

# 既製コンクリート杭の集中外圧荷重による縦亀裂発生に関する実験・解析と亀裂荷重の推定方法

土屋 勉  
井上 嘉信

## § 1. はじめに

1978年宮城県沖地震の基礎杭の被害調査資料<sup>1)2)</sup>によると、既製鉄筋コンクリート杭に材軸方向の亀裂(縦亀裂)が数多く発見されている。これらの縦亀裂は、水平力によっては発生しにくいことや、曲げ亀裂(水平亀裂)の無い杭体にも発生していることから、地震によって水平力が作用する以前に発生したと考えられる。

杭体上記の縦亀裂が発生することについては、下記に示すような種々の要因を挙げることができる。

①杭体の打設以前に発生するもの——杭体の製造過程でまだ強度が十分に発揮されない状態や、ヤードでの保管時あるいは車船による輸送時等の杭体の過大な積み重ねに起因する。

②杭体の打設中に発生するもの——プレローリング孔に挿入した杭体を打撃する際に、打撃により杭体が湾曲して杭体側面が孔壁に衝突することに起因する。

③杭体の打設以後に発生するもの——杭頭のカットオフ処理に起因する。

一方、既製鉄筋コンクリート杭の軸方向の圧縮や曲げ耐力については、これまで種々の実験<sup>3)~5)</sup>がなされており、これらをもとに杭体の品質向上が図られている。しかしながら、フープ方向の耐力については埋設管に対する検討例<sup>6)</sup>がある程度で、これまで既製鉄筋コンクリート杭の杭体の縦亀裂発生に関して検討した報告はみられない。

以上のことから、筆者は上記の①~③の荷重状態が杭体の周面に対して垂直に作用する集中荷重(集中外圧荷重)であることに着目して、杭体の縦亀裂に関する実験と解析を行なった。本報告は、これを取りまとめたものであり、以下の構成になっている。

まず、杭体に集中外圧荷重を静的に作用させた実験を行なって、亀裂の進展状況は載荷幅の大小によらずほぼ同様であることや、杭体の内側表面(内面)には比較的小さな荷重で亀裂が入ることを明らかにした。次に、杭

の内面に発生する初亀裂荷重に着目して、亀裂発生前の杭体の応力分布について実験と有限要素法(FEM)弾性解析の対応を検討するとともに、応力分布性状に対する杭体の諸元と荷重条件の違いによる影響を明らかにした。最後に、これまでの検討結果をもとにして、杭体内面に発生する亀裂発生荷重の推定法を示すとともに、杭体の積み重ね段数に制限をすべきことを提案した。

## § 2. 亀裂の進展と外圧荷重

本章では、既製鉄筋コンクリート杭の縦亀裂が、集中外圧荷重により発生することを確認するために実験を行なった。まず、試験体の載荷方法や亀裂発生の判定方法などの実験方法について述べた後、実験結果として杭径や載荷幅を変えて、亀裂発生から破壊に至るまでの亀裂進展状況とそのときの外圧荷重について述べている。

### 2.1 実験方法

#### 2.1.1 試験体形状

実験に用いた杭は、図-1に示すような杭径  $R=600$  mmと400mmの2種類の高強度PC杭(AC杭—A種)である。この杭を2~3等分して、図-2のように集中外圧荷重を作用させる杭体を作成した。試験体の一覧を表-1に示す。試験体P61~P63とP41~P43ではワイヤーストレインゲージ(W.S.G.)によるひずみ測定の外に破壊に至るまでアコースティックエミッション(A.E.)測定

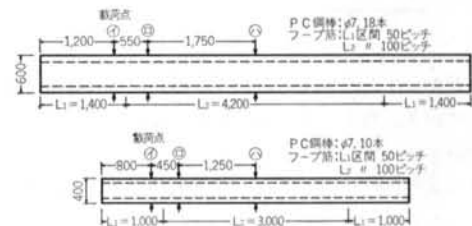


図-1 試験杭

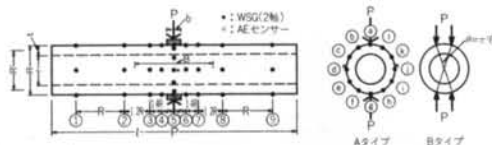


図-2 試験体形状および荷重型式

試験体	外径 R(mm)	肉厚 t(mm)	杭長 l(mm)	試験体 位置	荷重 型式	荷重幅 b(mm)
P61	600	90	3500	⊕	A	100
P62	〃	〃	〃	⊕	〃	200
P63	〃	〃	〃	⊕	〃	400
P64	〃	〃	2330	①	〃	100
P65	〃	〃	〃	①	B	〃
P66	〃	〃	〃	⊖	〃	〃
P41	400	80	2500	⊕	A	100
P42	〃	〃	〃	⊕	〃	200
P43	〃	〃	〃	⊕	〃	400
P44	〃	〃	1670	①	〃	100
P45	〃	〃	〃	①	B	〃
P46	〃	〃	〃	⊖	〃	〃

表-1 試験体一覧

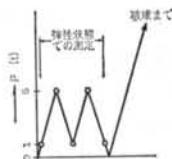


図-3 荷重サイクル

試験片	(I)	(II)	(III)
力学常数			
圧縮強度 $F_c$	—	○	○
引張強度 $F_t$	—	—	○
ヤング率 $E_c$	○	○	○
ポアソン比 $\nu$	○	○	○

