

論文

[1095] 不連続面を有する弾塑性多孔質材料の変形挙動に関する解析的研究

大下英吉*1・Ahmed. M. FARAHAT*2・石川靖晃*3・田辺忠顕*4

1. はじめに

近年、大深度地下空間の利用が土木工学における一つの焦点となり、コンクリートを主体とした地中構造物の建造が盛んに行われるようになってきた。しかし、その要求とする品質、機能、耐久性を満足する構造物の建造を行うにあたり、岩盤力学に見られるように水圧、土圧など多くの外力下における構造物の変形特性を十分に把握しておく必要がある。その際の変形特性は、コンクリート内部にはミクロあるいはマクロクラックを介して水分が浸透すると予想されるため、コンクリートの浸透特性をも考慮したものでなくてはならない。このような観点から、著者らはコンクリートの変形のうちクリープ特性に着目し間隙水圧の影響に関する解析的研究[1]を行い、その影響は非常に大きいという結果を得た。しかし、既往の研究[1]ではひびわれ或いはそれに伴う浸透性の変化を考慮しておらず、コンクリートが破壊に至るまでの統一的な解析理論ではなかった。

そこで本研究では、ひびわれたコンクリートに対する変形および浸透に関する定式化を行いコンクリート強度および間隙水圧に及ぼすひびわれの影響に関する解析的な評価を行った。

2. 解析理論

本研究では、図-1に示すように2種類の支配的なひびわれを仮定した。一つは骨材とセメントペーストとの界面に、一つはセメントペースト内部に発生しコンクリートの破壊過程につながるものである。解析は、コンクリートを弾塑性多孔質材料として捉え、ひびわれを考慮した力の釣合条件と流れの連続条件とを満足する連成式を有限要素で離散化して行った。なお、非線形領域では、修正したDrucker-Prager タイプの降伏関数[2]を用いた。

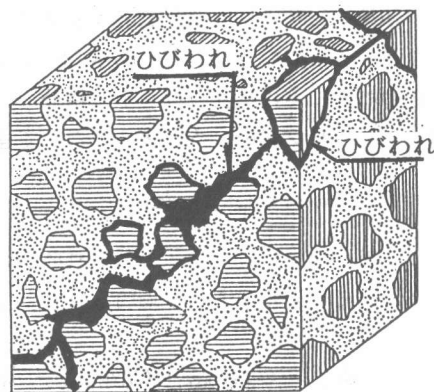


図-1 コンクリート中のひびわれ形態

2. 1 ひびわれたコンクリートの変形および浸透に関する定式化

本研究では、ひびわれたコンクリートをComposite Material として捉え、ひびわれ面において変位および動水勾配の不連続性をミクロレベルにおいて考慮した。また、コンクリートは図-2に示す各成分から成るものとし、一成分であるクラックバンドには次のような仮定を設定した。

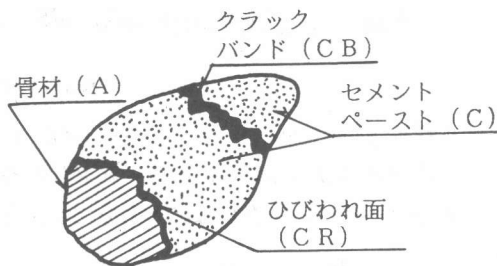


図-2 コンクリートを構成する各成分

- ① クラックはセメントペースト内部(クラックバンド(CB))と骨材とセメントペーストとの界面に発

*1 広島大学助手 工学部第四類土木工学科、工修(正会員)
 *2 熊本大学助手 工学部土木工学科、工博(正会員)
 *3 名城大学助手 工学部土木工学科、工修(正会員)
 *4 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

