

論文 遷移材齢時におけるコンクリートの局所的熱変形性状に及ぼす岩盤節理の影響に関する研究

村上 祐貴*1・佐々木 恒也*2・大下 英吉*3

要旨: マスコンクリートの温度応力等の初期応力性状の精度良い解明がなされるためには、岩盤とコンクリートの境界面特性を明確にする必要がある。本研究では境界面における構成則モデルを構築する際に重要である岩盤節理の影響によるコンクリート内部の局所的な変形性状および応力性状の実験的検討を行った。その結果、岩盤節理近傍では局所的な変形性状および応力性状が確認された。

キーワード: 温度応力, 岩盤節理, 局所化, 応力集中

1. はじめに

近年、建設技術の進歩に伴い、コンクリートの断面化さらには大深度海洋構造物や地中におけるコンクリート構造物など新たなコンクリート構造物の利用が注目されている。これらの典型的な事例は、地下タンクや放射性廃棄物処理施設等であり、この種の構造物において各種要因による初期欠陥が重要なものとなってくる。

一般に、コンクリート構造物の初期欠陥の原因には自己収縮や水和熱による温度収縮などの体積変化による初期応力が挙げられる。コンクリート構造物が、構造上および耐久性上十分に機能するためには上述した要因を念頭において設計されなければならない。

特にマスコンクリートのような大断面を有する場合においては、水和熱およびそれによる温度応力が初期欠陥に及ぼす主要因となる。現在、数値計算技術の向上によりマスコンクリートの温度予測に関しては精度良く評価が可能であるが、温度応力解析は定性的にもまた定量的にも詳細な予測が可能であるとは言い難い。実験結果に不確定な要因はあるものの解析と実験結果との差異に及ぼす影響には、セメントと水和反応過程における線膨張係数や弾性係数、打継面

におけるはく離現象、岩盤節理との付着性状等があり、それらが十分には解明されていないことによるものである。特に、岩盤とコンクリートの付着性状に関しては未解明のままである。新旧コンクリートの境界面特性に関する研究⁽¹⁾は現在までに幾つも行われているが、それらの研究は境界面構成則の構築条件として、岩盤とコンクリートの付着が十分に確保されていることが前提条件となっている。しかしながら、実際の岩盤には大小様々な節理が存在するとともにその断面では凹凸を有するため、岩盤に打設されたコンクリートは節理の部分では岩盤との付着がなく、節理端部近傍では応力集中が発生する。したがって、コンクリートの内部応力は一様ではなく、局所的に異なる変形性状および応力性状になるため⁽²⁾、微視的観点に基づいた岩盤とコンクリートとの付着性状を解明することが重要と考えられる。

そこで本研究では、微視的観点に基づいた節理を有する岩盤とコンクリートの境界面特性を明確にすることを目的とし、コンクリートに引張応力が作用した際、岩盤節理の影響によりコンクリート内部に生じる局所的変形性状および応力性状を実験的に評価した。

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科

*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

表 - 1 使用材料

	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
被拘束体	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³	万田野産細骨材 密度:2.59g/cm ³	荒川水系粗骨材 密度:2.63g/cm ³	AE減水剤 リグニンスルホン酸塩系
拘束体	早強ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³			高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系

表 - 2 コンクリートの配合

被拘束体		スランブ (cm)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				AE剤 (C×%)
水セメント比 (%)	最大骨材寸法 (mm)				水	セメント	細骨材	粗骨材	
60	25	10±1	40	5	168	280	723	1089	0.43
拘束体		スランブ (cm)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				AE剤 (C×%)
水セメント比 (%)	最大骨材寸法 (mm)				水	セメント	細骨材	粗骨材	
25	25	24±1	37	5	140	560	610	1044	1.1