表-2 力学常数の測定

を実施した。また、表中の試験体位置の記号は図-1に対応している。なお、 $R=400$  mmの杭では肉厚の規格が $t=65$  mmとなっているが実測結果では各試験体とも $t \approx 80$  mmであったので、本報ではこの実測値を $R=400$  杭の肉厚とみなした。

### 2.1.2 荷重方法

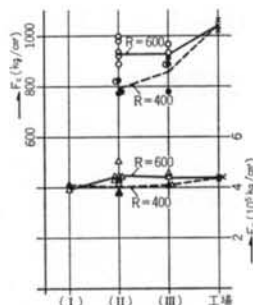


図-4 各試験片による $F_c$ 、 $E_c$ の比較

荷重型式は図-2に示したように、荷重が杭周の頂点に作用する場合（Aタイプ）と中心角が $\pi/6$ の位置の場合（Bタイプ）の2種類であり、Aタイプでは荷重幅を $b=100 \sim 400$  mmまで変化させた。加力は、図-3のように最初の2サイクルを亀裂発生前で弾性的な挙動を示すと考えられる1~5 tonの間で繰り返し、その後は破壊に至るまで1 tonピッチで荷重を増加させた。

### 2.1.3 試験体の力学常数

外圧実験に先立ち、杭体コンクリートの力学常数を推定する目的で、外圧実験に用いた杭体と材令が同じ杭体から試験片を作成し、表-2の測定を行なった。試験片は搬入後、直射日光をさけた空气中に放置しておいたものであり、材令は約8カ月である。

圧縮強度( $F_c$ )とヤング率( $E_c$ )の測定結果をまとめて図-4に示す。なお、図中で工場とあるのは試験杭と同じロットから採取した1/4セグメント試験体であり、材令3~4日における製造工場での試験結果である。図-4によると、 $F_c$ は(II)、(III)試験片とも工場での値より小さくなっている。また、 $R=600$  杭と $R=400$  杭で強度に幾分差がみられるが、杭体の圧縮強度は約 $F_c \approx 900$  kg/cm<sup>2</sup>程度であると思われる。ヤング率は、いずれの試験結果とも工場での値に近似しており、 $E_c \approx 4.3 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup>である。

(III)試験片による引張(割裂)強度は $F_t=50 \sim 70$  kg/cm<sup>2</sup>とかなりばらつきがみられた。試験片の寸法の違いや周面の整形の程度も影響しているものと思われる。ポアソン比については、いずれの試験片においても通常のコンクリートの常数に用いられる $\nu \approx 1/6$ であった。

### 2.1.4 亀裂発生の判定方法

通常、コンクリートの亀裂の発生を知る方法として、目視で観察する方法や、表面にW.S.G.を貼って亀裂発生による応力の再配分現象をひずみ分布の変化から判定する方法がある。しかしながら、今回の外圧実験のように初亀裂が杭体の内側の表面(内面)に発生する場合においては、目視やW.S.G.貼付が困難であり、亀裂

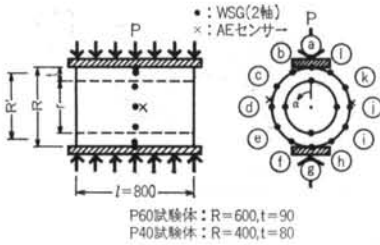


図-5 P60, P40試験体

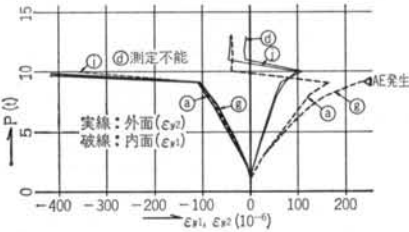


図-6 P~ε 曲線 (P60試験体)

の判定は難しい。そこで、今回の実験においては近年構造物や設備の破壊予知、健全性の診断等に広く応用されている A. E. 計測を実施した。

集中外圧荷重を作用させる実験に先立ち、図-5に示すような等分布荷重が作用する試験体について、杭体の外側の表面(外面)に A. E. センサを取り付け、また杭体の内面と外面に W. S. G. を貼って破壊に至るまで両者を比較した。図-6は、その内から試験体 P60 について、フープ方向の内面ひずみ度 ( $\epsilon_{y1}$ ) と外面ひずみ度 ( $\epsilon_{y2}$ ) をプロットしたものである。それによると、引張ひずみは④、⑤点では  $P=9\sim 10\text{ t}$ 、また④、①点では  $P=10\sim 11\text{ t}$  の荷重時に大きく減少したことから、この荷重で亀裂が発生したと思われる。一方、A. E. 計測によると、最初の A. E. は  $P=9\text{ t}$  に達したときに発生し、④、⑤の杭体内面の W. S. G. に変化が表われた荷重に一致している。しかし、その後は連続的に A. E. が発生するため、④、①点の杭体外面に亀裂が発生した時点を A. E. で察知することは不可能であった。

以上のことから、外圧実験においては初亀裂の発生する荷重については A. E. 計測により判定し、杭体外面に発生する亀裂荷重については杭体外面に貼った W. S. G. のひずみ変化から判定することにした。

## 2.2 亀裂の進展状況

集中外圧実験結果の一例として、図-7は試験体 P61 について外圧荷重(P)と⑤断面における杭体外面の材軸方向ひずみ度 ( $\epsilon_{x2}$ ) およびフープ方向ひずみ度 ( $\epsilon_{y2}$ ) の関係を示したものである。また、図-8は破壊時の亀裂分布を示したものであるが、本実験においてみられた亀

