

[100] 連続地中壁継手部曲げ特性に関する研究

塩尻 弘 雄 (電力中央研究所 構造部)  
 正会員 ○遠藤 達 巳 (電力中央研究所 構造部)  
 松本 光 永 (東京電力 技術開発研究所)  
 宮本 幸 始 (東京電力 建設部)

1. ま え が き

LNG地下タンク、送変電地下施設等において、連続地中壁（以下連壁と略）の使用が最近増大している。在来  
 の設計では、これら連壁は本体構造を施工するまでの仮設の土留・止水壁として用いられ、本体構造の耐力には全  
 く寄与しないとして取り扱われている。しかし、最近における連壁の鉛直寸法精度、コンクリートの品質等をみる  
 と、地上構造物と比較しても遜色のないものが造られている。このような現状を考えて、連壁を本体構造に組み込  
 み、これを設計上考慮に入れ、材料、工数の節減を図り、もって工費を低減する可能性の検討がされつつある。そ  
 のためには、水平方向の曲げ耐力を確保する観点から、連壁の水平方向にも有効な鉄筋継手を設けなければならな  
 い。その際、水平継手を有する連壁の変形および耐力を適切に評価し、設計に反映させる必要がある。

本研究は、連壁の本体利用をはかるため、継手部の曲げ、ひびわれ、破壊性状を明らかにすることを目的として  
 実施したもので、特殊な重ね継手を有する連壁を梁部材としてモデル化し、曲げ試験を実施し、曲げ変形性状、終  
 局曲げ耐力等の把握を行った結果について考察したものである。さらに、梁の力学的性状を非線形有限要素法によ  
 り数値シミュレーションし、解析結果と実験結果を比較して、数値解析のこの種の部材への適用の可能性について  
 検討を加えた。

2. 実験及び解析概要

2.1 コンクリート：粗骨材の最大寸法25mm、水セメント比50%、単位セメント量370kg/m<sup>3</sup>のものを用い、ス  
 ランプは20±1cmとした。また、圧縮強度、弾性係数はそ  
 れぞれおよそ400kgf/cm<sup>2</sup>、2.5×10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>であった。

2.2 試験体作製：泥水中でのコンクリートと鉄筋の付着  
 状態に近づけるため、鉄筋を組立後ベントナイト液に浸し、  
 泥水が付着した状態でコンクリートを打設した。

実験に供した試験体は、図-1に示すものであって、連  
 壁の施工性を配慮し、鉄筋を互に重ね合わせずに、一方の  
 鉄筋を他方の鉄筋の内側に折り曲げる方法を採用した。ま  
 た、先打ちコンクリート部との間に仕切鉄板を設け、実際の連  
 壁の構造を模擬した。仕切板を境界に継手のない部分、次いで  
 継手部という順序でコンクリートを打設した。試験体は全長  
 380cm、試験区間220cm、巾20cm、高さ40cmであり、引張鉄  
 筋及び圧縮鉄筋にD16鉄筋(SD30)2本を使用した（鉄筋比  
 $p=p'=0.57\%$ ）。表-1に示すように、試験体は鉄筋重ね継手長  
 さを3段階に変化させ、継手のない梁の試験結果と比較した。

2.3 試験方法：試験体の両端部に試験体と直角になるようにH型鋼をとりつけ、これに荷重を与えることによ  
 って梁の試験区間に一様なモーメントが作用するようにした。測定項目は鉄筋とコンクリートの歪、梁のたわみと局

