

コンクリートの壁面ひびわれ誘発目地位置に関する F. E. M. による検討

中西正俊

§ 1. まえがき

コンクリートのひびわれは、コンクリートの研究のうちでも、もっとも重要なもののひとつであり、かつ解決が困難なものの1つである。当社内においても、昭和46年11月に“軀体コンクリートひびわれ防止委員会”が設置され、各種の検討を行ない、その結果は、“ひびわれ誘発目地設定による外壁打放しコンクリートのひびわれ対策”¹⁾あるいは“ひびわれ防止を考慮したコンクリートの外壁の仕様”²⁾としてすでに発表されている。

日本建築学会においても、昭和47年11月に、“RC造ひびわれ委員会”が設置され、調査研究活動を行なっているほか、昭和49年度大会研究協議会の主題としてとりあげられ、材料・施工の立場から、ひびわれによる障害を少なくするための事前の対策として、ひびわれを集めさせる方法等³⁾が考えられている。

外壁打放しコンクリートのひびわれ対策としては、ひびわれ発生は避けられないものと考え、縦目地を柱間に3~4mに(できれば柱の両わきにも)設け、ひびわれ発生位置を限定する方法^{1), 2)}が一般に用いられ、その対策はおおむね効を奏している⁴⁾ようである。

きて、これらひびわれ誘発目地の間隔や位置は、従来のひびわれ観察結果から経験的にきめられている。

ACI 224 委員会報告⁵⁾によると、乾燥収縮ひびわれの制御の方法の1つに“control joints”がとりあげられており、“コントロールジョイントの使用は、目ざわりなひびわれの発生を防止する最も効果的な方法である”としているが、“ジョイントの配置に関しての正確なルールをつくることはできない。ジョイントを設置する個所については、各工事において個々に検討しなければならない。”と結論している。

J. W. de Courcy⁶⁾は、18カ国の基準を調査し、コンクリート構造物のムーブメントを予知し抑制するための勧告を、16項目に分類し解説を加えているが、その中の“予想される伸縮に関連するジョイント間隔”で各国の

基準を紹介している。たとえば、Indian Code (IS 456, 1964: Code of Practice for Plain and Reinforced Concrete) では、長さが45mを超える構造物は1つ以上の expansion joint で分割すべきとされており、擁壁に関する American Document (AASHTO, 1961, Standard Specification for Highway Bridges) では、収縮目地は30ft (9.15m) を超えない間隔で、膨張目地は90ft (27.5m) を超えない間隔で入れるべきとしている。これらは、わが国の規準⁷⁾とほぼ同様といえる。同氏⁶⁾による報告のうち、“建物の形状に関連するジョイント位置”では、断面、容積、露出条件、ならびに建設方法の変化、あるいはコンクリートの沈降や熟成度の差に伴う応力集中が考慮されているとしているが、たとえば上記の Indian Code では、平面上で形が大きく変化するところにエキスパンション・ジョイントを設けるとされており、Canadian Document (CSA Standard S 6, 1966: Design of Highway Bridges) では、アパットメントと擁壁との接合部にはエキスパンション・ジョイントを設けるとされている。また、British Code (CP 116, 1965: The Structural Use of Precast Concrete) では、構造物のひびわれを制御するためのジョイントの効果はその位置の正確さによるとし、その位置は多分に経験的なもので、ジョイントを設けなければひびわれが最も発生しやすい場所と定義されるとしている。

山根他⁸⁾は、1スパン2層の壁付きラーメンモデルが一樣な乾燥収縮を受けた時の応力状態を F. E. M. により求めており、コンクリート壁体の乾燥収縮による応力状態は柱際隅角部およびスパン中央に集中し、目地を設けた場合にはその部分に応力集中が起ると結論しているが、解析に用いた拘束条件は明らかでない。また同氏他^{9), 10)}は、多スパン2層ラーメンのひずみ測定を行ない、13Wおよび18Wで、1階の壁のひずみは建物端部の柱際で -160×10^{-6} 、建物中央の柱際で -61×10^{-6} 、2階については1階より少ないひずみを報告するとともに壁つきラーメン模型を作成しひずみを測定し、F. E. M.