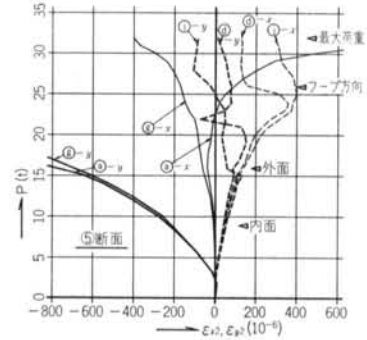


図-7 P~ε 曲線 (P61試験体)

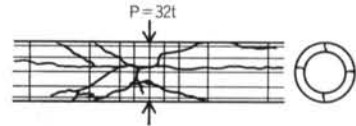


図-8 亀裂状況 (P61試験体)

裂の進展状況は一般的に以下のように表わされる。初亀裂は杭体内面の④、⑤位置で材軸方向に発生する。これは A. E. によって観測されるが、図-7に示したように杭体外面に貼った W. S. G. の値では応力再配分の現象が明瞭には分らない。次に、杭体外面の④、①位置で材軸方向に亀裂が発生する。この亀裂は W. S. G. の値に明瞭な変化が表われるが、目視ではまだ分らない場合が多い。荷重が増加するとともに、この亀裂幅が広がり目視で観察できるようになるが、この亀裂が杭径の2倍程度に進展するまでは新たな亀裂が発生しない。次に、載荷断面のフープ方向に亀裂が発生し、この亀裂が荷重の増加とともに斜め方向に進展して破壊に至る。

## 2.3 亀裂発生荷重および最大荷重

杭の内面および外面に亀裂が発生したときの荷重と、杭体が破壊したときの最大荷重をまとめて表-3に示した。表中、内面の亀裂発生荷重を( )で表示したものは、A. E. 測定を実施しなかったため、外面に亀裂が発生した荷重を1/2することにより推定したも

試験体	亀裂発生荷重		最大荷重
	内面	外面	
P61	8~9	16	32.0
P62	8~9	17	33.8
P63	8~9	17	33.3
P64	(9)	18	33.9
P65	(12)	24	46.0
P66	(12)	24	41.0
P60	8~9	11	13.0
P41	7~8	15	31.0
P42	7~8	17	25.9
P43	8~9	15	31.9
P44	(9)	18	28.6
P45	(13)	26	37.3
P46	(10.5)	21	33.6
P40	7~8	13	13.0

表-3 亀裂発生荷重および最大荷重 (単位: ton)

のである。

表-3によると、亀裂発生荷重や最大荷重は載荷幅や杭長が異なるにもかかわらず、P61~P64とP41~P44は、それぞれほぼ同じような値を示している。そして、おおむね最大荷重の約1/2が杭体の外面に発生する亀裂荷重であり、さらにその約1/2が杭体の内面に発生する亀裂荷重である。

Bタイプの載荷型式である試験体P65, P66およびP45, P46では、上記に示したP61~P64やP41~P44に比べて5割程度大きな荷重で亀裂や破壊が生じている。

なお、等分布荷重を作用させた試験体P60やP40では、杭体の外面に発生した亀裂荷重と最大荷重がほぼ等しくなっており、集中外圧荷重が作用する杭体の性状と大きく異なっていることが分かる。

### § 3. 杭体の応力度分布

本章は、集中外圧荷重が作用する場合の杭体の内面に発生する初亀裂荷重に着目して、それに影響を与えと思われる杭体の応力度分布についてFEM解析値と実験値をもとに考察したものである。最初に、FEMによるモデル化とその適用性について検討を行なった後、杭体に分布する面外および面内の各応力度の傾向を明らかにする。次に、杭体の応力度分布における集中外圧荷重の載荷幅、載荷位置や杭長の影響について、FEM解析値と実験値をもとに明らかにする。

#### 3.1 FEMによる解析方法

##### 3.1.1 杭体のモデル化

図-2の外圧が作用する円筒構造物を、図-9のように折板構造物に置き換えて有限要素法(FEM)により解析した。使用した要素は面内力については長方形要素、面外力については非適合長方形曲げ要素であり、通常のFEMによる解析手順に従い<sup>8)</sup>、次に示す変位関数を用いて剛性マトリックスを求めて解析した(記号は図-9参照)。

$$\{f\} = [N]^e \cdot \{\delta\}^e \quad \dots\dots(1)$$

ただし、

長方形要素:

$$\{f\} = \{u, v\}^T$$

$$[N]^e = [IN_1, IN_2, IN_3, IN_4]$$

$$[N_i] = (1 + \xi \cdot \xi_i) \cdot (1 + \eta \cdot \eta_i) / 4$$

$$\xi = x/a, \quad \xi_i = x_i/a, \quad \eta = y/b, \quad \eta_i = y_i/b$$

$$\{\delta\}^e = \{u_i, v_i\}^T, \quad i=1, 4$$

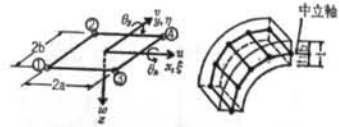


図-9 FEM単位要素およびモデル化

モデル名	外径	中立	肉厚	杭長	載荷幅	載荷	備考
	R(mm)	R'(mm)	t(mm)	l(mm)	b(mm)	型式	
6A1	600	504.6	90	2400	100	A	P61, P64
6A1-I	''	''	''	600	''	''	—
''-II	''	''	''	1200	''	''	—
''-III	''	''	''	3600	''	''	P61, P64
''-IV	''	''	''	4800	''	''	—
6A2	''	''	''	2400	200	''	P62
6A4	''	''	''	''	400	''	P63
6B1	''	''	''	''	100	B	P65, P66
4A1	400	313.2	80	1600	100	A	P41, P44
4A1-I	''	''	''	400	''	''	—
''-II	''	''	''	800	''	''	—
''-III	''	''	''	2400	''	''	P41, P44
''-IV	''	''	''	3200	''	''	—
4A2	''	''	''	1600	200	''	P42
4A4	''	''	''	''	400	''	P43
4B1	''	''	''	''	100	B	P45, P46

