



A Study on the Strain Assessment of Buried Pipelines Located above the Concealed Fault

潘, 越

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2025-03-25

(Date of Publication)

2027-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9197号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496478>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 _____ 潘 越 _____

専 攻 _____ 市民工学 _____

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

A Study on the Strain Assessment of Buried Pipelines

Located above the Concealed Fault

伏在断層上に位置する埋設管のひずみ評価に関する研究

指導教員 _____ 鋤田 泰子 _____

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

Buried pipelines for water, gas, and fuel often cross faults in regions with frequent fault activity due to their wide coverage requirements. Since the 1980s, seismic design and earthquake mitigation measures for pipelines crossing faults have been crucial topics in earthquake engineering. However, despite advancements, significant damage to pipelines has been observed in earthquakes like the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan, the 1999 Kocaeli Earthquake in Turkey, and the 2018 Kumamoto Earthquake in Japan. Damage from fault displacement is severe, requiring prolonged recovery efforts. Ideally, fault zones would be avoided during planning, but constructing linear infrastructure such as pipelines often makes this infeasible. Moreover, fault displacements during earthquakes are highly uncertain. While deterministic approaches have been used to consider fault displacement in design, small earthquakes or deep faults may result in displacements that do not reach the surface. Assessing the seismic risk posed by concealed faults is therefore necessary, particularly as shallow-buried pipelines (about 1m) are subject to complex soil-pipeline interactions under significant fault-induced deformation, requiring experimental validation of analytical models.

This study focuses on the impact of concealed faults on buried pipelines by examining ground displacement and strain induced by fault movement. Fault parameters are used to systematically evaluate strains, and finite element methods (FEM) with experimentally validated parameters are employed to analyze the dynamic interaction between pipelines and soil.

In Chapters 2 and 3, strains caused by concealed fault movements are analyzed using dislocation elasticity theory, which has been widely applied in fault research since the 1950s. Ground displacement derived from the theory is used to calculate pipeline strain in specific directions. The study considers strike-slip and reverse fault movements and examines the effect of pipeline-fault intersection angles on strain distribution. Maximum strain locations are identified for different fault types and angles. Regression analysis of parameters such as fault types, intersection angles, and fault depth yields an estimation formula for maximum pipeline strain. This formula allows strain prediction using fault parameters and aids in determining whether fault mitigation measures are necessary.

The 2023 Turkey-Syria earthquake is used as a case study to validate the applicability of the dislocation elasticity theory. By using observed fault parameters provided by researchers, ground displacement along the fault direction is calculated and compared with actual displacement data. The comparison demonstrates the reliability of the theory for estimating ground displacement and its applicability in assessing pipeline strain in

concealed fault regions.

Chapters 4 and 5 refine the accuracy of response analysis for pipelines crossing faults. Fault displacement results in elastoplastic behavior in both pipelines and the surrounding soil. Shallow-buried pipelines (about 1m) face complex interactions with soil, making parameter estimation difficult using standard penetration test N-values. To address this, experimental results from Kobe University on ground reaction forces acting on buried pipelines are analyzed. These experiments are reproduced to validate and refine analysis models. The study reveals that the relationship between displacement and ground reaction force for small-diameter pipelines (50–150mm) varies by loading direction, such as horizontal, vertical downward, and vertical upward loading. Appropriate soil parameters for horizontal loading are identified for use in FEM analysis.

Using the refined soil parameters, simulations analyze the deformation characteristics of small-diameter polyethylene and steel pipelines (diameter 100mm, length 20m) under strike-slip fault displacement. The soil surrounding the pipeline is modeled as solid elements in the finite element analysis to accurately capture the dynamic interaction between the pipeline and the soil. Results demonstrate that this approach effectively represents pipeline deformation under fault displacement. By combining these results with ground deformation derived from dislocation elasticity theory, the study provides a clearer understanding of pipeline responses to concealed fault movement, supporting the development of more reliable seismic designs for pipelines.

