので、特にコンピュータに関する知識を必要としません。

計算結果は、プリンタ及びフロッピーディスクに出力され、断面等騒音線図、距離減衰曲線を描くことができます。計算点は、格子点、環境基準評価高さと、任意点の3方式による選択ができます。

パソコン用に開発され



自動車排ガス解析システム

TRGAS

パソコン用に開発された自動車排ガス解析システムです。道路に直角な断面における一酸化炭素(CO)・窒素酸化物(NO_x)の濃度(ppb)を予測します。計算方法は、建設省提案モデルです。

操作は、画面に表示されるメニューを選択し、指示に従ってデータを入力します。特に、コンピュータに関する知識は必要としません。

結果は、プリンタ及びフロッピーディスクに出力され、距離減衰曲線を描くことができます。計算予測点は、任意に10点まで設定できます。

パソコン用に開発された自動車排



自動車振動解析システム

TRVIB

パソコン用に開発された自動車振動解析システムです。道路に直角な断面における振動レベルの80%レンジの上端値を予測します。計算方法は、建設省提案モデルです。

操作は、画面に表示されるメニューを選択し、指示に従ってデータを入力します。特に、コンピュータに関する知識は必要としません。

結果は、プリンタ及びフロッピーディスクに出力され、距離減衰曲線を描くことができます。計算予測点は、任意に10点まで設定できます。

パソコン用に開発された自動車振動

お問い合わせ先

株式会社 **CRC** 総合研究所

西日本支社 総合研究部

担当：薮内・中川

〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3 伊藤忠ビル

☎06-241-4126

本社 / 〒103 東京都中央区日本橋本町3-6-2 小津本館ビル

☎03-3665-9711(案内)

地球を切る! 視る! 創る!

未来設計企業
CRC

3次元地質解析システム

GEORAMA

ジオラマ

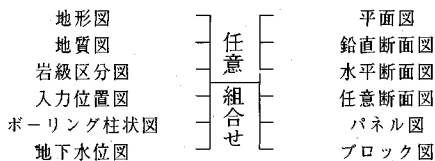
概要

地質調査で得られたデータを基に、利用者の判断を加味して3次元地質モデルを作成します。この3次元モデルより地質・岩級区分・地下水位等をグラフィック表示並びに作画します。今後この3次元モデルを利用して解析用メッシュ作成等への応用が考えられます。

特徴

- ・ 走向・傾斜データも考慮できる高度な推定法
- ・ 複雑な地質体モデルの表現が可能
- ・ ビジュアルで豊富な出力機能
- ・ 図面間での整合性がとれる
- ・ 操作性の高いシステム

出力図面



ユーザーインターフェースにより、拡がる適用分野

データベース 土量計算 構造物マッピング

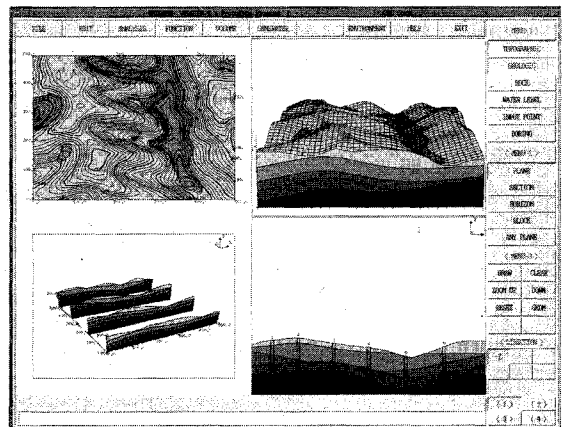
メッシュジェネレータ プレゼンテーション資料 その他

標準適応機種(EWS)

- ・ SONY-NEWSシリーズ*
 - ・ Sun-3, Sun4, Sun-SPARCシリーズ*
 - ・ HP9000/300, HP9000/800シリーズ*
- *ウィンドウシステムとしてX-Window System, Version 11 (X11)が必要です。
(標準以外のものにつきましても御相談に応じます)

