

論文 持続荷重および繰返し荷重を受けるコンクリートの変形性状に関する検討

立石 晶洋^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}・角田 與史雄^{*3}

要旨：持続および繰返し荷重を受けるコンクリートの変形性状を明らかにするためにコンクリート平板の一軸圧縮試験を行った。各種荷重による変形性状の差異を比較する指標として、除荷時の弾性係数と残留ひずみを軸ひずみおよび軸直角ひずみとの関係に着目した。その結果、軸ひずみは作用荷重の影響を大きく受けること、コンクリートの損傷過程は、いずれの荷重に対しても、軸直角ひずみを指標として一義的に表せることを明らかにした。

キーワード：繰返し荷重, 持続荷重, 弾性係数, 残留ひずみ, 非弾性ひずみ

1. はじめに

現在、構造物の疲労設計は、S-N 曲線による荷重と疲労寿命の関係性を元に行われており、破壊に至るまでの変形に関する検討は行われていない。これを実現する方法として、有限要素解析などの高度な非線形解析技術の利用が挙げられる。この場合、持続および繰返し荷重を受けるコンクリートの材料構成則の開発が必要であることは言うまでもない。

本研究は、持続応力および応力振幅を変数としたクリープ試験および疲労試験を行い、持続

荷重および繰返し荷重を受けるコンクリートの破壊に至るまでの変形性状の差異を実験的に明らかにすることを目的に行った。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本研究ではクリープ試験と疲労試験の2種類実験を行った。実験供試体は、普通ポルトランドセメント, 水セメント比 60%, 細骨材率 41%, 粗骨材の最大骨材寸法 25mm で配合し、打設した。打設後水中養生した。

Table 1 Details of Specimens

No.	Maximum Stress σ_{max} / f'_c	Minimum Stress σ_{min} / f'_c	Age at Test (day)	Age at Drying (day)	Static Strength f'_c (MPa)
T-C1	0.40	—	39	31	29.3
T-C2	0.57		25	23	23.9
T-C3	0.62		29	26	24.6
T-C4	0.71		28	26	29.8
T-C5	0.80		171	110	27.4
T-C6	0.90		187	103	32.5
T-C7	0.90		199	115	27.4
T-F1	0.60	0.20	203	181	36.3
T-F2	0.60	0.40	200	181	36.3
T-F3	0.70	0.15	195	183	34.8
T-F4	0.70	0.30	201	196	30.9
F2	0.62	0.00	44	30	35.1
F3	0.71	0.00	44	30	35.1

T-C ; Creep Test, T-F ; Fatigue Test

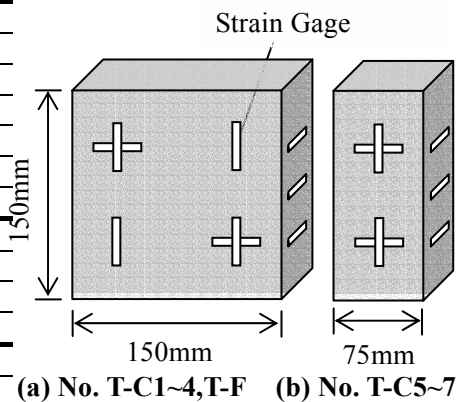


Fig.1 Specimen

*1 日鉄コンポジット(株) 技術部 工修 (正会員)

*2 北海道大学大学院工学研究科助手 社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*3 北海道大学大学院工学研究科教授 社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

Table 2 Ultimate Strain and Ultimate Stress

No. (Max.-Min.)	ε'_{20} (μ)	ε'_{10} (μ)	Loading Mode at Failure	ε'_{2u} (μ)	ε'_{1u} (μ)	Ultimate Stress σ / f'_c
T-C1(0.40)	1458	706	Mono- tonic	—	—	—
T-C2(0.57)	1637	1297		2336	852	1.108
T-C3(0.62)	1518	682		2378	1147	1.151
T-C4(0.71)	1467	1457		2386	678	1.174
T-C5(0.80)	1905	995		2609	572	1.052
T-C6(0.90)	1886	1079	Sus- tained	2538	1972	—
T-C7(0.90)	1905	995		3393	2848	
T-F1(0.60-0.20)	1723	1004	Mono- tonic	2017	758	1.013
T-F2(0.60-0.40)	1723	1004		1998	1125	1.029
T-F3(0.70-0.15)	1791	867		2223	1019	0.937
T-F4(0.70-0.30)	1497	517		2848	1338	1.050
F2(0.62-0.00)	1991	—	Cyclic	2267	—	—
F3(0.71-0.00)	1991	—		2345	—	