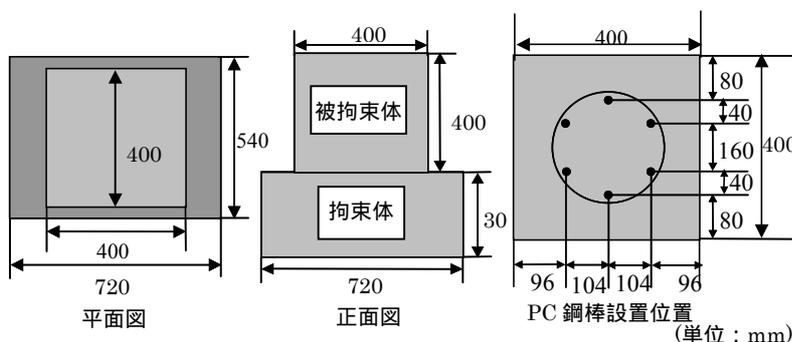


図 - 1 試験体寸法および PC 鋼棒設置位置

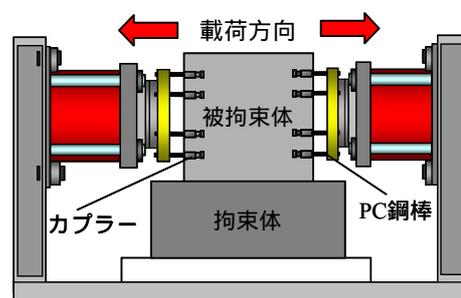


図 - 2 荷重荷荷方法

2. 実験概要

2.1 供試体

試験体は、図 - 1 に示すように岩盤を模擬した拘束体と被拘束体により構成され、拘束体表面を打継処理した後に被拘束体を打設した。拘束体表面の処理方法は、打設直後表面に遅延剤を散布し 24 時間気中養生の後にワイヤーブラシにて表面を 5~7mm 削り骨材を露出させ、その後 6 日間湿潤養生(水温 20)を施した。被拘束体は拘束体に打継打設し、その後 3 日間気中養生を施す。なお、使用材料および配合は、表 - 1 および表 - 2 に示す通りである。

2.2 実験方法

外部拘束によるコンクリート内部に発生する温度応力は、温度上昇時には圧縮、温度降下時には引張の性状であり、初期欠陥として重要な性状は後者である。この温度降下時におけるコンクリート内部の引張性状を模擬するために、本研究では図 - 2 に示すように被拘束体内部にカプラーを埋込み、カプラーと引張試験機の水

平ジャッキを PC 鋼棒(10mm)によって固定し、一定の引張荷重を水平に荷重することにより、被拘束体内部を引張性状にした。なお、PC 鋼棒は図 - 1 に示す の箇所に設置した。また、表 - 1 および表 - 2 に示すように、拘束体は岩盤を模擬するために、高強度を発現する配合を設定し、被拘束体は拘束体の荷重荷重による変形を抑制するために、設計基準強度を満たす範囲内で、弾性係数が小さくなるよう配合を設定した。

2.3 引張力荷荷方法

荷荷方法は 0.01MPa/sec の荷重速度で所定の荷重まで加圧し、その後一定引張力として 10 時間保持させた。なお、荷荷荷重の設定については 2.5 で述べる。

2.4 測定項目

測定項目は、被拘束体軸方向の局所ひずみであり、その測定箇所は、図 - 3 に示すように異型に加工した 10mm のアクリル製丸棒を被拘束体底面から 1.5cm(下層)、20cm(中層)、37cm(上層)に配置し、各アクリル製丸棒に 44mm

間隔でひずみゲージ(20mm)を貼り付けて測定した。各層の断面1および断面2における測定箇所は、それぞれ中心断面から同距離であるため、計測したひずみは中心断面に対して同一箇所の平均値とした。なお、アクリル製丸棒によるコンクリートの拘束は、その弾性係数が 3.3KN/mm^2 とコンクリートに比べ十分小さいためゼロとした。なお、実験環境は 20 ± 1 , $50 \pm 5\text{R.H.}$ であり、事前に被拘束体と同様の養生を施した $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体の温度ひずみ、および乾燥収縮を10時間計測したところ、最大収縮量が約 5μ 程度であることより、外気温および湿度変化による影響は無いと考えられる。

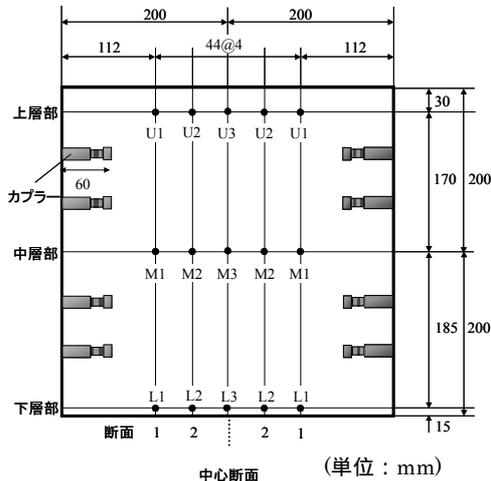


図 - 3 局所ひずみ測定箇所

2.5 実験パラメータ

実験パラメータは、表 - 3 に示すように切欠きの存在の有無とその幅である。切欠きは拘束体中心部に軸直交方向に導入した。切欠きを有していない試験体 N - 0、小さな幅の切欠きを有する試験体 N - 5 および大きな幅の切欠きを有する試験体 N - 10 は、それぞれ節理を有していない岩盤、小さな幅の節理と大きな幅の節理を有する岩盤に対応している。なお、試験体 N - 5 および N - 10 は切欠き深さ、奥行長は同様であるが、切欠き幅がそれぞれ5mm、10mmである。