表-4 解析モデル一覧

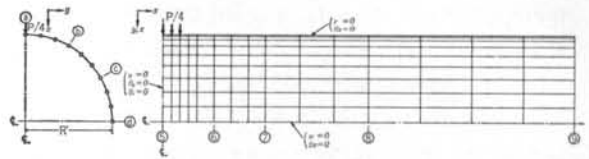


図-10 FEM解析のメッシュ分割例(6A1モデル)

$[I] = 2 \times 2$  の単位マトリックス

非適合長方形曲げ要素:

$$\{f\} = w$$

$$[N]^e = [N_1, N_2, N_3, N_4]$$

$$[N_i] = \frac{1}{2} [(1 + \xi \cdot \xi_i)(1 + \eta \cdot \eta_i) \cdot (2 + \xi \cdot \xi_i + \eta \cdot \eta_i - \xi^2 - \eta^2), -a \cdot \xi_i(1 + \xi \cdot \xi_i)^2 \cdot (1 - \xi \cdot \xi_i) \cdot (1 + \eta \cdot \eta_i), -b \cdot \eta_i(1 + \eta \cdot \eta_i)^2 \cdot (1 + \xi \cdot \xi_i) \cdot (1 - \eta \cdot \eta_i)]$$

$$\{\delta\}^e = \{w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}\}^T, \quad i=1, 4$$

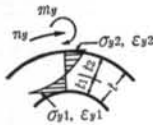
解析したモデルの一覧を表-4に示し、備考欄には対応する実験の試験体名を記した。また、杭体のヤング係数は  $E = 4.37 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比は  $\nu = 1/6$  とした。図-10に杭体モデルのメッシュ例を示したが、加力位置近傍では細かく、材軸方向に遠ざかるにつれて粗い分割とした。なお、モデルの対称性を考慮して、全体の1/8について計算して全体の性状を表わした。

##### 3.1.2 モデルの適用性

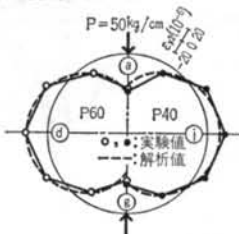
解析モデルの適用性を検討する目的で、図-5のよう

		半径方向変位		フープ方向応力				フープ方向の内外面ひずみ度			
		$\delta_z(P/E \cdot l)$		$m_y(P \cdot \text{cm}/l)$		$n_y(P/l)$		$\varepsilon_{y1}(P/E \cdot l^2)$		$\varepsilon_{y2}(P/E \cdot l^2)$	
		Ⓐ	Ⓓ	Ⓐ	Ⓓ	Ⓐ	Ⓓ	Ⓐ	Ⓓ	Ⓐ	Ⓓ
R=600 t=90	本解析	21.0	-17.6	8.12	-4.71	-0.043	-0.501	6.76	-4.51	-5.40	2.55
	曲り梁	19.4	-17.9	8.03	-4.58	0	-0.500	6.74	-4.40	-5.30	2.47
	実験	17.5	—	—	—	—	—	6.90	-4.46	-4.46	2.71
R=400 t=80	本解析	7.5	-5.7	5.00	-2.87	-0.046	-0.500	5.55	-3.86	-4.05	1.67
	曲り梁	6.6	-6.0	4.98	-2.85	0	-0.500	5.59	-3.83	-3.98	1.65
	実験	9.6	—	—	—	—	—	3.93	-4.89	-4.33	2.32

表—5 等分布荷重を受ける場合の変位，応力，ひずみ度の比較



図—11 断面内の応力分布



図—12 杭体外面のひずみ度分布

に等分布荷重が作用する場合について，本解析法による解と曲り梁による解<sup>10)</sup>および実験値と比較した。

表—5は，変位や応力の極大値を示すⒶ点およびⒹ点での値である。なお，各値はヤング係数 $E$ ，外圧荷重 $P$ ，杭長 $l$ を単位として扱っている。表中の曲り梁の変位および応力は下式により算定した（記号は図—5，図—11参照）。

$$\text{Ⓐ点変位: } \delta_z = P \cdot R'^3 (\pi/4 - 2/\pi) / 16 \cdot E \cdot I \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{Ⓓ点変位: } \delta_z = -P \cdot R'^3 (2/\pi - 1/2) / 16 \cdot E \cdot I \quad \dots\dots(3)$$

ただし， $I$ ：肉厚部のフープ方向断面2次モーメント

$$R' = (R+r)/2 - 2 \cdot e$$

$$e = \frac{t^2}{3(R+r)} \left\{ 1 + \frac{16}{15} \left( \frac{t}{R+r} \right)^2 \right\}$$

$$\text{曲げモーメント: } m_y = P \cdot R' (2 - \pi \cdot \sin \alpha) / 4 \cdot \pi \cdot l \quad \dots\dots(4)$$

$$\text{軸力: } n_y = -P \cdot \sin \alpha / 2 \cdot l \quad \dots\dots(5)$$

また，フープ方向の内外面ひずみ度は，本解析値や曲り梁として求められる上記の応力を，以下の式に代入して算定した。

$$\text{内面ひずみ度: } \varepsilon_{y1} = \{ n_y / t + 2 \cdot m_y \cdot t_1 / t \cdot e \cdot r \} / E \quad \dots\dots(6)$$

$$\text{外面ひずみ度: } \varepsilon_{y2} = \{ n_y / t - 2 \cdot m_y \cdot t_2 / t \cdot e \cdot R \} / E \quad \dots\dots(7)$$

