

光弾性皮膜法によるモルタル柱偏心圧縮実験

吉田俊彌* 三井康司**

(昭和50年10月31日受理)

The Photoelastic Coating Method Applied to the Analysis of Eccentrically Loaded Mortar Column

Shun-ya YOSHIDA and Yasushi MITSUI

The photoelasticity has been developed to a powerful technical instrument of quantitative stress analysis which exceeds all other methods in reliability and practicability. Especially, the photoelastic coating method is mainly used to obtain the principal stresses or the yielded patterns of steel structural members, and its utility has been recognized in several experiments about steel beams and columns in our laboratory. On the other hand, it seems that this useful method is not applied to the stress analysis of concrete and similar brittle materials.

In this paper, an experimental approach to the analysis of stress distribution through all range in the eccentrically loaded mortar column by applying the photoelastic coating method is reported, and the accuracy of this method is verified numerically by the finite element method.

1 ま え が き

光弾性皮膜実験法は土木、建築、機械工学の分野において、実際に使用される材料を下地母材として、モデルの応力を領域的に把握しようとする一実験的手法である¹⁾。この実験的手法はエポキシ系のモデルを使用する通常の光弾性実験法と異なり、下地材料の特性が忠実に現われるため、鋼等をモデルとした塑性問題の解析に多く用いられている^{2),3),4)}。しかし延性の比較的少ないコンクリートのごとき脆性体に応用された例はほとんど見当らず、わずかにクラックの発生位置を知るために適用されたものがある位である⁵⁾。当実験法のこのような脆性体に対する適用が容易になると、理論解析の煩雑なコンクリート構造

* 土木工学教室 教授

** 土木工学教室 助手

物各部の応力解析，コンクリート構造物における骨材の挙動⁶⁾，クラックの定量的把握，鉄筋コンクリートにおける鉄筋とコンクリートの付着状態⁷⁾等の実験解析が可能となり，また破壊機構^{8)~13)}を知るための一実験的解析手法となり得るものと思われる。

本研究はその基礎的段階としてモルタル柱偏心圧縮実験により，

- 1) 等色線図における低次の縞次数の取り扱い方
- 2) 当実験において比較的撮影が困難とされ¹⁴⁾，かつ実験誤差を含み易い等傾線を用いないで主応力を分離する一手法

を主として報告する。

2 実験概要

2.1 モルタル供試体

コンクリート柱は粗細骨材等の不均一性要素が入るため，本研究においてはモルタル柱により実験を行なった。モルタル柱の寸法は $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 16\text{cm}$ であり，製作は JIS R 5201 により行ない，重量配合比は水：セメント：砂 = $0.65 : 1 : 2$ である。砂は豊浦標準砂，セメントは秩父早強ポルトランドを使用した。モルタル供試体は打設後 4 時間後にストレートエッジで表面仕上げを行ない，24 時間湿気箱に入れておき，脱型後は 10 日間水中養生を施した。水中養生の後には 1 日間空中養生を行ない皮膜を接着した。皮膜の接着期間は 4 日間であり，モルタル供試体 1 個につき 10kg の重みで接着を行なった。

2.2 光弾性皮膜

筆者らは従前エピコートラバー (チオコール LP-3, ジェチレントリアミン, ハードナー 905 を配合したもの) を使用したが^{15), 16)}，本実験では光弾性感度の比較的良好と思われるアラルダイトラバー (アラルダイト CY 230, ハードナ 956 を配合したもの) を使用した¹⁷⁾。重量配合比を決定するに当たり，(100 : 18), (100 : 20), (100 : 22) の 3 種の皮膜を製作し検討したが，結局 (100 : 22) のものを採用した。モルタル供試体への接着は皮膜と同配合のものを使用し，モルタル供試体と皮膜の間に偏光の反射を可能ならしめるためにアルミ箔を挿入した¹⁵⁾。

2.3 実験設備

等色線は低次の縞次数を読みとる必要上カラー撮影とし，色相判別を行なった。撮影条件を一定とするため，200 ton アムスラーの周囲を暗幕で囲み実験を行なった。写真 1 にその概要を示す。写真 2 は偏心荷重を加えるための装置である。偏心荷重を正確に載荷させるために，モルタル柱の三