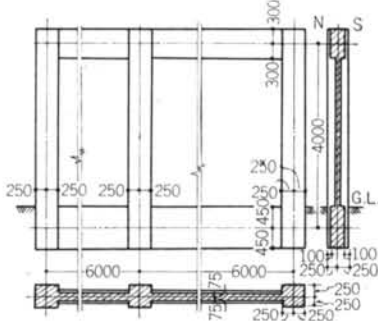
による模型壁面の応力解析を行ない、F.E.M.による最大引張応力は 44kg/cm^2 であったが、試験体にひびわれは認められなかったと報告している。

柿崎他¹⁰⁾は、コンクリートの乾燥収縮に起因する壁面の収縮ひびわれと架構の固定条件との関係をF.E.M.によって解析しているが、固定条件には4種類のモデルを使用している。入力には、横尾他¹¹⁾の調査結果を用いて、壁の収縮ひずみを 4.8×10^{-4} 等とした上、鉄筋による収縮拘束緩和を考慮している。解析から得られた引張主応力の最大値は、一辺固定三辺自由としたとき 90kg/cm^2 、二辺固定二辺自由としたとき $60 \sim 100\text{kg/cm}^2$ 、三辺固定一辺自由としたとき $60 \sim 180\text{kg/cm}^2$ 、ならびに四辺固定としたとき 120kg/cm^2 となっている。

この他に、コンクリートの収縮応力とひびわれに関して、東他¹²⁾は模型実験を行ない、川端他¹³⁾は略算式を提案し、堯天他¹⁴⁾は応力関数を用いた試算を、森田¹⁵⁾はNevilleの手法を用いた試算を、鬼武他¹⁶⁾や小幡他¹⁷⁾はF.E.M.による試算を行なっている。

以上の、解析に関する既往の研究に共通した点は、

- (1)解析に用いた拘束条件の根拠があきらかでない。すなわち、実際の構造物の拘束条件との関係があきらかでない。



図一 実大試験体

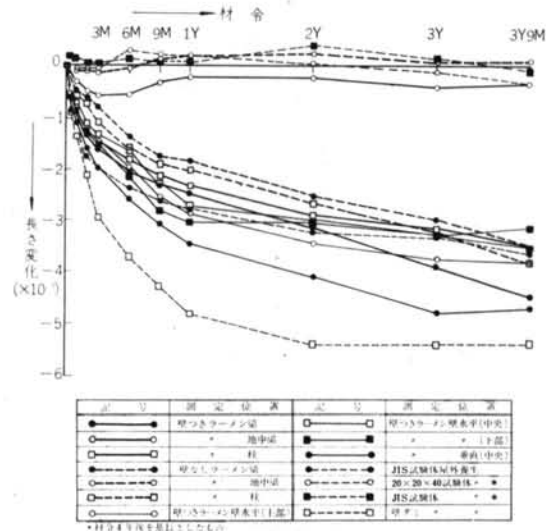
(2)解析に用いた入力値のうち、部材の乾燥収縮の値は主として過去のデータから選んだもので、解析しようとする構造物に最も適しているとはいえない。

(3)解析結果と実験結果との対比を行なったものは少なく、対比を行なったものも模型実験である。

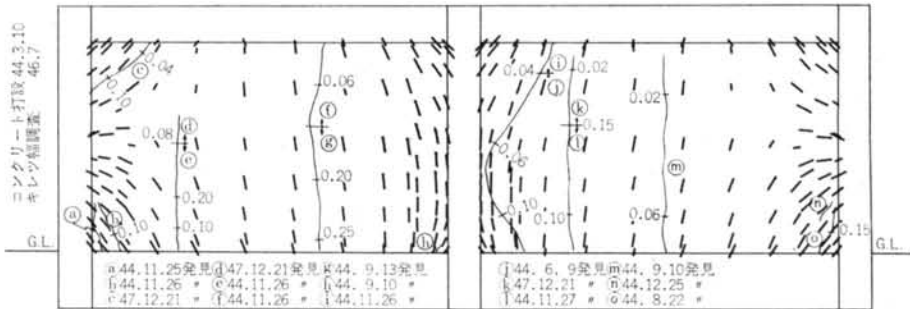
本報告は、すでに報告した実大試験体¹⁸⁾をモデルとして、同試験体によって得られた値を入力としたF.E.M.解析を行ない、モデルの仮定条件が妥当なものであることを確認した上で、目地の効果等をシミュレーションしたもので、目地の効果等の確認実験は行っていない。

§ 2. モデルに用いた実大試験体について

モデルに用いた実大試験体のコンクリートの内部温度の変動、コンクリート内部ひずみの変動、ならびに材令2年までの結果による検討についてはすでに報告した¹⁸⁾。



図二 測定位置別長さ変化の測定結果



図三 北立面図、ひびわれ図、解析上得られた要素の破断面

ここでは、材令3年9ヵ月における最終結果と発生したひびわれを報告する。なお、発生したひびわれについては § 4. で F. E. M. による解析結果とあわせて検討する。