ε'_{2u} ; Ultimate Axial Strain , ε'_{1u} ; Ultimate Lateral Strain

ε'_{10} ; Ultimate Lateral Strain at Static Test

ε'_{20} ; Ultimate Axial Strain at Static Test

供試体諸元を **Table 1** に示す。本研究では、過去に著者らが行った 2 体 (F2 及び F3) ¹⁾ の供試体を加えた合計 13 体により考察がなされる。

実験では、 $\sigma_{max} / f'_c = 0.80$ 以上の高応力下の試験は、 $150 \times 150 \times 60 \text{ mm}$ の直方体のコンクリート供試体 (**Fig.1(a)**)、 $\sigma_{max} / f'_c = 0.80$ 以下の応力下では、 $150 \times 150 \times 60 \text{ mm}$ の直方体のコンクリート供試体を $150 \times 60 \text{ mm}$ 断面中央をコンクリートカッターで切断した $150 \times 75 \times 60 \text{ mm}$ 供試体 (**Fig.1(b)**) を用いた。

2.2 実験方法

供試体への载荷は、 $\sigma_{max} / f'_c = 0.80$ 以上の高応力下の試験は高精度万能試験機により、それ以外の試験はアクチュエータにより行った。疲労試験における载荷周波数は 5Hz である。試験は $13.5 \pm 2.5^\circ \text{C}$ 、 $\text{RH}40 \pm 10\%$ の環境で行った。

すべての試験において荷重は、一軸圧縮で作用させ、荷重軸直角方向の摩擦による拘束を除去するため供試体の載荷面と底面においてそれぞれ 2 枚ずつテフロンシートを介した。また、任意の繰返し回数および時間において手動で除荷、再載荷を行い、残留ひずみと除荷剛性を調べた。載荷期間は 1 日から 10 日となっている。

静的試験は、クリープ試験と疲労試験前にそ

れぞれ 3 体行い、コンクリートの圧縮強度および終局ひずみを調べた。

なお、本実験では、**Table 1** に示されるように、材齢が 28 日から 203 日まで、乾燥開始日が 2 日から 84 日と一定の条件が定められていない。材齢及び乾燥開始日の差異が静的荷重下の変形挙動に及ぼす影響は小さいと考えられるが、持続・繰返し荷重下での変形挙動には無視できない影響を及ぼす可能性がある。よって、変形及び破壊を論ずる場合には材齢や乾燥状態の差異を考慮に入れる必要があるとも考えられるが、本研究では、まず、作用の種類の差異のみ

に着目し、議論を進める。

2.3 ひずみ測定方法

本実験では実験供試体にワイヤーストレインゲージを $150 \times 150 \times 60 \text{ mm}$ 供試体では荷重軸方向 6 枚、軸直角方向 8 枚、 $150 \times 75 \times 60 \text{ mm}$ 供試体では荷重軸方向 6 枚、軸直角方向 6 枚、貼付しコンクリートのひずみを測定した。ひずみは 3 方向でそれぞれ平均ひずみとして求め、試験中、試験供試体と同様の環境条件の供試体において測定した乾燥収縮ひずみ値を差し引いた。

また、100Hz のサンプリング速度を有するシステムを用い、载荷開始から試験終了までの荷重およびひずみ値をすべてコンピュータに保存した。

3. 実験結果および考察

3.1 終局ひずみおよび残存強度

Table 2 に静的試験と持続および繰返し荷重を受けるコンクリートの終局ひずみ値を示す。破壊した供試体では持続荷重、繰返し荷重、単調増加荷重の順に破壊時の軸ひずみは大きくなる傾向にあった。また、持続荷重により破壊した供試体の軸直角方向のひずみは静的試験の 2

倍ほど大きくなっている。載荷期間内に破壊しなかった供試体は、単調増加載荷によって破壊させた残存強度の値を示す。残存強度は持続および繰返し荷重載荷後、強度増加は数%であった。