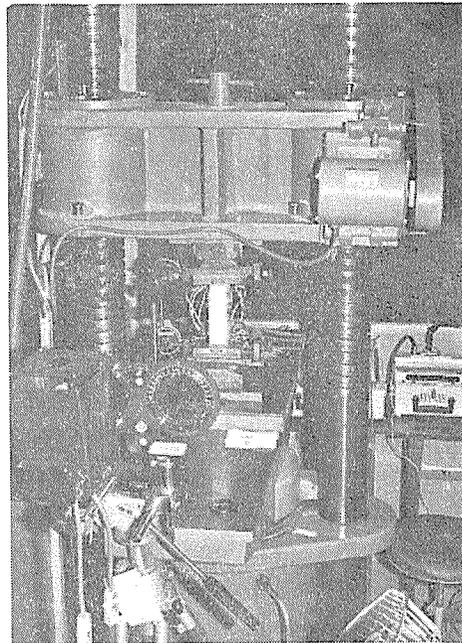


写真1 実験概要

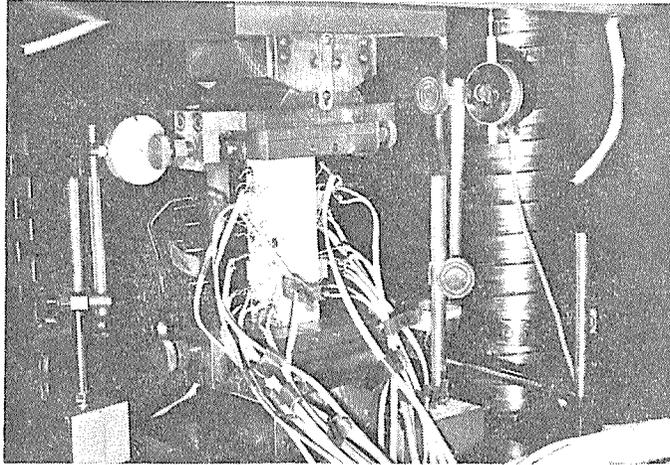


写真2 偏心荷量装置

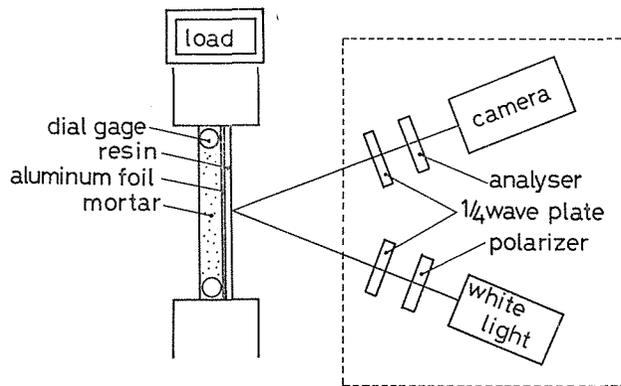


図1 実験装置概要図

側面にポリエステルゲージを貼布し、まず縦ひずみが 100×10^{-6} 前後の値で圧縮中心軸を求め、しかる後に偏心を与えた。図1は実験概要を示す。図中の光弾性皮膜装置は理研製 PA-15であり、ダイヤルゲージは偏心距離を測定するためのものである。なおモルタル柱上下面と偏心圧縮装置面との摩擦の影響を少なくするために¹⁸⁾厚さ1mmのテフロンシートにグリスを塗って挿入している。

3 モルタルとアラルダイトラバーの材料特性

図2はモルタル柱と同配合のモルタルによる円柱形供試体の応力-ひずみ曲線である。同図より理論計算に用いる弾性係数 E_m とポアソン比 ν_m はそれぞれ、 $E_m = 2.2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\nu_m = 0.2$ と算定した。また図3は皮膜の応力-ひずみ曲線である。同図は幅20

* 応力-ひずみ図で $\sigma = 200 \text{ kg/cm}^2$ 迄の E_m の平均値を採用した。

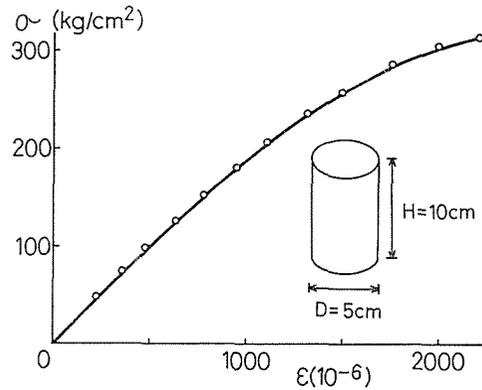


図2 モルタル応力-ひずみ図

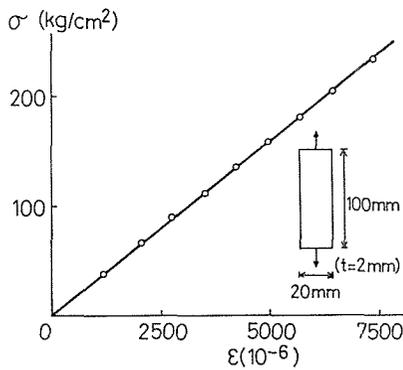


図3 皮膜応力-ひずみ図

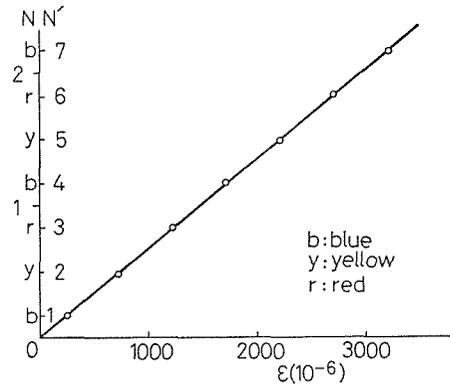


図4 皮膜感度曲線

mm, 長さ 100mm, 厚さ 2mm の皮膜の両面に二方向ゲージを貼布し, 5ton アムスラーによる引張試験より得たものであり, 縦方向ひずみが 7500×10^{-6} 位迄は線形であることがわかる. 図より皮膜の弾性係数 E_r は $3.20 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$ であり, ポアソン比 ν_r は 0.37 であった.