載荷荷重は、事前に本実験に使用する試験体と同様の試験体によって引張試験を実施したところ引張強度が約 0.75MPa であり、また各試験

体において本試験体と同様の養生を施した $10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用い、圧縮試験も実施したところ、表 - 4 に示すように圧縮強度に差異があるものの、弾性係数がほぼ同じであることから、載荷荷重を各試験体において固定し、引張強度の約65%に相当する 0.5Mpa を一定引張荷重として載荷した。

表 - 3 実験パラメータ

試験体名	切欠き幅(mm)	切欠き深さ(mm)	奥行長さ(mm)
N-0	-	-	-
N-5	5	80	400
N-10	10	80	400

表 - 4 強度特性

試験体名	圧縮強度(N/mm^2)		弾性係数(kN/mm^2)	
	拘束体	被拘束体	拘束体	被拘束体
N-0	62.7	12.3	42.3	19.12
N-5	63.0	11.6	46.2	19.57
N-10	63.6	10.6	44.8	18.42

3. 被拘束体の変形挙動

3.1 所定荷重載荷時点における変形特性

図 - 4 は所定の荷重が載荷された時点におけるひずみ分布であり(以下、弾性ひずみと称す)、(a)~(c)はそれぞれ、試験体 N - 0、N - 5 および N - 10 に対するものである。図中に示す記号、およびはそれぞれ上層部、中層部、下層部のひずみであり、横軸は試験体中心断面からの距離を表している。なお、各測定箇所の弾性ひずみ量を表 - 5 に示す。

まず、切欠きが存在しない試験体 N 0 においては、各層において中心断面に向かうにしたがって、ひずみが小さくなる。これは、被拘束体底面と拘束体境界面上に発生するせん断抵抗が被拘束体側面から伝達される応力を徐々に低減させるためであると考えられる。また、拘束体のせん断抵抗が減少することにより、各断面において上層部に向かうにしたがいひずみが増加していく傾向が見られる。

一方、切欠き幅が小さい試験体 N - 5 に関しては、下層断面1および断面2において切欠きが存在しない試験体 N - 0 とひずみ量の差異はほとんど無いが、中心断面においてはひずみが約 10μ 大きく、局所化現象が生じている。これ

は、切欠き上のコンクリートは岩盤との付着が無いためにせん断抵抗が発生しておらず、切欠き端部近傍において発生する応力集中により局所化現象が生じたと考えられる。

また、切欠き幅の大きい試験体 N - 10 に関しては、切欠き幅の小さい試験体 N - 5 と同様に下層中心断面においてひずみの局所化現象が生じているが、その大きさは N - 5 に比べて約 15 μ 大きく、切欠き幅が拡大したことともなう無拘束領域の拡大の影響が顕著に生じている。さらに上層、中層中心断面および各層の断面 2 において断面 1 に比べひずみが大きくなっており、切欠きの影響によるひずみの局所化現象が広範囲に及んでいる。

表 - 5 弾性ひずみ量

試験体名 \ 測定箇所	U1	U2	U3	M1	M2	M3	L1	L2	L3
N-0	38	36	30	31	30	27	13	12	8
N-5	31	28	25	25	23	20	14	11	17
N-10	39	50	50	26	45	41	16	31	33