なお、本研究では、静的試験における応力-ひずみ曲線に供試体寸法の違いは見られなかったため、寸法の影響は無視し議論を進める。

3.2 軸方向クリープひずみ

クリープひずみ ε_{cr} は、繰返し荷重載荷開始後の最大応力時のひずみ増分とした。

本研究では、持続および繰返し荷重を受けるコンクリートのクリープひずみを予測するために中間応力 σ_m と応力振幅 Δ のみをパラメータとした Neville²⁾ のクリープ予測式 (式 (4)) を用いて、高応力下のクリープについて検討する。Neville の予測式を以下に示す。

$$\varepsilon_{cr} = 129 \sigma_m (1 + 3.87 \Delta) t^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$\sigma_m < 0.45, \Delta < 0.3$$

$$\varepsilon_{cr}; \text{荷重軸方向のクリープひずみ} (\mu)$$

$$t; \text{時間 (時)}$$

$$\sigma_m (= (\sigma_{max} / f'_c + \sigma_{min} / f'_c) / 2); \text{中間応力}$$

$$\Delta (= (\sigma_{max} / f'_c - \sigma_{min} / f'_c)); \text{応力振幅}$$

この式では、等しい最大応力で比較した場合 $\sigma_{min} / f'_c = 0.12$ のときクリープひずみが最大値となり、それ以上の最小応力では最小応力が大きくなるとクリープひずみは小さくなる式となっている。この予測式の適用範囲内の持続荷重を作用させた $\sigma_{max} / f'_c = 0.40$ の実験値は予測式

よりおよそ 50% 大きい結果となり、予測式は適用範囲内において本研究においても適用可能だとした。

実験結果および式 (4) との比較を Fig.2 に示す。図中の凡例は持続荷重の場合'供試体番号 (σ_{max} / f'_c) '繰返し荷重の場合'供試体番号 ($\sigma_{max} / f'_c - \sigma_{min} / f'_c$) 'を示している。繰返し荷重を受けるコンクリートのクリープひずみ (Fig.2(b), (c)) は、予測式における σ_{min} / f'_c の値による影響と異なり、等しい σ_{max} / f'_c で比較した場合 σ_{min} / f'_c が大きい供試体でクリープひずみが大きくなった。Shah³⁾らの研究において持続と繰返し荷重を受けるコンクリートにおいて同様の結果が得られている。

任意の時間で実験結果と予測式の比較において、持続荷重を受けるコンクリートの場合、 $\sigma_{max} / f'_c = 0.71$ 以下の供試体はすべて同様の結果であった。 $\sigma_{min} / f'_c = 0.80$ 以上においては、実験結果は予測式より 5 倍から 10 倍と非常に大きい値を示した (Fig.2(a))。繰返し荷重を受けるコンクリートの場合、 $\sigma_{max} / f'_c = 0.60, 0.70$ と最小応力が小さい供試体で予測式とほぼ一致する値を示した (Fig.2(b),(c))。応力振幅の影響は、予測式は適切に表現していると考えられる。しかし、最小応力の大きい供試体において、 $\sigma_{max} / f'_c = 0.60$ では 25%, $\sigma_{max} / f'_c = 0.70$ では 50% ほど実験値が予測値を上回った。このことから、Neville の予測式では、高応力の範囲 ($\sigma_{max} / f'_c > 0.60$) においては、最大応力が高く最小応力が小さいとき予測値が実験値を下回

