

パイプラインの地震時応力のこい減法

電力中央研究所 正員 ○桜井彰雄 栗原千鶴子 正員 高橋 忠

1 パイプラインの耐震上の問題点

パイプラインは地表面に沿って掘りも有することが、耐震検討上、地上構造物と大きく異なる点であり、地震時における地盤変形 — 地震時土の歪 — を視点として検討すべきものである。過去の震害例よりその原因を分類すると、(i) 地震波動伝播に伴う地盤の歪 (ii) 地盤の流動化・Compaction (iii) 斜面の滑動・他構造物の影響 (iv) 地震に伴う火災 (v) 外国では断層などによるものがみられる。以下では、(i)の原因によるパイプ応力を推定し、その地震対策を考察しようとするものであるが、他の原因によるものについても、その対策は同様となる。

2 パイプラインの地震時応力の推定方法

パイプラインの地震時挙動および応力推定法についてはすでに報告してあるので [1~3]、その詳細は省略するが、取扱の基本的な考え方を示せば次のようである。

(1) パイプラインの応力は、地震時土の歪と密接な関係がある。

地中構造物は、地上構造物の反力を受けない限り、周囲土砂の剛性と減衰性のために動的増幅を考へる必要はなく、周囲地盤の挙動のみ知れば構造物の挙動を知ることができ、思考の節約が出来る。地上パイプラインでは動的増幅も考慮しなければならぬこともありますが、問題を明確にするためには埋設パイプラインを考へる方が便利である。この場合は、慣性力的な取扱が不要であり、地震時における地盤変形 — 土の歪 — を視点として考察すればよい。さらに、第一近似として構造物が地盤と同じ挙動をすと考へるならば、パイプライン応力は地震時における土の歪と密接な関係があることがわかる。その後、管路剛性・周囲地盤の拘束力の性質によつて修正を加えればよい。

(2) 地震時における土の歪は、三種の原因に大別できる。

地震波動伝播に伴う地盤変形 — 土の歪 — は、地震波に含まれる各々の位相に対し、(i) 深さ方向の地震波動伝播による歪 (せん断波) (ii) 地表面に沿う地震波動伝播による歪 (表面波) (iii) 地盤の不均一により生ずる歪 に区別して考察する必要がある。

(i) による土の歪 (せん断歪) は、次式で推定できる [4]。

$$\gamma = V/v \quad (1) \quad v: \text{地震波 (せん断波) の伝播速度} \quad V: \text{地震波の速度振幅}$$

多層地盤の具体的な取扱いについては文献 [5] に示した。しかし、水平に敷設されるパイプラインでは、この歪はあまり問題にならない。

(ii) についても、パイプラインのように地震波の波長に比べ管径の小さな構造では、地盤変形のうち管軸方向の横波的成分のみによつて応力は支配されるので問題は簡明となり、(1) 式と同様の関係：

$$\epsilon = V/v \quad (2) \quad v: \text{地震波 (表面波) の伝播速度} \quad V: \text{地震波の速度振幅}$$

トネルなど波長に比べ管径の大きな管路では、横波的成分による歪も考慮する必要があり、 v は表面波の伝播速度であるが、その地盤のせん断波の速度 v_s と基に推定することができ、なお Love 波の速度は分散性であり、2 周期に関係するが、最近の表面波の研究によれば [6]、せん断波

の多重反射理論で与えられる卓越周期 $T_0 = 4H/v_0$ (H : 表層の厚さ) に、数値的にはほぼ等しい周期で Love 波も卓越し、このときに変位振中も大きいことが示されている。図1に実験および計算例を示したが、卓越周期 $T = (4 \times 7.5) / (115) = 0.26 \text{ sec}$ の Love 波の速度は表層の v_{s1} 、下層の v_{s2} の平均値 $v_L = (v_{s1} + v_{s2}) / 2$ に近いことを指摘しておく。なお、後の考察のために (2) 式と卓越周期との関係より与えられる次式によつて土の歪より見た地盤の軟弱度を定める。

$$H/v^2 = \pi \epsilon_a / 2nA \quad (3)$$

こゝに、 ϵ_a : 構造物の許容歪、 $n = \epsilon_a / \epsilon$ 土の歪 ϵ の構造物に伝達される割合である。これを図2に示した。

(iii) 地震時土の歪は、加速度最大の時点では生じないことは (1)(2) 式よりわかるが、地下に傾斜層があるような不均一な地盤では、せん断波の伝播時でも平面的に土の歪が生ずる。このような例も図3に示したが、傾斜角の大きいほど・表層が厚いほど・下層との波動インピーダンスに顕著な差があるほど歪が大きくなることがわかる。

以上のようにして知れる土の歪を第一近似とし、構造に応じ適宜修正を加えればよい。埋設パイプラインの場合には、管軸方向には摩擦カシカ働かないとあるなどである。

3 パイプ応力の二減について

(埋設パイプライン)