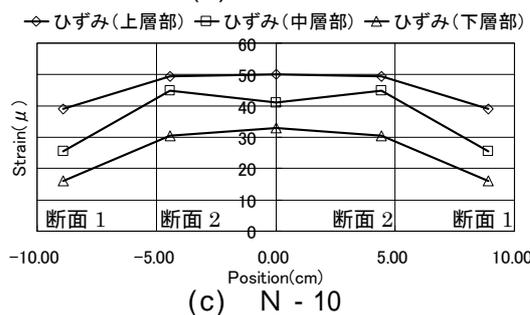
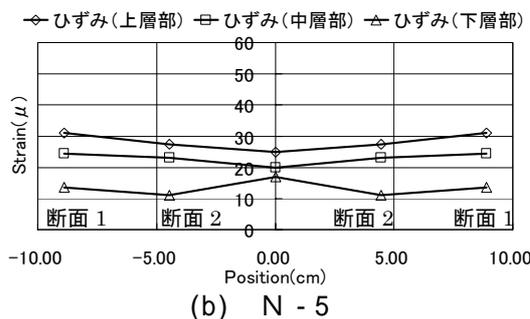
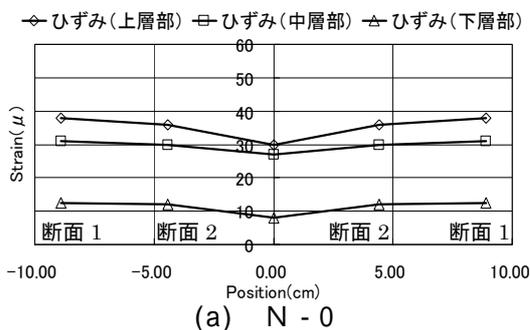


図 - 4 弾性ひずみ分布

3.2 クリープ変形特性

図 - 6 ~ 8 はそれぞれ荷重載荷後 1 時間, 5 時間, 10 時間経過時に発生したひずみから弾性ひずみを差し引いたものである(以下, クリープひずみと称す)。各図(a) ~ (c)は、それぞれ試験体 N - 0, N - 5 および N - 10 に対するものであり、図中の記号 , および は図 - 4 と同様である。

3.2.1 一定引張荷重載荷 1.0 時間経過時

まず、試験体 N - 0 においては全測定箇所でクリープひずみはほとんど発生しておらず、境界面上に発生するせん断抵抗が十分に発揮されていることが確認できる。

次に、試験体 N - 5 においては、各層中心断面において断面 2 に比べるとひずみが大きく、無拘束領域コンクリートのひずみが局所的に増加している影響であると思われる。また、N - 0 と比べると全測定箇所においてひずみが大きい。試験体 N - 10 においても同様に各層の中心断面においてひずみの局所化現象が生じているが、下層断面 2 においては弾性ひずみに対してひずみの回復現象が生じている。これは、N - 5 に比べ切欠き幅が大きいので、図 - 5 に示すように無拘束領域のひずみが切欠き端部表面での応力集中の影響により著しく増加し、その影響により回復現象が生じたと考えられる。また、下層断面 2 を除き N - 5 と同様、各層の断面 1 および断面 2 においてひずみが N - 0 に比べ大きく、両結果から応力集中の影響が時間経過にともない、上層部と荷重端方向に応力伝達していることによるものと思われる。

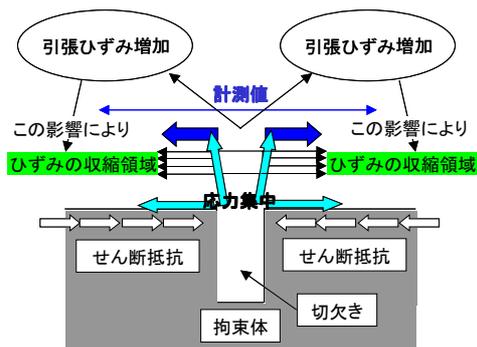


図 - 5 切欠き近傍の変形性状

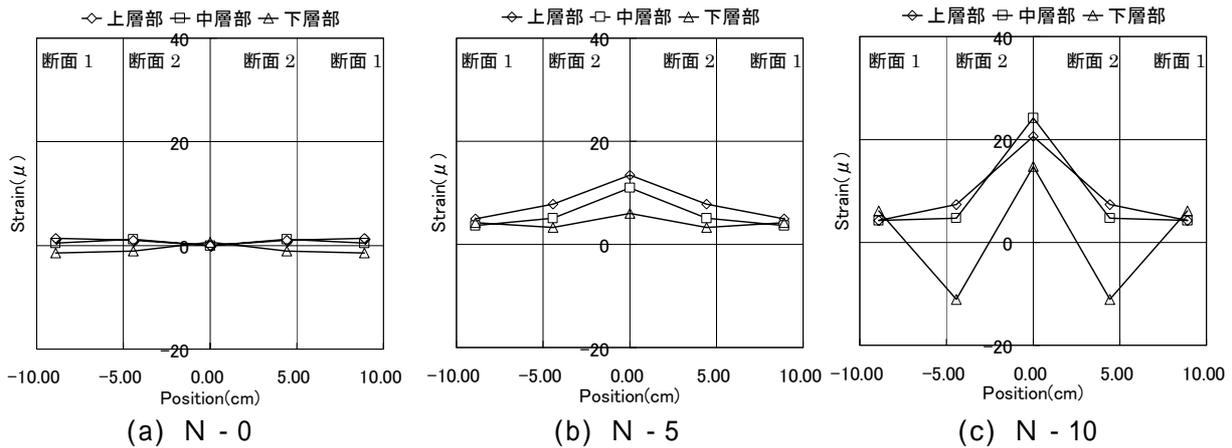


図 - 6 クリープひずみ分布(所定荷重載荷後 1 時間経過時)