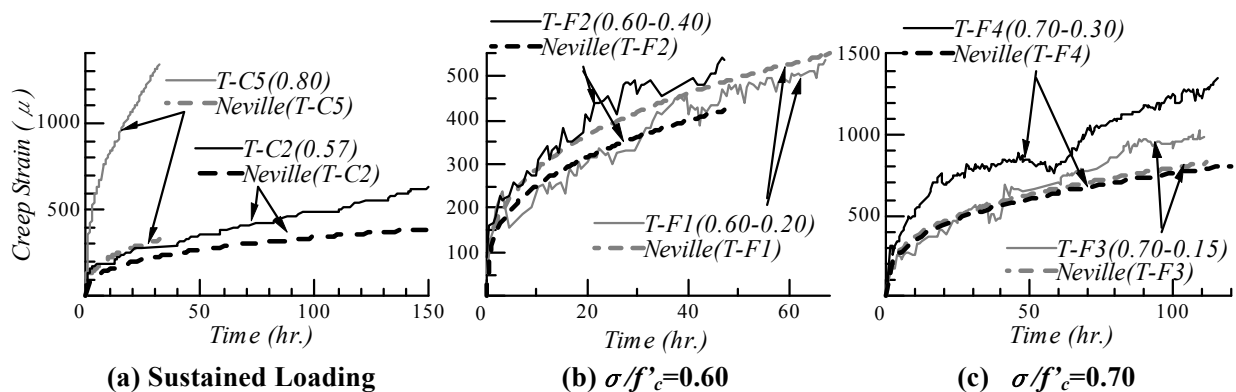


Fig.2 Axial Creep Strain

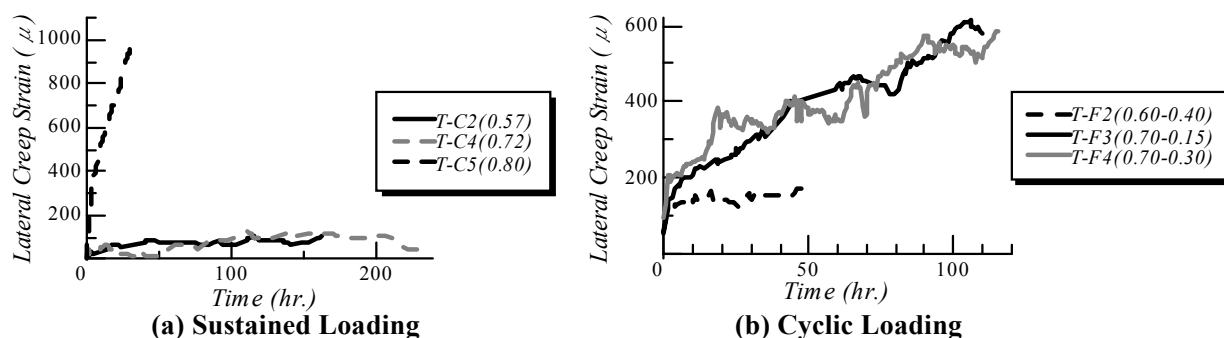


Fig.3 Lateral Creep Strain

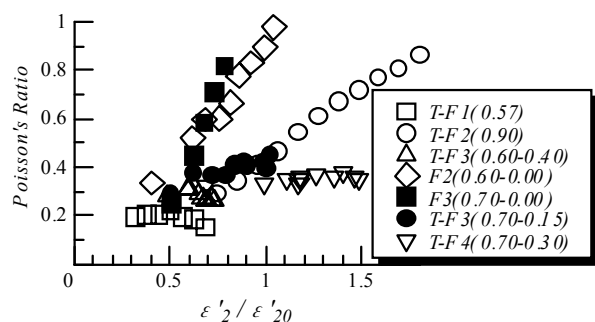


Fig.4 Poisson's Ratio

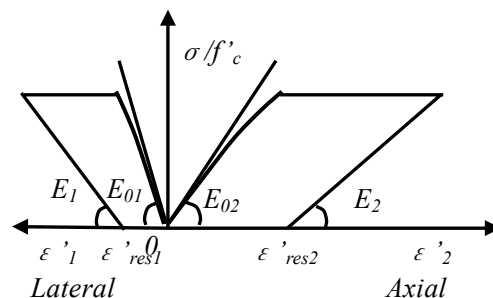


Fig.5 Definition of Strains and Young's Modulus

る。つまり、中間応力がより高応力であるとき予測が困難になっていると考えられる。高応力下のクリープひずみ予測では、中間応力が高応力になるほどよりクリープひずみが大きくなるよう修正する必要があると考えられる。

3.3 軸直角方向クリープひずみ

軸直角方向のクリープひずみと時間の関係を Fig.3 に示す。持続荷重 $\sigma_{max} / f'_c = 0.80$ 以下と繰返し荷重 $\sigma_{max} / f'_c = 0.60$ 以下の供試体では作用荷重載荷直後ひずみは増加するが、その後はあまり増加しなかった。 $\sigma_{max} / f'_c = 0.80$ 以上の持続荷重と $\sigma_{max} / f'_c = 0.70$ の繰返し荷重を載荷した供試体ではひずみは著しく増加した。

