

論文 損傷を受ける遷移材齢時コンクリートの強度回復特性に関する実験的研究

石川 靖晃*1, 藤原 武司*2, 浅川 祐人海*3, 三堀 崇*3

要旨: 打設後のコンクリートの初期欠陥が練り直しにより回復する現象はよく知られていない。本研究では遷移材齢時コンクリートに対して一軸圧縮試験により所定の損傷を与え、再載荷することにより遷移材齢時コンクリートの強度回復特性を実験的に検討した。その結果、ポストピーク以降ではひずみレベルによりレラクセーション特性は異なることが示された。さらに、ある程度材齢が経った後は圧縮強度は損傷の影響をあまり受けないが、弾性係数は損傷により低下することが示された。

キーワード: 強度回復特性, 遷移材齢時コンクリート, 初期欠陥, レラクセーション

1. はじめに

遷移材齢時コンクリートとは、練り混ぜ直後のフレッシュコンクリートから凝結が始まり硬化していく過程のコンクリートである。遷移材齢時のコンクリートは水和による温度変化、乾燥収縮および自己収縮等の初期ひずみによる損傷を受けるが、遷移材齢時コンクリートは材齢が経つにつれ弾性係数および粘着力等の材料物性値の上昇が極めて大きいという特徴を有している。故に、コンクリートの打設後に初期欠陥が生じた場合、パイプレータ等で再度練り直しを行うことにより、コンクリートの強度特性を回復させるといった処置が施工の際よく用いられている。ここで問題となることは、練り直しを施す場所および材齢は実験あるいは理論的にほとんど解明されておらず、それ故に練り直し作業は熟練した技術者の勘と経験のみによりなされていることである。著者らは遷移材齢時コンクリートの構成則モデルを構築してきているが^{1),2),3)}、損傷と強度回復特性に対する実

験的検討は現在まで行われておらずその点で極めて不十分である。

本研究では、遷移材齢時コンクリートの一軸圧縮試験を行うことにより、圧縮強度および弾性係数等の強度特性と、損傷の程度および材齢との関連を実験的に検討した。

2. 一軸圧縮試験による損傷と強度回復特性評価実験

一般的にコンクリートの損傷を検討する際、引張強度および圧縮強度特性の両方について検討する必要があるが、本研究では圧縮強度特性のみについて検討することにする。

まず、 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ のコンクリート円柱供試体を作製し、材齢 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 日および 28 日に達したときそれぞれ一軸圧縮試験を行った。用いた配合は表-1 に示すとおりである。供試体は打設後、温度 20°C、湿度 80% の室内で 0.5 日間気中養生、その後、水温 20°C の水槽内で所定の材

表-1 配合表

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単分量 (kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
15	7	2	55	49	193	351	870	896

*1 名城大学助教授 理工学部建設システム工学科 工博(正会員)

*2 名城大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

*3 名城大学 理工学部土木工学科

齢に達するまで水中養生された。但し、材齢 0.25 および 0.5 日については、気中養生後直ちに一軸圧縮試験を行った。材齢 0.25 日で試験を行う供試体は 2 時間、それ以外の供試体は打設後 6 時間で、水セメント比 27% のセメントペーストを用いてキャッピングを行った。

圧縮強度試験は図-1 に示す装置を用いた。測定項目は軸応力、軸ひずみおよび横ひずみである。それぞれの供試体に対して所定のひずみレベルまで一定ひずみ速度(50 μ /sec)で一軸載荷を行った。ひずみレベルは一軸圧縮強度の 1/3(type 1)、一軸圧縮強度発生時のひずみ(type 2)およびピーク以

降において応力が圧縮強度の 4/5 に減少したときのひずみ(type 3)の 3 パターンとした(図-2)。

所定のひずみに達した後、軸ひずみ速度を所定の時間が経過するまで 0 とし、その後、最初の軸ひずみ速度で再載荷を開始した。ここでの所定の時間を以下では Hold 時間と呼ぶことにする。Hold 時間は 0.5、1.0 および 3.0 時間の 3 パターンとした。