図4は皮膜の感度曲線を示す. 図中縦軸の N' は通常の縞次数を表わすが本実験のようにモルタルを皮膜下地材料とする場合は鋼等の場合と異なり, 高次の縞次数を期待することができない. そこで1次の縞次数間を色相により3分割し, 等色線を読みとった. 縦軸の N' はそれを示す. なおこの感度曲線は厚さ6mmの鋼部材を下地材とし, $20\text{mm} \times 40\text{mm}$, 厚さ2mmのアラルダイトラバーを接着し, 鋼部材の裏面にポリエステルゲージを貼布して, 50ton アムスラーにより引張試験を行なった結果である. 図より明らかなるようひずみが 3000×10^{-6} 位迄はひずみ ϵ_r と縞次数 N' の間は線形関係である.

光弾性皮膜法において皮膜の縞次数と皮膜の主応力差, 主ひずみ差との関係は式(1)のごとくなる.

$$N = 2\alpha t_r(\sigma_{r1} - \sigma_{r2}) = \frac{2\alpha t_r E_r}{1 - \nu_r} (\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2}). \quad (1)$$

ここに α : 皮膜の感度,
 t_r : 皮膜の厚さ,
 $(\sigma_{r1} - \sigma_{r2}), (\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2})$: 皮膜の主応力差, 主ひずみ差,
 E_r, ν_r : 皮膜の弾性係数, ポアソン比.

鋼部材のポアソン比を ν_s とすると皮膜の感度測定においては $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{r1}, \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{r1}$ であり, かつこれは単軸引張試験であるから $\varepsilon_{s2} = -\nu_s \varepsilon_{s1}$ である. ここに $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}$ は鋼部材の主ひずみを表わす. これらの関係を式 (1) に代入すると結局皮膜の感度 α は

$$\alpha = \frac{1 + \nu_r}{1 + \nu_s} \cdot \frac{N}{2t_r E_r \varepsilon_{s1}} \quad (2)$$

となり, 本実験に使用した皮膜の感度は 0.0556cm/kg であった.

硬い皮膜を使用した場合には皮膜の弾性係数 E_r が大きくなるので, 補強効果の影響を考慮する必要がある. そこで F. Zandman が弾性平面問題に用いた式を修正し, モルタルの弾性係数を変化させて計算してみる. 皮膜の補強係数を c とすると,

$$c = 1 + \frac{t_r \cdot E_r}{t_m \cdot E_m} \cdot \frac{(1 + \nu_m)}{(1 + \nu_r)}. \quad (3)$$

ここに t_m はモルタル柱の厚さを表わす. ひずみ ε_m が $1000 (\times 10^{-6})$ 程度では E_m は $1.52 (\times 10^5) \text{kg/cm}^2$ であり, この場合 $c = 1.01$ となる. また ε_m が $2500 (\times 10^{-6})$ 程度では E_m は $0.80 (\times 10^5) \text{kg/cm}^2$ で, このとき $c = 1.02$ となる. よって皮膜による補強効果は最大約 2% 位でほとんど無視してさしつかえない.

4 主応力の分離

従来の光弾性皮膜実験法においては等傾線撮影の困難さから, 内部応力を分離することが難しい. このため本実験法は鋼部材における応力集中問題のごとき境界応力の実験解析に主として使用されているのが現状である.

そこで筆者らのはつぎのような実験手法を用いてモルタル柱の内部応力の分離を行なった. すなわち,

- (1) まず等色線撮影によりモルタル柱表面の主ひずみ差 ($\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m2}$) を検出する.
- (2) つぎに主応力分離を必要とする個所に対応するモルタル柱背面に二方向ひずみゲージを貼布し, 二方向応力を求める.

(1), (2) よりゲージを貼布した個所の主応力の分離が可能となり, (1) よりゲージ貼布位置の近傍の応力の変化が推定できる.

図 5 (a) は同図 (b) の応力状態の場合のモールの応力円であり, 図中の $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ は等色線撮影より求まる値であり, σ_x, σ_y はポリエステルゲージの測定より決まる値である.