生する。

② クラックバンド(CB)内の特性は、セメントペーストとは異なる。

③ コンクリートの全体積 U に対するクラックバンドの体積比 (U_{CB}/U) はゼロとする。

これらの仮定に基づき、ひびわれたコンクリートの弾塑性マトリックスおよび透水係数の定式化を以下に示す。

(1) ひびわれを考慮したコンクリートの弾塑性マトリックス

平均的なマクロなひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_{ij}$ は、ミクロなひずみ増分 $d\epsilon_{ij}$ により次のように表すことができる。

$$d\bar{\epsilon}_{ij} = \int_V d\epsilon_{ij} dV \quad (1)$$

ここで、 U は全体積である。(1)式は図-2に示す各ひずみ成分に分割し、さらにひずみ～変位関係およびガウスの定理を適用することにより下式のように表すことができる。

$$d\bar{\epsilon}_{ij} = C_A d\bar{\epsilon}_{Aij} + C_C d\bar{\epsilon}_{Cij} - \frac{1}{V} \int_{S^{CB}} ([du_i]_C^B n_j + [du_j]_C^B n_i) dS \\ - \frac{1}{2V} \int_{S^A} ([du_i]_A^C n_j + [du_j]_A^C n_i) dS \quad (2)$$

ここで、 C_A, C_C はそれぞれ体積比 $(U_A/U, U_C/U)$ 、 $[du_i]_{\{s\}}$ は変位増分のジャンプ、 $\int_S$ はひびわれ表面の面積積分をそれぞれ表している。また、 U_A, U_C はそれぞれ骨材、セメントペーストの体積、 S^{CB}, S^A はそれぞれクラックバンド、骨材とセメントペーストの界面に発生するクラック面積を表している。なお、添字 α, β は図-2に示す各材料に対応するものである。いまひびわれ面における変位ベクトル増分 du_i は、ひびわれ面の法線方向成分 du_n と接線方向成分 du_t により次式のように表すことができる。

$$du_i = du_n n_i + du_t t_i \quad (3)$$

ここで、 n_i, t_i は、それぞれひびわれ面の法線方向、接線方向単位ベクトルである。(3)式を(2)式に代入すると、平均的なマクロなひずみ増分は次のように表すことができる。

$$d\bar{\epsilon}_{ij} = C_A d\bar{\epsilon}_{Aij} + C_C d\bar{\epsilon}_{Cij} - A_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} - b_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} \quad (4)$$

ここで、 A_{ijkl}, B_{ijkl} はそれぞれ下式で表され、 ω は損傷の程度を表すパラメータであり

$$A_{ijkl} = \int_{S^{CB}} (\omega_1 \alpha_{ijkl} + \omega_2 \beta_{ijkl}) dS \quad B_{ijkl} = \int_{S^A} (\omega_3 \alpha_{ijkl} + \omega_4 \beta_{ijkl}) dS \quad (5)$$

$$\alpha_{ijkl} = n_i n_j n_k n_l \quad \beta_{ijkl} = t_i n_j t_k n_l + n_i t_j t_k n_l$$

本研究では、 $\omega_1 \sim \omega_4$ と Wu ら[2] によって提案されたものと同じとし、ひびわれ表面における面積積分にはMicro Plain Model[3]を導入した。(4)式に下式に示す平均的なミクロな応力増分 $d\sigma_{\alpha ij}$ とマクロな応力増分 $d\sigma_{kl}$ との関係式を代入することにより、

$$d\bar{\sigma}_\alpha = A_\alpha d\bar{\sigma} \quad (6)$$

ひびわれを考慮したコンクリートの弾塑性マトリックス D^{ep}_{ijkl} は次のようになる。

$$D^{ep}_{ijkl} = [Q_{ijmn}^{-1} (R_{mnop} D_{Cpq}^{ep-1} A_{Cqrkl} + S_{mnop} D_{Aopqr}^{-1} A_{Aqrkl})]^{-1} \\ Q_{ijkl} = A_{ijkl} + B_{ijkl} + \delta_{ij} \delta_{kl} \quad R_{ijkl} = C_C \delta_{ij} \delta_{kl} \\ S_{ijkl} = C_A \delta_{ij} \delta_{kl} \quad (7)$$

