

論文

[1106] 若材令コンクリートの強度に及ぼす間隙水圧に関する基礎的研究

谷口幸弘*1 ・ 大下英吉*2 ・ 田辺忠顕*3

1. はじめに

コンクリート中の水分移動に関するメカニズムを正確に把握することは、コンクリート部材の強度、クリープあるいはレラクゼーション、乾燥収縮、クラックやコンクリートの打継ぎ面からの漏水等の予測をする上で重要なばかりでなく、放射性廃棄物の拡散移動の問題など、実用上の技術的安全性検討の見地からも、極めて重要な問題と考えられる。

一般に、コンクリートは多孔質材料であり、特に初期材令においては、内部の空隙にゲル水やキャピラリー水を多く含んだものである。このような多孔質材料の強度特性は、固体相に作用する応力(有効応力)で表されることが一般的である。載荷応力が、有効応力と間隙水圧との和[1]で定義されると仮定すると、コンクリート内の固体相に生じる応力は、コンクリート内部に発生する間隙水圧により異なることになる。すなわち、コンクリート強度特性に影響を及ぼす大きな要因の一つが、間隙水圧であるといえる。

そこで本研究では、コンクリート内部に発生する間隙水圧測定実験を実施し、コンクリートの応力特性に及ぼす間隙水圧の影響を実験的に検討することを目的とする。

2. 実験概要

本研究では、コンクリートの応力特性に及ぼす間隙水圧の影響を実験的に解明することを一つの目的とし、含水率および損傷の程度をパラメーターとした間隙水圧測定実験を行った。

2.1 実験方法

実験は、 $\phi 10 \times 20$ cmのコンクリート供試体を図-1に示す間隙水圧測定用モールドに配置し、供試体上面を軸方向に圧縮載荷することにより行った。間隙水圧測定用モールドは、二つの鋼材の間に漏水防止用ゴムを噛ませボルトで定着することにより構成されている。したがって、供試体は横方向の変位が拘束され(三軸状態)、また完全に非排水な状態となっている。間隙水圧の測定は、モールドが完全非排水状態を模擬していることから、コンクリート内部における間隙水圧は場所によらず一定であるものと想定し、モールド底部に設けた二つの排水口(供試体断面積の1%)において実施することにした。また、供試体の軸方向ひずみは、図-1に示す載荷用鋼材に取り付けた変位計により測定した。これは、全応力および間隙

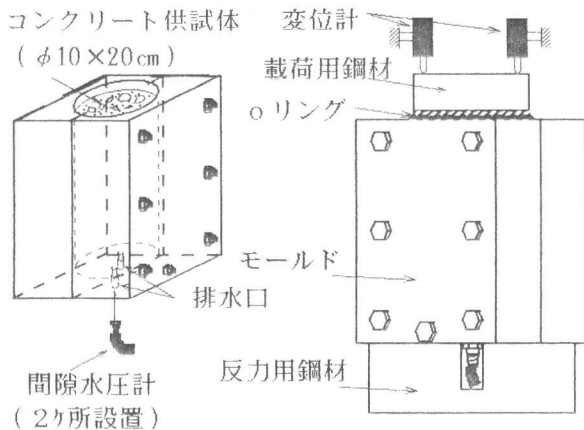


図-1 測定用モールド

*1 広島大学大学院 工学部土木工学科、(学生会員)

*2 広島大学助手 工学部土木工学科、工修(正会員)

*3 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

水圧とも局所的な計測値ではなく供試体の平均的なものであるため、それに対応するひずみは、供試体の平均的な変位から算出するべきであると思われることによる。なお、計測値のゼロ点は、載荷応力がコンクリート強度の約6%を示した時点初期値とした。

また、コンクリートの配合は、表-1に示す通りであり、最大連続空隙径が極力大きくなるように、水セメント比が60%の貧配合とした。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	単位体積重量(kg/m ³)			
				W	C	S	G
60	54	10±2	2.5±1	226	377	906	732

2.2 載荷方法

載荷装置は、25t 万能試験機であり、供試体上部に設置した載荷用鋼材を介して載荷スピードを0.02mm/secで軸方向に圧縮載荷し、載荷は間隙水圧が計器許容能力の約50~80%になるまで行った。なお、載荷用鋼材下部には、モールドと載荷用鋼材からの漏水を防止するために、Oリングとバックアップリングを配置してある。