- | | | |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------|
| (株)アイ・エヌ・イー
アイサワ工業(株) | (株)情報数理研究所
御新日本技術コンサルタント | 東電設計(株)
東電ソフトウェア(株) |
| アイドールエンジニアリング(株) | 住友建設(株) | 東洋地質調査(株) |
| アサヒ地水探査(株) | 住友建設(株) | 動力炉・核燃料開発事業団 |
| (株)エイトコンサルタント | 石油資源開発(株) | (株)中堀ソイルコーナー |
| 応用地質(株) | 全日本コンサルタント(株) | 西松建設(株) |
| 大阪ガス(株) | 大成建設(株) | 日本工営(株) |
| 大手開発(株) | 大豊建設(株) | 日本国土開発(株) |
| (株)大林組 | (株)ダイソク | (株)日本パブリック
エンジニアリング |
| (株)奥村組 | (株)ダイヤコンサルタント | (株)間組 |
| 川崎地質(株) | (株)竹中工務店 | (株)阪神コンサルタント |
| 基礎地盤コンサルタント(株) | 中央開発(株) | ヒロセ(株) |
| (株)熊谷組 | 地球科学総合研究所 | フジタ工業(株) |
| (株)建設技術研究所 | 中電技術コンサルタント(株) | (株)富士和ボーリング |
| 建設省 土木研究所 | 通産省 地質調査所 | 北光ジオラサーチ(株) |
| 五洋建設(株) | 電源開発(株) | 北海道開発コンサルタント(株) |
| 佐藤工業(株) | (株)電力中央研究所 | 三井建設(株) |
| サンコーコンサルタント(株) | 東急建設(株) | 三菱金属(株) |
| (株)四国総合研究所 | 東建地質調査(株) | 村本建設(株) |
| (株)四電技術コンサルタント | 東京電力(株) | 明治コンサルタント(株) |
| 清水建設(株) | | |

3次元地質解析システム研究会 参加メンバー



株式会社 **CRC** 総合研究所 西日本支社

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原

MATRAN EX

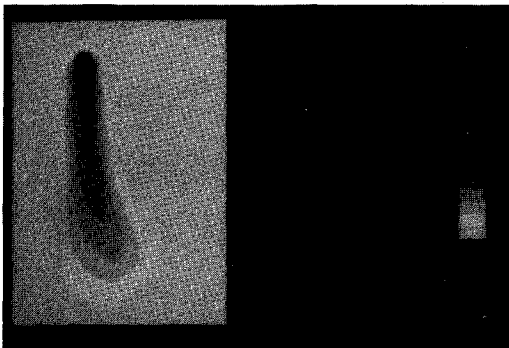
地下水汚染
の解析に!

塩水くさび
農薬汚染
廃棄物処理
その他

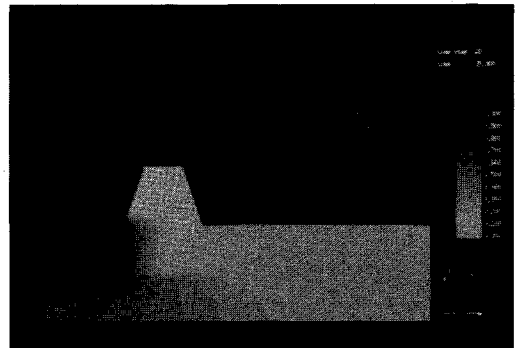
飽和・不飽和浸透解析に、移流分散・拡散を考慮。
EXTensiveな問題に適用可能なEXcellentなプログラム。

プログラムの特長

- 断面(EXV)および平面(EXH)の解析が可能
- 充実した解析機能
 - 定常・非定常解析 (断面、平面)
 - 軸対称解析 (断面)
 - 降雨 (断面、平面)
 - 揚水・注水 (断面、平面)
 - 浸出面 (断面)
 - 材質変更 (断面、平面)
 - 境界条件の変更 (断面、平面)
 - 水位・濃度の経時変化 (断面、平面)
- 豊富なグラフィック出力 (濃度コンター図、流速ベクトル図、濃度の時間推移グラフ 他)



濃度コンター図(平面解析例)



濃度コンター図(断面解析例)

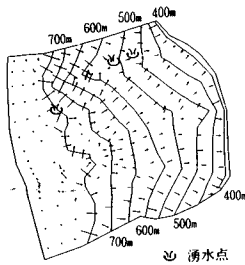
画面出力図

画面出力図

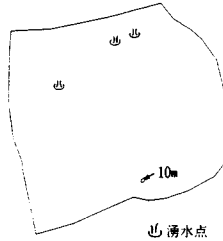
あの地下水解析ソフトがさらに機能充実!

