論文　打継面の水分移動性状がコンクリートの変形挙動に及ぼす研究

中村直樹*1・井谷大介*2・村上祐貴*3・大下英吉*4

要旨：打継面を有するコンクリートに対して加圧透水試験を行なうことにより，打継面の処理方法がコンクリートの透水性状に及ぼす影響を評価する基礎的な実験を実施し，実験結果に基づいた打継面処理方法に依存する透水性状および強度特性を用いることにより，新旧コンクリートに及ぼす打継面の透水性状の影響評価を目的とした変形挙動解析を実施した。その結果，打継面処理方法の違いから生じるコンクリート全体の変形挙動は，打継面の性状に依存していることが確認された。

キーワード：透水性，ヤング係数，打継面，クリープ

1.　はじめに

近年，コンクリート材料の技術的進歩は目を見張るものがあり，海洋構造物や大深度地下などの厳しい環境下における施工も可能な時代となってきている。しかしながら，コンクリート構造物を建造する際には，コンクリート特有の性質である打継面が必ず存在することは自明である。新旧コンクリートの打継面は，既設コンクリート打設後の表面処理の程度によっては構造物全体の変形挙動に対して大きな影響を及ぼす欠陥となり，その種の事例が少なからず報告されている。

現在の打継面に関する研究の多くは付着性状に着目したものが殆どであるが，打継面特有の多孔質であるという性質を鑑みると，透水性状がコンクリート全体の変形性状に及ぼす影響は非常に大きなものと想定される。特に，地中或いは海洋コンクリート構造物では，水が静水圧として直接コンクリート表面に作用することにより，コンクリート内部への水の圧入現象に起因した間隙水圧が発生することとなり，間隙水圧勾配による水分移動現象によってクリープ変形に似た現象が発生するという実験的報告[1)]がなされている。既存の研究[2)]では，打継面を有するコンクリート供試体用のクリープ変形性状は，打継面を有していないものに比べて非常に大きなものとなることが指摘されている。

そこで本研究では，打継部近傍の透水性状がコンクリート部材全体の変形挙動に及ぼす影響を詳細に解明することを目的として，打継部の透水性状評価に関する実験を実施するとともに梨木ら[1)]が開発した排水境界を有する破壊力学に基づく水分移動モデルを用いることにより，打継面処理の有無による変形挙動解析を実施し，変形挙動に及ぼす打継面の影響を解析的に評価した。

2.　打継面における透水試験実験概要

2.1　使用材料および配合

本実験では，水セメント比は60%とし，普通ポルトランドセメントを使用した。なお，コンクリートの配合表を**表－1**に示す。

2.2　実験供試体

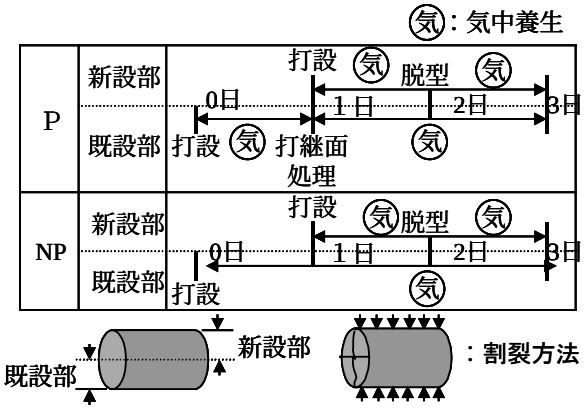
実験供試体は，φ10×20(cm)の円柱供試体とし，既設および新設の二相からなるコンクリートを用いることとした。

図－1に示すように，既設コンクリートにおいては，型枠の半分の位置まで水平方向に打設し，24時間気中養生を経て，新コンクリートを打設した。さらに，24時間気中養生後脱型し，圧力水を

