

# 論文 面内力を受ける鉄筋コンクリート面材の構造性能について

鬼東俊一\*1・足立正信\*1・野本高憲\*2・松尾豊史\*3

**要旨：**鉄筋コンクリート製の LNG 地下タンク側壁のように比較的厚い部材では鉄筋が断面外縁部付近に集中的に配置されることが多く、そのような場合、鉄筋とコンクリートとの付着効果が期待できる領域と期待できない領域の評価が重要になると考えられる。そこで本研究では、大型パネル試験体を用いた面内加力試験とシミュレーション解析を行い、鉄筋配置とテンションスティフニングおよび耐荷力との関係について検討した。その結果、鉄筋配置がテンションスティフニングに及ぼす影響は大きい、構造体の耐荷力に対する影響は小さいことが分かった。

**キーワード：**LNG 地下タンク側壁，鉄筋配置，付着効果，テンションスティフニング

## 1. はじめに

ひびわれ発生後の鉄筋コンクリート部材では、鉄筋との付着によりコンクリートも引張応力の一部を負担することは衆知されており、その付着領域がコンクリート構造物のせん断耐力に大きな影響を及ぼすことも既往の研究<sup>1)</sup>により明らかにされている。

LNG 地下タンク側壁のような比較的部材厚が大きく低鉄筋比の部材では、鉄筋が断面外縁部に配置されることが多く、その場合、部材断面の中央部付近は付着効果の期待できない無筋領域が存在していると考えられ、それによる耐荷力の低下が設計上の問題として懸念された。

そこで本研究では、鉄筋が局所配置される LNG 地下タンク側壁を想定した面部材の面内加力試験とシミュレーション解析から、鉄筋配置、つまり鉄筋の付着効果が期待できる領域（以下、付着有効領域という）の大きさが面部材のひびわれ発生から終局域までの非線形挙動および耐荷力に及ぼす影響について検討した。

## 2. 1 試験体の諸元

試験体の諸元と配筋を表-1および図-1に示す。試験体は実機タンク側壁の約5分の1の大きさである。鉄筋ひずみや変形については、

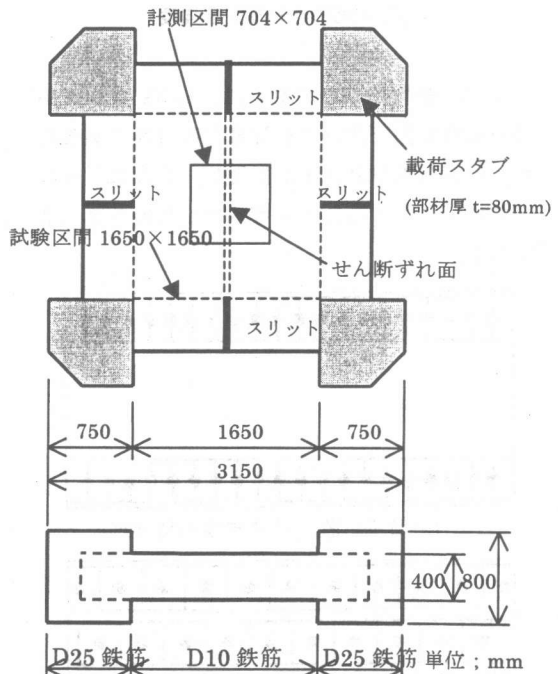


図-1 試験体の諸元

## 2. 実験の概要

\*1 東電設計 (株) 技術開発本部土木技術部 (正会員)

\*2 東京電力 (株) 広野火力建設所土木グループ (正会員)

\*3 (財) 電力中央研究所我孫子研究所 構造部 (正会員)

図-1に示す計測区間（部材厚 40cm, 鉄筋比約 0.8%）で計測を行った。なお、試験体の外周部中央には、計測区間にひびわれが発生しやすいようにスリット（鉄板）を設置した。

