

(81) 継手管路下管部の地震応答シミュレーション

神戸大学 正員 高田 至郎 大阪ガス 橋本 敏弘 大阪ガス 堀 康二郎

1. まえがき

日本におけるガス導管は、本管(口径100mm以上)については、溶接場合による鋼管と、継手部により機械的に接合された鋳鉄管に分類される。これらの耐震性については、従来から多くの研究成果が発表されておられ、著者らも管と地盤のすべり挙動を考慮した埋設管直管部の耐震解析について既に報告している^{1), 2)}。一方、最近になって、地震被害事例や各種実験結果等から、T字部や曲管部などの異形部の耐震性評価について着目されておられ、これらの間からの研究もあつ、日本では、スリヤを考慮した耐震設計法(「ガス導管耐震設計指針」³⁾)も、1982年に発表されている。しかしながら、鋳鉄管路異形部については、継手の極端な機械的特性の複雑さ、及び、異形部の解析手法の困難さのため、その耐震性については、十分に解明されているとは言えない。

本報では、対象鋳鉄管として、引抜片及び圧縮余裕があり、かつ、割断防止機能を有するガスマカニカル(GM, GMII)継手管路と、また、異形部として地震時の影響が最も大きいT字部を想定し、地震入力、地盤特性は、上記「ガス導管耐震設計指針」(以下「指針」)の考へ方を用いて、鋳鉄管路T字部の地震応答シミュレーションを行い、その結果について検討した。なお、本シミュレーションにおいては、著者らの開発したERAUL(Earthquake Response Analysis of Underground Lifelines)プログラムを用いた。

2. 解析モデルと手法

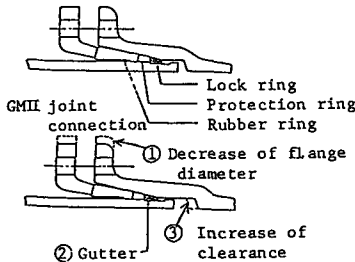
(1) 管の種別と特性

ガス送給用導管として、最もよく使われている口径150mmの鋳鉄管を対象とする。また、解析結果を比較するために、同口径の鋼管についてもその対象とした。Table 1に鋳鉄管、鋼管の諸元を示す。Fig. 1には、GM、GMII継手の概略図を示す。GM継手は、引抜片余裕を考慮して製作された一種の耐震継手と、割断防止機能を備えている。ロッキング、保護リング、ゴム輪が充てん材として使用され、ホルトナットにより締め付けられている。GMII継手は、GM継手の圧縮側変位吸収能力を改良したものであり、引抜片及び曲げ特性は同一である。両継手の機械的特性をFig. 2に示す。また、引抜片、圧縮特性の発生メカニズムを、Fig. 3, 4に示す。

Table 1. Dimensions of pipes.

	Steel (SGP)	Ductile-iron (FCD)
Diameter (cm)	16.52	16.9
Thickness (cm)	0.5	0.85
Young's modulus E (kgf/mm ²)	2.1 x 10 ⁴	1.7 x 10 ⁴
Tensile Strength σ_B (kgf/mm ²)	30	42
Yield Strength σ_Y (kgf/mm ²)	18	26
Elongation ϵ (%)	30	10

GM joint connection



(note) ①, ② and ③, are improvement points.

Fig. 1. Sketch of cross-sections of GM and GMII joints.

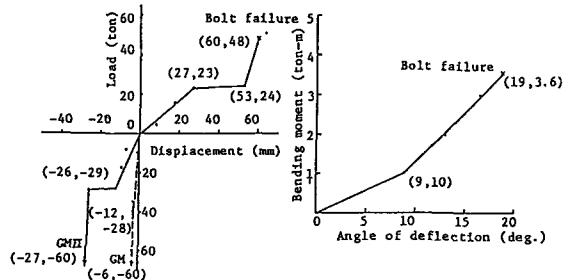


Fig. 2. Mechanical behaviors of GM and GMII joint (150mm).