2.1 試験方法

詳細はすでに報告した¹⁸⁾。2次元、2スパンの壁つきおよび壁なしラーメン(図-1)、ならびに壁ダミー等に埋設した長さ変化測定用のカールソンひずみ計の総数は60個であり、各測定位置に2~8個埋設した。

2.2 結果

材令3年9ヵ月までのコンクリートの長さ変化の測定結果を、測定位置別に図-2に示す。また、発生したひびわれを図-3に示す。

2.3 長さ変化の測定結果の検討

図-1は温度変化による影響を除いた長さ変化である。軸材(梁・柱)は、壁と比較すると長さ変化の進行速度は材令1年までは小さいが、以後材令2年までは両者はほぼ同程度となり、以後(軸材は)一定の割合で長さ変化が進行している。一方、壁の長さ変化の進行速度は材令2年以後ではきわめて小さい。この原因として軸材では圧縮クリープ、壁では引張クリープが考えられる。

§ 3. 解析法

解析は温度応力解析汎用プログラムにより、長さ変化を温度変化におきかえて2次元解析を行なった。使用した要素は三角形三節点板要素、ならびに四角形四節点板要素である。

3.1 解析モデルの要素分割と拘束条件

解析に用いたモデルの要素分割と拘束条件を図-4に示す。実大試験体は中央の柱を軸として対称なため半分だけ解析した。部材(地中梁、梁、柱、および壁)の境界線上の各点には、3.3で示すように各部材の収縮ひずみの平均値を入力するため、この周辺は特に細かく分割した。また、断面が変化する箇所は応力集中が考えられるので細かく分割した。全体として地中梁の拘束のために、地中梁に近い部分ほど応力が大きく、また、大きさの変化も急激であることが予想されるため、地中梁に近い部分ほど細かく分割した。軸対称としたため、図-4

の左側の各点の水平方向の移動はないものとし、最下部を除き上下方向の移動だけを許した。地中梁の底部では上下方向の移動はないものとした。図-4の左下の点は固定とした。

3.2 解析上の仮定

コンクリートは均質・等方質な物体とし、鉄筋の影響は無視した。

コンクリートの引張り応力度-ひずみ曲線は狩野¹⁹⁾の研究によると図-5に示すように、圧縮の場合と比較して破壊間近まではきわめて直線に近い。また、圧縮強度 200kg/cm^2 内外では、引張強度は圧縮強度の約10%である¹⁹⁾(図-6)。コンクリートの引張強度 F_t と引張弾

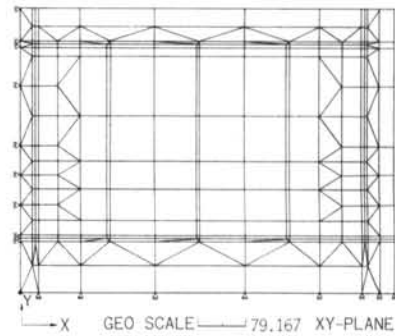


図-4 解析に用いたモデルの要素分割と拘束条件

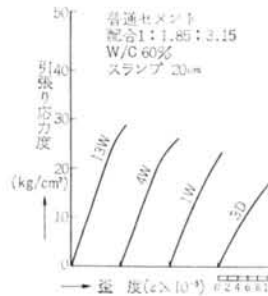


図-5 引張応力度とひずみ度との関係

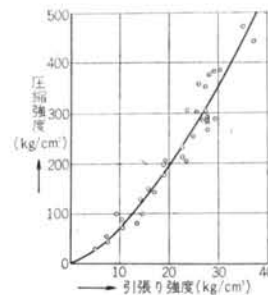


図-6 圧縮強度と引張強度との関係

性係数との関係は、普通コンクリートではつぎの式が適用できるとされている²⁰⁾。

$$E = 0.64 F_c^{0.44} \times 10^5$$

いま、コンクリートの圧縮強度 $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ とすると、 $F_t = 21 \text{ kg/cm}^2$ 、上記の式から $E = 2.44 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ となるが、ここでは $E = 2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とし、 $\sigma - \varepsilon$ は直線と仮定した（圧縮、引張とも）。また、コンクリートの温度膨張係数 α 、ならびにポアソン比 ν は、それぞれ $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、0.167 と仮定した。