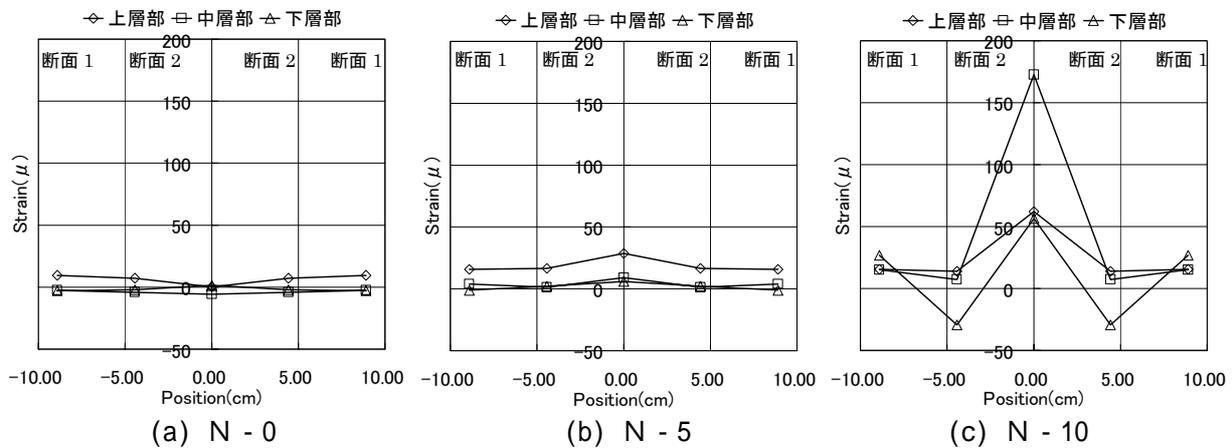


図 - 7 クリープひずみ分布(所定荷重載荷後 5 時間経過時)

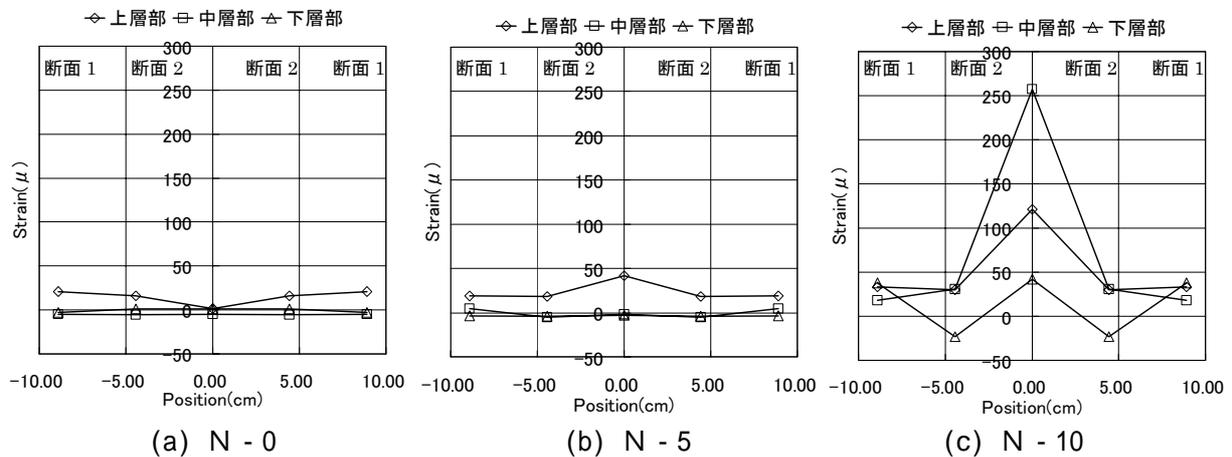


図 - 8 クリープひずみ分布(所定荷重載荷後 10 時間経過時)