UNISSE_{ユニセフ(V-2)}

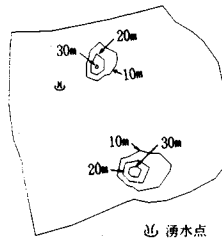
スピーディな同定・安価な解析



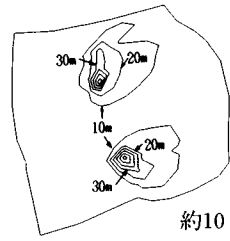
初期状態の地下水流



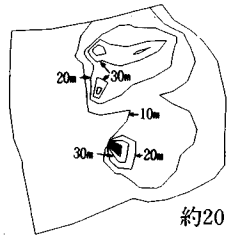
トンネル掘削開始直後



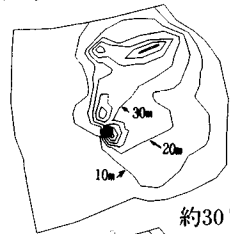
約4日後



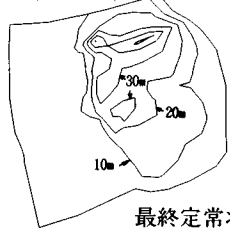
約10日後



約20日後



約30日後



最終定常状態

特長 ○有限要素法による準3次元解析を中心とした地下水の流れのトータルシステムです。

○観測水位と計算水位より、非線形最小二乗法を用いて帯水層定数の同定が可能です。(逆解析手法)

○建設・土木工事(掘削・ディープウェルその他)の解析に対応する多くの機能を備えています。

○メッシュ・ジュネレータにより、モデル(要素分割)作成の手間を軽減できます。

○凶化処理プログラムにより、結果の確認が容易に行えます。

適応機種: SUN, NEWS, HP,

IBM 30XX, FACOM-Mシリーズ 他

このシステムは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3

(06) 241-4121 営業担当: 岩崎

(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原

個別要素法プログラム **CRC**

未来設計企業

CRC-ITASCAが提供するカンドールモデル個別要素法(DEM)!!

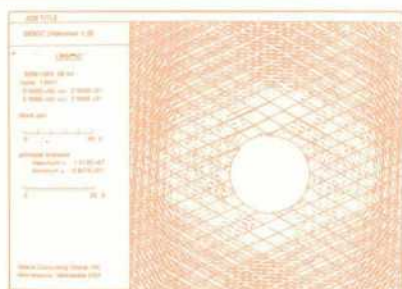
二次元個別要素法プログラム(ソースコード)

UDEEC

三次元個別要素法プログラム(ロードモジュール)

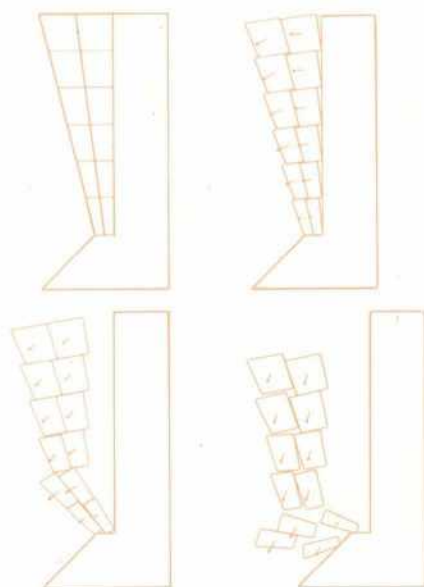
3DEEC

個別要素法とは、1971年にDr. P. Cundallが発表した不連続体に対する動的崩壊過程をシュミレートするための解析手法です。すなわち、岩盤をジョイントとブロックから構成される岩石ブロックの集合体と考え、個々のブロックの挙動を時々刻々に追跡し、全体挙動を解析しようとするものです。集合体としての岩盤や地盤が最終的に、安定状態となるのか、あるいは大変形するのか、崩壊していくのかなど、時間の経過に伴うモデル全体のブロックの動きや破壊の進行の様子を視覚的に追跡できます。現在、岩盤・地盤の崩落や安定性の解析など、不連続体力学の有力な解析手法となっています。



大深度地下掘削時の安定解析

- 岩盤の転倒・滑落解析
- 岩盤の掘削解析
- 不連続性岩盤の安定解析
- 地震応答解析
- 浸透-ブロック連成解析(UDEEC)
- 熱-ブロック連成解析(UDEEC)



岩盤斜面崩落シミュレーション

■販売条件

UDEEC・3DEEC

- ◆EWS, SUN-SPARC, HP, SONY-NEWS
- ◆IBM-PC/AT及び互換機
- ◆UDEECはソースコードで提供します。
- ◆3DEECはロードモジュールで提供します。

株式会社 **CRC** 総合研究所 西日本支社

〒541
大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06)241-4121 営業担当: 岩 崎