以上の実験によって得られた軸応力-ひずみ関係を図-3 に示す。但し、材齢 28 日においては軸応力が他のケースよりも著しく大きいため、図には記していない。

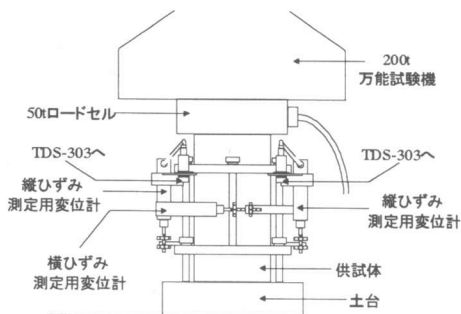


図-1 試験装置

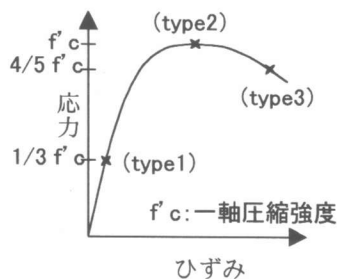


図-2 損傷を与えたひずみレベル

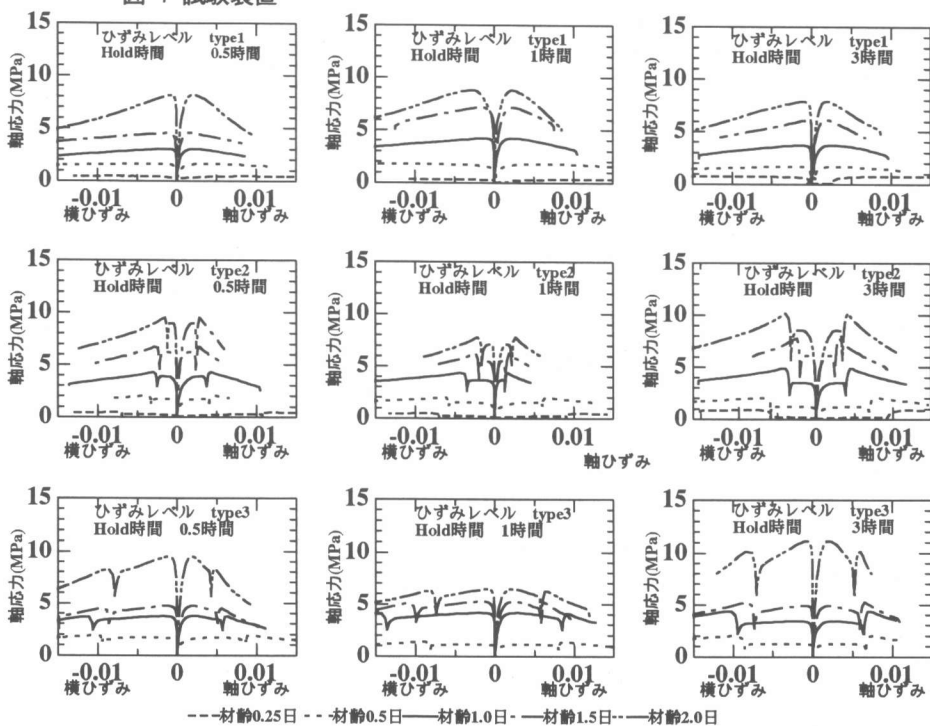


図-3 一軸圧縮試験実験結果

どのケースをみても、軸ひずみ速度を0とした瞬間より、軸応力は低減していることがわかる。また、Hold 時間後の再載荷後は Hold 前の包絡線に比べ軸応力は増加しており、強度が回復している様子が伺える。