表—5によると，本解析値と曲り梁理論の値は，応力やひずみ度については極めて良い一致を示している。変

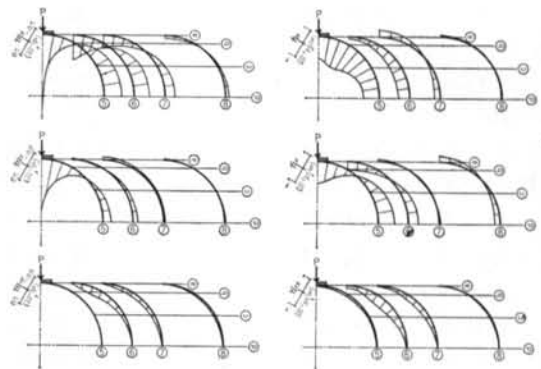
位については，本解析値は曲り梁理論の値よりもⒶ点では8%程大きくなっているが，Ⓓ点では逆に2~4%程小さくなっている。また，実験値の変位と比較すると，本解析値は実験値よりも $R=600$ のモデルで20%程度大きいが， $R=400$ のモデルでは逆に20%程度小さくなっている。

図—12は，杭体外面の $\varepsilon_{y2}$ について本解析値と実験値を比較したものであるが，両者はかなり良い一致を示していることが分かる。

以上のように，本解析法による値は曲り梁理論や実験値に比べて，変位についてはそれ程合致しているとはいえないが，応力や杭体表面のひずみ度についてはかなり良い一致を示していることから，本解析法によるモデルで外圧を受ける杭体の性状をおおむね表わし得るものと考えられる。

### 3.2 面外および面内応力度分布の傾向

図—13は，集中外圧荷重が作用する杭体の弾性時における応力分布の一例として，モデル6A1について各節点の面外応力度 $m_y$ ， $m_x$ ， $m_{xy}$ および面内応力度 $n_y$ ， $n_x$ ， $n_{xy}$ のFEM解析結果を示したものである。ただし，曲げモーメントの符号は杭の内面が引張力になる方向を正とした。



図—13 杭体の応力度分布 (6A1モデル)

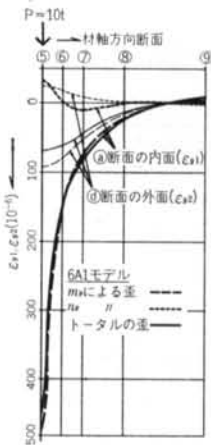


図-14 フープ方向のひずみ度分布 (6A1 モデル)

図-13によると、正のフープ方向曲げモーメント  $m_y$  の最大値は荷重点中央である(⑤, ⑧)位置に発生している。④断面では荷重点位置から材軸方向 ( $x$  方向) に遠ざかると急激に小さな値になっている。また、 $m_y$  の符号は①~④で逆転しており、負の  $m_y$  最大値は(⑤, ⑧)位置に発生している。なお、④断面では⑧断面と異なり、 $x$  方向に遠ざかるにつれて  $m_y$  の減少の仕方はかなりゆるやかである。

材軸方向曲げモーメント  $m_x$  分布についてみると、⑥~⑧断面では極めて小さくなっているが、⑤断面では  $m_y$  分布に比べて値は小さいものの、最大位置が同じである等の分布傾向は前述の  $m_y$  にほぼ等しい。

ねじりモーメント  $m_{xy}$  は、荷重点の外端位置から斜め  $45^\circ$  方向の(⑥, ⑩)を中心とした領域で比較的大きな値になっている。

フープ方向応力度  $n_y$  は、荷重点である⑤断面を中心としてほぼ一様に分布している。しかしながら、荷重点位置から  $x$  方向に遠ざかると、④断面では徐々に圧縮力が小さくなるのに対して、⑧断面では杭の半径ほど離れた⑦断面付近でかなり大きな引張力が発生している。

材軸方向応力度  $n_x$  は、(⑤, ⑩)付近に大きな圧縮力を示す領域があり、(⑤, ④)付近に大きな引張力を示す領域がある。

せん断応力度  $n_{xy}$  は、(⑥, ⑩)付近を中心とした領域で比較的大きな応力度になっている。

次に、図-13の値をもとに杭体の表面に発生するひずみ度を計算した。図-14は、その内から杭体の縦方向亀裂に影響をおよぼすと思われる引張側のフープ方向ひずみ度について、④断面の内面 ( $\epsilon_{y1}$ ) および④断面の外側 ( $\epsilon_{y2}$ ) の値をプロットしたものである。なお、ひずみ度の計算は先に示した式(6), (7)に基づいている。図-14に

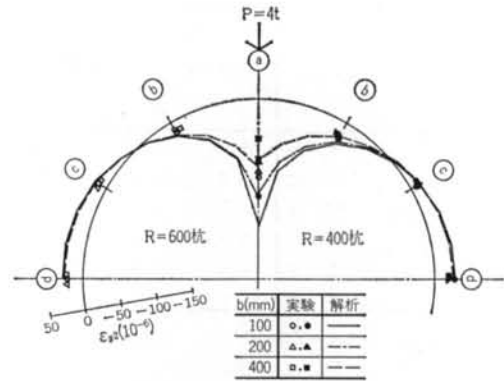


図-15 ⑤断面の  $\epsilon_{y2}$  分布 (荷荷幅を変化させた場合)