通常のパイプラインでは、地震時土の歪を基にし、管軸方向には摩擦限界までしか力が伝達しないとして修正を行わないと、過去の震害例を十分説明できない。この場合、波長に比べて十分長い直管路には、次式で与えられる程度の応力 σ が生ずることになる。

$$\sigma = E \epsilon = C_0 L / 4A_0 = C_0 v T / 4A_0 \quad (4)$$

こゝに、 C_0 : 管路単位長さ当りの摩擦力、 A_0 : 管路断面積である。管路中に含まれる曲管・マンホールなどの影響をみるため数値実験を行った結果を、紙数の関係で、結論のみ述べれば次のようである。

(i) 図4に示す例は、250 A 鋼管 (ϕ 字管路) の曲管部応力と中心角の関係であるが、中心角が小さいと曲管部応力は (4) 式による値 (300 kg/cm^2) の3倍以上にもなる。中心角は、なるべく大きく 90° を標準とする。

(ii) 曲率半径はなるべく大きくとる (例では 10 m 以上)。(iii) このようにすれば、曲管部応力は (4) 式より減少するが、接続する直管部へ応力

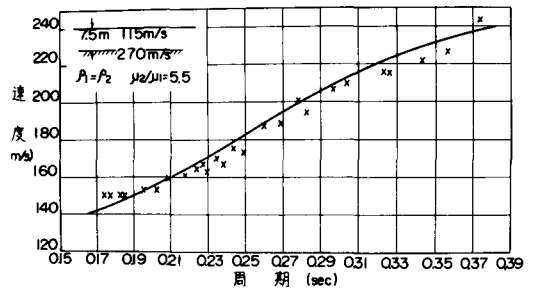


図 1

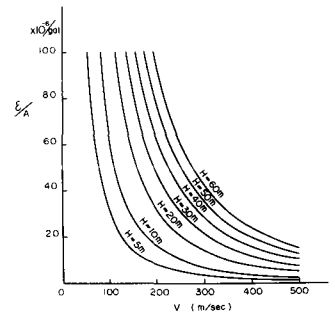


図 2

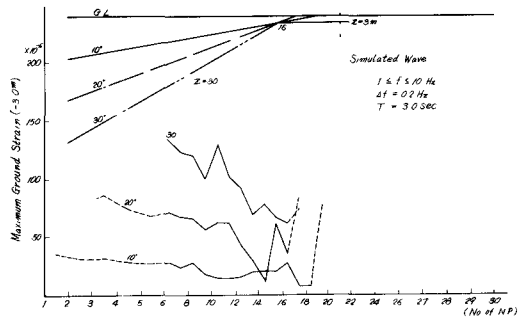


図 3

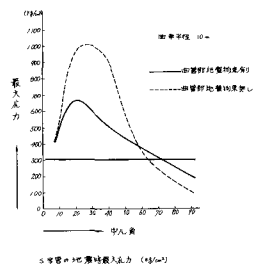


図 4

のしめ寄せがみられる。(iv) 曲管部地盤拘束をなくすと(熱応力の減少には役立つが)、曲管部の変位吸収能力のため曲管部応力は減少するが(図4の点線)直管部に(4)式の2倍程度の応力が生じる。(v) 同様の理由により、曲管部にたわみ性継手を設けると、直管部に応力のしめ寄せがみられる。(vi) さらに直管部にたわみ性継手を設けるとたわみ性継手の絶縁能力が不良であるとかえ、2倍程度の増大を招くことがある。(vii) たわみ性継手は、したがって、主要な波長に対しかなり密に設けないと応力減少にはならない。(viii) たわみ性継手の変位吸収能力は、予想される地盤変形以上には必要である。(ix) マンホール・曲管部などによつて、一般には、(4)式の3倍程度の応力が生ずるものと考えられる。(x) マンホールなど他構造とは構造的に絶縁切れる。(xi) 管路応力に対する地盤の拘束力の影響は、管路横方向拘束の影響は少なく、管軸方向の摩擦力の変化に鋭敏である。このため、摩擦力を減少させる工夫が最大の応力減少法である。重要なパイプラインで、地震時土の歪の大きは地盤を通過する場合には、共同溝・銷管(トラフ = 埋管)の採用などは最もよい方法である。図5は原油送油パイプラインの場合であるが、保温層がまた耐震性向上のためにも役立つといえる(さらに、外管が塩ビ管であったり、ガラスト管になる)。

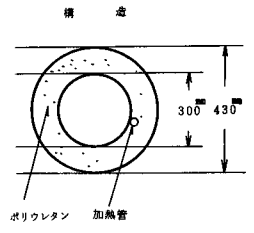


図5

(地上パイプライン)

地上パイプラインの場合も埋設パイプラインの場合と同様であるが、この場合には慣性力的な影響も考えなければならぬ場合があるとして、多少異った考察が必要である。地上パイプラインで、コンクリートブロックのサドル上に配管してある場合を考えると、軸方向では動的増中は考えなくともよいから、サドル上で完全拘束してあると、およそ次の応力が生ずる。

$$\sigma = E\epsilon = \frac{E}{2\lambda} \frac{V}{U} \left[1 - \sin \frac{2\pi}{4} (1 + 4\lambda) \right] \quad (5) \quad \lambda = l/L \quad l: \text{サドル}$$