3. 遷移材齢時コンクリートの短期的なレラクセーション特性

2章で得られた一軸圧縮試験実験結果の傾向は模式的に図-4のように表わされる。ここで Hold

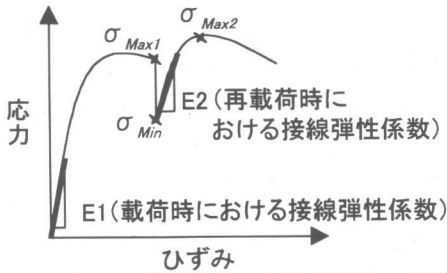


図-4 応力ひずみ曲線における記号の定義

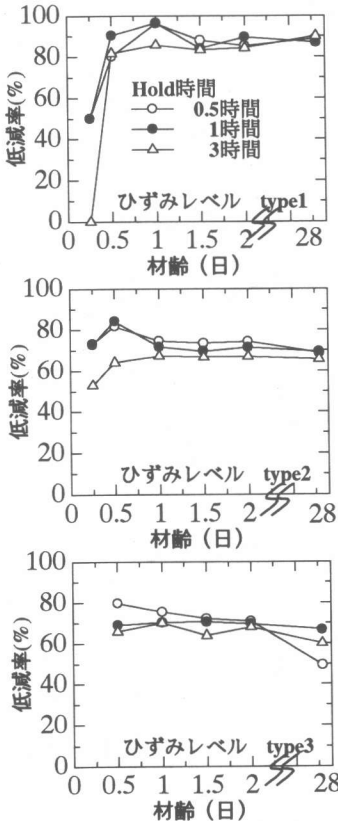


図-5 応力の低減率と載荷材齢との関係

時間経過後の応力の低減率 r_1 を式(1)で定義する。

$$r_1 = \sigma_{Min} / \sigma_{Max1} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 σ_{Max1} は軸ひずみ速度を0とした瞬間の軸応力、 σ_{Min} は Hold 時間経過後の軸応力を表わす。Hold 時間の違いによる応力の低減率 r_1 と載荷材齢との関係を図-5に示す。図より、材齢0.25日を除いては、どの Hold 時間においても、顕著な低減率の違いは見られず、例えば、ひずみレベルが type2 の場合では、低減率は70%程度の値となっている。このことから、軸ひずみ速度を0とした瞬間より急激に応力緩和が始まることを示唆している。

図-6にひずみレベルの違いによる応力の低減率と載荷材齢との関係を示す。

ひずみレベルは type 1 が最も小さく、type 3 が最も大きいのであるが、図より、材齢0.25日を除いては、どの Hold 時間においても、type2 およ

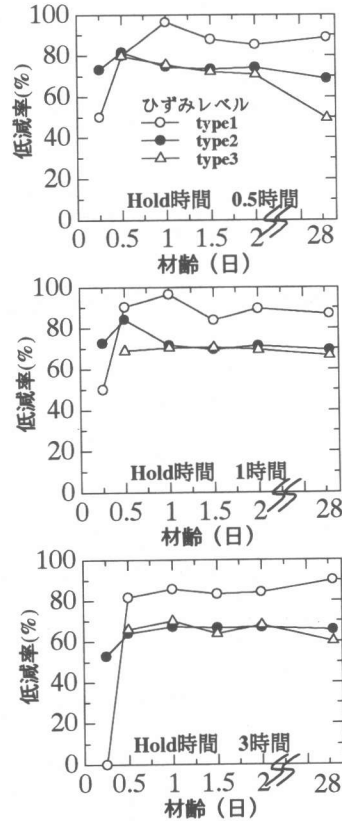


図-6 応力の低減率と載荷材齢との関係

び type 3 は type 1 に比べ、低減率は小さくなっている。例えば、type 1 では低減率は 90%程度であるが、type 2 および type 3 では 70%程度まで低下している。

レラクセーション現象は、力学的には除荷による時間依存現象である。故に主として粘弾性が支配的であり、荷重応力レベルが 80%以内であれば応力レベルに依存しないとされていた¹⁴⁾。しかしながら、ここでの結果は、ポストピーク以降においては遷移材齢時コンクリートのレラクセーション現象は損傷の影響を強く受け、応力依存性となることを示唆しており、今後さらに検討を行う必要があるといえる。

4. 遷移材齢時コンクリートの強度回復特性

4.1 強度回復率

強度回復率 r_2 を式(2)で定義する。

$$r_2 = \sigma_{Max2} / \sigma_{Max1} \quad (2)$$

ここで σ_{Max1} , σ_{Max2} は図-4 で定義した応力である。図-7 に強度回復率 r_2 と荷重開始材齢との関係を示す。実験値は実線で描かれている。図より強度回復率は荷重開始材齢が小さくあるいは Hold 時間が大きくなるにつれ、大きな値となっており、例えば、Hold 時間 3 時間、ひずみレベルが type2 の場合においては、荷重開始材齢 0.25 日で約 450% と極めて大きな値となっている。そして、材齢が経つにつれ、強度回復率は 100% に近づくことがわかる。荷重材齢による変化をみると、0.25 日の