実験ケースについては、表-2に示すように鉄筋配置と初期ひびわれ導入量をパラメータとして3ケース実施した。鉄筋配置については、断面外縁部に鉄筋を集中させた配置（以下、局所配置という）と鉄筋の付着有効領域が部材断面全体に及ぶよう鉄筋を分散した配置（以下、分散配置という）の2パターンとした。図-2に鉄筋配置と付着有効領域を示す。なお、鉄筋1本当りの付着有効領域の大きさは次式に基づいて算定した<sup>1)</sup>。

$$h_{\max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} db \sqrt{\frac{f_y}{f_t}} \dots \dots (1)$$

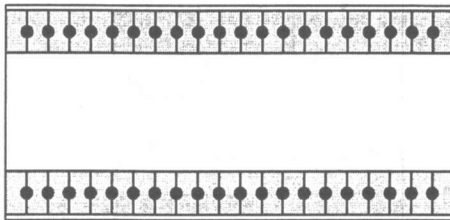
ここに、 $h_{\max}$ : 付着有効領域の高さ

$db$ : 鉄筋の直径

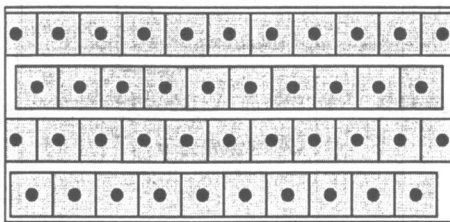
$f_y$ : 鉄筋の降伏強度

$f_t$ : コンクリートの引張強度

また、初期ひびわれ量とは、LNG タンクが-162℃の液化天然ガスを貯蔵する設備であるために温度荷重やガス圧が作用し、それによりひびわれが発生することを考慮するための導入量である。



(a)局所配置（付着有効面積 42%）



(b)分散配置（付着有効面積 81%）

図-2 鉄筋配置と付着有効面積

表-1 試験体諸元

試験体	配筋		鉄筋比
	ピッチ	鉄筋段数	
T1 試験体	D10@44mm	2 段	0.8%
T2 試験体	D10@88mm	4 段	
T3 試験体	D10@44mm	2 段	

表-2 実験パラメータ

試験体	鉄筋配置	初期ひびわれ導入時の作用引張力
T1 試験体	局所配置	1400kN
T2 試験体	分散配置	2300kN
T3 試験体	局所配置	2000kN

試験体に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-3および表-4に示す。

表-3 コンクリートの材料試験結果

材令(日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
35	34	2.61×10 <sup>4</sup>	2.7
60	34	2.59×10 <sup>4</sup>	2.9

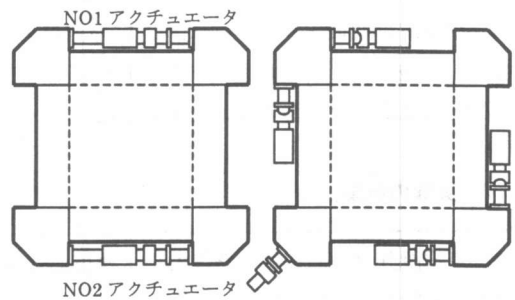
表-4 鉄筋の材料試験結果(D10,SD295)

降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	公称断面積 (cm <sup>2</sup> )
379	2050	1.8×10 <sup>5</sup>	0.713

## 2.2 載荷方法

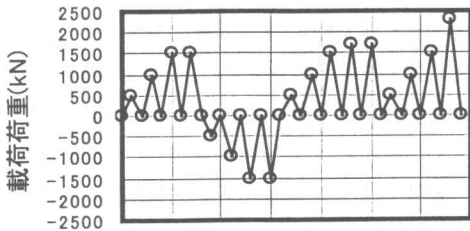
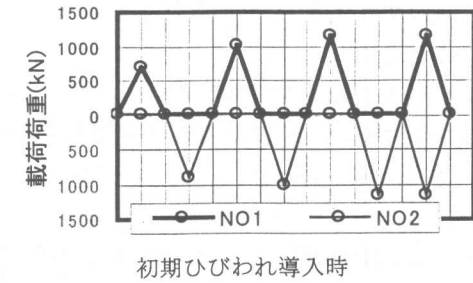
実験は、まず試験体中央に初期ひびわれを発生させた後、設定した計測区間（試験体中央 704mm×704mm の領域）が純せん断状態になるように、対角方向から圧縮力と引張力を同時に載荷する方法で行った。初期ひびわれ導入時ならびに面内加力試験時のジャッキ配置と荷重ステップを図-3および図-4に示す。また、実験の載荷手順を以下に示す。