しかし、これは拘束しない方がよいことは当然である。この場合曲管部の中心角が小さいと応力集中を招く(図4の点線参考)。

地上パイプラインの場合、パイプの破損以前にアンカーが破損しパイプラインを止めて機能障害にならないため(新潟地震・新潟火力送水管)を考慮すると、パイプ破損以前にアンカーが破損するように設計することが、応力減少法すなわち地震対策として有効と思われ。地盤変形のうち、横波的成分により生ずる応力は、およそ

$$\sigma = 4\pi^2 E \gamma_0 \frac{a_0}{L} = E \frac{A}{V} \gamma_0 \quad (6)$$

a_0 : 変位振幅 A : 加速度 γ_0 : 管路外半径である。このときの支点反力 V は、およそ、 $V \approx 12EI (1/L^2 + \lambda/L^2) a_0$ 。
 $p = 2\pi/T$ となるから、許容応力 σ_a に対してどの程度の地震子で耐えられるか、アンカーが破損するまでの地震力はどの程度かは知るこゝが出来る。しかし、一般のパイプラインでは、多くの地震に対して(6)式によつて与えられる応力は許容応力以下である。サドル上で回転が固定されたいような場合でも

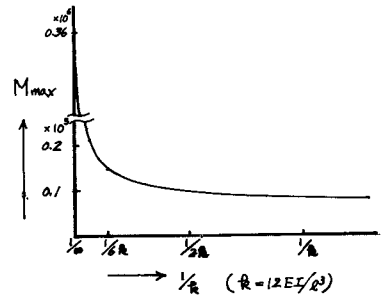


図6

、許容工小サドール間の相対変位 δa は $\delta a = \theta a l^2 / 6 E I_0$ 、また $\delta a \approx a_0 \lambda$ であるから、許容工小サる地震(変位振幅 a_0)を知ることが出来る(300 A鋼管、 $v = 140 \text{ m/sec}$ $T = 1.35 \text{ sec}$ $l = 5 \text{ m}$ 、 $\theta a = 2400 \text{ kg/cm}^2$ λ は $a_0 \approx 18 \text{ cm}$ 、 400 gal である)。曲管等を含む一般的な管路に適用すれば、多入力多自由度系としての計算を行わなければならぬ[7]。この場合の支点反力 f_B は次式で求められる。

$$f_B = M_{BB} \ddot{x}_B + C_{BA} \dot{x}_A + C_{BB} \dot{x}_B + K_{BA} x_A + K_{BB} x_B \quad (7)$$

こゝに、 x_B は各支点での入力変位である。

通常の送油パイプライン程度では、必要はないが、大口径管路または高架連続橋などでは、次のような応力への減法も考えられよう。このような例では、地盤変形による応力が優越するから、支承または橋脚を弾性的にして静的な応力を減らせ、このため増加する動的な応力との和を減らす方法である。図6は300 A鋼管送油パイプラインの例であり、このような例としては不適であるが、管路と同一材・同寸パンクの剛性 ($k = 12EI/l^3$) をバウメーターとして求めたものである。この場合動的応力はあまりなく ($f_0 = 20 \text{ Hz}$)、6%程度の応力への減かかなりみられる。

4 工学としての地震対策

以上、パイプラインを例にして長大構造物の耐震性を考察してみた。以上の所論から、このような構造物は地盤変形による耐震性が定まりものであることがわかる。このような構造物の、地盤変形による応力を求め、これに耐えるような剛性をもたせると言う考え方もありうるが、外力も剛性増加に伴って増大すること、地盤変形そのもの・周囲工場の動的抵抗力など不明な点の多いものに立脚した設計になることは留意しなければならぬ。著者らは、このような構造物に対しては狭い意味の耐震設計は成立しないものとして免震的な考察を加えたが、パイプラインのように多様地盤に存在するの一部でも破損可能な機能重要構造物では、構造物の設計と同時に被災後の地震対策をも考慮しておく必要がある。

参考文献

- [1] 桜井・高橋 堤他「松代地震を利用した地中電線路埋設管の耐震研究」 電研技研報告 67058
- [2] A. Sakurai and T. Takahashi 「Dynamic Stresses of Underground Pipe Lines during Earthquakes」 4 WCEE 1969
- [3] 桜井・高橋・栗原・矢島「地震時土の至り良き埋設パイプラインの耐震性」 電研技研報告 No 69087
- [4] 桜井・栗原「H原子力発電所取水トンネルの耐震検討(仮題)」 電研技研報告(準備中)
- [5] 桜井・高橋 堤 佐藤「松代地震観測に基づく地盤震動特性の検討」 電研技研報告 No 69026
おとゝ 土木学会論文報告集 186号
- [6] 佐藤孝雄「軟質地盤と伝播する弾性波について」 電研技研報告 No 69045
- [7] 桜井・高橋 栗原・矢島「長大構造物の地震応答解析について一考察」 Proc 3rd Japan Earth. Eng. Symposium 1970