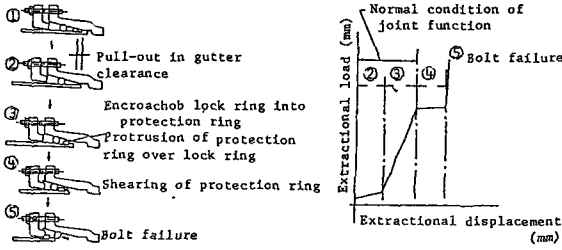


Fig. 3. Mechanism of extractional displacement absorption of GM and GM II joints.

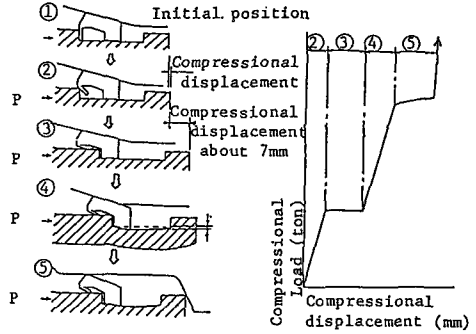


Fig. 4. Mechanism of compressional displacement absorption of GMII joint.

(2) 地盤の特性

解析に用いた地盤の特性は、Fig. 5に示すように管軸方向は完全弾塑性(はね係数 k_1 、限界せん断応力 τ_{cr})、管軸垂直方向は弾性(はね係数 k_2)とし、 k_1 、 k_2 、 τ_{cr} の値は「挿針」の値を採用した。すなわち、 $k_1 = 0.6 \text{ kg/cm}^2$ 、 $k_2 = \pi \cdot k_1 = 1.9 \text{ kg/cm}^2$ 、また、 τ_{cr} は、鋼管 0.1 kg/cm^2 、鉄線管 0.1 の純手張出し部心の拘束力の増大を考慮して 0.3 kg/cm^2 とした。

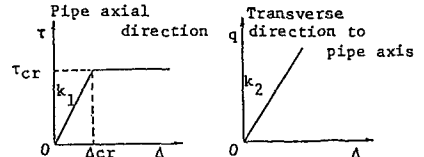


Fig. 5. Ground spring constant.

(3) 地震入力

地震波は、埋設管の管軸方向に入射し、その進行方向の垂直成分をもつ90度の横波(波長 L 、振幅 U_n の正弦波)と考へる。その地震波については、「挿針」の地震波を用いた。 L 、 U_n は式(1)より求める。

$$L = V \cdot T$$

$$U_n = \frac{2}{\pi} \cdot T \cdot S_v \cdot K_0 \cdot \cos \frac{\pi z}{2H}$$

T と V 、 T と S_v の関係はFig. 6、7に示す。また、 T と U_n の関係はFig. 8に示す。

また、直管部の管心より管と地盤の相対変位 Δ のT字部に集中することから、相対変位 Δ が最大時にT字部の管のみも最大となる。このことから、本解析では、 Δ をT字部の管路系に対して Δ が最大となる地盤の固有周期 T で代表させて検討した(Fig. 9)。

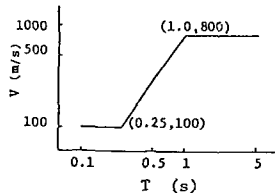


Fig. 6. Apparent propagation velocity of seismic motion.

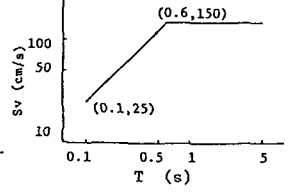


Fig. 7. Velocity response spectrum per unit seismic intensity at base rock.

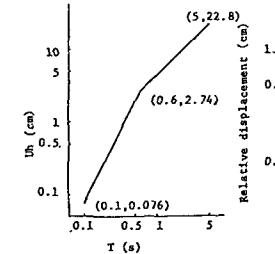


Fig. 8. Displacement amplitude of the surface layer.

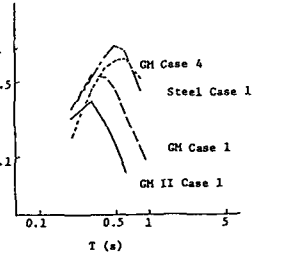


Fig. 9. Relative displacement.