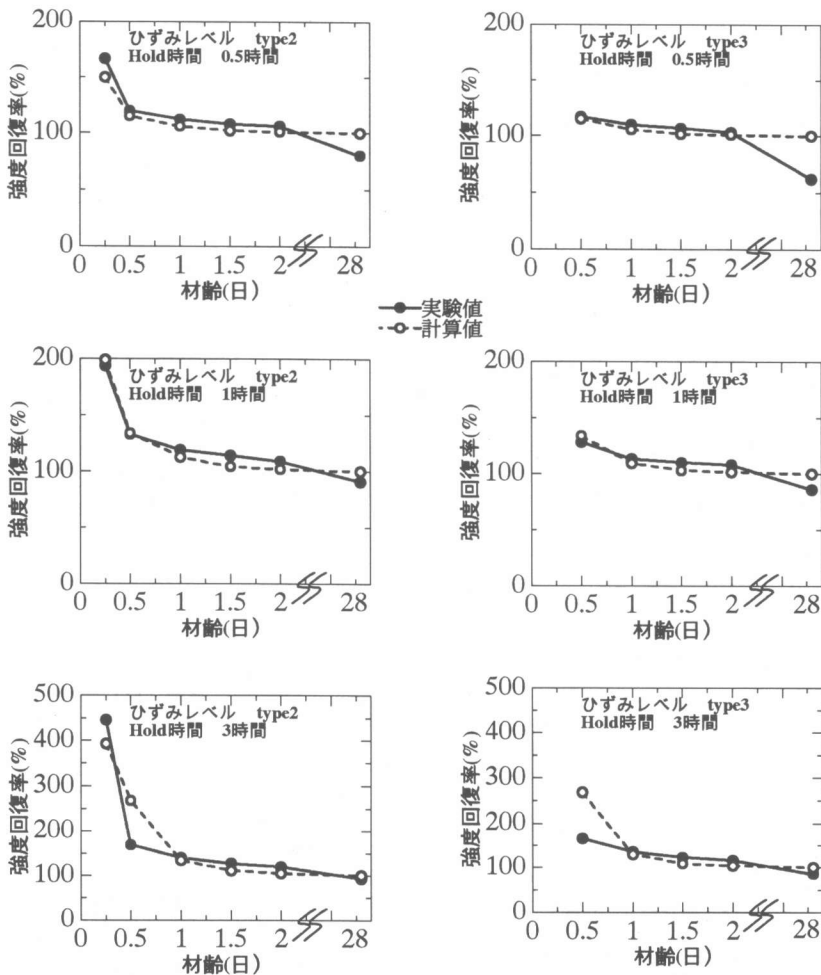


図-7 r_2 と荷重開始材齢との関係

強度回復率が他のケースに較べ著しく大きく、載荷材齢 1 日以降は強度回復率はあまり変化しないことがわかる。損傷の程度(type 2, type 3)に着目すると、type 3 即ち損傷の程度が大きいほど、強度回復率は小さくなるが、その影響は Hold 時間による影響に較べ、極めて小さい。

4.2 材齢依存型の等価一軸塑性ひずみ関係

著者らは、材齢が異なる遷移材齢時コンクリートに対して繰り返し一軸圧縮試験を行い、等価一軸応力と等価一軸塑性ひずみの関係を材齢毎に実験的に評価している。その結果、材齢毎の等価一軸応力および等価一軸塑性ひずみの関係を式(3)で評価している。

$$\sigma_{eq} - \sigma_0 = \frac{\xi_1 \varepsilon_{ep}}{1 + \left(\frac{\xi_1}{\xi_2} - 2 \right) \frac{\varepsilon_{ep}}{\varepsilon_{ep, \max}} + \left(\frac{\varepsilon_{ep}}{\varepsilon_{ep, \max}} \right)^2} \quad (3)$$

ここで、 ε_{ep} および σ_{eq} はそれぞれ等価一軸ひずみおよび等価一軸応力である。さらに、 σ_0 は降伏応力である。但し、降伏応力は一軸圧縮強度の 1/3 であると仮定している。 ξ_1 、 ξ_2 および $\varepsilon_{ep, \max}$ は実験から得られる材料パラメータである。以上のパラメータは全て材齢により変化する。著者らは載荷材齢毎に上記の材料パラメータを測定した¹⁾。各材料パラメータと材齢の関係を適当な関数で最小二乗法により近似することにより次式が得られる。

$$\sigma_0 = \frac{11.07 \times (T - 0.21)}{4.98 + (T - 0.21)} + 0.003 \quad (\text{MPa}) \quad (4a)$$

$$\xi_1 = 4.315 \times 10^5 \exp(-0.759/T^2) \quad (4b)$$

$$\xi_2 = 5.808 \times 10^4 \exp(-1.898/T^2) \quad (4c)$$

$$\varepsilon_{ep, \max} = 2.19 \times 10^{-2} \exp(-3.78T) \quad (4d)$$

ここで T は材齢(日)である。但し、式(4a)中の切片の値(0.003)は練り混ぜ直後のフレッシュコンクリートの降伏強度であり、森田らの研究⁵⁾を参考にして決定した。式(4a)~式(4d)中の他のパラメータについては実験値を最小二乗近似することにより決定した。

式(3)(4)より、一軸応力は一軸塑性ひずみと材齢

との関数で表わすことができる。式(3)(4)から計算した強度回復率と材齢との関係を図-7 に破線で示す。なお、式(3)における一軸塑性ひずみの評価は、Hold 位置における軸ひずみから、降伏ひずみを引いた値とした。