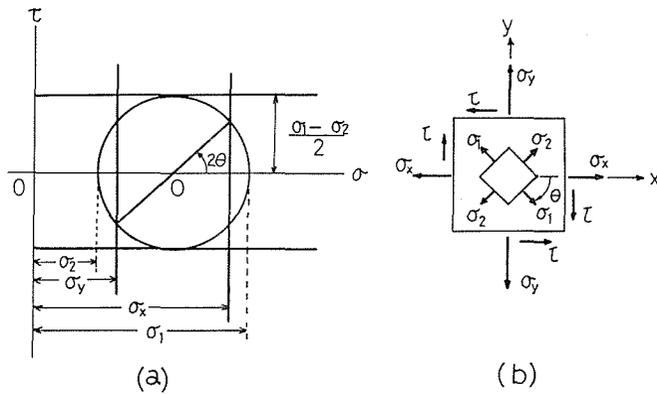


図5 モールの応力円

なおモルタル柱の最大せん断応力を $\tau_{m(max)}$ とすると

$$\tau_{m(max)} = (\sigma_{m1} - \sigma_{m2})/2$$

であるから、等色線は最大せん断応力の軌跡を表わしている。

通常のエポキシ板をモデル材料とする光弾性実験においても等傾線は等色線に較べ幅があり、精度が落ちる。また偏心圧縮実験のように主応力面の傾きの変化の著しくない場合は等傾線の検出がほとんど不可能に近く本実験の手法はその点でも実用的であると思われる。

5 測定値と実験解析

5.1 ひずみ測定

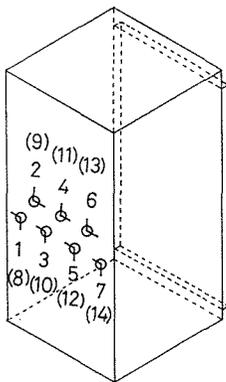


図6 ポリエステルゲージ貼布位置

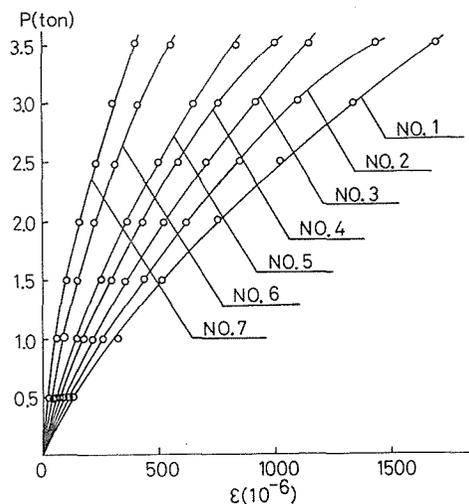


図7 縦方向ひずみ測定値

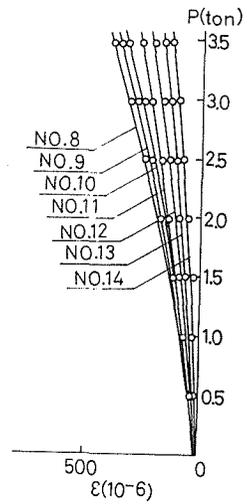


図8 横方向ひずみ測定値

本実験は主として偏心距離 $e = 6\text{mm}$ について圧縮実験を行なった。図6はモルタル柱の背面に貼布したポリエステルゲージの位置を示すものであり、主応力分離のため二方向ゲージをモルタル柱中央部に7箇所接着してある。図7はそれらのゲージによる縦方向のひずみ測定値 (ϵ_{mx}) と偏心荷重 (P_{ton}) の関係を示し、図8は横方向のひずみ測定値である。

5.2 等色線図

等色線はカラー撮影で行なうがその結果を写真3 (p.37) に示す。図9(a)~(f)はこの写真をタブロイド版に引伸し色相毎にトレースしたものである。モルタル柱は3.95 ton で破壊に至ったが、3.5ton 迄は載荷0.125ton ごとに、3.5ton 以上では縦ひずみ 100×10^{-6} ごとに等色線撮影を行なっている。代表的等色線図として0.5ton ほどの図を示す。通常の縞次数からいえば2次程度のものであるが本実験では更に細分割しているので主応力の分離はこの程度で十分可能である。

5.3 主応力

4節で述べた方法で主応力の分離を行なう。図9(a)~(f)よりポリエステルゲージ貼布個所の縞次数と荷重の関係は表1のようになる。また一例として $P = 2.0\text{ton}$ と 3.0ton のときの主応力分離の過程を表2、表3に示す。

このように等色線図とポリエステルゲージによるひずみ測定を併用することにより、等傾線をとらなくても内部の応力は完全に分離できる。一方等色線図は最大せん断応力の軌跡であるから、破壊に致るまでのモルタル柱の挙動を把握する一手法としても有効である。

6 理論解析

モルタル柱供試体による実験結果と比較するために F. E. M. による2次元弾性解析を行なった。要素は三角形1次要素を用い、モルタル供試体は平面応力状態にあるものと仮定した。解析は対称性を利用し上半分について行なった。三角形要素の総数は204個、総節点数は125個であり、計算所要時間は約45秒である。図10はその分割状態を示す。