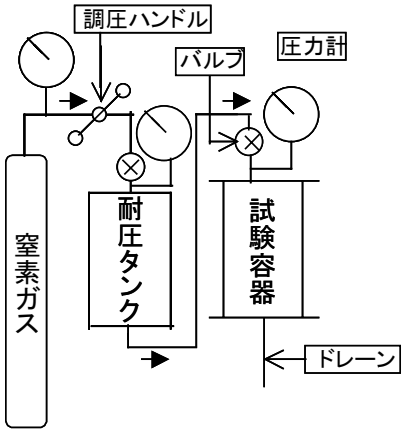
*1 中央大学　理工学部　土木工学科　(正会員)
*2 中央大学　理工学部　土木工学科　(正会員)
*3 中央大学　理工学部　土木工学科　(正会員)
*4 中央大学助教授　理工学部　土木工学科　工博　(正会員)

表－1　配合表

水セメント比 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
60	25	10±2	2.5±1	54	226	377	906	732



図－1　円柱供試体



図－2　透水試験装置

加圧する際に一次元の流れが得られるように，供試体の側面部にエポキシ樹脂を塗付し防水処理を施した後に 24 時間気中養生を施した。そして，既設コンクリート打設後 3 日の時点で透水試験を開始することとした。なお，コンクリート打継面の処理方法は，ワイヤーブラシを用いて 1～2mm削り，新旧コンクリートの付着低下の原因であるレイタンスを除去した。また，本実験で使用した供試体の設定条件は，表面処理を施す供試体，および施さない供試体（以下 60－Ｐ, 60－ＮＰと記す）とした。

2.3　透水試験方法 [3)]

透水試験は，打継部と既設部および新設部の透水性の違いに焦点をおいて実施することとした。打継面処理無しにおいては，ブリージングにより既設コンクリート上部に堆積したレイタンスの層を打継部とした。打継面処理有りにおいては，既設部と新設部の境界領域を打継部とした。

まず，供試体を試験容器内に設置し，供試体の上端面に水圧 1.5kgf/cm^2 を 3 時間加え，試験終了後に JIS　A1113「コンクリートの引張強度試験方法」に従い供試体を**図－1 にしめすように**打継面に対して直交する方向に割裂し, 断面内の既設部, 新設部および打継部の浸透深さの最大値を測定し，浸透深さ，水圧および加圧時間より透水係数を求めることとした。

2.4　拡散係数と透水係数の算出

透水係数の算出の際に必要となる拡散係数においては，次式に示す村田の式 [4)]を用いることとした。

$$\beta_i^{\,2} = \alpha \frac{D_m^{\,2}}{4t\xi^2} \qquad (1)$$

β_i^2：拡散係数（ｃｍ^2/s）

D_m：浸透深さ（ｃｍ）

t　：水圧を加えた時間（sec）

ξ：水圧に関する係数

α：水圧を加えた時間に関する係数

式(1)はコンクリート中の水の流れを拡散流れとして，*Fourier* の熱伝導方程式中の温度を水圧に置き換えたものである。

そして，次式に示す岩崎の式 [5)]により，

表－2　透水係数

	60%透水係数比較(cm / sec)	
	処理有り	処理無し
既設部	4.54×10^{-9}	5.65×10^{-9}
打継部	7.54×10^{-9}	9.70×10^{-9}
新設部	9.96×10^{-9}	8.71×10^{-9}

表－３　骨材とセメントペーストの諸係数

	骨材	セメントペースト					
		60－P			60－NP		
		既設部	打継部	新設部	既設部	打継部	新設部
ヤング係数（MPa)	4.0×10^4	2.7×10^4	2.0×10^4	2.0×10^4	2.5×10^4	1.5×10^4	2.0×10^4
ポアソン比	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

表－４　水に関する諸係数

	水
体積弾性係数(MPa)	2.2×10^3
単位体積重量(MPa)	1.0×10^{-4}
間隙比	0.15

$$\beta_i^{\,2}=\frac{\kappa K}{\rho}=\frac{\kappa\times1.0\times10^5}{1.0\times10^{-3}}=\kappa\times10^8 \quad (2)$$