図より、計算値と実験値はよく一致しており、一軸圧縮応力場のみではあるが、著者らの材齢依存型の等価一軸応力および等価一軸塑性ひずみ評価式の妥当性が確認されたといえる。今後、一軸引張応力場、或いは多軸応力場における損傷と材齢の実験評価を行い、総合的に材齢と損傷の関連を検討する必要があることは言うまでも無いが、ここで得られた知見は、遷移材齢時コンクリートの構成則モデルへの精度良い損傷評価の導入への可能性を示唆しているといえる。

4.3 弾性係数の回復性の検討

先の実験により得られた弾性係数と材齢との関係を表-2 に示す。弾性係数は図-4 の定義に基づいて算定している (E1, E2)。但し、材齢 0.25 日のケースにおいては弾性係数が測定できなかったため、表には記していない。載荷材齢 0.25 日では Hold 時間後の弾性係数(E2)は Hold 時間が大きくなるにつれ載荷瞬間の弾性係数(E1)に較べ 2~30 倍程大きくなるが、材齢 0.25 日以降では、Hold 時間によって硬化が進行しているにも拘らず Hold 時間後の弾性係数は載荷瞬間の弾性係数よりケースによって半分以下に低下していることがわかる。

実験データ数が不十分であるため今後詳細な検討をする必要があるが、材齢 0.25 日以降については、損傷によって弾性係数は明らかに低下するということがわかった。

5. まとめ

本研究の範囲内で以下のような結論が得られた。
(1)ポストピーク以降の応力レベルにおける応力の低減率は降伏前の応力レベルのそれよりも小さくなり、遷移材齢時コンクリートのレラクセーション現象には応力依存性を伴うことを確認した。

表-2 弾性係数の実測値 (単位は $\times 10^3$ MPa)

ひずみレベル	Hold時間	弾性係数	材齢0.25日	材齢0.5日	材齢1日	材齢1.5日	材齢2日	材齢28日
type1	0.5時間	E1	0.27	3.49	6.54	9.56	13.82	25.97
		E2	0.51	15.52	9.31	11.42	15.26	26.94
	1時間	E1	0.04	3.77	8.49	11.35	27.76	25.82
		E2	1.28	5.11	10.00	13.45	18.08	22.05
	3時間	E1	0.03	1.27	6.39	10.78	12.26	29.30
		E2	3.34	4.66	9.57	9.68	6.16	25.67
type2	0.5時間	E1	0.16	5.90	8.76	9.75	14.69	28.03
		E2	0.62	2.65	5.83	5.26	4.44	24.64
	1時間	E1	0.13	4.96	19.52	32.60	13.60	27.78
		E2	0.86	1.78	4.94	7.94	10.13	16.91
	3時間	E1	0.39	3.47	9.26	12.54	13.50	26.41
		E2	3.25	3.24	5.87	8.08	11.17	23.15
type3	0.5時間	E1	—	5.10	9.39	9.56	15.85	25.89
		E2	—	2.77	2.85	6.09	11.36	21.72
	1時間	E1	—	3.24	8.79	10.46	13.26	25.69
		E2	—	8.58	6.28	6.12	8.58	21.93
	3時間	E1	—	3.68	8.61	11.22	17.02	27.95
		E2	—	2.83	4.34	4.78	7.76	18.67

- (2) 遷移材齢時コンクリートの強度回復特性は損傷よりもむしろ材齢の影響を強く受ける。
- (3) 一軸圧縮場において、石川らの材齢依存型の等価一軸応力および等価一軸塑性ひずみ評価式と実験結果は良く一致する。
- (4) 遷移材齢時の弾性係数は材齢 0.25 日程度までは損傷を受けてもある程度回復するが、材齢が経つにつれ損傷により低減する。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金(奨励研究(A):課題番号 12750425)を受けて行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 石川靖晃: 不飽和多孔質材料としての遷移材齢時コンクリートの構成則ならびに構造挙動に関する研究, 名古屋大学学位論文, 1999. 10
- 2) 下田勝彦, 藤原武司, 石川靖晃, 田辺忠顕: 3次元ひずみ場における遷移材齢時コンクリートの塑性ひずみ及び粘塑性ひずみの同定方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.1069-1074, 2000. 6
- 3) 石川靖晃, 藤原武司, 田辺忠顕: 材齢極初期に

おける壁状マスコンクリート構造物の塑性局所挙動に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.1075-1080, 2000. 6

- 4) 森本博昭, 平田正成, 小柳治: 若材令コンクリートのレラクセーション特性とその評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.396, V-9, pp.59-68, 1988. 8
- 5) 森田篤史, 飯坂武男, 稲熊唯史: 振動下におけるフレッシュコンクリートのレオロジー特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.415-420, 2000. 6