

ガス橋梁管の地震時変形挙動の検討

大阪ガス(株) 小川 安雄
 大阪ガス(株) 清水 謙司
 住友金属工業(株) 桑嶋 健
 住友金属工業(株) 岡村 一男

1. はじめに

兵庫県南部地震では、液状化による地盤の大変状がライフラインに影響を与えた。特に湾岸埋立地への橋梁に添架されているガス橋梁管の中には、橋台背面地盤の変状、護岸崩壊等によってガスの漏洩は生じなかったが、架管部で座屈変形したものがある。

ここでは兵庫県南部地震でのガス橋梁管の座屈発生メカニズムを解明するために曲げ試験およびFEM解析によって直管の座屈挙動を検討するとともにその検討結果を踏まえ、実際の神戸市灘区のガス橋梁管の座屈変形事例についてFEM解析を実施したので報告する。

2. ガス橋梁管の座屈変形例

神戸市のガス橋梁管の被害状況を図-1に示す。橋梁管は表-1に示すように管径200Aのパイプビーム式であり、両護岸部は熱による変位量を吸収するために400Aの鞘管を用いた二重管構造になっている。地震動により右岸側護岸が崩壊、左岸側に移動し、架管部の右岸よりのキャンパー部で座屈変形を起こしている。橋梁管の施工では自重によるたわみを吸収するために直管を斜めに切断し、線形を台形状にすることが行われ、これをキャンパーと呼んでいる。座屈変形を起こした溶接部はそのキャンパー部であり、座屈変形箇所の曲げ角度は約11°であった。この橋梁管の座屈変形は右岸側護岸の移動と崩壊により架管部に曲げと圧縮の複合荷重が作用したものと推測された。

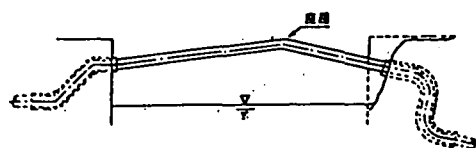


図-1 橋梁管の被害状況

表-1 橋梁管の主仕様

項目	仕様
本管管径	200A(φ216.3mm)
材質	直管SGP、曲管FSGP
延長	約20m
圧力	中圧B
形式	パイプビーム形式
護岸部構造	二重管形式 (鞘管外径406.4mm)

3. 直管の片持ち曲げ試験および解析による検討

(1) 試験概要

直管の座屈による変形挙動を確認するため、片持ち曲げ試験を行った。試験装置を図-2に示す。

試験ケースは表-2に示す管径600A(ケース1)、300A(ケース2)の2ケースである。荷重は100tの油圧シリンダーにより載荷し、荷重および載荷点の移動量、座屈発生箇所周辺のひずみを測定した。ひずみは2軸式のひずみゲージにより測定した。貼付位置は図-3に示す断面A～Fの計21箇所である。荷重は油圧シリンダーのストローク一杯まで載荷した後、試験体を固定し、油圧シリンダーの位置を移動させ、再度載荷し、試験体に亀裂が発生するまで試験を実施した。

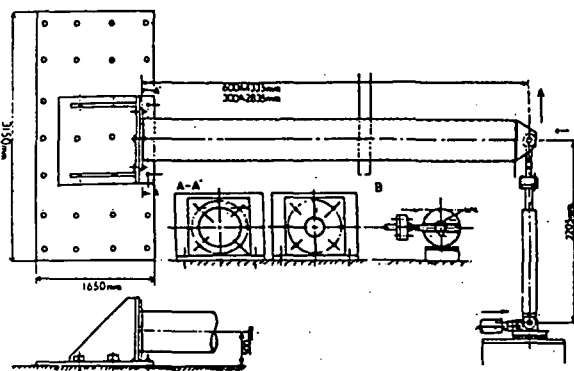


図-2 試験装置

表-2 試験ケース

ケース	外径×管厚(mm)	固定端～載荷点の長さ(mm)	外径/管厚	材質
ケース1	φ609.6×19.5	4335	64.2	JIS G 3457 STPY400
ケース2	φ318.5×16.9	2835	46.2	JIS G 3452 SGP