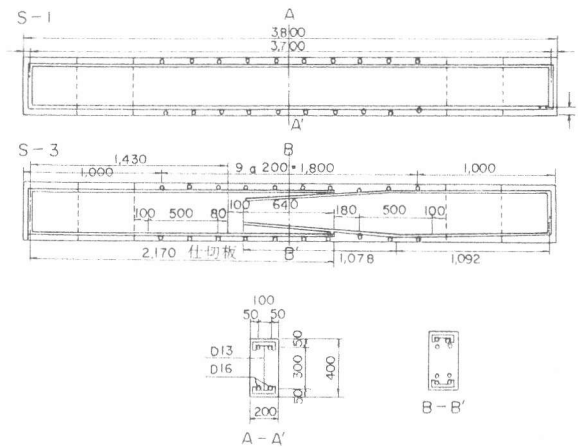


図-1 試験体の形状

表-1 試験体の種類

D：鉄筋直径

№	試験体番号	重ね継手長さ(L)
1	S-1	一体物(継手無)
2	S-2	$L = 4.5D (720\text{mm})$
3	S-3	$L = 4.0D (640\text{mm})$
4	S-4	$L = 3.0D (480\text{mm})$

部曲率及びひびわれ性状である。

2.4 解析方法：解析においては、コンクリートの非線型性はバイリニア(CASE1), A C I型(CASE2)の2種類の応力-ひずみ曲線を用いて検討した。(図-2)

また、ひびわれについてはSmearred Crackモデルを用いた。コンクリートの応力が限界応力を上回ると、その要素全体のひびわれ方向の剛性を0とし、ひびわれ面でのせん断剛性も単純に直交異方性材料として算出した。コンクリートと鉄筋との付着は接合要素で表現し、付着応力-すべり関係はバイリニア型とし、最大付着

応力は泥水の付着を考慮し $30\text{ kgf/cm}^2$ 、その時のすべり量は $0.01\text{ mm}$ とした。

### 3. 破壊モードの評価

各試験体の破壊後のひびわれ状況は、図-3に示すとおりであって、継手のないS-1試験体では、コンクリートの破壊による典型的な曲げ引張破壊を呈している。これに反し、継手を有するS-2, S-3, S-4試験体では、内側に折り曲げた鉄筋に沿った付着割裂破壊が支配的であったことを示している。また、S-2, S-3試験体では鉄筋降伏後に破壊に至ったが、最も継手長さの短いS-4試験体では、鉄筋降伏直前に破壊に至るといって極めて脆性的な破壊形態であった。

終局曲げモーメントの単体梁の鉄筋降伏時計算値に対する比を図-4に示した。継手長さの最も短い試験体で、2割程度の終局曲げ耐力低下がみられた。

また、終局時における塑性変形態の指標である靱性率(終局時曲率の鉄筋降伏時曲率に対する比率)は、図-4で示すように、重ね継手の有無及び重ね継手長さが顕著な影響を及ぼし、ある継手長さ(本実験では $4.5D$ )を境界にして急激に靱性が低下することが明らかとなった。

FEMによる解析結果をひびわれ発生モーメント、鉄筋降伏モーメント、降伏時曲率について表-2に示した。解析においても実験と同様に継手長さの短い試験体で、鉄筋降伏前に継手部の付着破壊の生ずることを予測している。また、数値的にも、降伏モーメント及び降伏時曲線の解析値は、実

