

Ⅲ - A105

兵庫県南部地震による地下構造物の破壊メカニズムの検討

大阪市立大学工学部 正会員 望月 秋利  
 NTT関西設備建設総合センター 正会員 奥村 一郎  
 同 正会員 鳥越 寿彦  
 大阪市立大学工学部 学生会員 ○金田 拓也

1. はじめに

兵庫県南部地震によって、土木構造物は甚大な被害を受けた。地上構造物被害よりも軽微といわれた地中構造物も例外ではない。本研究は、神戸市湊川地区、地下8mに設けられたNTTとう道(図1参照)の立坑部分にある3本の中梁の両側に、幅1mm程度で鉢巻き状に生じたクラックの発生原因について検討したものである(壁面から30cm~60cmの位置、図2参照)。被害は、他の構造物に比べれば必ずしも深刻なものでない。しかし破壊の原因が不明で、対策工を講じるためにも、破壊メカニズムを追求する必要があった。中梁の破壊形状を検討したところ、原因は何らかの理由で引張応力が、梁に働いたのではないかと推測された。しかし、常時土圧+（水圧）および地震時土圧+（水圧）では、一般にとう道に引張力が作用することは考えにくい。水平動によって仮に大きな水平力（負）が作用したとしても、とう道と土の間にすき間が生じ、負圧は生じにくいので、破壊原因を説明できない。その後の検討で、地震時上下動により地盤中に、「過剰間隙水圧が発生し、負の水圧が作用する」ことを見いだした。以下検討結果をまとめる。

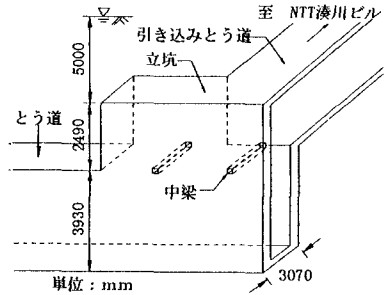


図1 とう道構造図

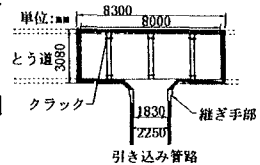


図2 とう道平面図

2. 検討方法と結果

図3は解析検討のフローを示したもので、以下これに従って説明する。文中[]の番号は、フロー図に示す番号と対応させた。

2.1 解析条件

湊川付近を構成する地盤のほとんどが礫で、一部に砂、粘土層を挟む。N値50以上を「洪積礫層」、N値50以下を「段丘層」とした。基盤面はN値が150以上のGL-26.3mの深さに選び、解析ではそこを「半無限境界」とした(〔2〕)。解析には2次元動的応答解析を用いた。地盤特性は、現場付近の調査資料がないので、神戸付近の5地点の資料をもとに、表1に示す実験式で $V_s$ 値を推定した(〔3〕)。表2は常時の土圧算定用の強度定数である。また地下水位を地表面とし、縦波速度( $V_p$ )は1500m/sとした。 $G/G_0$ 、 $h \sim \gamma$ 関係は今までの資料から標準的な値を設定した。コンクリートに関する材料定数は標準値を用いた。図4は解析地盤

表1  $V_s$ とN値、深度の関係式

砂礫	$V_s = B \times N^{0.01} \times H^{0.025}$	$B = 60.63 \times N^{0.440}$
砂	$V_s = B \times N^{0.01} \times H^{0.026}$	$B = 62.12 \times N^{0.427}$
粘土	$V_s = B \times N^{0.01} \times H^{0.027}$	$B = 96.94 \times N^{0.303}$

表2 強度定数(c,  $\phi$ )の算定

粘土層	西垣らの式 $c = N/3$
砂層	大垣の式 $\phi = 15 + \sqrt{(20N)}$
礫層	$c = 0.7 \text{ kgf/cm}^2$ , $\phi = 35^\circ$ N値が60以下の層に対してはcを比例配分で低減

また現場付近の推定地表加速度が500~600Galと推定されている。そこで解析用の入力波には、地表応答加速度として520Galを得た「神戸大NS波」および「UD波」を用いた(〔4〕)。また中梁に作用する応力計算のためには、中梁一本が受け持

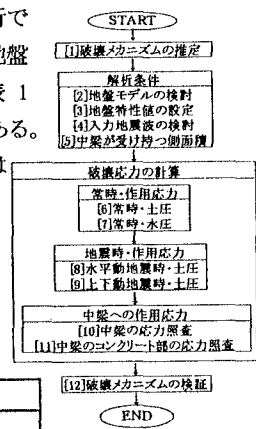
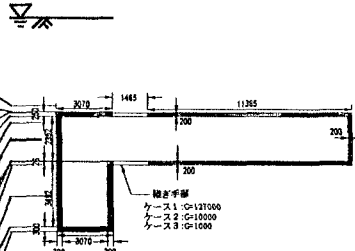


図3 解析フロー図

キーワード: 地中構造物、引張破壊、2次元応答解析、地震時上下動、過剰間隙水圧  
 連絡先(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138 TEL&FAX 06-605-2726)

つとう道側壁面積の推定が必要である([5])。受け持ち面積の高さをとう道の 1/2(3.23m)とし、横幅は他の中梁との中間までの幅(=2.47m)とした。したがって側面の土圧作用範囲はGL-6.31m~9.54mである。