(4) 解析モデル

解析に用いたERAVLプログラムは、位置2トリック法により埋設管路の非線形地震応答を解析し得るもので、換算静的な手法に基づいている⁴⁾。埋設管路-地盤の振動系モデルはFig. 10に示す。解析モデルは、T字管を含む管路系の枝管(Fig. 12a Element(1))例から、管軸方向に運動変位をもち、同一方向に進行する波が入射する場合を考へ、地震波の位相差の影響をとり入れた、Fig. 11 a 4-スプリングで解析を行った。

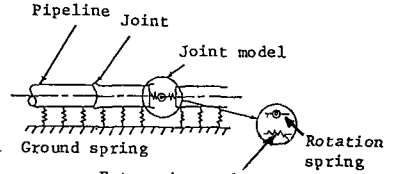


Fig. 10. Analytical model.

(5) 解析手法

T字部の解析手法をCase 1, 2として述べる。Fig. 12 a 2とく、地震動によりT字部は①のように変形する。すなわち、主管(Element(4))は分岐部より離れ Δ と Δ の中心に、地盤と同一の動きをするが、分岐部では、枝管の拘束により地盤の動きに追随しない。この挙動は②、③に示すように二つの梁の挙動に分解できる。つまり、

枝管の拘束による主管の曲げ変形 Δ' と、枝管自身の変形 Δ_s との和が地盤変位 U_h に対応する。この際、枝管の端部には2Pの軸力が、主管の端部にはPのせん断力が作用している。すなわち、 $\Delta' + \Delta_s = U_h$ なるPを求めるとともに、T字部全体の変位、たわみ、軸力、曲げモーメントが求められる。

3. T字部の地震応答解析

(1) 継手を含む鋳鉄管路の地震応答解析

鋳鉄管T字部の解析結果を表2に、管路方向のひずみ分布をFig.13~16に示す。これらの結果より以下のことがわかる。

① T字管を含むGM、GMII鋳鉄管路では、直管部で生じる管と地盤の相対変位を継手中心部で吸収しようとする傾向が生ずる。T字部の影響は非常に小さい。すなわち、T字部のひずみは直管部より小さく、ひずみの最大値はT字部から離れた直管部で生じる(地盤ひずみの最大値を発生する位置)。(しかし、その値も管の耐力 G_y (Table 1)より、十分に小さいことより)、GM、GMII鋳鉄管路では、継手の効果的延滞特性により地盤変位に追随シ、それによる管ひずみ軽減効果により十分な安全性を有しているといえる。

② Case1,4は、T字部付近で管路が圧縮ひずみを受けた場合であり、Case2,3は引張ひずみの場合であるが、圧縮ひずみを受けた場合の方が管ひずみが大きくなっている。これは、継手の引張特性が圧縮特性に比して、荷重に対する変位吸収能力が大きいことによる(Fig.2)。また、継手の圧縮特性の効果に着目すると、

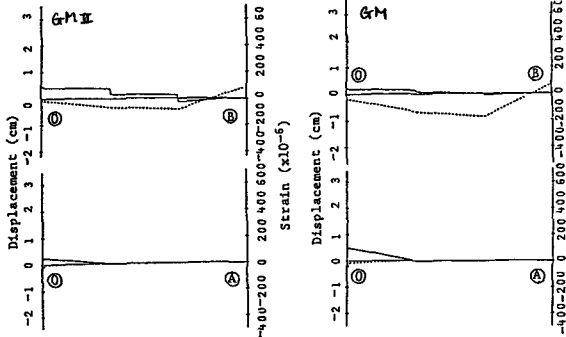


Fig.13. Distribution of strain and displacement Case 1 Ductile-iron pipeline.