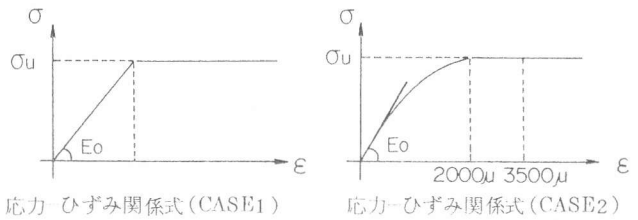


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

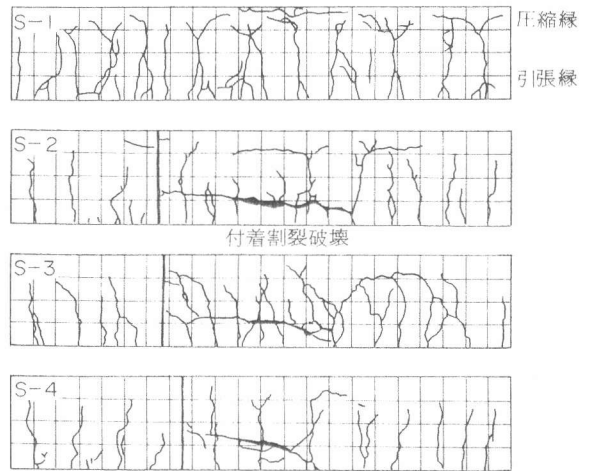


図-3 ひびわれ進展及び破壊状況

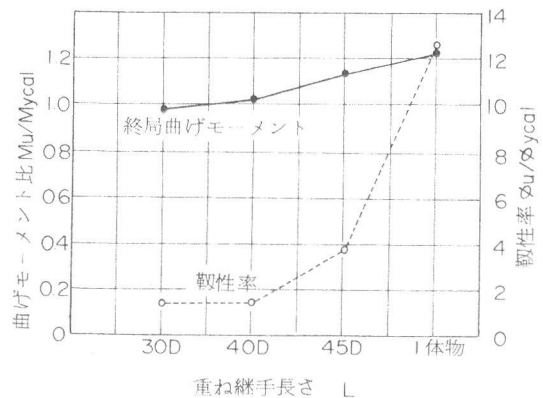


図-4 重ね継手長さ L と終局曲げモーメント

表-2 解析結果と実験結果の比較

重ね継手長さ	ひびわれ発生モーメント (t-m)			鉄筋降伏モーメント (t-m)			降伏時曲線 ( $\mu/cm$ )		
	実験値	FEM CASE1	FEM CASE2	実験値	FEM CASE1	FEM CASE2	実験値	FEM CASE1	FEM CASE2
S-1 単体物	1.73	1.44	1.19	5.10	5.04	5.20	79.5	58.9	166.2
S-2 4.5D	*1	1.44	1.19	4.70	4.71	4.49	65.9	54.1	63.8
S-3 4.0D	*1	1.44	1.19	4.49	4.71	*2 4.49	69.5	57.8	*2 68.4
S-4 3.0D	*1	1.44	1.19	*2	4.71	*2 4.49	*2	57.3	*2 63.9

\*1 : 仕切り板位置でひびわれ発生

\*2 : 鉄筋降伏前に付着破壊

験値と比較的良好一致を示している。

#### 4. ひびわれ性状

各試験体のひびわれの進展状況を図-3に示した。ひびわれの分散性は、継手を有する試験体においては継手のない試験体に比較して若干劣っており、仕切板部及び重ね継手部にひびわれが集中することが明らかとなった。特に、仕切板部では、コンクリートと鋼板の付着強度は小さく、先行ひびわれが入っているものと見なすことができ、初期の荷重段階よりひびわれの拡幅がみられ、多少これより高い荷重段階において、継手部にひびわれが集中する傾向があった。S-2, S-3, S-4試験体について、仕切板及び継手部の影響が小さいと思われる一般部分のひびわれ幅と仕切板部のひびわれ幅の関係を、図-5に示す。初期荷重段階より仕切板部のひびわれ幅が一般部のそれに比べ卓越しているが、継手長さのひびわれ幅に及ぼす影響は鉄筋許容応力度付近まではほとんどない。

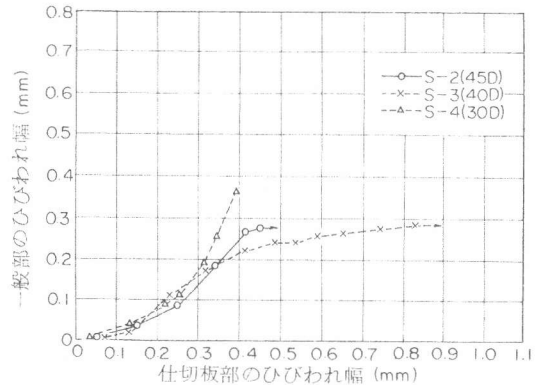


図-5 ひびわれ幅相互の関係 (一般部 vs 仕切板部・鉄筋位置)