透水係数κを導くことができる。

2.5　打継部の透水性状

本実験より求めた透水試験結果を**表－２**に示す。なお，表中の値は W/C= 60%の打継面処理有りおよび無しについて各 3 回ずつ試験した結果の平均値である。

打継面処理の有無による透水試験の比較をしてみると，表面処理を行なうことによって，処理無し供試体と比べて新設部においては大きな値となることに対して，既設部，打継部では小さな値となる。これは，表面処理無しである 60－NP の供試体ではブリージング現象により既設面上部にレイタンスが形成されるため，既設コンクリート上層部および新設コンクリート下層部が非常に多孔質な組織となり，既設部上部および新設部ともほぼ同等に水分移動が生じることになる。一方，表面処理有りである 60－P 供試体では，打継面処理によってレイタンスを除去したことにより既設コンクリート上層部では 60－NP に比べ組織が緻密なものとなり，新設コンクリート打設後の打継部から既設部への水分移動現象が殆ど生じないため，多孔質である新設部において水分移動が活発になったものと考えられる。

3.　一定側面水圧下での新旧コンクリートの変形挙動解析手法の構築

3.1　解析理論[1)]

本解析では，コンクリートは骨材とセメントペーストから形成される二相材料として捉え，骨材およびセメントペーストは完全等方弾性体と仮定した。コンクリート中の水分移動に関する支配方程式は，間隙水の質量保存則と力の釣合式を連成させなければならない。

3.2　連成方程式

コンクリート中の水分移動に関する支配方程式は，間隙水の質量保存と力の釣合式を同時に満足する水～コンクリート骨格連成解析モデルである。

水～コンクリート骨格連成解析モデルは，次式のようなマトリックスにより表すことができる。

$$\begin{bmatrix}[K_T] & -[L]\\ -[L]^T & -[S]-\Delta t_n([H]-[M])\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\Delta\bar{u}_n\\ \Delta\bar{p}_n\end{Bmatrix}$$

$$=\begin{Bmatrix}\Delta f_n\\ -fp_n\Delta t_n+W\Delta\bar{T}_n+\Delta g_p+\Delta t_n(H-M)\bar{p}_{n-1}\end{Bmatrix} \quad (3)$$

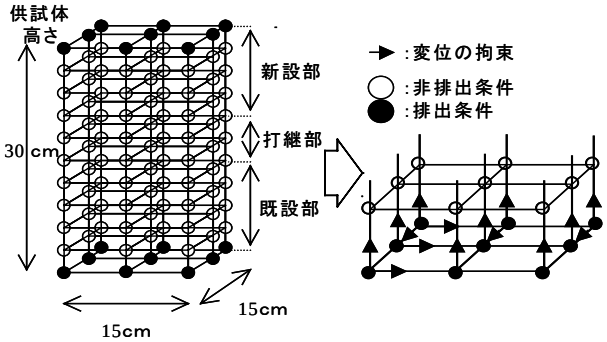
ここで，$\Delta\overline{u_n}$，$\Delta\overline{p_n}$は，それぞれ節点変位ベクトル増分，節点間隙水圧増分である。

3.3　解析モデルおよび解析条件

解析の対象としたモデルは，**図－３**に示すように 15ｃｍ×15ｃｍ×30ｃｍの形状寸法をした角柱供試体を 40 要素に分割したものである。そして，この要素を既設，打継および新設部に分けることにより，それぞれに異なる物性値を与えることにした。境界条件は，変位に関しては等二軸状態を仮定し，間隙水に関しては，供試体上下面を排出境界とした。なお，一定水圧は，供試体側面に与