ここで、 $\hat{A}_{Aijkl}, \hat{A}_{Cijkl}$ は、それぞれ骨材、セメントペーストに関する応力集中マトリックスであり、次式のように表すことができる。また、 $D_{Aijkl}, D_{Cijkl}^{ep}$ はそれぞれ、骨材の弾性マトリックス、およびセメントペーストの弾塑性マトリックス[1] である。

$$\begin{aligned} A_{Aijkl} &= (C_A D_{ijmn}^{ep-1} Q_{mnop} - R_{ijmn} D_C^{-1})(C_C S_{opqr} D_{Aqrkl}^{-1} - C_A R_{opqr} D_{Cqrkl}^{ep-1}) \\ A_{Cijkl} &= C_C^{-1}(I_{ijkl} - C_A A_{Aijkl}) \end{aligned} \quad (8)$$

(2) ひびわれを考慮したコンクリートの透水係数

平均的なマクロな動水勾配増分 $d\bar{\epsilon}_i$ は、平均的なマクロなひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_{ij}$ と同じような扱いをすることにより次式のように表すことができる。

$$d\bar{\epsilon}_i = \frac{1}{V} \int_V d\epsilon_i dV \quad (9)$$

ここで、 $d\epsilon_i$ はミクロな動水勾配増分を表している。(9)式は図-2に示す各動水勾配成分に分割し、さらに全ヘッドおよびガウスの定理を適用することにより下式のように表すことができる。

$$d\bar{\epsilon}_i = C_A d\bar{\epsilon}_{Ai} + C_C d\bar{\epsilon}_{Ci} - \frac{2}{V} \int_{S^{CB}} [dh]_C^{CB} n_i dS - \frac{1}{V} \int_{S^A} [dh]_A^C n_i dS \quad (10)$$

ここで、 $[dh]\{\delta\}$ は全ヘッド増分のジャンプを表している。また、ひびわれ面における動水勾配増分 $d\epsilon_i$ は、(3)式と同様に表すことができる。

$$d\epsilon_i = d\epsilon_n n_i + d\epsilon_t t_i \quad (11)$$

ここで、 $d\epsilon_n$ 、 $d\epsilon_t$ はそれぞれひびわれ面の法線方向および接線方向成分である。(11)式を(10)式に代入すると、平均的なマクロな動水勾配増分は次のようになる。

$$\begin{aligned} d\bar{\epsilon}_i &= C_A d\bar{\epsilon}_{Ai} + C_C d\bar{\epsilon}_{Ci} - \int_{S^{CB}} \omega_1 \alpha_{ij} dS d\bar{\epsilon}_j - \int_{S^A} \omega_2 \alpha_{ij} dS d\bar{\epsilon}_j \\ \alpha_{ij} &= n_i t_j \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $\omega_{1,2}$ は(1)の損傷パラメータと同じものとした。最終的に、(12)式に(6)式中の応力に代わり流速を用いたものを代入すると、ひびわれを考慮したコンクリートの透水係数は次のように表すことができる。

$$K_{ij} = [R_{ik} K_{Ckl}^{-1} B_{Clm} + S_{ik} K_{Akl}^{-1} B_{Alm}]^{-1} Q_{mj} \quad (13)$$

$$Q_{ij} = \int_{S^{CB}} \omega_1 \alpha_{ij} dS + \int_{S^A} \omega_2 \alpha_{ij} dS + \delta_{ij} \quad R_{ij} = C_C \delta_{ij} \quad S_{ij} = C_A \delta_{ij}$$

ここで、 B_{Aij}, B_{Cij} はそれぞれ骨材、セメントペーストに関する流速集中マトリックスであり、次式のように表すことができる。また、 K_{Aij}, K_{Cij} は、それぞれ骨材、セメントペーストの透水係数マトリックスを表している。

$$\begin{aligned} B_{Aij} &= (C_C Q_{ik} - R_{in} K_{Cno}^{-1} K_{ok})(C_C S_{kl} K_{Alm}^{-1} K_{mj} - C_A R_{kl} K_{Clm}^{-1} K_{mj}) \\ B_{Cij} &= C_C^{-1}(I_{ij} - C_A B_{Aij}) \end{aligned} \quad (14)$$