3.3 入力値

入力値は材令1年における実測結果¹⁸⁾によった。すなわち、

地中梁：Bラーメン（壁なしラーメン）地中梁の値：
 $+2.8 \times 10^{-5}$

梁：Bラーメン梁の値： -19.2×10^{-5}

柱：Bラーメン柱の値： -21.6×10^{-5}

壁：壁ダミーの値： -47.3×10^{-5}

3.1で述べたように部材の接点（地中梁と柱、地中梁と壁、地中梁と柱と壁、梁と柱、梁と壁、梁と柱と壁、ならびに柱と壁）には各部材の値の平均値を入力した。

3.4 解析モデル

外壁誘発目地の位置は図-7に示す方法がとられている¹⁾。ここではこのような方法を用いた場合、まず両者にどのような差があるか、つぎに各々の場合どの程度応力緩和効果があるかを検討したもので、与えられた構造物に最適な誘発目地位置を検討したのではない。

解析モデルは、表-1および図-8~10に示すように垂直目地および垂直スリットの各々について2通りの位置を、また、地中部分と地上部分との打継を考慮して、地中梁と壁との境界に水平スリットを、ならびに目地もスリットもないものの、計6ケースを考えた。なお、目地部分の壁厚は2割減とした。スリットは、誘発目地にひびわれが発生した後の応力緩和状態をしらべるための

No.	目地あるいはスリット			
	有	無	方向	位置
1	無	—	—	—
2	目地	垂直	スパンの $1/4$ 左右、計2本（図-8）	
3	目地	"	柱両わき、スパン中央、計3本（図-9）	
4	スリット	"	スパンの $1/4$ 左右、計2本（図-8）	
5	スリット	"	柱両わき、スパン中央、計3本（図-9）	
6	スリット	水平	地中梁と壁の境界、1本（図-10）	

表-1 解析モデル

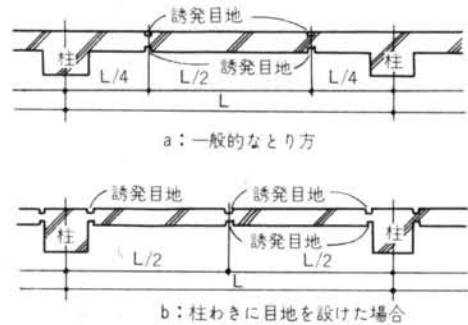


図-7 外壁誘発目地の位置平面図

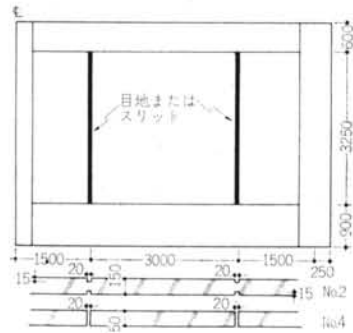


図-8 解析モデル (No. 2, 4)

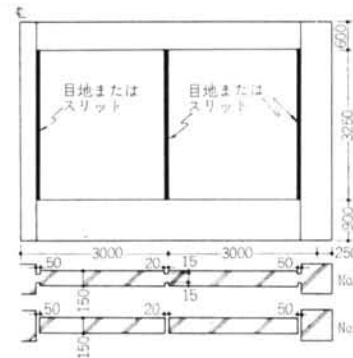


図-9 解析モデル (No. 3, 5)

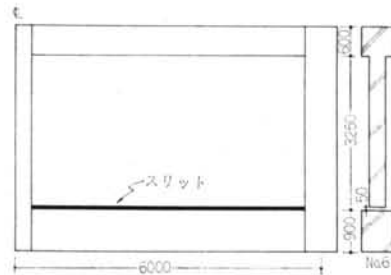


図-10 解析モデル (No. 6)

ものである。

§ 4. 解析結果および考察

4.1 基本モデル (No. 1: 目地・スリットともになし) の解析結果と検討

基本モデル (No. 1: 目地・スリットともになし) の変位図を図-11に、主応力図を図-12に、実大試験体に発生したひびわれならびに解析上得られた要素の破面図を図-3に示す。基本モデルだけは解析結果と実測結果とを対比した。検討結果を以下に示す。