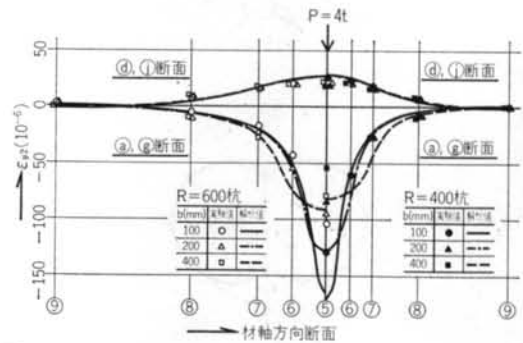


図-16 ④, ⑤および⑧, ①断面の  $\epsilon_{y2}$  分布 (荷荷幅を変化させた場合)

よると、④断面の値の方が⑧断面の分布よりもかなり大きくなっており、最大値は(⑤, ⑩)位置に発生している。面内応力  $n_y$  によるひずみ度は、曲げモーメント  $m_y$  により生ずるひずみ度に比べて(⑤, ⑧)位置で7%、(⑤, ④)位置で26%とかなり小さくなっている。さらに、荷重点近傍では  $n_y$  によるひずみ度は圧縮側であり、 $m_y$  によるひずみ度とは逆向きであることを考慮すると、杭体の縦方向の亀裂荷重を計算するような場合は  $n_y$  を無視してもよいと思われる。

### 3.3 杭体の諸元と荷重条件の影響

#### 3.3.1 荷荷幅の影響

荷荷幅を  $b=100, 200, 400$  mm に変化させて、杭体外面の  $\epsilon_{y2}$  分布を比較した。図-15は、 $P=4t$  が作用した時の荷重点中央の⑤断面について、実験値と解析値を示したものである。④点では荷荷幅が大きくなる程小さなひずみ度が発生する傾向があり、 $b=400$  の場合のひずみ度は  $b=100$  の場合の約  $1/2$  である。これに対して、①~④点では試験体によるひずみ度分布の差は極めて小さくなっている。また、全ての試験体とも実験値は解析値よりも小さくなっており、実験値と解析値の比率は



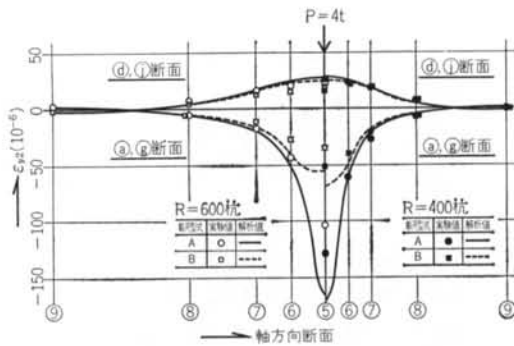


図-17 ④、⑤および④、①断面の  $\epsilon_{y2}$  分布 (載荷位置を変化させた場合)

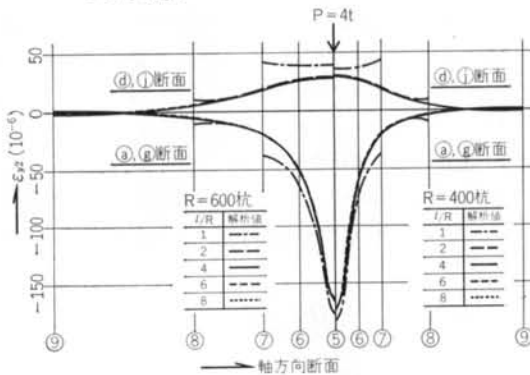


図-18 ④、⑤および④、①断面の  $\epsilon_{y2}$  分布 (杭長を変化させた場合)

0.6~0.9 である。

図-16は、④、⑤および④、①断面の  $\epsilon_{y2}$  を図-15と同様にプロットしたものである。④、⑤断面の分布についてみると最大ひずみ度が載荷点中央の⑤断面に発生し、その大きさは載荷幅が小さい試験体ほど大きくなっている。しかし、載荷位置から材軸方向に遠ざかるにつれて各試験体の値が近似するようになり、⑦断面より外側ではほぼ一樣になっている。また、解析値の分布は実験値に比べて載荷点の⑤断面付近に集中している傾向がある。なお、⑤~⑦区間に発生するモーメントは各試験体とも杭体に発生する全体のモーメントのほぼ80%であり、載荷幅の影響は小さくなっている。次に、④、①断面についてみると、 $\epsilon_{y2}$  分布は⑤断面から材軸方向に遠ざかるにつれて徐々に小さくなっており、④、⑤断面の分布に比べてかなり平均化されている。また、載荷幅の影響は極めて小さくなっている。

### 3.3.2 載荷位置の影響

載荷幅を  $b=100\text{mm}$  と一定にして、図-2に示したA、Bタイプの載荷型式の場合について  $\epsilon_{y2}$  分布を比較した。図-17は、④、⑤および④、①断面の  $\epsilon_{y2}$  分布を 図

-16と同様にプロットしたものである。④、⑤断面の分布についてみると、Bタイプの試験体ではAタイプの試験体に比べて  $\epsilon_{y2}$  の最大値が  $1/2 \sim 1/3$  でかなり小さくなっている。また、全体の分布もBタイプの試験体ではかなり小さくなっており、杭体に発生する全体のモーメントはAタイプの試験体に比べて約60%しか生じていない。このように、杭周の載荷位置は④、⑤断面の分布性に大きな影響を与えることが分かった。これに対して、④、①断面の分布はA、Bタイプの試験体両者がほぼ同じになっている。