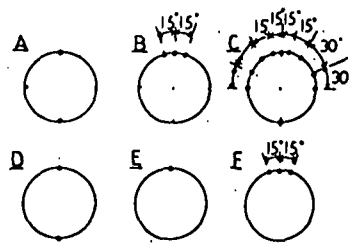
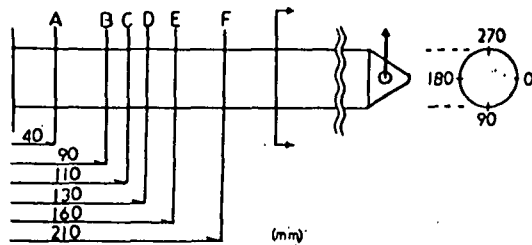


図-3 ひずみゲージ貼付位置

(2) 試験結果

ケース1、2とも固定端より約100mm 付近の断面で座屈が発生した。その時期は最大荷重が発生した時期で曲げ角度はケース1で2.2'、ケース2で3.6'であった。

図-4にケース2における荷重と曲げ角度の関係を示す。荷重は曲げ角度3.6'の時、最大となりその値は7.6tである。その後荷重は減少するが、曲げ角度約20'付近から増加に転じる。これは座屈によるしわが管表面に接触し、載荷荷重に抵抗するためである。その後曲げ角度33'の時に固定端付近でクラックが発生した。なお、座屈発生時の座屈しわが発生した断面においてひずみは曲げの腹側で最大値をとり、その値はケース1で約1.4%、ケース2で約3%であった。

ケース2における発生モーメントと降伏曲げモーメントの比である降伏モーメント比と曲げ角度の関係を図-5に示す。降伏モーメント比の最大値はケース1で1.53、ケース2で1.15であった。

図-6にケース2の各断面の軸方向ひずみと曲げ角度の分布を示す。座屈発生断面は図-6中断面Cであり、断面C、D、Eの腹側($\phi=270^\circ$)でははじめ圧縮ひずみを示すが、最大荷重発生後、引っ張りが作用して値が+側に増えていく傾向が見られる。

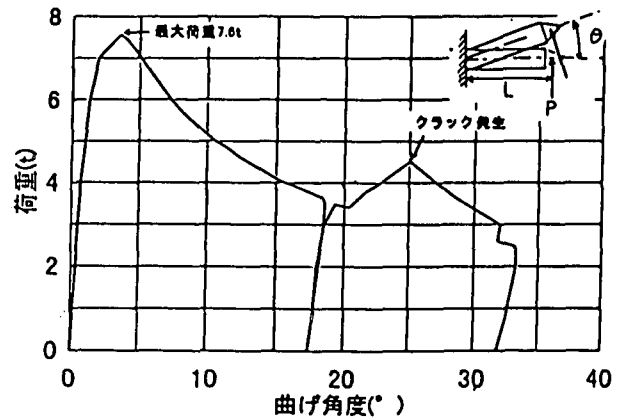


図-4 荷重と曲げ角度の関係(ケース2:300A)

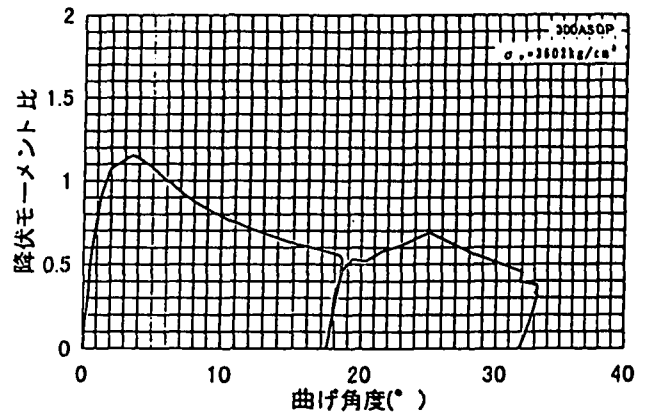


図-5 降伏モーメント比と曲げ角度の関係(ケース2:300A)