変位については実測ひずみから計算した値と比較したところ、垂直方向ではかなり良く一致しているが、水平方向では F. E. M. によって求めた値の方がやや大きい。

ひびわれの方向はほぼ一致している。特に下方端部の引張主応力がもっとも大きい部分で良く一致している。

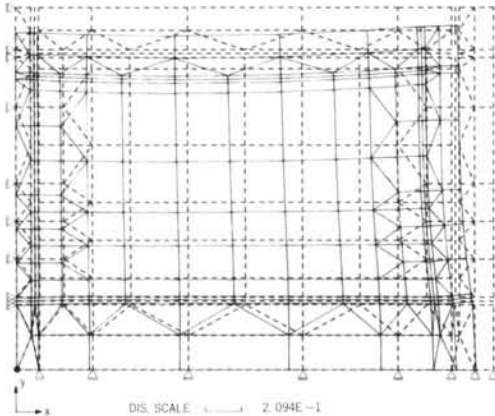


図-11 基本モデル (No. 1) の変位

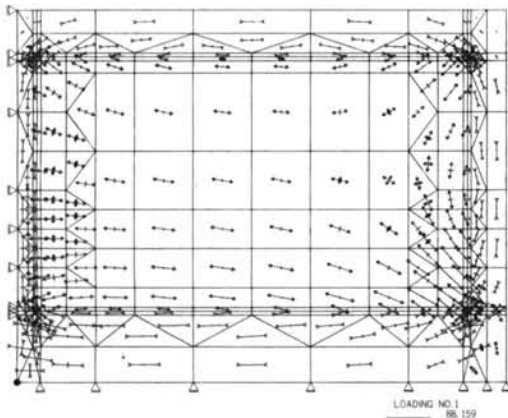


図-12 基本モデル (No. 1) の主応力

4.2 主要節点の変位

すべてのケース (No. 1~6) について、主要節点の変位を表-2に示す。垂直スリットの存在 (No. 4, 5) によって、 x 方向 (水平方向) 変位はほぼ半減するが、 y 方向 (垂直方向) 変位はほとんど変わらない。水平スリットの存在 (No. 6) による y 方向の変位はそれほどでもない。

変位方向	節点番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
x	9	-0.102	-0.102	-0.101	-0.042	-0.045	-0.081
	139	0	0	0	0	0	0
	149	-0.189	-0.189	-0.189	-0.096	-0.078	-0.198
	252	0	0	0	0	0	0
	264	-0.209	-0.209	-0.209	-0.159	-0.161	-0.208
y	9	0	0	0	0	0	0
	139	-0.067	-0.067	-0.067	-0.064	-0.063	-0.053
	149	-0.035	-0.035	-0.035	-0.033	-0.033	-0.029
	252	-0.145	-0.145	-0.145	-0.139	-0.144	-0.128
	264	-0.105	-0.105	-0.105	-0.092	-0.092	-0.099

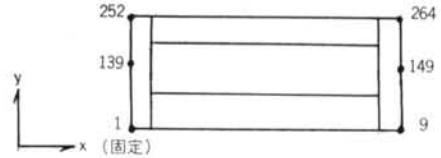


表-2 主要節点の変位 (単位: cm)

4.3 スリット部分の変位

スリットを有するモデル (No. 4, 5, 6) について、スリット部分の変位を拡大して図-13にまとめて示す。スリット部分の計算上の変位よりも、実際に観察したひびわれ幅 (図-3) はかなり小さい。これは、鉄筋の存在やコンクリートの引張クリープの影響と考えられる。

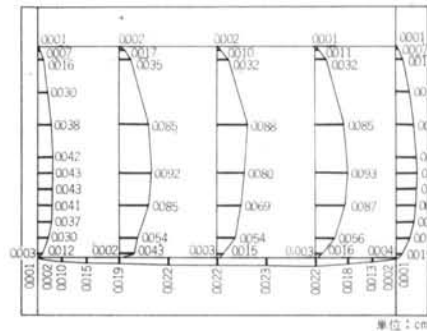


図-13 スリット部の変位

4.4 目地部分の応力集中の程度

目地を有するモデル (No. 2, 3) について、目地部分の応力集中の程度を図-14にまとめて示す。図中の数字は、目地に隣接する壁面要素の引張・応力を 1 としたときの目地要素に作用する引張応力の比率を示す。