氏名	潘 越		
論文 題目	A Study on the Strain Assessment of Buried Pipelines Located above the Concealed Fault (伏在断層上に位置する埋設管のひずみ評価に関する研究)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	鎌田 泰子
	副 査	教 授	芥川 真一
	副 査	教 授	橘 伸也
	副 査		
	副 査		印
要 旨			
水道、ガス、燃料などの埋設管路は、広範囲に供給するため、断層の多い地域では断層を横断せずに建設することは難しい。このため、1980 年代以降から地震工学分野では断層横断する埋設管路の耐震設計やその地震対策は最重要課題として取り組まれてきた。しかしながら、1999 年の台湾集集地震や同年のトルココジャエリ地震、日本においても 2018 年熊本地震などで、断層横断による埋設管が多く被害を受けている現状にある。断層変位による埋設管の被害は甚大で、その復旧に相当な時間を要する。そのため、可能であれば計画設計段階から断層を避けるような対策が望ましいところであるが、管路のような線状土木構造物は断層を避けて建設することは難しいのが現状である。また、地震時に地表に現れる断層変位は不確定性が多く、安全側をみて、これまで断層横断箇所においては断層変位を決定論的に与える方法で設計されてきた。しかし、地震の規模が小さくや震源断層が深い場合に断層変位が地表に達しないこともありえる。断層が地表に露頭しないような伏在断層による断層変位についても包含して、断層を横断する管路の地震リスクとしてとらえることが必要である。また、土被りが 1m 程度の浅い埋設状況で断層変位のような大変形を受ける場合、地盤―管路の動的相互作用は非常に複雑であり、実験等で検証したパラメータで以って解析する必要がある。 本研究では、地表地震断層が生じないような伏在断層が動いた場合に地中に埋設された管路に作用する地盤変位やひずみに対して検討し、断層運動による埋設管路への影響を幅広く捉えようとするものである。このため、断層運動による地盤変位から想定される管路延長上に生じる地盤ひずみを断層パラメータによって系統的に整理するとともに、埋設管と地盤との動的相互作用について実験によって検証したパラメータを用いて有限要素法において断層変位に伴う管路の挙動を把握しようとしたものである。 本研究の前半である第二章、第三章では、伏在断層の断層運動による地表近く埋設管路のひずみ分布を分析するために、食い違い弾性理論を用いて検討している。食い違い弾性理論は、1950 年代に提案された理論でこれまでに断層研究でも多く利用されている。本研究では、理論式から得られる地表地盤変位からある測線方向のひずみを算出している。さらに、異なる断層運動（横ずれ断層と逆断層）と埋設管との交差角によって、これらの断層によって引き起こされる管路の最大ひずみを明らかにしている。その結果、横ずれ断層と逆断層は、断層角度が異なる場合、管路のひずみやその位置が異なる影響を与えることが示された。さらに、異なる断層タイプや断層との交差角、断層上端までの深さなどの種々のパラメータにおける管路の最大ひずみを算出し、それらの回帰分析から、横ずれ断層と逆断層によって引き起こされる埋設管路の最大ひずみの推定式を導き出した。これによって、伏在断層の断層パラメータを得るだけで、管路に生じるひずみを予測し、断層対策をすべきか否かを判断できる。 さらに、本研究では、2023 年に発生したトルコ・シリア地震をケーススタディとして、地震時に観測された地震動から断層面のすべり量を推定した結果から食い違い弾性理論を適用し、本手法の適用性について検討している。他の研究者が提供した 2 つの主要な断層パラメータに基づき、本研究では、断層方向に沿った地表変位を計算するために食い違い弾性理論を適用している。計算された地表変位は、断層による実際の地表変位と比較され、食い違い弾性理論を使用することの信頼性が議論されている。このケーススタディは、食い違い弾性理論を用いて計算した地表変位の適用性を検証するだけでなく、これらの計算に基づく断層横断管路におけるひずみ計算の実用化を根拠づけるものである。 後半の第四章では、断層を横断する管路の応答解析の高精度化を行ったものである。断層変位のような大変形を地盤と管路受ける場合、管路も地盤も弾塑性挙動をする。管路が敷設される埋設深さ 1m 程度の地盤は、非常に複雑であり、標準貫入試験の N 値で地盤パラメータを推定するのが難しい。そこで、			

氏名	潘 越
----	-----

本研究では、神戸大学で行われた埋設管の地盤反力に関する実験結果を用い、解析でこの実験を再現し、適切に実験を再現できる解析モデルやパラメータの検討を行っている。この研究では、小口径管路を対象として口径 50mm から 150mm までの管路に対して、水平載荷、鉛直下方向載荷、鉛直上方向載荷によっておそれぞれの管路の変位と地盤反力の関係が載荷方向によって異なることが示されている。本研究では、水平方向の載荷実験を再現できる地盤のパラメータについて明らかにした。

次に、第五章では、第四章で明らかになったパラメータに基づき表層地盤の詳細なモデルを構築し、食い違い弾性理論で算出される断層変位と入力とした場合の地表変位と、食い違い弾性理論で算出される地表変位を比較し、それらの評価精度について検証している。さらに、この表層地盤モデルに鋼管とポリエチレン管がそれぞれある場合の断層による管路挙動を明らかにしている。その結果、管路の高剛性・低剛性の影響によって管路ひずみが出やすい箇所やその値が明らかになった。管路応答を確認することで伏在断層を横断する管路の応答をより高精度に明らかにすることができた。

本研究では、地表地震断層が生じないような伏在断層が動いた場合に地中に埋設された管路に作用する地盤ひずみに対して検討し、断層運動による埋設管路への影響を幅広く捉えるため、食い違い弾性理論と有限要素法を援用して埋設管のひずみについて明らかにした。不確定性のある断層変位に対して、いくつかの断層パラメータで容易に管路ひずみを推定することができる方法を提案しているだけでなく、表層近くの地盤についても実験と解析の V&V から、より精度のよい管路応答を導き出したことは、従来の断層を横断する管路の研究分野において新たな見地を切り拓いたといえる。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の潘 越は、博士（学術）の学位を得る資格があると認める。