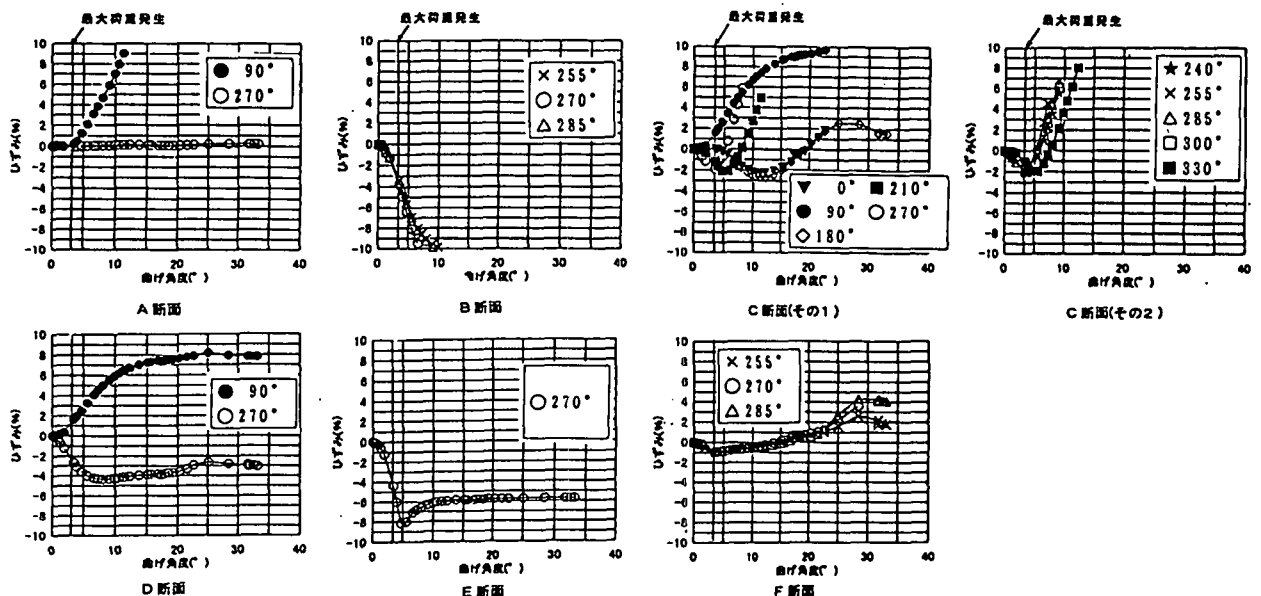


図-6 ひずみと曲げ角度の関係(ケース2:300A)

(3) 解析概要

ケース1, 2について弾塑性FEM解析を実施し、試験結果との比較を行った。解析ソフトはABAQUSを用い、要素は3次元8節点シェル要素を用いた。

材料特性は引張試験結果を用いた。図-7に解析モデルを示す。固定端の周辺はフランジを締結した支持材治具が剛体であると仮定し、フランジは剛体壁にボルト締結箇所固定されているものと仮定した。

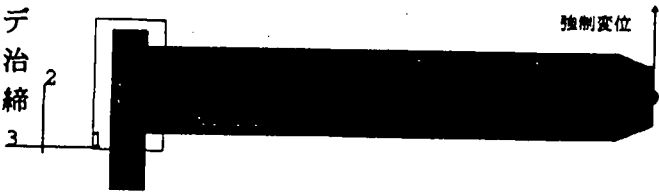


図-7 解析モデル

(4) 解析結果

ケース1の結果を示す。図-8に曲げ角度13°の変形状態を示す。座屈発生位置は固定端より約50mmの断面であり、試験結果と位置が異なるが、座屈しわの形状はほぼ再現できた。