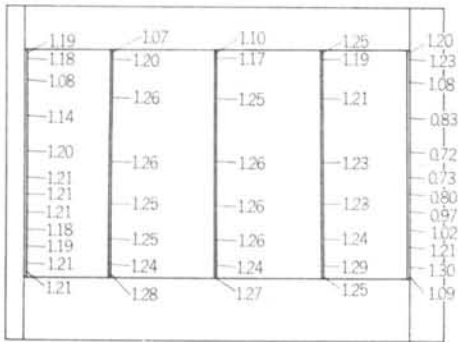


図-14 目地部分の応力集中の程度

目地部分は壁厚2割減であり、 $1/0.8=1.25$ であるから、大部分の応力集中の程度は壁厚の減少に対応している。

柱わきに設けた目地以外の壁面に設けた目地の応力集中の程度は、図-14で右側になると（外柱に近いと）低下してくる。

柱わきに設けた目地では、中柱わきの目地より外柱わきの目地の応力集中の程度は低下しており、部分的には目地部分の応力が周囲より小さい（図中の数字で1.0未満）ところも存在する。

4.5 スリットおよび目地の設置による主応力の分布

No. 2~6の主応力図を図-15~19に、No. 1~6の主応力分布図を図-20~25に示す。

(1) 垂直目地の効果

目地周辺ではたしかに目地に応力が集中されるが、壁面の下方端部には、かなり大きい引張応力が存在する。

(2) 垂直目地部分にひびわれが誘発されたときの、目地以外のところの応力分布

垂直目地にひびわれが誘発された後の応力状態は、最

初からスリットをつけたモデルの応力状態に等しいと考えると、壁の大部分については引張応力は小さい。しかし、スリット端部付近にはきわめて大きい引張応力が残

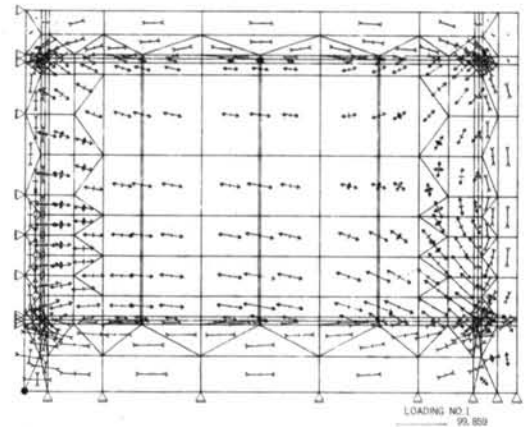


図-16 主応力 (No. 3)

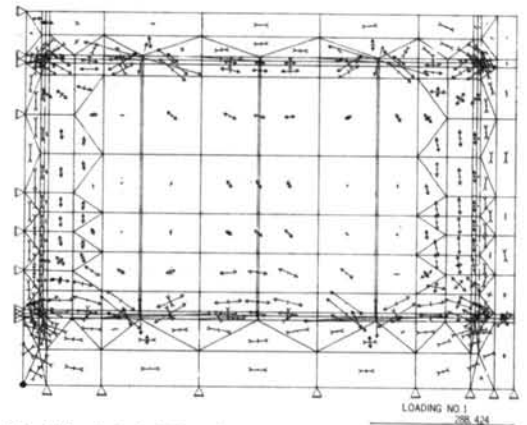


図-17 主応力 (No. 4)

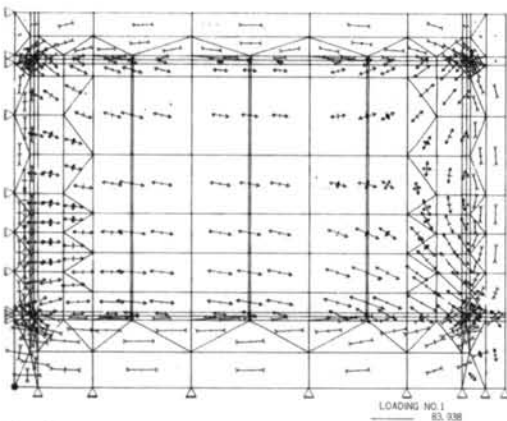


図-15 主応力 (No. 2)

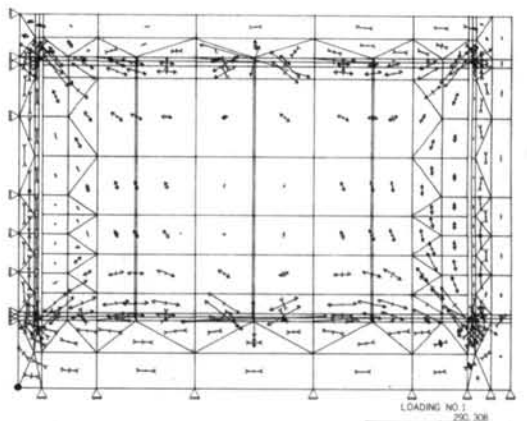


図-18 主応力 (No. 5)