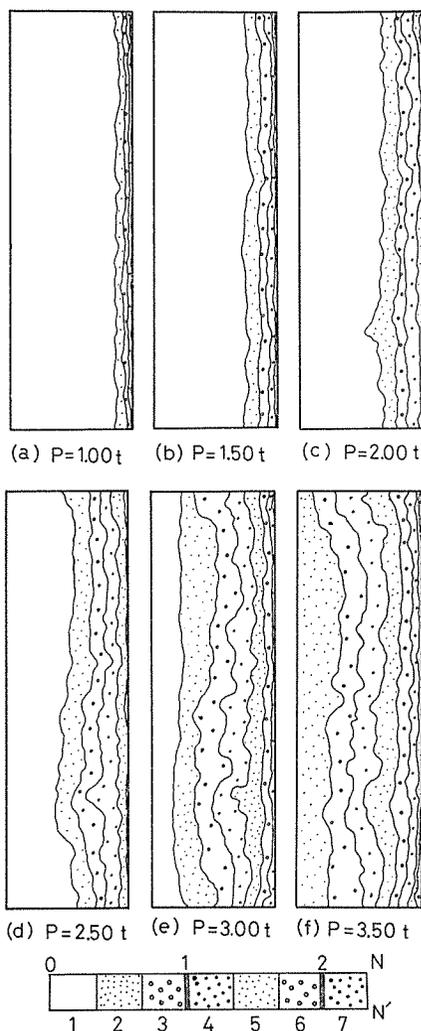


図9 等色線図

表1 稿 次 数 (N)

$P(\text{ton})$ ゲージ番号	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
1	0.38	0.71	1.04	1.29	1.53	1.80
2	0.30	0.40	0.65	0.84	1.14	1.42
3	0.26	0.32	0.52	0.67	1.07	1.33
4	0.23	0.26	0.37	0.41	0.73	0.93
5	0.20	0.24	0.31	0.37	0.70	0.76
6	0.18	0.22	0.25	0.32	0.43	0.62
7	0.16	0.20	0.23	0.28	0.35	0.50

表2 実験解析値 ($P = 2.00\text{ton}$)

ゲージ番号	$\varepsilon_x(\times 10^{-6})$	$\varepsilon_y(\times 10^{-6})$	$\sigma_x(\text{kg/cm}^2)$	$\sigma_y(\text{kg/cm}^2)$	N	$\sigma_1(\text{kg/cm}^2)$
1	757	-197	118	-5	1.04	177
2	622	-174	107	-7	0.65	133
3	509	-165	87	-10	0.52	87
4	424	-138	92	-11	0.37	97
5	357	-118	77	-9	0.31	87
6	220	-94	47	-11	0.27	64
7	156	-85	32	-12	0.23	49

表3 実験解析値 ($P = 3.00\text{ton}$)

ゲージ番号	$\varepsilon_x(\times 10^{-6})$	$\varepsilon_y(\times 10^{-6})$	$\sigma_x(\text{kg/cm}^2)$	$\sigma_y(\text{kg/cm}^2)$	N	$\sigma_1(\text{kg/cm}^2)$
1	1328	-297	164	4	1.53	223
2	1114	-254	151	4	1.14	192
3	902	-237	135	9	1.07	187
4	716	-188	119	8	0.73	149
5	644	-160	107	6	0.70	141
6	419	-125	88	9	0.43	110
7	298	-106	62	10	0.35	83

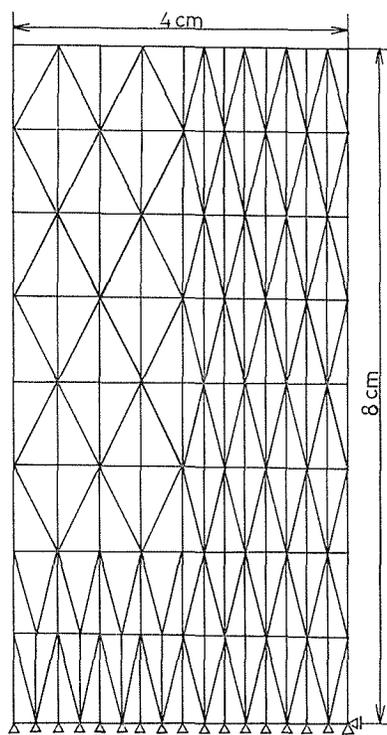


図10 要素分割

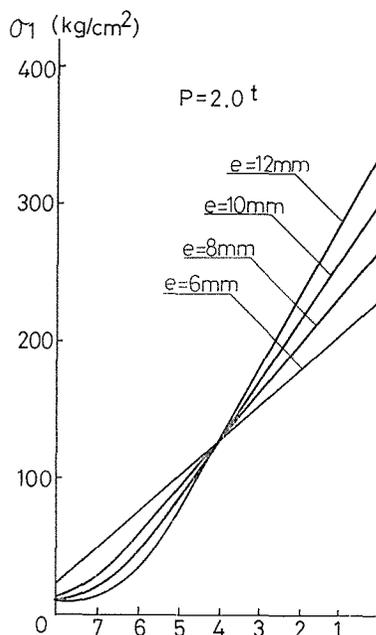
図11 σ_1 分布図 (理論値)

図11は偏心距離を $e = 6\text{mm}$, 8mm , 10mm , 12mm と変化させたときの最大主応力 σ_1 の分布図である。計算結果より主応力面はモルタル柱全幅に亘りほぼ等しくなり、このことから主応力面が同方向となるので等傾線はとりにくいこととなることがわかる。