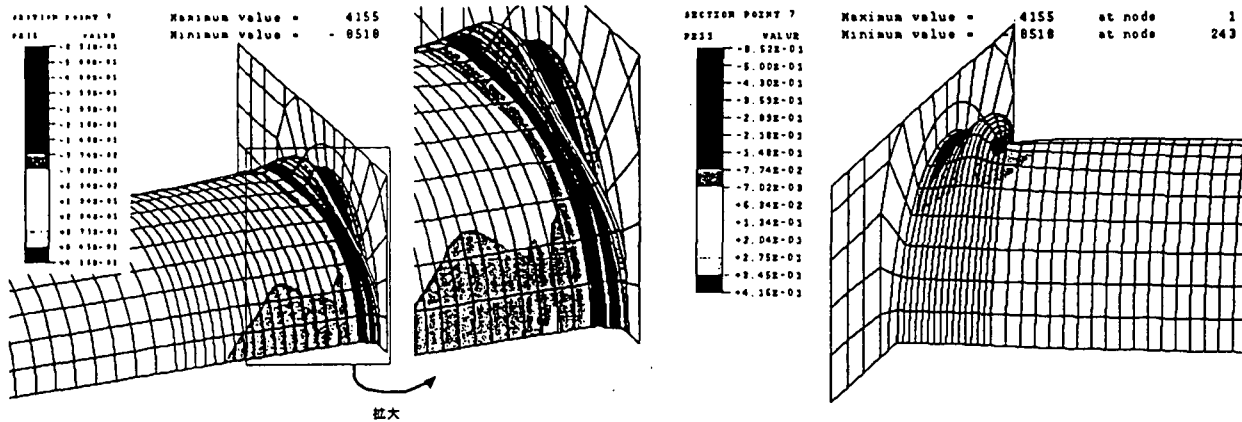


図-8 座屈変形状態(ケース1:600A)

図-9に荷重と曲げ角度の関係を示す。試験結果と比較すると最大荷重発生時まではほぼ一致しているが、それ以降は解析の方が早く荷重が低減している。解析では座屈のしわが試験より急峻になり、しわ同士の干渉を考慮できないためと考えられる。ケース2においても同様に解析を実施したが、試験より早い時点で座屈が発生する結果となった。これは試験装置の固定端フランジ部の拘束が解析に比較して緩くなっているためと考えられる。

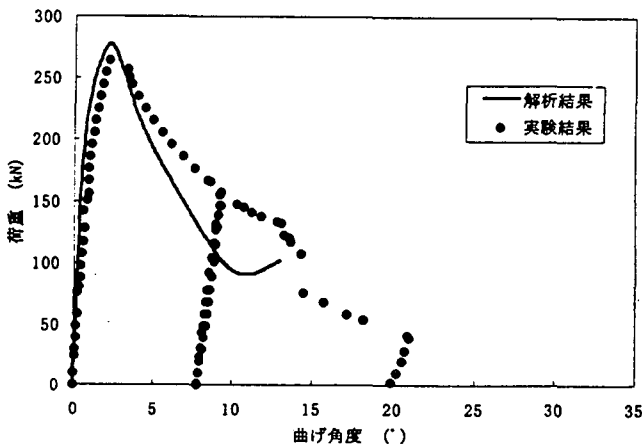


図-9 荷重と曲げ角度の関係(ケース1:600A)

4. 橋梁管モデルの解析検討

ここでは表-1の橋梁管の架管部をモデル化し、座屈の発生限界について検討した結果を示す。

(1) 解析概要

解析ケースを表-3に示す。ケース1~6について座屈解析を行い、座屈発生限界の曲げモーメントと軸圧縮力の関係について検討を行った。ケース1~4については片端を固定し、1/2断面を薄肉シェル要素により要素分割した。ケース5, 6では両端支持条件を表現するため図-10

表-3 解析ケース

ケース	外径×管厚×長さ (mm)	外径/管厚	支持条件	荷重条件	
				曲げモーメント	軸圧縮応力
ケース1	φ216.3×5.8×1300	37.3	片端固定	○	0
ケース2				○	8.7kg/mm ²
ケース3				○	17.3kg/mm ²
ケース4				○	26.0kg/mm ²
ケース5	φ216.3×5.8×4000		両端支持	○	0
ケース6				○	35.1kg/mm ²

○は増分荷重であることを示す

に示すように管の1/2長さ、1/2断面をモデル化し、端面のシェル要素節点の動きが曲げに対して整合性を保つように端面にはり節点を設けた。このはり節点とシェル要素の端面節点との間にABAQUSの多点拘束機能を使用した。端面の回転はこのはり節点に強制回転を入力することで可能となる。

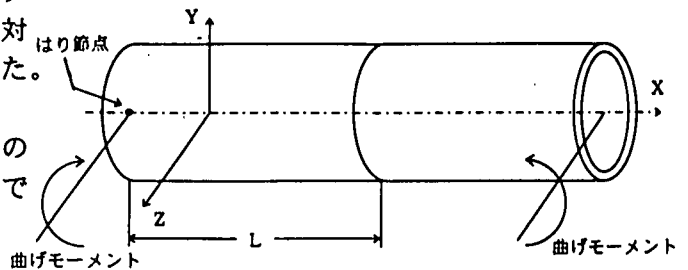


図-10 解析モデル模式図(両端支持)