る。

(3)垂直目地あるいはスリットの位置

スパン $1/4$ のところに左右計2本と、柱両わきとスパン中央計3本の2つの場合を比較したとき、応力状態に著しい差はない。

(4)水平スリット

垂直スリットと同様、スリット端部の応力集中が著しい。

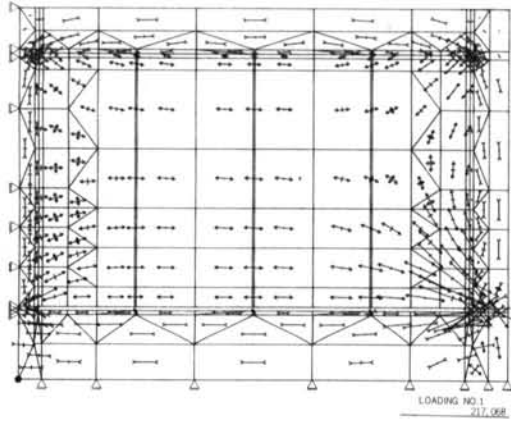


図-19 主応力 (No. 6)

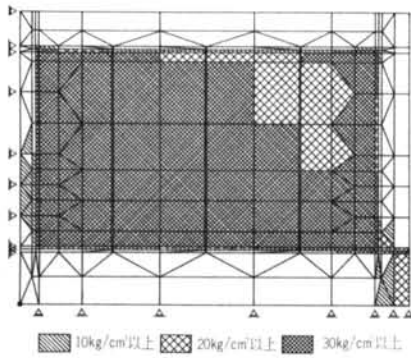


図-20 主応力の分布 (No. 1)

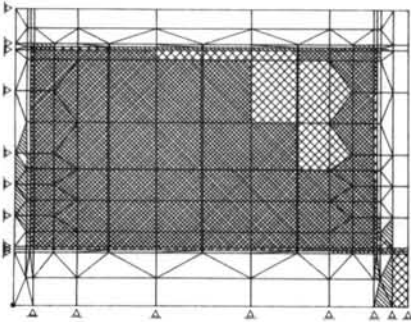


図-21 主応力の分布 (No. 2)

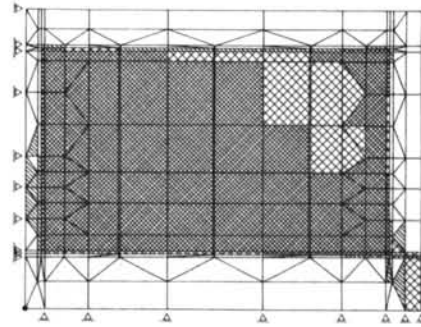


図-22 主応力の分布 (No. 3)

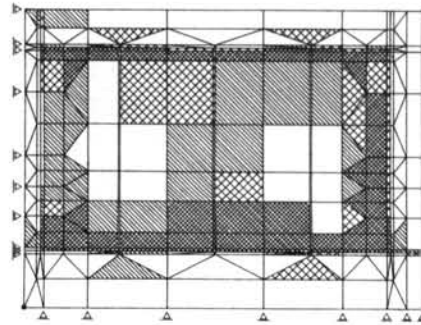


図-23 主応力の分布 (No. 4)

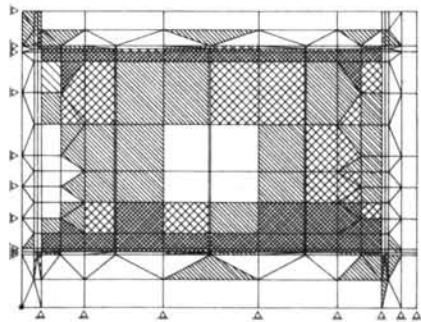


図-24 主応力の分布 (No. 5)

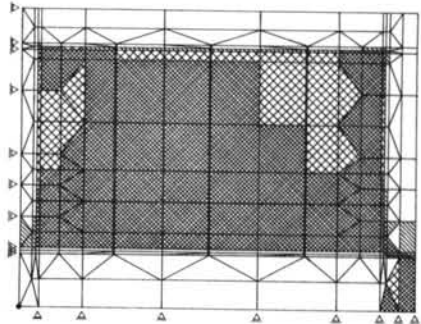


図-25 主応力の分布 (No. 6)

§ 5. 結 論

通常行なわれているひびわれ誘発目地の位置は、おおむね妥当であるが、壁面の下方端部にはかなりの応力集中が残る。壁にスリットを設けた場合、ならびに目地位置にひびわれが誘発された後の状態をスリットと考えると、スリットの端部に著しい応力集中が残る。