- ①初期ひびわれ導入（図-2(a)）
- ②鉄筋降伏を目標に  $\delta y$  まで面内力を載荷（正



(a)初期ひびわれ導入時 (b)面内加力試験時

図-3 載荷状況図



面内加力試験時

図-4 荷重ステップ (T2試験体)

方向荷重, 図-2(b))

③試験体の方向を変えて $-\delta y$ まで面内力を荷重(負方向荷重)

④試験体の方向を変えて正方向に終局状態で面内力を荷重(正方向荷重)

なお, ②③の荷重はジャッキ容量の関係から最大1500kNまでとしたが, ④の荷重時にはジャッキを追加して破壊するまで荷重した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 耐力力

各ケースの実験結果を表-5に示す。表中のひびわれ発生荷重は, 試験区間内に斜めひびわれの発生を目視により確認できた荷重を示す。同表より, 初期ひびわれ導入量の最も小さいT1試験体でひびわれ発生荷重が最も大きくなっているが, 最大荷重では分散配置のT2試験体が大きくなっている。

表-5 実験結果の一覧

	ひびわれ発生時荷重(kN)	鉄筋降伏時荷重(kN)	最大荷重(kN)
T1試験体	990	—	1890
T2試験体	905	2030	2227
T3試験体	805	1315	1766

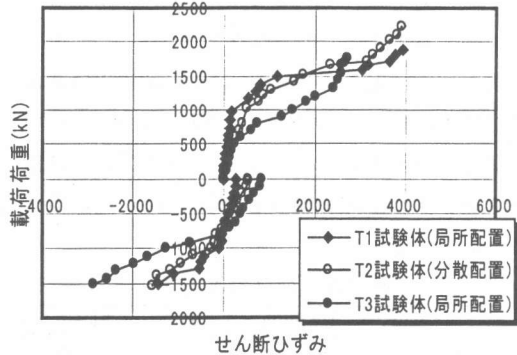


図-5 荷重～せん断ひずみ関係

次に, 各試験体の荷重と計測間におけるせん断ひずみ関係の包絡線を図-5に示す。初期ひびわれ導入量が同程度のT2, T3試験体の曲線を比較すると, 試験体に斜めひびわれが発生するまでは両者の応答はほぼ同じであるが, 斜めひびわれ発生時点では, 局所配置のT3試験体の方がT2試験体よりも荷重で約10%小さく, 断面剛性も小さくなっていることが分かる。最終的には, 全ての試験体で試験区間外の荷重載荷部付近でひびわれが大きく開いて破壊に至っており, 表-5の最大荷重は試験区間の耐力ではないことを意味している。ただし, T3試験体の最大荷重である1700kNでの計測区間のせん断ひずみは3000 $\mu$ 程度であり, 各試験体ともほぼ一致している。このことから面内せん断力に対しては, 鉄筋配置の違いが耐力に及ぼす影響はさほど大きくないと思われる。

#### 3.2 ひびわれ性状

ひびわれは, 初めに載荷スタブ付近で発生し, 試験区間に向かって進展した。試験区間でのひびわれは, 比較的等間隔に鉄筋軸に対して約45°の斜め方向に発生している。なお, 目視による試験体表面のひびわれ状況には各試験体で明確な差異は認められなかった。

次に, 試験後に試験体を切断し, その切断面においてひびわれ幅をクラックスケールにより計測した結果を表-6に示す。ひびわれ本数は各試験体で明確な差はないが, 分散配置のT2試験体では微細なひびわれが分散して発生して