(2) 解析結果および考察

ケース1～4(片端支持)とケース5,6(両端支持)の支持条件の違いによる座屈発生状況を比較する。ケース5とケース6における軸方向曲げ変形率と降伏モーメント比の関係を図-11に示す。これによると曲げと軸圧縮の複合荷重が作用する場合は曲げのみの場合に比べて1/5の曲げ曲率で最大値を示す。これは圧縮荷重が管に作用するとより小さいモーメントで座屈が発生することを示している。座屈が発生する曲げモーメントと軸圧縮力の関係図を図-12に示す。これによると軸圧縮力と座屈発生モーメントの間には負の比例関係があることがわかる。また、純曲げの条件における座屈開始曲げ角度を両端支持と片持ちで比較すると後者は前者の約1.5倍であった。片持ち条件の曲げ試験データを用いた曲げ座屈開始ひずみの設定は実際の配管系では安全側の設計になっている可能性がある。

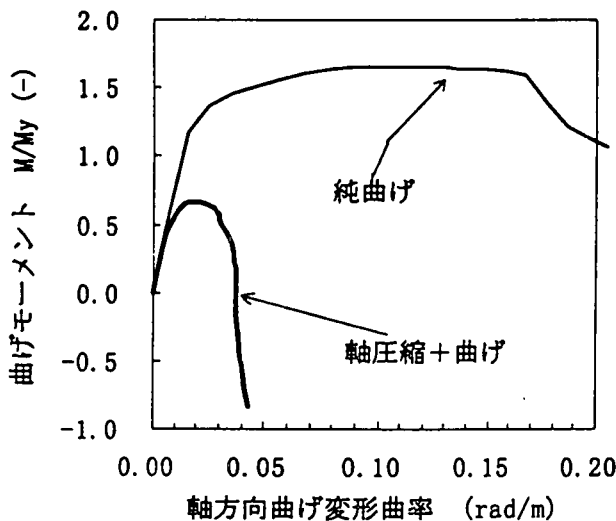


図-11 曲げ変形率と曲げモーメント比の関係

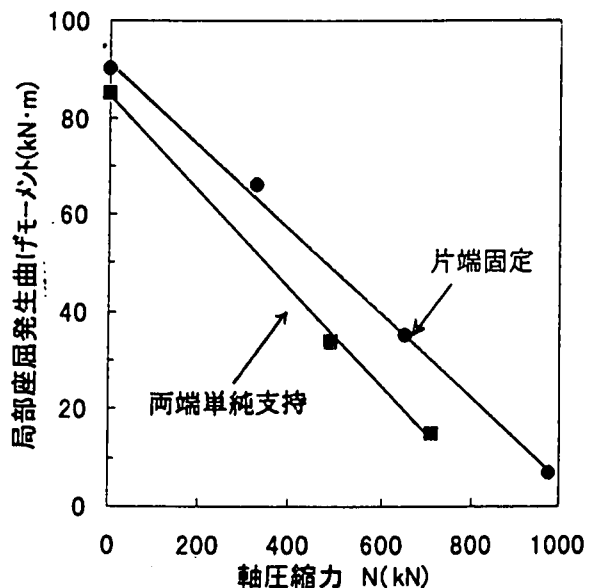


図-12 座屈発生モーメントと軸圧縮力の関係

6. おわりに

ガス橋梁管の座屈発生メカニズムを解明するために曲げ試験およびFEM解析によって直管の座屈挙動を検討し、橋梁管のFEM解析を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 直管の曲げ試験の結果をFEM解析し、曲げ座屈開始までの変形挙動がほぼ再現可能であることが明らかになった。
- (2) 直管の拘束条件が両端支持と片持ち支持の場合を比較すると座屈開始曲げ角度が前者は後者の約1.5倍となった。片持ち支持条件のデータによる曲げ座屈開始ひずみの設定は実際の配管系では安全側の設計になっている可能性がある。
- (3) 管に軸圧縮力が作用すると座屈発生曲げモーメントは減少する。すなわち、軸圧縮力と座屈発生曲げモーメントの間には負の比例関係が存在する。