2.3 実験パラメーター

実験パラメーターは、表-2に示すように、処女載荷応力比および水中養生期間の2種類とした。なお、コンクリート供試体の養生は、水中養生期間中は20℃の水中にて養生を行い、気中養生期間中は雰囲気気温度20℃、湿度50%の恒温室にて行われた。

表-2 実験パラメーター

試験体番号	載荷材令(日)	処女載荷材令(日)	水中養生期間(日)	処女載荷応力(%)
Ⅲ1	3	1	0	0
				60
Ⅲ1	3	1	2	0
				60
				90

(1) 処女載荷応力比

コンクリートに予め損傷を与え、その損傷の程度の違い、すなわちコンクリート粒子間の結合力の違いによる影響を調べる目的で設定されたものであり、処女載荷応力は、各材令における強度の、60%および90%で導入されている。

(2) 水中養生期間

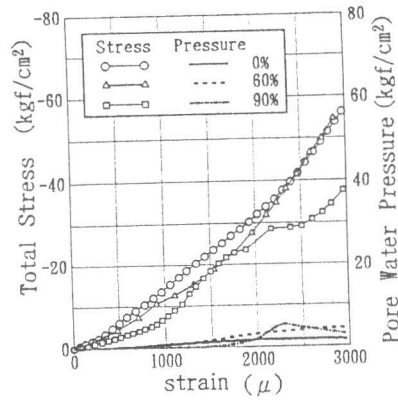
コンクリートの含水率の違いによる影響を調べる目的で設定されたものであり、本研究では水中養生を行わないもの(以下では、Ⅲ1-0)と2日間行うもの(以下では、Ⅲ1-2)を用い実験を行った。

3. 間隙水圧発生状況

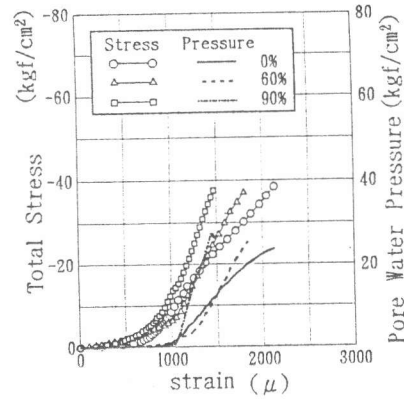
間隙水圧の特性を、図-2~5に示す。図-2は全応力・間隙水圧~ひずみ関係、図-3は全応力~間隙水圧関係、図-4は有効応力~ひずみ関係、図-5は有効応力~間隙水圧関係をそれぞれ表している。本章では、載荷材令が3日、水中養生期間が2日間、処女載荷応力導入材令が1日であるⅢ1-2に着目して、間隙水圧の発生状況を述べることとする。

図-2から、低ひずみ域において全応力は緩やかに上昇するが、間隙水圧が発生する時点のひずみ域から、載荷応力(全応力)の一部を間隙水圧が負担することにより急激にその傾きは大きくなる。また、低ひずみ域では間隙水圧は全く発生せず、あるひずみ状態に達すると急激に生じる。これは田沢ら[2]の自己収縮に関する実験的研究や、大下ら[3]が行った解析的研究から、養生期

間中に起こる水和反応によって形成される内部空隙に発生する応力が負圧状態であり、載荷応力は、その一部が内部空隙の負圧と打ち消し合い、その他が骨格に作用する。したがって、内部空隙に発生していた初期応力がゼロとなるひずみで供試体が飽和状態となり、供試体内部で水分の移動が生



(a) III 1-0



(b) III 1-2

図-2 全応力・間隙水圧～ひずみ関係

じることによるものと思われる。このような初期の内部空隙における応力状態は、全応力～ひずみ関係における低ひずみ域の応力状態(全応力の緩やかな上昇)にも影響を及ぼしていることが確認される。また、本研究における実験の範囲内では、載荷応力が 40 kgf/cm^2 の時点で生じる間隙水圧の最大値は、損傷の程度が90%の時に生じ、その値は約 32 kgf/cm^2 で全応力の約80%にも達している。これは、損傷の程度を大きくすることにより、水中養生中にマイクロクラックを通じて水が内部に浸透し易くなり含水率が大きくなること、コンクリート粒子間の結合力が弱いことによりコンクリート骨格が応力を十分には負担できないことなどによるものと思われる。