いるのに対して、局所配置のT3試験体ではひびわれ幅が大きなものも存在する。

また、局所配置のT1, T3試験体では断面表面付近に密に配置された鉄筋を横切るようなひびわれが観察されており、このひびわれは被りコンクリートが剥離する原因になっているものと思われる。

表-6 ひびわれ本数

	0mm~	0.5mm~	1.0mm~	1.5mm~
T1	13	—	1	—
T2	14	—	—	—
T3	7	4	2	2

### 3.3 応力-ひずみ関係

ここでは、鉄筋配置の影響によるテンションスティフニングの違いについて評価するために、コンクリートの負担するせん断応力に着目して比較を行った。

実験結果から得られるせん断応力は、対角荷重から図-1に示すせん断ずれ面に作用するせん断力を算出し、せん断ずれ面の面積で除して求めた。このせん断応力から鉄筋が負担するせん断応力を差し引いて、コンクリートが負担するせん断応力を算定した。

なお、鉄筋が負担するせん断応力については、最大荷重付近では鉄筋のみで引張力を負担するとみなして、この抵抗力をコンクリート標準示方書耐震設計編(平成8年度制定, 土木学会)の耐震壁のせん断耐力算定式に準拠して求め、これと原点を結んだ直線が鉄筋のせん断応力~

せん断ひずみ関係(鉄筋の応力負担分)を示すものと仮定した。

この考えに基づいて算定したコンクリートの負担するせん断応力~せん断ひずみ関係を図-6に示す。同図より、コンクリートの負担する最大せん断応力は局所配置のT3試験体で $0.82\text{N/mm}^2$ 、分散配置のT2試験体では $1.53\text{N/mm}^2$ であり、分散配置の方が明らかにコンクリートの負担するせん断応力が大きくなっていることが分かる。また、同図の応力-ひずみ曲線の面積からコンクリートが負担するせん断応力の総量を求めると、T3試験体では $10166\text{kgf}\cdot\mu\text{rad/cm}^2$ であるのに対して、T2試験体では約2.5倍の $25513\text{kgf}\cdot\mu\text{rad/cm}^2$ である。

以上の結果から分散配置の方が局所配置よりもコンクリートのせん断応力負担分は大きくなっており、鉄筋配置の違い、つまり付着有効領域の違いがテンションスティフニングに及ぼす影響は大きいことが分かった。

## 4. シミュレーション解析

鉄筋配置の違いによる付着有効領域の大きさの違いが構造体の耐力に及ぼす影響について解析的に検討するために、T2およびT3試験体の実験結果をもとにシミュレーション解析を行った。解析は、前川ら<sup>2)</sup>により開発された非線形FEMプログラム「COM3」(ver9.1)を用いて実施した。また、解析は実験と同様に荷重制御で行い、初期ひびわれ導入、面内加力試験ともに実験と同じ荷重ステップで解析を実施した。