3.2.2 一定引張荷重載荷 5.0 時間経過時

まず、試験体 N - 0 においては、上層部が下層部、中層部に比べ、拘束効果が低減するため上層部でのみひずみが増加している。この傾向は、試験体 N - 5 も同じである。

一方、試験体 N - 10 においては試験体 N - 0、N - 5 の傾向とは異なり、各層の中心断面において、ひずみの局所化が顕著である。その値は、

中層部において最も大きくなっている。また下層部断面 2 においては、1 時間経過時に比べさらにひずみが約 20 μ 回復しており、図 - 5 に示した応力集中の影響が、より顕著に生じていると思われる。また応力集中の影響を最も受けられると思われる下層部中心断面におけるひずみの時間的増加率は、中層部中心断面のそれに比べ非常に小さい。この結果から立脚するならば、ひ

ずみの回復現象が、より切欠き近傍の領域においても生じていると考えられ、図 - 5 に示すように切欠き直上すなわち下層中心断面において計測している節理近傍のひずみには回復現象の影響が含まれており、その影響により中層部中心断面に比べひずみの時間的増加率が非常に小さくなったと思われる。すなわち切欠き直上の無拘束領域にあるコンクリートひずみは、計測値よりも大きな値となっていることが想定される。なお、上述した現象は今後詳細に評価する必要がある。

3.2.3 一定引張荷重载荷 10.0 時間経過時

まず、試験体 N - 0 においては、時間の経過とともに上層部のひずみが増加することに対して、中層部および下層部においては、10 時間経過後もほとんど発生しなかった。

次に、試験体 N - 5 においては上層部でひずみが増加し、下層および中層部の中心断面においては、5 時間経過時に比べると約 10 μ 程度ひずみが回復していることから判断すると、切欠き端部近傍に発生した応力集中が、時間の経過にともないコンクリート全域に影響し、下層、中層部においては時間経過にともない、応力が緩和されたためにひずみが回復したと思われる。

試験体 N - 10 においては、時間の経過とともに上層および中層の中心断面においてひずみの局所化が進行しているが、下層中心断面においてはひずみの回復現象が生じている。また、下層断面 2 においてはわずかではあるものの引張方向にひずみが約 5 μ 発生している。さらに、各層断面 1 および上層、中層断面 2 においてひずみが進展しており、N - 5 に見られた傾向とは異なり、ひずみの回復現象が生じなかった。中層部においてひずみが約 250 μ も発生していること、上層および中層断面 2 においてひずみが 5 時間経過時から比べ、大きく増加していることから判断すると、微細なひび割れが切欠き直上部のコンクリートに生じているものと想定される。したがって、中心断面ではひずみが増え続け、中心断面に発生した応力は他の領域に分

担されるため、中心断面に近い断面 2 においてひずみが大きく増加していると考えられる。

上述のように微視的観点に基づいた節理を有する岩盤とコンクリートの境界面特性に与える影響を論じ、節理の影響が境界面における構成則モデルを構築する際、考慮に入れるべきファクターの一つであることを言及した。しかしながら、本実験は実際の遷移材齢時における物性、温度応力発生状況および環境状況とは相違があるため、今後更なる詳細な検討が必要であると考えている。

4. 結論

本研究では、微視的観点に基づいた節理を有する岩盤とコンクリートの境界面特性を明確にすることを目的とし、コンクリートに引張応力が作用した際、岩盤節理の影響によりコンクリート内部に生じる局所的変形性状および応力性状を実験的に評価した。以下に本研究で得られた結果を要約する。

- (1)岩盤節理近傍では応力集中が発生し、節理上に打設されたコンクリートは無拘束状態になるため、ひずみの局所化現象が生じる。
- (2)応力集中の影響は時間が経過するとともに伝達すると思われ、時間経過にしたがいひずみの回復現象が生じる領域が存在する。
- (3)応力集中の影響は節理幅に大きく影響し、節理幅によっては初期欠陥を引き起し得るひずみが発生する可能性がある。

参考文献

- 1)石川靖晃，田辺忠顕：時間依存性を考慮する境界面モデルの開発およびその層打ちコンクリート構造物温度応力解析への適用，土木学会論文集，V-38，No.585，pp.175-187，1988-2
- 2)平野貴規，中村光，斉藤成彦，檜貝勇：一軸圧縮応力を受ける拘束コンクリートの破壊性状の推定，日本コンクリート工学年次論文集，vol.24，No2，2002