また、図-3から、間隙水圧は全応力に対してほぼ直線的に上昇しており、その増分は損傷の程度により異なる。それぞれの傾きは、損傷の程度が0%では全応力の約70%、60%では約90%、90%では約98%となり、著者らは、この傾きがマクロ的に見たコンクリート粒子間の結合力を表す主要因であるものと考えている。すなわち、傾きの小さい90%では結合力が小さく、逆に傾きの大きい0%では結合力が大きいものと考えられる。

さらに、全応力～ひずみ関係における傾きは、見掛け上では損傷の程度が大きいほど大きいのが、有効応力～ひずみ関係では、損傷の程度が大きくなるほど、コンクリート骨格の損傷が大きいことによりその傾きは小さくなる。また、有効応力～間隙水圧関係から、損傷がない場合には、間隙水圧の増加とともに有効応力も増加するが、損傷がある場合には、有効応力はほぼ $10 \sim 15 \text{ kgf/cm}^2$ の一定値となり、コンクリート骨格はそれ以上の応力を負担できなくなっている。

以上のことから、間隙水圧特性は、特に若材令コンクリートの応力特性に非常に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

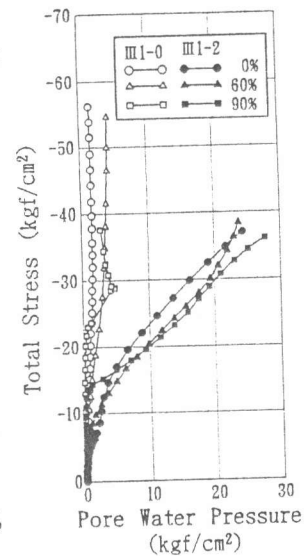


図-3 全応力～間隙水圧関係

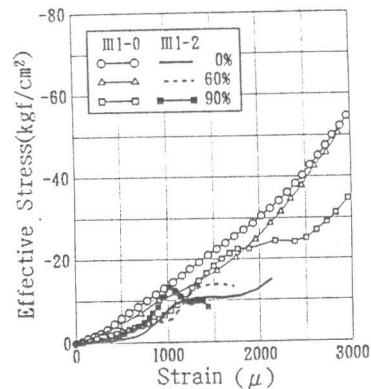


図-4 有効応力～ひずみ関係

4. 各パラメーターに関する間隙水圧特性

本章では、①処女載荷応力比、②水中養生期間、の各パラメーターについて間隙水圧特性を比較検討し、さらに有効応力からコンクリート挙動に関するメカニズムを評価する。

4.1 処女載荷応力比

図-2～5は、表-2に示すように処女載荷材令における強度の0、60、90%の応力を導入した供試体（以下では損傷を与えると表現する）に対する結果である。図-2から、特にⅢ1-2試験体では、損傷の程度が大きいほど、全応力および間隙水圧～ひずみ関係の勾配は大きい。これは、全応力～ひずみ関係では、損傷の程度が大きいほど水が負担する応力すなわち間隙水圧が大きくなることにより、勾配は見掛けでは上記のような傾向を示すものと思われる。しかし、骨格に作用する応力とひずみ、すなわち有効応力～ひずみ関係における勾配は、間隙水圧が発生するひずみ域(約1000 μ)以降では、0%の損傷の場合のみ正であり、損傷の程度が大きくなるほど大きな負の勾配となっている。また、間隙水圧～ひずみ関係では、損傷の程度が大きいほど、セメントゲルを構成しているコロイド粒子間の結合力が小さいため、コンクリート骨格が受け持つ応力(有効応力)が小さくなることにより、損傷の程度が大きいほど大きな勾配となるものと思われる。なお、Ⅲ1-0試験体では、全期間気中養生であるため含水率が小さいことにより、間隙水圧は発生するもののそのピーク値は小さく、その後は急激に低下するという現象を示し、またⅢ1-2試験体に比べ間隙水圧～ひずみ関係の勾配が非常に小さいことから不飽和状態であるものと予想される。

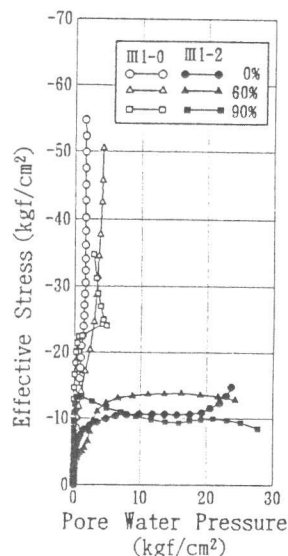


図-5 有効応力～
間隙水圧関係

損傷の程度の違いによる間隙水圧特性は、図-3の間隙水圧～全応力関係から、特に全応力が大きくなると損傷の程度が大きいほど間隙水圧は大きく、さらに損傷を与えない場合に比べ全応力の増加につれてその差も大きくなっている。これは、試験体に損傷を与えることで、コロイド粒子間の結合力が弱まり、有効応力が小さくなることによるものと思われる。