図-6では、仕切板部と重ね継手部、すなわち、応力集中が起り配筋上有効高さが小さくなる真直鉄筋の先端位置でのひびわれ幅の比較を行った。初期荷重段階においては、仕切板部のひびわれの拡幅が卓越しているが、ある程度荷重段階が進むと重ね継手部の方が卓越し、破壊に至る結果となった。すなわち、ひびわれの限界状態の最大の弱点となるのは重ね継手部であり、仕切板部のひびわれが問題になるのは初期の段階に限られると言える。

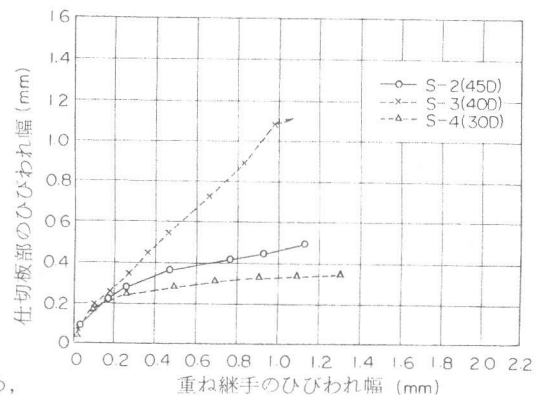


図-6 ひびわれ幅相互の関係 (重ね継手部 vs 仕切板部・引張縁)

FEM解析では、Smearred Crackモデルを採用しているため、正確にひびわれの進展状況を予測することは難しいが、ひびわれ要素を深さ方向に追跡することによってある程度の予測が可能である。そこで図-7にひびわれ進展深さと曲げモーメントの関係を示し、実験値とFEM解析値の比較を行った。ここでの対象断面は、ひびわれの限界状態が問題となる継手部分である。解析結果では、すべての試験体ともほとんど同じひびわれ進展状況を示している。ある段階までは、ひびわれが急激に進展してゆき、それ以上はひびわれの進展が止まるという鉄筋コンクリート梁の特性をよく表している。実測値との比較においては、進展速度という観点から見ると、ほぼ一致していると思われる。実験結果と異なり、解析値において、初期の段階よりひびわれが進展しているのは、解析では材料強度のバラッキや、鉄筋先端での応力集中が考慮できず、また、すべての断面でひびわれが発生していると仮定していることによる。

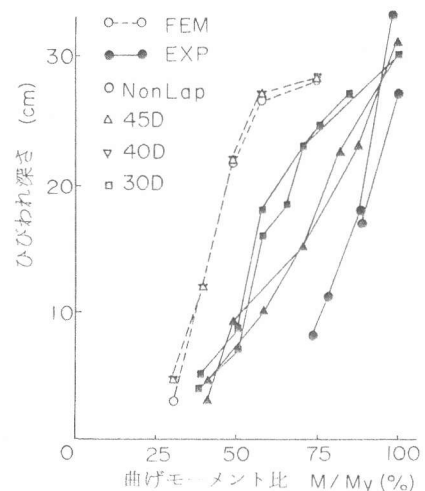


図-7 曲げモーメント比とひびわれ深さの関係

#### 5. 変形性能の評価

継手を含む試験区間全体の変形性能に着目し、平均曲げ剛性に関して検討を行なった。

図-8に、各試験体の鉄筋応力度と曲げ剛性残存率の関係を示した。曲げ剛性残存率とは、荷重及びたわみの測定結果より梁の試験区間における平均曲げ剛性(EI)を算出し、これを全断面有効とする弾性曲げ剛性(EI<sub>0</sub>)で除した値である。継手長さの短い試験体において、初期荷重段階で剛性が小さくなっているが、これは仕切板部の剛

性低下等の影響であると考えられる。しかし、それ以後の荷重段階では各試験体間の差は見られず、平均曲げ剛性に与える継手の有無、継手長さの影響はほとんどないと考えられる。