表－５　解析パラメータ

供試体名	σ_{ru} (MPa)	一定側圧($0.5\sigma_{ru}$) (MPa)
60－ＮＰ	2.4	1.2
60－Ｐ	2.8	1.4



図－３　解析対象モデル

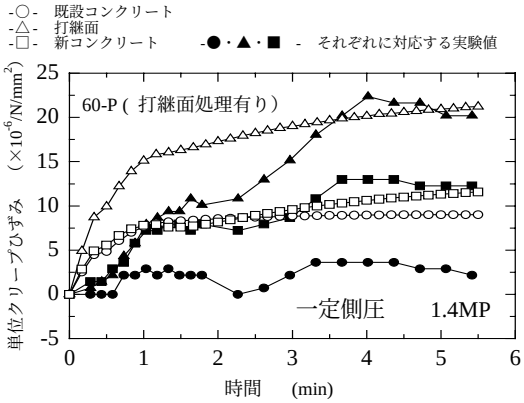
えた。解析に用いた物性値は，**表－２**，**表－３**および**表－４**に示す通りである。水に関する諸係数は一般的な値を用い，透水係数に関しては実験で得た値を用いた。また，既設部および新設部のヤング係数，ポアソン比は実験により求め，打継部に関しては，処理有りの場合にはレイタンスが除去されたことにより新設部と同じ値，処理無しの場合には江上らの実験 [2]による破壊強度から推定を行った。また，間隙比は梨木らのデータを採用した。

3.4　解析パラメータ

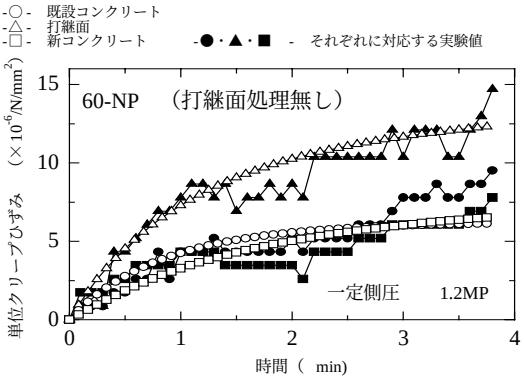
江上らの実験 [2] では，破壊時の側圧 σ_{ru} に対し50%($0.5\sigma_{ru}$)の値を一定側圧として持続的にコンクリート供試体の側面のみに載荷させたものであり，解析パラメータは**表－５**に示す通りである。実験に使用した供試体は円柱供試体であるが，解析においては簡易なモデルとして角柱供試体とした。

4.　打継面処理による変形性状

まず，本解析モデルの適用性の評価を行なうため，江上らの実験結果に対する，解析的評価を実施する。そして，本解析モデルに基づいて，打継部の透水性状がコンクリート供試体の変形性状に及ぼす影響評価を解析的に実施した。なお，後述の解析パラメータは，打継部におけるコンクリートのヤング係数 E_C および透水係数 κ である。



図－４　単位クリープひずみ履歴
(供試体　60－Ｐ　)



図－５　単位クリープひずみ履歴
(供試体　60-ＮＰ　)

4.1　本解析モデルの適用性評価

図－４および**図－５**は，それぞれ打継面処理の有無による打継部と既設部および新設部の中心の単位クリープひずみと時間の関係を表したものである。図中の記号○，△および□は，既設部，打継部および新設部における解析結果であり，●，▲および■は江上らの実験結果である。

本モデルによる解析結果と実験結果は比較的良好な一致を示しているが，60－P の場合，既設部のみ解析結果と実験結果に差異が生じている。これは，著者らの実験と江上らの実験において打継面の処理の程度に違いがあったため解析値と実験値に差異が生じたと思われる。

単位クリープひずみは打継面処理の有無にかかわらず打継部において最も大きく，その値は処理有りで約 20×10^{-6}/N/mm^2，処理無しで約 13×10^{-6}/N/mm^2 であり，本解析結果はこのような性状

を詳細に評価している。

図－4に示す60－Pの供試体においては，解析結果は既設コンクリート部において実験結果よりも大きな単位クリープひずみを生じている。このような性状に関しては，次項に示す解析手法に基づく打継面の影響評価において論じることとする。