### 3.3.3 杭長の影響

載荷幅を一定にして、杭長が  $l=R, 2R, 4R, 6R, 8R$  の場合について解析を行なった。図-18にその結果を示したが、 $R=600$  杭、 $R=400$  杭ともに  $l/R=2 \sim 8$  のモデルでは応力分布がそれぞれほとんど同じになっている。これは④、⑤および④、①の両方の断面でいえることである。これに対して、 $l/R=1$  のモデルでは他のモデルと異なり、全体的に大きな分布になっている。このように杭長が杭径の2倍程度以上あれば、杭体の応力分布は杭長の影響を受けなくなることが分かった。

## § 4. 杭体の亀裂荷重の推定方法

本章では、これまでの検討結果をもとに縦亀裂発生荷重の計算方法を種々検討して、その内から集中外圧荷重が作用する杭体の内面に発生する縦亀裂荷重について簡便な計算方法を提案する。また、杭体の過大な積み重ねによる縦亀裂発生を防止するために、杭体の積み重ね段数に制限をすべきことを述べている。

### 4.1 亀裂荷重の計算方法の提案

表-6は、杭体内面の  $\epsilon_{y1}$  が亀裂発生時のひずみ度に達したときの外圧荷重を種々の方法で計算したものである。亀裂発生時の引張ひずみ度は試験体P60、P40や杭体のコアによる力学常数の試験結果をもとに、 $\epsilon_t=135 \times 10^{-6}$  とした。

計算値④は、図-16~図-17の実験における杭体外面の最大圧縮ひずみ度から、杭体内面の引張ひずみ度を式(6)、(7)で推定して、このひずみ度が上記の引張ひずみ度に達したときの荷重を算定したものである。また、計算値⑤は、図-16~図-17の解析値の最大値をもとに④と同様にして算定したものである。実験値では、Aタイプの載荷型式であるP61~P64、P41~P44とBタイプの載荷型式であるP65~P66、P45~P46はそれぞれほ

試験体		実験値	計算値					
			㊶	㊷	㊸	㊹	㊺	
載荷型式	A	P61	8~9	4.8	3.0	30.6	10.5	8.8
		P62	8~9	5.1	3.9	〃	〃	〃
		P63	8~9	6.2	5.4	〃	〃	〃
		P64	9	5.5	3.0	20.4	〃	〃
	B	P65	12	14.2	10.8	32.5	16.7	14.0
		P66	12	13.0	10.8	〃	〃	〃
載荷型式	A	P41	7~8	3.4	2.5	26.3	8.4	6.6
		P42	7~8	5.2	3.5	〃	〃	〃
		P43	8~9	8.2	5.2	〃	〃	〃
		P44	9	2.9	2.5	17.5	〃	〃
	B	P45	13	11.8	6.8	27.9	13.4	10.5
		P46	10.5	10.9	6.8	〃	〃	〃

(単位: ton)

表-6 初亀裂発生荷重一覧

ほ同じ亀裂荷重になっている。これに対して計算値㊶, ㊷では, 同じAタイプの載荷型式であっても載荷幅が増加するにつれて計算値が大きくなり, 実験値の傾向と異なっている。さらに, 計算値は実験値よりかなり小さな値であり, 応力分布の最大値をもとに推定する上記の方法は極めて不経済である。

計算値㊸は, 集中荷重の状態を全く考えずに, 外圧荷重 $P$ が杭の全長にわたり等分布に作用するものとして, 曲り梁の理論によって応力を求めて亀裂荷重を計算したものである。これによると, 計算値は実験値に比べて極めて大きくなり, 危険側の算定値になっている。

計算値㊹, ㊺は, 外圧荷重 $P$ が杭体のある有効長さの範囲に等分布に作用するものとして, ㊸と同様に求めたものである。杭の有効長さ $B$ として, ㊹は杭外径の2倍( $B=2 \cdot R$ )であり, ㊺は杭の中立軸径の2倍( $B=2 \cdot R'$ )として計算した。これによると, A, Bタイプの載荷型式の場合とも, 計算値と実験値が比較的近似していることが分かる。

以上, 実験値と各種計算値を比較した結果をまとめると, 弾性応力状態の最大応力をもとに亀裂荷重を推定する㊶, ㊷の方法や, 杭の全長を有効と考える㊸の方法を適用することはできないと考える。杭の有効長を考慮した㊹や㊺の方法が適切であると思われるが, 本報ではより安全側の算定値になる㊺の方法を提案する。

以下に, この亀裂発生荷重( $P_{era}$ )の計算法を示す(記号は図-2参照)。

$$P_{era} = M / \left\{ 0.159 R' \left( \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\pi - \theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \right) \right\} \quad \dots(8)$$

ただし, Aタイプの載荷型式では  $\theta=0$

$$M = F_t \cdot B \cdot t \cdot e \cdot r / (t - 2 \cdot e)$$

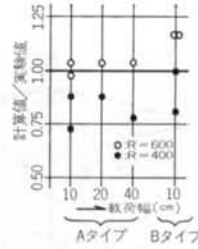


図-19 初亀裂発生荷重の計算値と実験値の比

$$F_t: \text{杭体の引張強度} = 1.8\sqrt{F_c^{11}}$$

$$B = 2 \cdot R' = R + r - 4 \cdot e, \quad b > B \text{ の場合は } B = b$$

$$e = \frac{t^2}{3(R+r)} \left\{ 1 + \frac{16}{15} \left( \frac{t}{R+r} \right)^2 \right\}$$