Table 2. Seismic response analytical results of ductile-iron pipeline

Case No.	Type of joint	Period time T (s)	Displacement U_h (cm)	Wave-length L (cm)	Extension Δ_s (cm)	Deflection Δ' (cm)	Axial force P (kgf)	Bending moment M (kgf-cm)	T-shaped portion		Straight portion	
									ϵ_1	σ_1 (kgf/cm ²)	ϵ_2	σ_2 (kgf/cm ²)
Case 1	GM	0.3	0.68	39	0.21	0.48	2670	-2.86x10 ⁴	-103	-175	-175	-298
	GMII	0.3	0.68	39	0.46	0.23	1260	-1.35x10 ⁴	-48	-82	-85	-145
Case 2	GM, GMII	0.3	0.68	39	-0.58	-0.11	-601	6.43x10 ³	23	39	43	73
Case 3	GM, GMII	0.5	1.90	141	0.18	0.18	-1010	-1.08x10 ⁴	-39	-66	-108	-184
Case 4	GM	0.6	2.74	223	-0.69	-0.69	3830	4.11x10 ⁴	148	252	-277	-471
	GMII	0.5	1.90	141	-0.33	-0.33	1820	1.95x10 ⁴	70	119	-83	-141

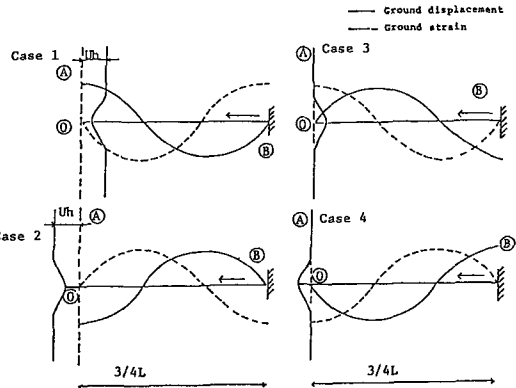


Fig.11. Analytical model (+ incident direction of seismic wave).

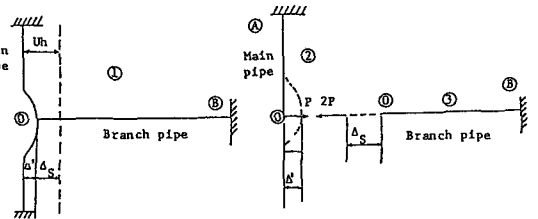


Fig.12. Analytical procedure.

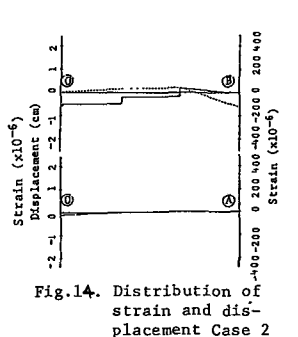


Fig.14. Distribution of strain and displacement Case 2 Ductile-iron pipeline.

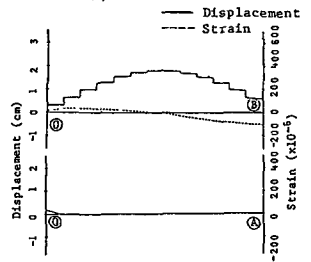
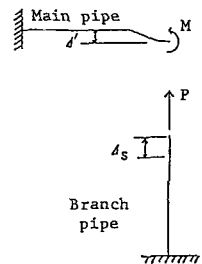


Fig.15. Distribution of strain and displacement Case 3 Ductile-iron pipeline.



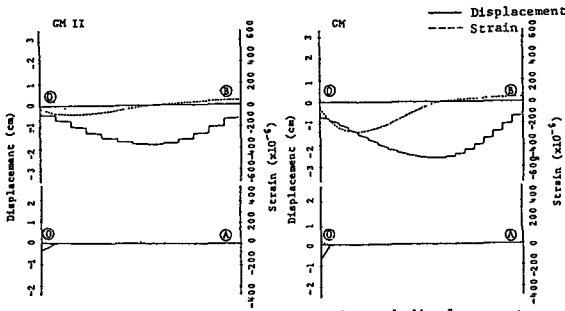


Fig. 16. Distribution of strain and displacement Case 4 Ductile-iron pipeline.

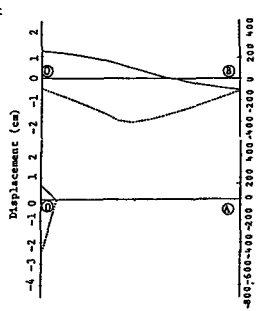


Fig. 17. Distribution of strain and displacement Case 1 Steel pipeline.