一方，**図－5**に示す60－NPの場合は**2.5**節でも述べたように，既設コンクリート上層部及び新設コンクリート下層部で非常に多孔質となる。したがって，既設部上部および新設部ともほぼ同等に単位クリープひずみが生じており，解析においても比較的実現象を精度良く評価しているものと考えられる。

4.2　解析手法に基づく打継面の影響評価

(1) ヤング係数による検討

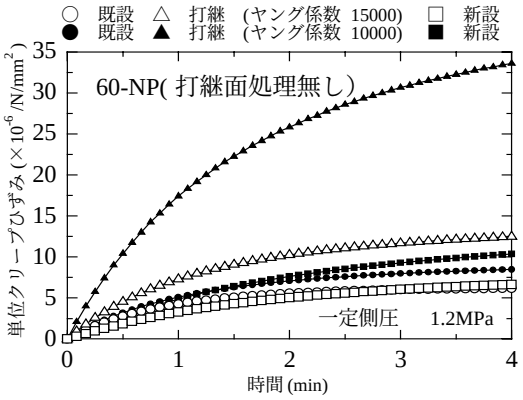
打継部のヤング係数E_Cの変化が供試体の変形挙動に及ぼす影響を検討するために，**図－5**の解析に用いた15000 MPaに対して，**図－6**では10000 MPa，**図－7**では20000MPaを用いた場合の解析を示している。

図－6における図中の記号○，△および□は**図－5**における解析値，●，▲および■は10000 MPaを用いた場合の結果である。同様に，**図－7**においては**図－5**における解析値に対する20000 MPaを用いた場合の結果を示している。

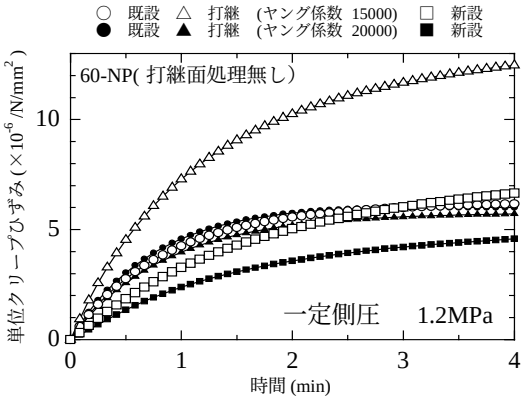
10000 MPaのヤング係数を用いた場合，15000 MPaのヤング係数の結果に比べて，打継部の単位クリープひずみが約3倍大きな値となっていることに対し，既設および新設部では殆ど差異はない。一方，**図－7**に示す20000MPaの場合には，打継部における単位クリープひずみは約0.5倍となっている。

これらの現象は，打継部の強度が小さくなれば，打継部のみへの変形の局所化が顕著になることを示している。逆に，打継部の強度が大きくなれば，供試体全体に一様な変形性状を生じることになるわけである。以上のことから，打継面の強度が既設および新設部への変形性状に及ぼす影響は殆どないものと考えられる。