7 実験解析値と理論解析値との比較

以上の結果を基に実験解析値と理論解析値との比較を行なった。図12(a)~(g)はポリエステルゲージ貼布位置に注目し、偏心荷重 P と主応力 σ_1 との関係を表わしたものである。図中の NO. はゲージの貼布位置を示す。なお○印は実験解析値を示し、細線はモルタルの弾性係数 E_m を一定として計算した理論値である。

これらの図より応力の比較的小さい場合は10数%以内、応力の大きいところでは約30%位の理論値と実験値との差が見られる。これは理論計算に用いたモルタルの弾性係数の値を一定としたため、ひずみの値が大きくなるにつれ実験値との差に開きが出たものと思われる。

モルタルのような応力-ひずみ関係が非線形²⁰⁾の場合の理論解析は一般に煩雑となり²¹⁾、²²⁾、特に F. E. M. を用いる場合は要素数が多く繰返し計算となるので計算所要時間が増大するから、たとえば F. S. M. の応用等要素数を減らすことなどを今後検討するつもりである。また偏心圧縮柱に関しては応力-ひずみ関係を仮定し、応力分布を求める計算法もあ

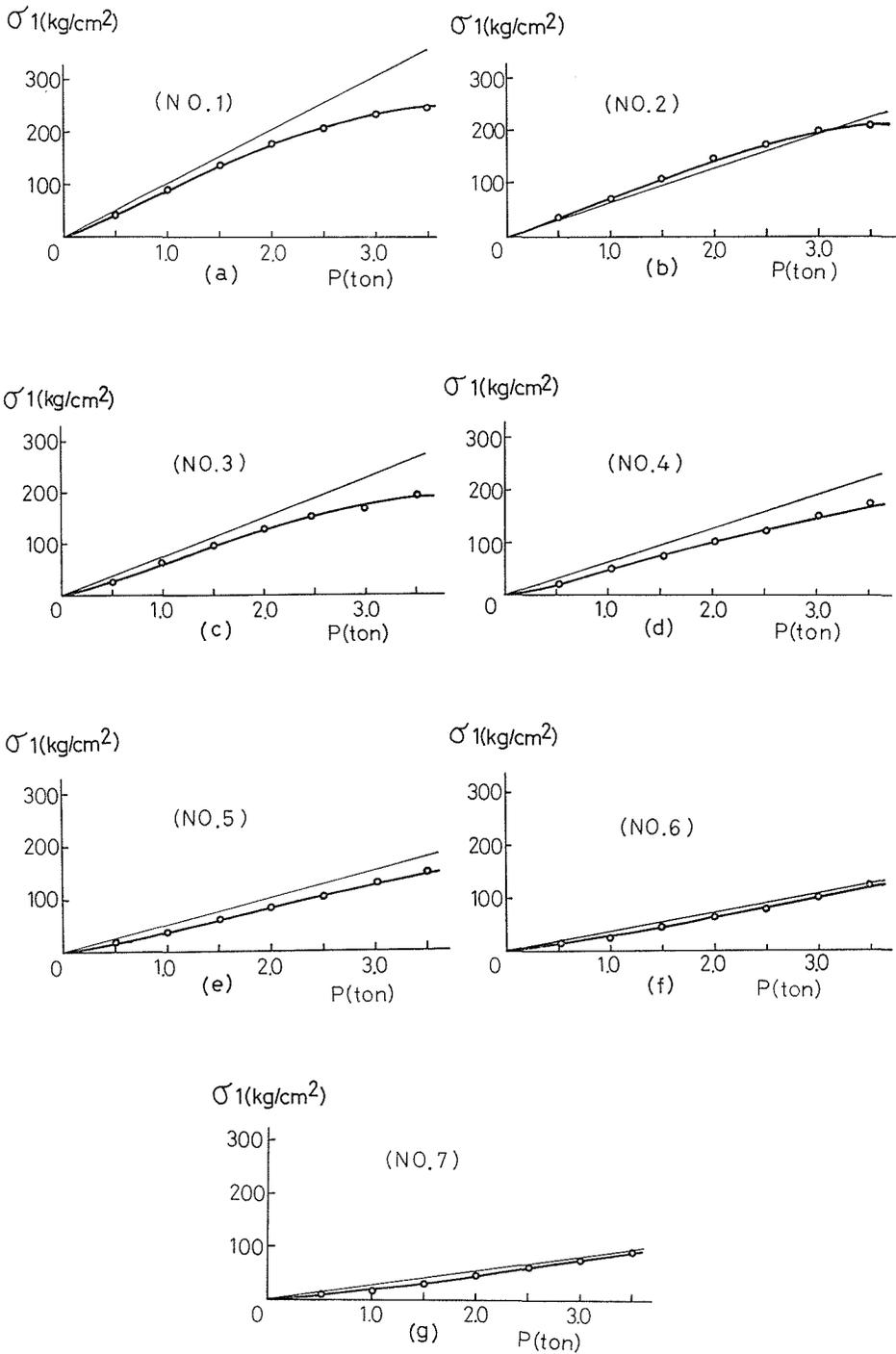


図12 σ_1 - P 図

り²³⁾、今後の研究課題としたい。

8 む す び

本研究は光弾性皮膜法の脆性体応力解析への適用性を検討することを目的として、一例として偏心圧縮を受けるモルタル柱の全領域の応力測定を行ない、低次数の縞しか得られない場合の等色線の取扱い方や、等傾線の撮りにくい場合の主応力の分離法等について一応の成果をみたものである。現在まで筆者らの知り得た文献の範囲ではコンクリートのような脆性体への光弾性皮膜法の適用例はほとんど見当たらないが、これは材料自体の延性が乏しいこと、下地母材が偏光を反射しにくいこと、皮膜製作上の配合の問題、あるいは接着技術、さらには主応力分離の困難さなどによるものと考えられる。本実験ではこれらの難点解決への糸口を得たものとする。今後引き続きより精度を高めるための研究を続けるつもりであるが、この実験法によりつぎのような場合の解析が可能となるものとする。

すなわち、

- 1) 比較的理論解析の困難なコンクリートラーメン隅角部、ハンチ部の応力分布、
- 2) 任意形開口部を有するコンクリート板の応力分布、
- 3) コンクリート構造における粗細骨材周辺の応力および骨材間の力の伝達機構、
- 4) コンクリート部材に対する荷重が漸増して破壊に至るまでの応力分布変動の把握および破壊機構のミクロ的解明^{24), 25)}、
- 5) クリープによる応力の全領域的測定、
- 6) 動的光弾性装置による衝撃応力伝播機構の把握、等である。

終りに本研究を遂行するにあたり種々の有益なる御助言を頂いた本学川上浩教授、草間孝志助教授並びに、実験およびデータ整理に並々ならぬ協力を頂いた橋梁研究室学生海津誠昭、熊倉雄一両君に心から感謝の意を表する。

なお理論計算は信州大学データステーションを通して東京大学大型計算機センターを利用した。

参 考 文 献

- 1) 西田正孝：光弾性実験法，日刊工業新聞社，1965.
- 2) 中村，吉田，喜内：ラーメン隅角部の塑性生成位置と崩壊荷重に関する実験的考察，第29回土木学会年次学術講演集 (I)，pp.302~303 (1974).
- 3) 宇佐美，川本，福本：光弾性皮膜法による鋼材の弾塑性域の拡がりに関する研究，土木学会論文報告集，第152号，pp.16~25 (1968).
- 4) 吉田，三井，清水：切欠を有する鋼板の塑性領域の拡がりについて，第2回光弾性シンポジウム論文集，pp.79~84 (1974).
- 5) Paul W. Abels: Cracking and Bond Resistance in High Strength Reinforced Concrete Beams, Illustrated by Photoelastic Coating, A.C.I., Vol.63, pp.1165~1174 (1966).
- 6) 大岸佐吉：コンクリートのレオロジーに関する研究，日本建築学会論文報告集，第189号，pp.1~9 (1971).