曲げモーメントと曲率の関係について、FEMによる解析結果と実験値の比較の一例を図-9に示した。FEM解析においては仕切板部の剛性低下を十分に表現し得ないため、計算値は全断面有効の場合に近い値として算出している。実験では初期荷重段階より剛性低下がおきており、その影響が表れている。また、FEM解析においては折曲り鉄筋の付着劣化等を十分に表現できているとは言えず、このような差が生じたと考えられる。この傾向は継手長さが短いほど大きくなっている。図-10に最も継手長さの長い試験体の曲げ剛性残存率と鉄筋応力の関係を示したが、初期の剛性低下を含め、実験値と解析値は良好な一致を見せている。変形性能に関して、FEMによる解析値は精度よく実験結果を追跡しているといえよう。

## 6. まとめ

連壁継手部の梁モデルによる曲げ実験及びこれに関連して実施したFEM解析の結果より以下のことがいえる。

1) 構造系の靱性及び終局耐力を含めた、破壊モードはある継手長さを境に大きく異なり、長さが短いと脆性的な破壊を呈することが示された。本実験の範囲内では継手長さが、鉄筋直径の4.5倍程度がその境界点となった。

2) ひびわれ性状に関しては、仕切板部及び重ね継手部に集中してひびわれが発生し、終局時に近づくにつれ、重ね継手部のひびわれが卓越する結果となったが、重ね継手長さとはひびわれ性状の間にはほとんど相関性は認められなかった。

3) 変形性能に関しては、初期における若干の剛性低下を除けば、継手の有無、継手長さの相違が全体的な変形性能に与える影響はほとんど認められなかった。

## <謝辞>

実験及び解析の計画・実施に際し多大の御協力を賜った、東電設計(株)、清水建設(株)の関係各位に対し深謝いたします。

## <参考文献>

連続地中壁のLNGタンク本体壁への適用に関する検討 報告書番号382557, 382567

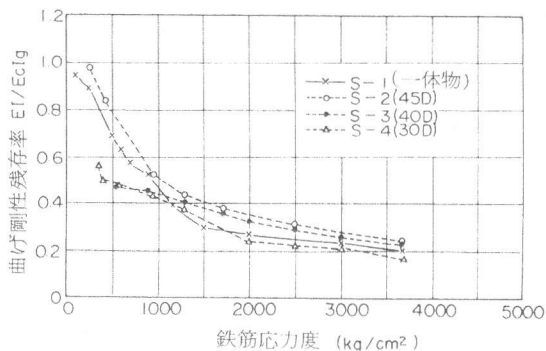


図-8 鉄筋応力度と曲げ剛性残存率

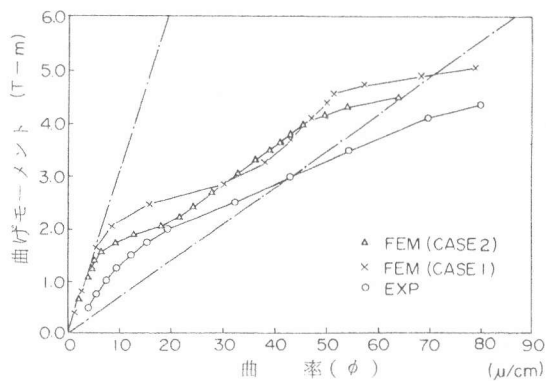


図-9 曲げモーメントと曲率の関係(3.0D)

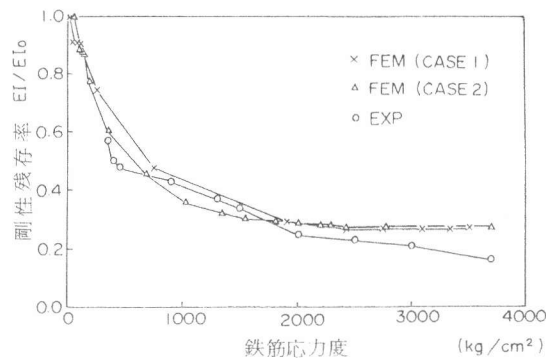


図-10 剛性残存率と鉄筋応力度の関係(4.5D)