2. 2 弾塑性多孔質材料としてのコンクリートのモデル化

コンクリートのモデル化は、以下の変更点を除いて既往の研究[1]と同じである。既往の研究ではコンクリート全体に生じる有効応力増分 $d\{\sigma'\}$ は骨材とセメントペーストに生じる有効応力増分に等しいと仮定したことに対し、本研究では下式に示すように両者の和で定義した。

$$d\{\sigma'\} = C_A d\{\sigma'_A\} + C_C d\{\sigma'_C\} \quad (15)$$

ここで、 $d\{\sigma'_A\}, d\{\sigma'_C\}$ はそれぞれ骨材、セメントペーストに生じる有効応力増分、 C_A, C_C はそれぞれ骨材およびセメントペーストの体積比を表している。

3. 数値解析

本研究では、コンクリート強度および間隙水圧に及ぼすひびわれの影響に関する評価を行うために、以下に示すような解析モデル、解析条件および解析ケースに対して有限要素法により解析を行った。ただし、本解析結果は今の段階では数値実験のレベルであって、今後実際との関連を検討するものである。

3. 1 解析モデルと解析条件

解析対象モデルは、図-3に示すように一辺が40cmの立方体で、これを27要素に分割したものである。境界条件は、変位に関してはモデル低面および上面を固定し、間隙水圧に関してはモデル表面は大気圧に等しいとした。本研究では、一軸圧縮状態を想定しモデル上面の変位制御により解析を行った。また、破壊を生じるひびわれ面は図-4に示すように $y-z$ 面で 45° の角度をなし、 x 軸に平行な面であると仮定した。なお、解析用いた材料パラメータは表-1に示す通りである。

表-1 材料パラメータ

ヤング係数 (骨材) (kgf/cm ²)	4.0×10^5
(ペースト)	5.5×10^4
ポアソン比 (骨材)	0.2
(ペースト)	0.2
体積比 (骨材 : ペースト)	7 : 3
体積弾性係数 (液体) (kgf/cm ²)	2.2×10^5
間隙比	0.15
透水係数 (骨材) (cm/sec)	5.0×10^{-8}
(ペースト)	5.0×10^{-8}
初期内部摩擦角 (°)	30.7
初期粘着力 (kgf/cm ²)	11.8
材料定数 α, β	0.65, 1.00
圧縮強度 (kgf/cm ²)	55.0