(2)　透水係数による検討



図－6　ヤング係数比較（10000MPa）

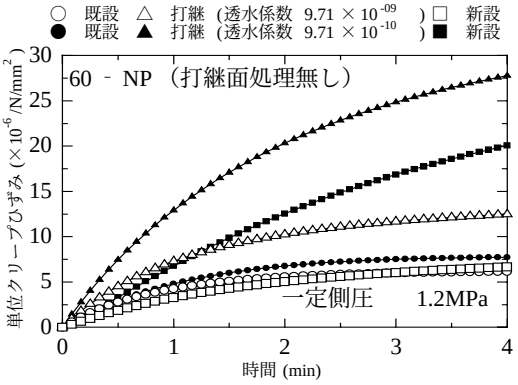


図－7　ヤング係数比較（20000MPa）

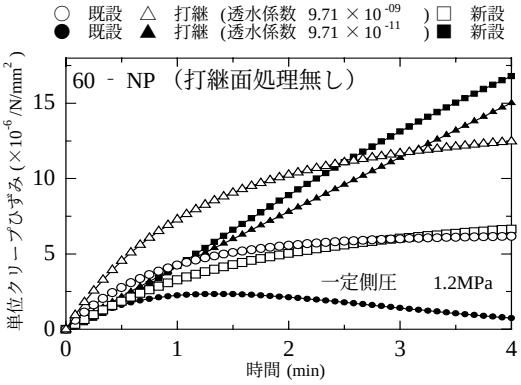
打継部の透水係数κの変化が供試体の変形挙動に及ぼす影響を検討するために，**図－8**および**図－9**に示すように，打継部のみの透水係数κを変化させて解析を行った結果を示している。

図－8は透水係数κが9.96×10^{-10}（cm/sec），**図－9**は透水係数κが9.96×10^{-11}（cm/sec）の結果である。図中の記号○，△および□は**図－5**の解析値，●，▲および■は打継部の透水係数を変化させて解析した値である。

図－8および**図－9**から，打継部の透水係数を小さくすることにより，打継部および新設部の単位クリープひずみが急激に増加することに対して，既設部においては低下する傾向を示している。これは，**表－3**に示すように打継部のヤング係数が既設および新設コンクリートに比べて小さいこと，打継部の透水係数が**表－2**に示すように既設および新設コンクリートに比べて小さいことに起因している。すなわち，打継部の透水係数が大きい場



図－８　透水係数比較（κ=9.71×10^{-10}cm/sec）



図－９　透水係数比較（κ=9.71×10^{-11}cm/sec）

合には，内部での水分移動による打継部の変形が新設部および既設部コンクリートによって拘束されることに対して，打継部の透水係数が小さい場合には，外部からコンクリート供試体内部への水の圧入現象が打継部に比べて既設部および新設部において顕著となり，特に新設コンクリートの変形が打継部の変形の進行を連動させることによるものである。このことから判断すると，**4.1** 節で述べた処理有り供試体における新設部コンクリートの大きな変形性状は，打継部の透水係数と既設および新設部の透水係数の大小関係に起因しているものと考えられる。

以上のことから，結果として透水係数が小さくなるほど，打継部および新設部への変形性状に及ぼす影響は大きくなるのである。

5.　まとめ

本研究では，打継面を有する新旧コンクリート側面に一定水圧が持続的に作用した場合の打継面が，クリープ変形性状に及ぼす影響を詳細に評価することを目的とし，打継部におけるヤング係数，透水係数が新旧コンクリートに及ぼす影響に関する解析的評価を実施した。

以下に本研究で得られた結果を要約する。

1)実験により得られた浸透深さを岩崎の式に適用することにより算出された透水係数を解析値として導入した結果，実際の解析を実施する上で精度良く実現象を評価可能であることが確認された。

2)本解析モデルは，打継部がコンクリートの変形挙動に及ぼす影響を詳細に評価できることが確認された。

3)打継部における強度特性は，打継部自身に与えるクリープひずみの影響は大きく，既設および新設部にはあまり影響を与えない。

4)打継部の透水性状は，打継部自身に与えるクリープひずみに対して大きな影響を与えることはもとより，新設部においても大きな影響を及ぼしていることが確認された。

参考文献

1) 梨木義春・井之上尚史・大下英吉：水圧作用下におけるコンクリートクリープ挙動に関する解析的研究，コンクリー工学年次論文報告集，Vol.21，　No2，pp799~804，1999

2) 江上健太郎・村上祐貴・三浦真司・大下英吉：新旧コンクリート打継面の変形性状に及ぼす水分移動の影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No2,367~372，2001

3) 上嶋宣裕・一ノ瀬晴幸・大下英吉：コンクリートの打設方向による鉄筋近傍の透水性状に関する実験的研究，コンクリート工学年論文報告集，Vol.23，No2，841~846，2001

4) 村田二郎：コンクリートの水密性に関する研究，土木学会論文集，Vol.77，1961

5) 岩崎訓明：コンクリートの特性：共立出版