上記の方法で計算した値と実験値を比較したものが図-19であるが, 各試験体とも計算値/実験値がおおむね1であり, 本計算法が有効であると思われる。

#### 4.2 杭体の積み重ね段数

本報の検討結果をもとにして, 杭体の過大な積み重ねにより発生する杭体の縦亀裂を防止するために, 積み重ね段数の制限を行なうことを以下に提案する。

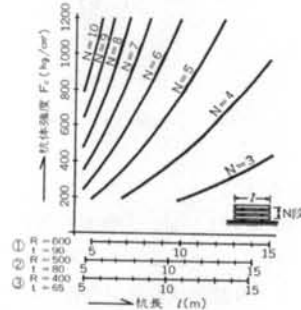


図-20 杭体の積み重ね限界段数算定図

図-20は, 杭径  $R=400, 500, 600$  の既製コンクリート杭について, 上段の杭重量によって最下段の杭体に縦亀裂が発生するときの段数を, 杭体強度( $F_c$ )と杭長( $l$ )をパラメータとして示したものである。なお, 図-20はAタイプの枕木上に積み重ねる場合であり, また亀裂発生荷重の計算は式(8)による。それによると, まだ強度が十分に発揮されない状態や杭長が長い場合には, 亀裂が発生しやすいことから特に注意が必要である。また, ヤードでの保管や輸送時において多量の杭体を扱う必要が生じた場合は, 上段の杭体を下段の杭体を介することなく独立に支持させる等の処置をして過大な応力の発生を避けなければいけない。



## § 5. 結論

本報告では、集中外圧荷重が作用する既製コンクリート杭の杭体の実験と FEM 解析を行なって、下記の事項を明らかにした。

①集中外圧荷重が作用する杭体の性状は、等分布外圧荷重が作用する杭体の性状と大きく異なる。前者の初亀裂発生荷重は、破壊時における最大荷重の約 1/4 の大きさである。それに対して、後者ではそれが約 2/3 の大きさであり、亀裂発生から破壊に至るまでの荷重増加が小さい。

②杭体の内側および外側の表面に発生するフープ方向のひずみ度は、大部分が面外の曲げモーメントにより発生し、面内の軸力により発生するひずみ度は極めて小さい。特に杭体内面の亀裂荷重を算定する場合は、面内の軸力を考慮する必要はない。

③集中外圧荷重の載荷幅が小さくなるほど、載荷点近傍に発生する最大応力は大きくなるが、材軸方向のある区間に分布する平均の応力は載荷幅の変動によらずほぼ一様である。亀裂発生荷重は 100~400 mm の載荷幅変動の影響を受けず、ほとんど同じである。

④集中外圧荷重が  $\pi/6$  の中心角をもつ杭周位置に作用

する場合は、杭周の頂点に作用する場合に比べて応力分布がかなり小さくなる。前者における亀裂発生荷重は、後者のそれに比べて約 1.5 倍である。

⑤杭長が杭径の 2 倍程度以上あれば、集中外圧荷重が作用する杭体の応力分布は杭長の影響を受けなくなる。

⑥亀裂発生荷重の算定法として、杭体の有効長として杭の中立軸径の 2 倍を考慮した式(8)を提案する。

⑦杭体の過大な積み重ねにより発生する杭体の縦亀裂を防止するために、杭体強度と杭長に応じて、杭体の積み重ね段数を図-20 に示した段数以下に制限することを提案する。

以上のように、本報告では集中外圧荷重が作用する既製コンクリート杭の静的な性状を明らかにすることができた。また、杭体の打設以前に発生すると思われる縦亀裂に関しては、それを防止するための提案をすることができた。しかし、杭体の打設中や打設以後に発生すると思われる縦亀裂に関しての検討がまだなされていないので、今後、現場実験等により明らかにする必要がある。さらに、縦亀裂の発生した後の既製コンクリート杭の耐力と変形状態についても、今後詳細な検討を行なう必要がある。

### <参考文献>

- 1) 岸田英明：“鉄筋コンクリート建築基礎構造の耐震性能” コンクリート工学 (1980.3) pp. 46~52
- 2) 志賀敏男：“宮城県沖地震におけるくいの被害とその復旧” 建築技術 (1980.4)
- 3) PC 杭技術委員会 (六車他)：“軸圧を受ける PC 杭の曲げ試験実験報告” プレストレストコンクリート (1971.6)
- 4) 末永保美他：“組み合わせ応力を受ける超高強度 PC くいの力学的強度特性に関する研究—その 1, その 2” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1972.10)
- 5) 大野和男他：“遠心力鉄筋コンクリート杭主体部の圧縮耐力について” 日本建築学会北海道支部研究報告集 (1967.8)
- 6) 杉木六郎：“極限強さ設計方法による鉄筋コンクリート管の強度計算” セメントコンクリート No. 177 (1961.11)
- 7) 古藪徳二：“PC くいの曲げ強さ試験方法に関する一提案” コンクリートパイル No. 6 (1972.11)
- 8) O. C. Zienkiewicz & Y. K. Cheung：“マトリックス有限要素法” 培風館 (1970)
- 9) 土屋勉：“切梁と腹起しの接合部の応力分布と腹起しの補強効果について” 日本建築学会関東支部研究報告集 (1978.5)
- 10) “強度設計データブック” 荻原房 pp. 431~449
- 11) 日本建築学会：“鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説” (1971) p. 70