変位制御面

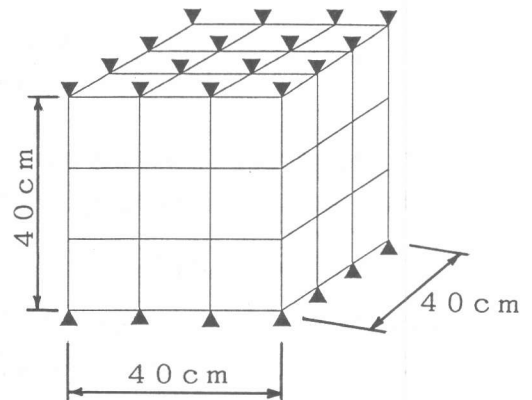


図-3 解析対象モデル

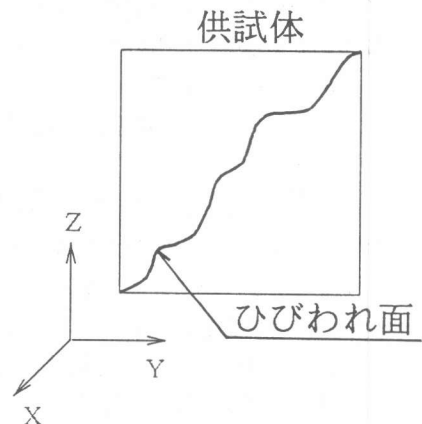


図-4 破壊を生じるひびわれパターン

3. 2 解析ケース

解析ケースは、コンクリート強度および間隙水圧に及ぼすひびわれの影響を調べるために既往の解析方法[1]と本解析方法の2種類とした。

4. 解析結果および考察

解析結果を図-5~8に示す。図-5、6は、それぞれモデル中心部における全応力~ひずみ関係、および間隙水圧~ひずみ関係の解析結果である。また、モデル端部における解析結果を図-7、8に示してある。各図とも本解析方法による結果を実線で、既往の解析方法[1]による結果を点線で示している。

既往の解析結果は、図-5、7からモデル内のどの位置においても全応力はコンクリートが塑性化しても徐々に大きくなるという結果を示している。この傾向は、透水係数の値により大きく変動し、例えば透水係数が大きい場合(5×10^{-6} cm/sec)では硬化した後軟化の現象を示すという結果が得られている。しかし本解析方法によれば、全応力はコンクリートの塑性後、硬化・軟化現象を示しており、

既往の解析のうち透水係数が大きい場合の結果とほぼ同じような傾向を示している。これは、コンクリートが塑性域に入ると従来の損傷の影響に加えて破壊を生じるひびわれ面における損傷の影響から、固体相に生じる応力(有効応力)の増分が急激に低下することによるものと思われる。図-6からもコンクリートが塑性化するとひびわれの影響により間隙水圧が負担していた応力が急激に解放されており、この解放応力が有効応力へと移行するため固体相の損傷が非常に大きくなることを示しているものと思われる。

一方、間隙水圧に関しては、モデル中心部において、既往の解析結果ではコンクリートが塑性化すると正圧が負圧に転じその後徐々に大きくなるという傾向を示しているが、本解析結果では正圧が負圧に転じる傾向は同じであるが、負圧の値が最大に達した後徐々にゼロに収束するという異なった傾向

を示している。この傾向は、全応力の場合と同様に既往の解析のうち透水係数が大きい場合の結果とほぼ同じである。これは、ひびわれが発生するとその部分の透水係数が損傷に程度に伴い徐々に大きな値となり、コンクリートが排水状態に近い状態になることによるものと思われる。ま

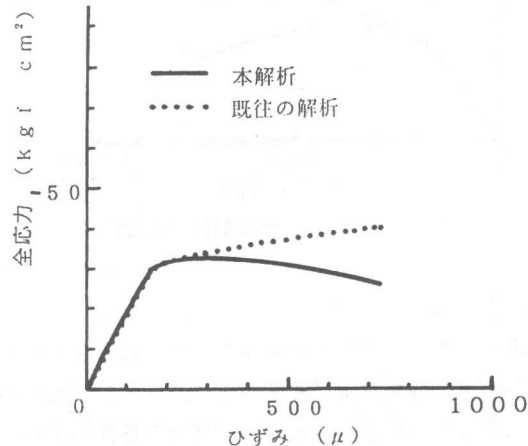


図-5 全応力~ひずみ関係(中心部)

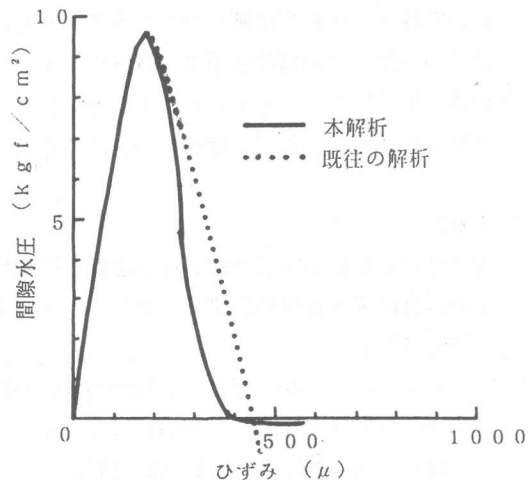


図-6 間隙水圧~ひずみ関係(中心部)