4.2 水中養生期間

本研究では、コンクリートの含水率を表すパラメーターに水中養生期間を設定しているが、水中養生期間が異なれば、コンクリートの組織も異なることは明らかである。しかし、コンクリートの含水率を変えるには、どのような手法を用いても、組織が全く同一で含水率のみが異なるコンクリートを製作することは、非常に難しいものと思われる。したがって、本研究では、含水率を表すパラメーターに水中養生期間を用いることとした。なお、水中養生期間に関する間隙水圧特性の検討は、図-2～5においてⅢ1-0とⅢ1-2を比較して行う。

本研究では、間隙水圧～ひずみ関係から、水中養生を行わないⅢ1-0試験体では発生する間隙水圧は小さく、全期間水中養生のⅢ1-2試験体に対する結果に比べ約1/10前後となり、この傾向はどの損傷の場合にも同様である。さらに、間隙水圧～ひずみ関係の勾配は、全期間水中養生のものに比べ非常に小さく、間隙水圧は発生するものの、あるピーク値になるとその後は一定値あるいは急激な低下を生じている。これは、Ⅲ1-2に比べ含水率が小さいこと、荷重載荷によるマイクロクラックの発生やクラック面への水分移動などによるものと思われる。また、間隙水圧～全応力関係から、どの損傷の場合にもその勾配はほぼ直線であり、全期間水中養生の試験

体における傾きは全期間気中養生の試験体に比べ小さい。これは、全期間水中養生の試験体では、粒子間に水分が多く存在するため結合力が小さくなることによるものと思われる。一般に、硬化したコンクリートでは、水中養生期間が長いほど組織が緻密になることにより剛性が大きくなると言われているが、若材令コンクリートでは、図-5に示す有効応力～ひずみ関係からコンクリートの緻密性よりもむしろ粒子間に存在する水分が少ないほど、すなわち結合力が大きいほど剛性は大きくなるものと思われる。

5 含水率、結合力の影響に関する検討

本章では、実験により測定された間隙水圧を含水率および間隙水圧・全応力勾配 (p/σ) により整理し、それに対する検討を行うこととする。

本研究で実施した間隙水圧測定の結果を含水率および間隙水圧・全応力勾配として表したものが図-6、7であり、それぞれ間隙水圧～含水率関係、間隙水圧～ p/σ 関係を表している。また、各図中の縦軸は荷重応力が 40kgf/cm^2 の時点で生じる間隙水圧の値である。さらに、図中の実線は、全供試体の結果に対する回帰曲線である。

図-6に示す間隙水圧～含水率関係から、含水率の増加とともに間隙水圧が上昇していることがわかる。

また、図-7に示す間隙水圧～ p/σ 関係から、試験結果はほぼ回帰曲線上にあり、 p/σ の増加とともに間隙水圧は大きくなっていることがわかる。すなわち、コンクリート粒子間の結合力が小さくなると、荷重応力を負担するコンクリート骨格の応力が小さく、逆に間隙水圧は増加する。同図は、まさにこのような現象を表しており、全応力増分に対する間隙水圧増分の割合は、コンクリート粒子間の結合力を表す一つの主要因であるものといえる。

6. 有効応力

本章では、実験により測定された全応力、間隙水圧からコンクリートの有効応力を求め、有効応力特性に関する検討を行うこととする。

図-4、5は、それぞれ、Ⅲ1-0とⅢ1-2における有効応力～ひずみ関係および有効応力～間隙水圧関係を表している。図-4から、有効応力は水中養生期間が短いほど大きくなる。これは、4章で記したように粒子間の結合力が大きく、含水率が小さいこと等から、発生する間隙水圧が小さいことによるものである。

図-5から、初期に発生する有効応力(以下、初期有効応力)は間隙水圧の発生とともに急激に生じる。Ⅲ1-2に関しては、その後、間隙水圧が増加するにつれ有効応力増分は小さくなり、最終的にはほぼ一定値となる。有効応力が一定値になるということは、すなわち全応力増分が全て間隙水圧増分になることを示している。なお、損傷がない試験体では、一定値とはならずある傾きを持って増加する傾向にある。ところが、Ⅲ1-0に関しては、含水率が小さいこと