### 4.1 解析モデル

シミュレーション解析では、鉄筋位置をできるだけ忠実にモデル化するために、断面方向を4分割した積層シェル要素を用いて検討した。

### 4.2 テンションスティフニングの評価

シミュレーション解析に用いた非線形FEMプログラム「COM3」では、ひびわれ後のテンションスティフニングおよびテンションソフトニングは下式により規定されている。

ここで、軟化係数Cはテンションスティフニ

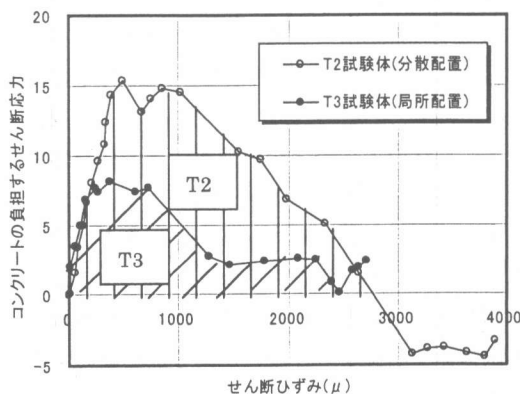


図-6 コンクリートの負担するせん断応力

ングおよびソフトニング効果を表すパラメータであり、「COM3」では、RCゾーンに対して $C=0.4$ 、無筋ゾーンに対して $C=2.0$ が推奨されている<sup>1)</sup>。今回の解析では、これらの値をもとに断面内のRCゾーンと無筋ゾーンの面積比に応じた等価軟化係数 $C_m$ を求めて検討した。なお、付着有効領域は式(1)により算定した。その結果、T2試験体では、ほぼ全断面がRCゾーンとなるため $C_m=0.4$ 、T3試験体では $C_m=0.6$ となった。

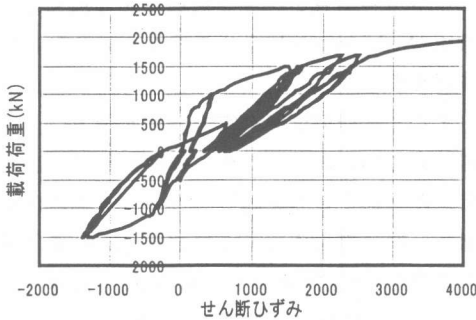
$$RC\text{ゾーン}; \sigma_{RC} = f_t \cdot \left(\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon}\right)^{c1} \dots \dots (2)$$

$$\text{無筋ゾーン}; \sigma_{PL} = f_t \cdot \left(\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon}\right)^{c2} \dots \dots (3)$$

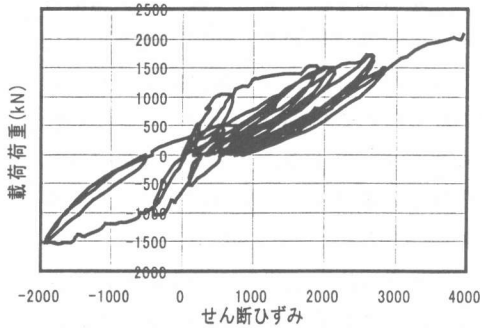
- ここに、 $f_t$ :コンクリートの引張強度
- $\varepsilon_L$ :ひびわれ発生時のひずみ
- $c1$ :RCゾーンの軟化係数 $c1=0.4$
- $c2$ :無筋ゾーンの軟化係数 $c2=2.0$

#### 4.2 解析結果

##### 1) 初期ひびわれ導入試験

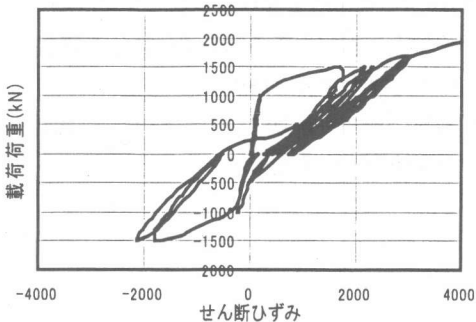


(a)解析結果

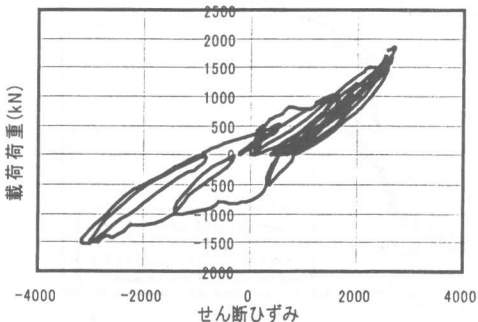


(b)実験結果

図-7 荷重-せん断ひずみ関係 (T2試験体; 分散配置)



(a)解析結果



(b)実験結果

図-8 荷重-せん断ひずみ関係 (T3試験体: 局所配置)