た、モデル端部においても図-8から同様な傾向を示していることがわかる。

以上のことから、ひびわれによるコンクリートの損傷を考慮することにより、全応力は軟化の傾向を示し既往の解析結果に比べ小さな応力値となる。また、間隙水圧はコンクリートが弾性域および損傷の程度が小さい塑性域までは既往の解析結果と同じであるが、損傷が大きくなるにつれて負圧から徐々にゼロに収束するという傾向を示している。

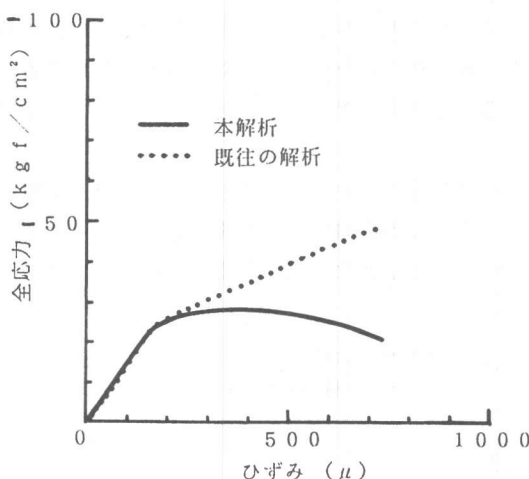


図-7 全応力～ひずみ関係（端部）

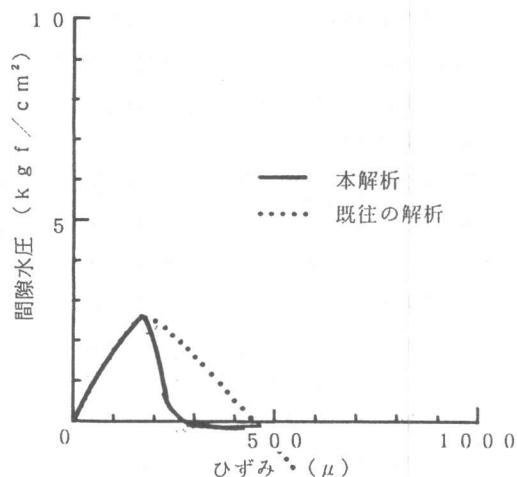


図-8 間隙水圧～ひずみ関係（端部）

5. まとめ

本研究では、ひびわれたコンクリートに対する変形および浸透に関する定式化を行い、コンクリートの強度特性および間隙水圧に及ぼすひびわれの影響に関する解析的評価を既往の解析方法と比較することにより行った。本研究の範囲内で得られた結果を要約すると以下になる。

- (1) ひびわれ発生後のコンクリートの強度特性は、このモデルに従えば本研究で設定した透水係数において既往の結果では硬化特性のみを示したが、本研究結果では硬化・軟化特性を示した。
- (2) ひびわれ発生後の間隙水圧は、既往の結果では正圧から負圧に転じた後、徐々に増加したが、本研究結果では負圧に転じた後徐々にゼロに収束する傾向を示した。
- (3) 今後は間隙水圧の測定実験を行い、このモデルの精度の検討を行っていくつもりである。

【参考文献】

- 1) 大下英吉、D.R.Lokuliyana、田辺忠顕：弾塑性多孔質材料のクリープ性状に及ぼす間隙水圧の影響に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.1, pp.58-59, 1992
- 2) Wu, Z.S. and Tanabe, T. : A Hardening-softening Model of Concrete Subjected to Compressive Loading :, Journal of Structural Engineering, Architectural Institute of Japan, Vol.36B, pp.153-162, 1990
- 3) Farahat, A.M., Wu, Z.S. and Tanabe, T. : Developement of Microplane Model of Concrete with Plural Types of Granular Particles :, Proceeding of JSCE, No.433, Vol.15, pp.231-238, 1991