- 7) 森田，角：繰返し荷重下における鉄筋コンクリート間の付着特性に関する研究，日本建築学会論文報告集，第229号，pp.15~24 (1975).

- 8) 丹羽, 小林, 平島: 三軸圧縮応力状態におけるモルタルの破壊状態, 材料, 第161号 (1967).
- 9) 畑野正: 組合せ圧縮荷重によるコンクリートの変形と破壊, 土木学会論文報告集, 第143号, pp. 22~27 (1967).
- 10) 上島, 森吉, 菅原: アスファルト混合物の破壊時のひずみに関する研究, 土木学会論文報告集, 第221号, pp. 73~80 (1974).
- 11) 岡島達雄: 複合応力(軸対称3軸圧縮)を受けるコンクリートの破壊条件, 日本建築学会論文報告集, 第189号, pp. 15~22 (1971).
- 12) 榎場, 川村, 斉藤: 圧裂試験におけるコンクリートの破壊挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第238号, pp. 69~76 (1975).
- 13) 滝口, 黒正, 岡田: 鉄筋コンクリートの二軸曲げ実験, 日本建築学会論文報告集, 第229号, pp. 25~33 (1975).
- 14) 青木, 倉元, 小林, 国尾: 直線硬化特性材料での有孔帯板内の応力およびひずみの集中係数について, 航空宇宙技術研究所報告, 第279号, pp. 1~11 (1971).
- 15) 吉田, 三井, 土屋: 光弾性皮膜法によるコンクリート構造物の応力解析, 第2回光弾性シンポジウム論文集, pp. 85~89 (1974).
- 16) 吉田, 三井, 土屋: 光弾性皮膜法によるコンクリート構造物の応力測定, 第29回土木学会年次学術講演会講演集 (I), pp. 101~102 (1974).
- 17) 吉田, 三井, 斉藤: 光弾性皮膜法によるコンクリート柱の破壊機構に関する研究, 第30回土木学会年次学術講演会講演集 (I), pp. 193~194 (1975).
- 18) Han-Chin Wu: Dual Failure Criterion For Plain Concrete, A. S. C. E., EM6, pp. 1167~1181 (1974).
- 19) 梶田, 秋本, 川本: 円柱状ぜい性材料供試体の一軸圧縮試験における加圧面拘束が変形状態および圧縮強度におよぼす影響について, 土木学会論文報告集, 第165号, pp. 27~38 (1969).
- 20) 富田, 秋本, 川本: モルタルのようなぜいせい材料の変形特性, 第5回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集 (1969).
- 21) Somasundaran Villapan, M ASCE and Terry F. Doolan: Nonlinear Stress Analysis of Reinforced Concrete, A.S.C.E., ST 4, pp. 885~897 (1972).
- 22) Arthur H. Nilson: Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method, A.C.I., pp. 757~766 (1968).
- 23) 草間孝志: 偏心圧縮柱の荷重 ~ 変形性状に与えるひずみ硬化の影響, 土木学会論文報告集, 第184号, pp. 1~10 (1970).
- 24) George S. Robinson: Behavior of Concrete in Biaxial Compression, A.C.I., pp. 656~666 (1968).
- 25) Shah S. P., Chandra S.: Critical Stress, Volume Change and Microcracking, A.C.I., Vol. 65, pp. 783~796 (1968).