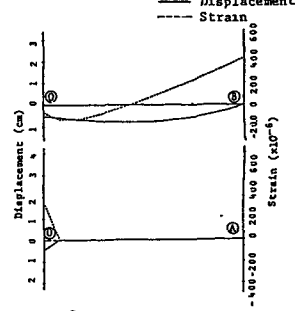


Fig. 18. Distribution of strain and displacement Case 4 Steel pipeline.

Case1と4においてGMとGMII絶手とくらへた場合、

GMIIの管のひずみが管路全長にわたって半減している。すなわち、絶手の瓦筋合流の増大が、管路全体のひずみレベルの軽減に非常に有効であることがわかる。

②鋼管路の地震応答解析

鋼管路の解析結果をTable 3に、管路軸方向のひずみ、変化分布をFig. 17, 18に示す。鋼管路は、管体の剛性が地盤の土に比して比較的大きいため、管と地盤のすべりにより発生した相對変位がT字部に集中し、その相對変位と主管の曲げ変形と吸収していることがわかる。この結果として、最大管ひずみが主管のT字部で生じており、Case1と4から、T字部に地震波の腹がくる場合の方が管ひずみばかり大きくならず、"鉛針"の向きと一致している。

Table 3. Seismic response analytical results

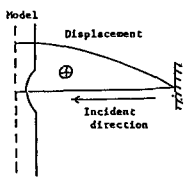
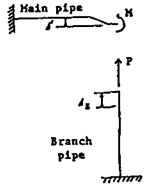
Case No.	Period time T (s)	Displacement U _h (cm)	Wave-length L (m)	Extension Δg (cm)	Deflection Δ' (cm)	Axial force P (kgf)	Bending moment M (kgf-cm)	T-shaped portion		Straight portion	
								ε ₁ (x10 ⁻⁵)	σ ₁ (kgf/cm ²)	ε ₂ (x10 ⁻⁶)	σ ₂ (kgf/cm ²)
Case 1	0.5	1.90	141	1.25	0.62	4930	-1.50x10 ⁵	729	1530	-405	-851
Case 4	0.5	1.90	141	-0.45	-0.45	3420	1.04x10 ⁵	506	1060	552	1160

次に、「鉛針」のT字部の計算値と、本解析結果とくらへる(Case1に対応)と、Table 4となり、むしろ一致していることがわかる。

Table 4. Comparison of the Recommended Standards and present paper, in steel pipe 150 mm

	Present paper	The Standards
Axial force P(kgf)	6,280	6,540
Bending moment M(kgf-cm)	1.91 x 10 ⁵	1.99 x 10 ⁵
Nominal strain ε(x10 ⁶)	930	969

(T = 0.5 sec)



③鋼鉄管路と鋼管路の解析結果の比較

絶手を有する鋼鉄管路と、連続している一体構造の鋼管路の地震応答解析結果を比較し、次のことについて述べる。

- i) 管路に発生するひずみは、絶手(GM, GMII)を有する鋼鉄管路の方が、鋼管路より小さい(例えば、Case1のGMIIと鋼管は、直管部でひずみ=4、T字部でひずみ=50程度)。
- ii) 鋼管路に発生するひずみは、T字部の曲げひずみに集中しているが、鋼鉄管路は曲げひずみに非常に小さい。

以上のことは、鋼鉄管路は、絶手の大きな変位吸収能力により、管と地盤の相對変位を絶手部で効果的に吸収し、このことにより、T字部の影響が非常に小さくなることによる。一方、鋼管路は、一体構造管路であり、管剛性も比較的大きいため、鋼鉄管路に比して、相対的に管路のひずみは大きい。材料自身の可成り大なる延性により、その変位を吸収しているといえる。

参考文献

1) Shiro Takada, Dynamic Behavior of Underground Pipelines 2) Shiro Takada, Sadao Nagao, Efficiency of Joint Parts for Seismic Strength of Buried Pipelines, Proceedings of the 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1978 3) 日本ガス協会, ガス導管耐震設計指針, 1982 4) 高田至郎他, PVC管の地震応答シミュレーション, 日本下水道協会誌, 1980