深度(m)	材料	N値	V <sub>s</sub> (m/s)	γ <sub>s</sub> (tf/m <sup>3</sup> )
0.00				
1.50	砂	10	174	1.80
3.00		14	208	1.80
3.40	粘土/砂	5/18	165/235	1.54/1.80
4.70	砂	20	248	1.80
5.00		4/22	155/260	1.54/1.80
5.05	粘土/砂	5/24	167/270	1.55/1.80
5.25		5/24	167/270	1.55/1.80
5.50		6/25	177/276	1.56/1.80
6.40	砂	26	281	1.80
7.60		50	370	2.10
7.63		50	371	2.10
7.80		50	371	2.10
9.43		50	372	2.10
11.12	れき	50	374	2.10
11.42		80	463	2.10
14.71		60	408	2.10
18.00		80	467	2.10
21.30		60	412	2.10
23.90	砂	43	365	1.90
24.50	れき	65	430	2.10
26.30	砂/れき	29	306/415	1.80/2.10
	れき	150	627	2.10



### 2.2 破壊応力の計算

表3は解析条件で、解析ケースは、とう道部と引き込み部の継ぎ手剛性の異なる3種類である(図4参照)。ケース1は剛結、ケース2は摩擦継手、ケース3はゴム伸縮継手を想定したものである(実際にはゴム製の伸縮継ぎ手が用いられている)。

常時土圧は、①ランゲン主働土圧、②静止土圧( $k_h=0.2$ )の2種類で計算した([6])。これに水圧([7])を加えたものが、常時作用力(正圧)である。地震時作用力は、まず水平動(NS波)による負圧を考えた([8])。この応力はとう道壁面に接する土要素の最大水平力をそれとした。次いで上下動(UD波)による負圧の発生を考えた([9])。

図4 解析地盤の材料定数ととう道の解析断面

表3 解析条件

項目	解析方法	入力波(Gal)	解析周波数(Hz)	継ぎ手剛性率(kgf/cm <sup>2</sup> )
内	FLUSH	神大NS:A <sub>max</sub> =270	NS:10	ケース1:127,000
要素数:453		神大UD:A <sub>max</sub> =453	UD:10	ケース2:10,000
容	接点数:512			ケース3:1,000

飽和地盤の場合、上下動による地盤内の応力は圧密の時間的な余裕がないので、すべて「過剰間隙水圧(正、負の)」に変換される。この力はとう道壁面(南、北面)に向き合う形で作用するため、中梁に引張り方向の力と圧縮方向の力が交互に働く。ここでその最大負圧を考え、表4にこれらを合わせた、「中梁に作用する合応力」を示した([10])。表の右端欄には、鉄筋とコンクリートの応力分担比を求めた応力を示した([11])。中梁・コンクリート部に作用する応力は土圧計算方式で約 14 kgf/cm<sup>2</sup> 違い、解析境界条件で、最大 9 kgf/cm<sup>2</sup> の違いが生じる。しかし、いずれも結論を変える

るほどには大きくない。以下は最もあり得た場合と想定している「ケース3」の結果を中心に、破壊メカニズムを検討した結果をまとめる。

### 2.3 破壊メカニズムの検討

壁面に働く応力は、常時土圧・水圧、水平地震動による土圧、上下地震動による水圧(土圧)である。解析結果によると、常時土圧・水圧と水平動による土圧(負)がほぼ同じ大きさで、上下動によって生じた間隙水圧(負圧)分がほぼ中梁の伸張応力になっている。したがって、水平地震動と上下地震動がある特定時間に、丁度、

「水平動および上下道による応力が同時に負圧」という組み合わせが生じ、その時点でコンクリートに引張破壊が生じた、と考えられる。またコンクリートの引張り強度( $\sigma_{cr}$ )を $-28\text{kgf/cm}^2$ とすると、その時の安全率( $=\sigma/\sigma_{cr}$ )は0.47~0.76である。最大上下応答加速度は430Galであったので、安全率=1以下の加速度、すなわち200~330Gal以上の波は数波存在していたことになる。したがってこれらの波をくり返し受けて、1mm程度のクラックが残留したものであろう。従来埋設構造物の土圧は正直しか考慮しないが、今回の検討を通して、地震時には負圧も作用することが見いだされた。

### 謝辞

本解析は阪神・淡路大震災調査研究委員会の活動の一環として実施したもので、資料の提供を受けた。地震記録は関西地震協会から提供を受けた。また解析で用いた FLUSH は(株)地震工学研究所から提供を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

表4 中梁に作用する応力

ケース	土圧式	中梁にかかる応力 <sup>※</sup>				中梁コンクリート部の応力( $\sigma_c$ )
		常時		地震時		
1	主働土圧	0.4	98.6	98.0	-70.7	-69.7
	静止: $K_h=0.2$	16.1	"	"	"	-53.9
2	主働土圧	0.4	"	-90.4	"	-62.1
	静止: $K_h=0.2$	16.1	"	"	"	-46.4
3	主働土圧	0.4	"	-87.4	"	-59.1
	静止: $K_h=0.2$	16.1	"	"	"	-43.4

※ 単位はkgf/cm<sup>2</sup>