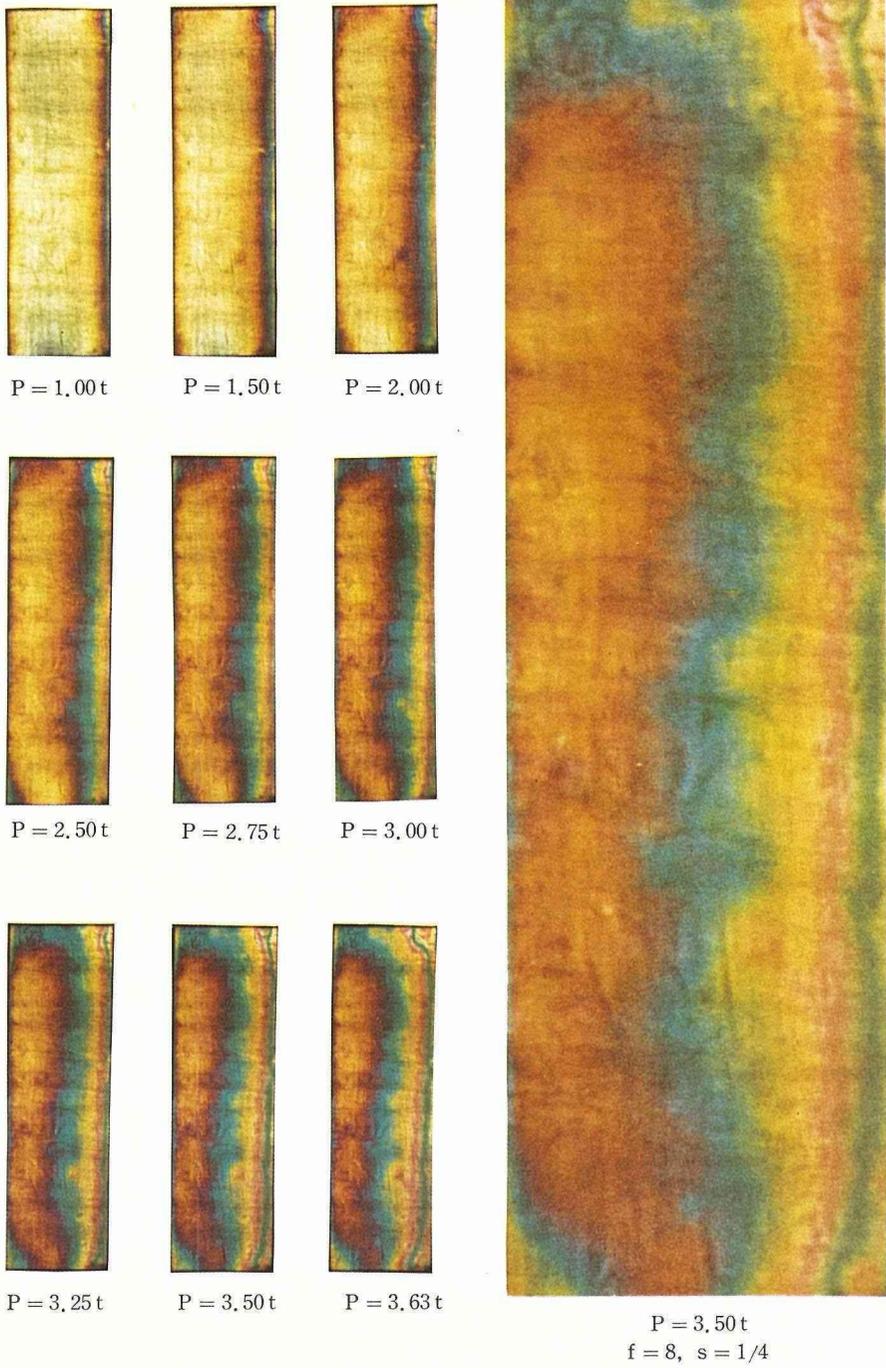


写真3 等 色 線