表-8に初期ひびわれ導入試験後の計測区間における対角線方向の残留変位量を示す。

同表よりT2試験体では、実験結果とはほぼ同程度の残留変位量となっているが、T3試験体では実験の約3分の1程度となっている。

表-8 残留変位量

	T 2	T 3
実験	0.032cm	0.025cm
解析	0.022cm	0.008cm

##### 2) 面内加力試験

###### ① T2試験体

図-7に実験結果と解析の比較を示す。実験における荷重-せん断ひずみ関係で1000kNを超える荷重レベルからせん断ひずみが急増している傾向は、解析でもよく捉えられている。

###### ② T3試験体

図-8に実験結果と解析の比較を示す。解析では、計測区間で鉄筋が降伏していないのに対

して実験では約 1300kN で降伏している。

荷重-せん断ひずみ関係を比較すると、実験では 500kN を超える辺りからせん断ひずみが急増しているのに対して、解析では T 2 試験体と同様に 1000kN を超えてから増加しており、解析の方が損傷状況（剛性の低下）を過少に評価しているものと思われる。これらの原因として、初期ひびわれ導入時の段階で、解析の損傷状況（残留変位等）が実験よりも小さいことに起因していることが考えられる。

### ③ T 2 試験体と T 3 試験体

図-9 に T 2 試験体と T 3 試験体の解析結果の比較を示す。同図より、1000kN 前後の荷重レベルで僅かではあるが両者の応答に差異が生じている。これは、初期ひびわれ導入時の損傷状態の違いにより、試験区間でのひびわれ発生荷重のレベルが異なることによるものと思われる。しかし、全体的には両者の応答は比較的よく一致している。その後の応答では 2000kN 程度まで両者の応答はよく一致しており、鉄筋配置の違いによる差異は認められない。実験では分散配置の T 2 試験体の方が T 3 試験体よりも最終段階の最大耐力で約 500kN 大きくなっていたが、これは前述したように、T 3 試験体では試験区間以外での破壊が T 2 試験体よりも低い荷重で発生したためと考えられる。

以上、解析的な検討結果から考えると、鉄筋配置の違いによる付着有効領域の大きさの違い

は、構造体の耐力にはそれほど影響を及ぼさないものと考えられる。

## 5. まとめ

実機タンク側壁の約 5 分の 1 の試験体による面内載荷試験ならびにシミュレーション解析を行った結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 試験体切断面のひびわれ幅は、局所配置の方がひびわれ幅が大きくなっており、配筋の違いはひびわれ性状に影響する。
- ② 分散配置の方が局所配置よりもコンクリートの負担するせん断応力は最大値で約 1.5 倍、累積で 2.5 倍程度大きくなる。
- ③ 鉄筋配置の違いはテンションスティフニングには影響を及ぼすが構造体の終局領域付近での耐力の差は小さい。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、東京大学前川宏一教授には解析プログラムを使用させて頂くと共に貴重なコメントをいただきました。ここに感謝の意を表します。

また、本研究は東京電力、関西電力による共同研究「LNG 地下式貯槽の合理化設計手法の研究」の一部として実施したものであることを付記し、関連電力会社、土木学会「LNG 地下タンクの設計合理化小委員会分科会 II」（遠藤達巳主査）に対して謝意を表すものである。

## 参考文献

- 1) An, X : せん断を受ける鉄筋コンクリートの破壊解析と耐震性能の照査法に関する研究, 東京大学博士論文, 1996.7
- 2) 岡村, 前川 : 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版

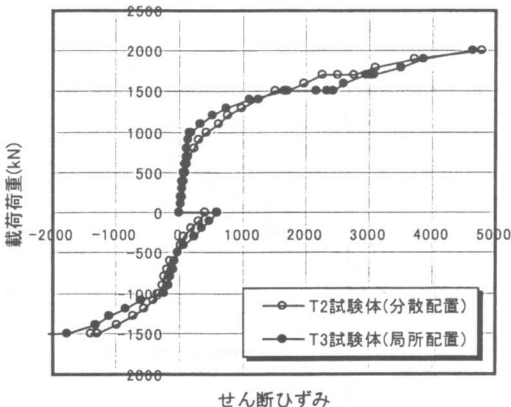


図-9 解析結果の比較