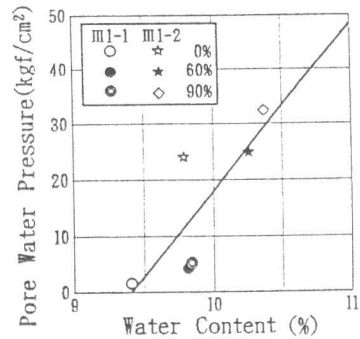


図-6 間隙水圧～含水率関係

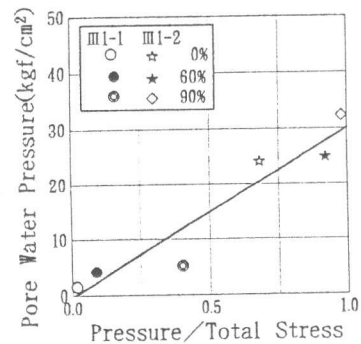


図-7 間隙水圧～ p/σ 関係

により間隙水圧があまり発生せず、有効応力は全応力とほぼ同じ値となっている。

本研究の範囲内では、設定した境界条件により、各粒子間のせん断変形(或いは、せん断応力)が生じにくいとため、発生する間隙水圧の符号は正であり、有効応力は全応力に比べ間隙水圧分だけ小さいものであった。しかし、せん断変形や塑性体積膨張が自由に生じさせることが可能な境界条件、例えば一軸圧縮、排水状態のような境界条件においては、コンクリートが弾性域であれば発生する間隙水圧の符号は正であるが、塑性域に入るとひずみの増加とともに間隙水圧は徐々に低下し、あるひずみ域から負圧に転じ、その後徐々に大きくなる[4]。このような場合、有効応力は全応力に比べ間隙水圧分だけ逆に大きくなり、コンクリートの強度低下に大きな影響を及ぼすものと思われる。なお、この挙動の実験的説明は、今後の検討課題となる。

7. 結論

本研究では、コンクリートの間隙水圧特性に及ぼす各パラメーターの影響およびコンクリートの応力特性に及ぼす間隙水圧の影響の実験的検討を行った。実験は、横方向変位が拘束された三軸完全非排水状態で行われ、荷重は一軸方向に圧縮载荷した。間隙水圧の測定位置は、完全非排水状態であることから、コンクリート内部に発生する間隙水圧は場所によらず一定であるものと想定し、モールド底部に設けた排水口にて行った。なお、設定した実験パラメーターは、処女載荷応力比および水中養生期間である。以下に、その結果をまとめる。

(1) 横方向変位を拘束した三軸完全非排水状態を模擬したモールドを開発することにより、硬化したコンクリートの間隙水圧測定が可能となった。

(2) コンクリートの含水率が大きいほど、またコンクリート粒子間の結合力が小さいほど、発生する間隙水圧は大きくなる。

(3) 全応力～間隙水圧関係における勾配は、マクロ的に見たコンクリート粒子間の結合力を表す一つの主要因である。コンクリート粒子間の結合力が大きくなると、(2)から載荷応力を負担するコンクリート骨格の応力(有効応力)が大きくなり、逆に間隙水圧は低下する。全応力～間隙水圧関係の勾配は、まさにこのような現象を表している。

(4) 本研究の範囲内では、含水率が小さく、結合力が大きいほど、有効応力は正の圧力として大きくなる。しかし、せん断変形や塑性体積膨張などが起こるような状態においては、有効応力特性は上記とは逆の現象になることが予想される。

なお、せん断変形や塑性体積膨張が生じる場合の間隙水圧測定実験に関しては、境界条件を変えて実施する予定である。

【参考文献】

- 1) Gudehus, G. : Finite Elements in Geomechanics, John Wiley & Sons, Ltd.
- 2) 田代忠一・田沢栄一・笠井芳夫 : セメント・コンクリート中の水の挙動、セメント・コンクリート研究会水委員会, pp53-55, 1993
- 3) 大下英吉・谷口幸弘・田辺忠顕 : 初期応力を考慮した若材令コンクリートの間隙水圧特性に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、1994
- 4) 大下英吉・Farahat, A. M.・石川靖晃・田辺忠顕 : 不連続面を有する断塑性多孔質材料の変形挙動に関する解析的研究、コンクリート年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp. 573-578, 1993