これらの応力のうち、壁面下方端部におけるものは、その方向性から垂直・水平目地では処理できないから、鉄筋補強によるひびわれ分散等の対策が考えられる。スリットの端部におけるものは、要素分割を細かくすればするほど応力集中が大きくなるという F. E. M. の特性によるものであり、実際との関連については今後検討を要する。

なお、スパン $1/4$ のところ左右計2本の目地を設置した場合と、柱両わきとスパン中央計3本の目地を設置し

た場合とを比較したとき、応力状態に著しい差はなかった。

§ 6. あとがき

今回の検討は1層2スパンの場合のみであったが、多層多スパンの場合については現在検討中であり、今後報告する予定である。また、地中部分の拘束の仮定については、さらに検討を行いたい。

謝 辞

解析結果の整理ならびに作図については、奈良禰徳、小坂幸司、福原美代子の各氏の協力をいただいた。ここに深く感謝します。

<参考文献>

- 1) 当社建築技術部：建築技術部報 Vol. 11, 1973. 8
- 2) 当社建築設計本部資料 1974. 11. 1
- 3) 上村克郎：“ひびわれによる障害を少なくするにはどうするか（材料・施工のサイドから）——昭和49年度日本建築学会研究協議会資料” 建築雑誌 Vol. 89, No. 1084, 昭和49. 9
- 4) 山根昭他：“RC 壁体の乾燥収縮によるひびわれ防止に関する研究（第1報）——単純スパンにおけるひびわれ発生 の予測について” 日本建築学会関東支部第43回（47年度）学術研究発表会
- 5) ACI Committee 224: “Control of Cracking in Concrete Structures” Journal of ACI, Dec. 1972
（訳文 森田司郎他訳：“コンクリート構造物におけるひびわれの制御” コンクリートジャーナル Vol. 12, No. 4, 6, 7, 8; 1974. 4, 6, 7, 8）
- 6) J. W. de Courcy: Movement in Concrete Structures Regional Recommendations and Standards for Design and Construction, Part 1~3” Concrete, June~August 1969
- 7) 土木学会：“コンクリート標準示方書解説（昭和49年度版）”
- 8) 山根昭他：“RC 壁体の乾燥収縮によるひびわれ防止に関する研究（第2報）——多スパン2層ラーメンの実測結果の検討” 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），昭和48. 10
- 9) 山根昭他：“同上（第3報）——1スパン1層の模型実験によるひびわれの検討” 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），昭和48. 10
- 10) 柿崎正義他：“有限要素法を適用した RC 造壁面の収縮応力解析とひびわれ発生 の予測について（その1：壁の固定条件について）” 日本建築学会関東支部第44回（48年度）研究報告集
- 11) 横尾義貫他：“鉄筋コンクリート構造の収縮亀裂の類型とそれに対する若干の考察（その1，2）” 日本建築学会近畿支部発表会，昭和31. 2
- 12) 東洋一他：“模型による鉄筋コンクリート壁およびスラブの乾燥収縮亀裂について” 日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）昭和43. 10
- 13) 川端一三他：“鉄筋コンクリート板の収縮応力とひび割れについて” 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），昭和48. 10
- 14) 梶天義久他：“鉄筋コンクリート構造物外壁の収縮応力に関する考察” 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），昭和45. 9
- 15) 森田司郎：“コンクリートの収縮応力計算例” 日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），昭和49. 10
- 16) 鬼武信夫他：“鉄筋コンクリート壁の収縮応力分布について” 日本建築学会近畿支部研究報告 昭和44. 5

- 17) 小幡守他：“有限要素法による鉄筋コンクリート部材の収縮応力の解析について—I, II” 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），昭和48.10
- 18) 中西正俊：“コンクリートの体積変化におよぼす外気温の影響（第1，2，3報）” 清水建設研究所報 第17，18，21号 昭和46.4，昭和46.10，昭和48.10
- 19) 狩野春一：“コンクリートの引張に関する研究” 日本建築学会論文報告集第17号，昭和15.3
- 20) 狩野春一監修：“コンクリート技術事典” オーム社 昭和43
- 21) 中西正俊：“実大試験体によるコンクリートの長さ変化” 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），昭和48.10
- 22) 中西正俊：“コンクリートの壁面ひびわれ誘発目地位置に関する FEM による検討” 昭和49年度日本建築学会関東支部研究報告集