3.4 ポアソン比

作用荷重の影響下におけるポアソン比と軸ひずみの関係を Fig.4 に示す。横軸は軸ひずみ ϵ'_2 を静的試験の軸方向終局ひずみ ϵ'_{20} で正規化した値である。

持続荷重を受けるコンクリートでは $\sigma_{max} / f'_c = 0.71$ 以下、繰返しを受けるコンクリートでは $\sigma_{max} / f'_c = 0.53$ 以下の供試体において、ポアソン比は軸方向ひずみが増加しても持続および繰返し荷重載荷開始時とほぼ変化はなかつ

た。また、図中の T-F3(0.60-0.40)のように若干低下する傾向を示す供試体もあった。

持続荷重を受けるコンクリートでは、 $\sigma_{max} / f'_c = 0.80$ 以上の供試体でポアソン比の増加が見られた。また、図中の T-F3(0.70-0.15)、T-F4(0.70-0.30)、F3(0.71-0.00)の比較において T-F3、T-F4 は比較的近い値を示したのに対し、F3 は、著しいポアソン比の増加を示した。F2(0.62-0.00)の供試体も F3 と同様に著しい増加割合を示したことから、繰返し荷重を受けるコンクリートは最小応力が 0 である軸直角ひずみの増加を促進すると考えられる。

3.5 弾性係数および残留ひずみ

本研究では弾性係数の低下割合の算出方法として、次のような方法を用いた。Fig.5 に示す初期弾性係数 E_0 を軸方向 E_{02} と軸直角方向 E_{01} でそれぞれ求め、除荷点と応力が 0 の点との割線剛性を除荷時の弾性係数 E として求め、除荷時の弾性係数 E を初期弾性係数 E_0 で除して弾性係数の低下割合とし、コンクリートの損傷の進行度合いであると考えている。

3.6.1 荷重軸方向

弾性係数と軸ひずみの関係を Fig.6(a),(b)に示

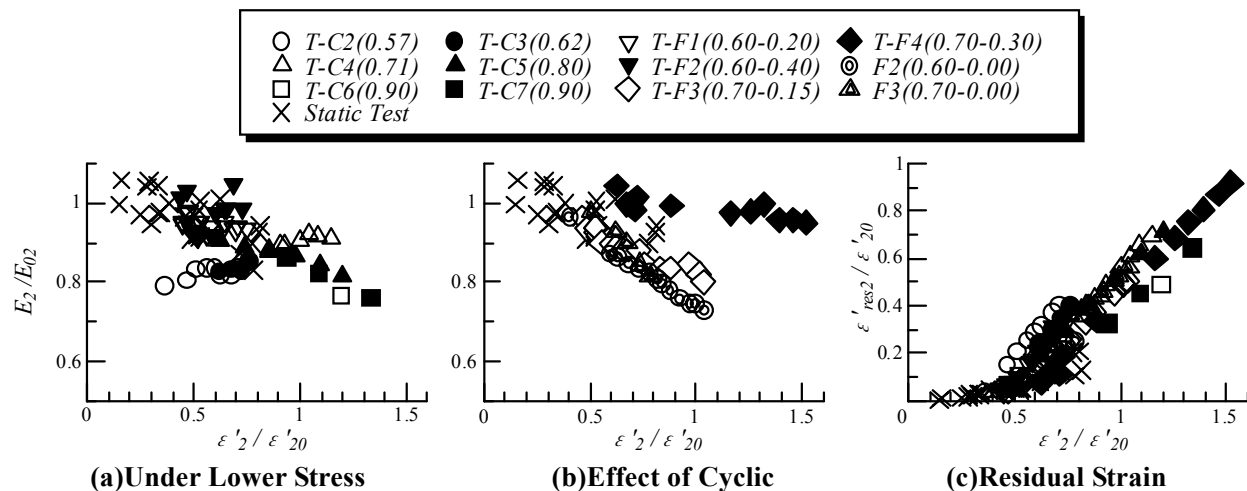


Fig.6 Axial Young's Modulus and Axial Strain

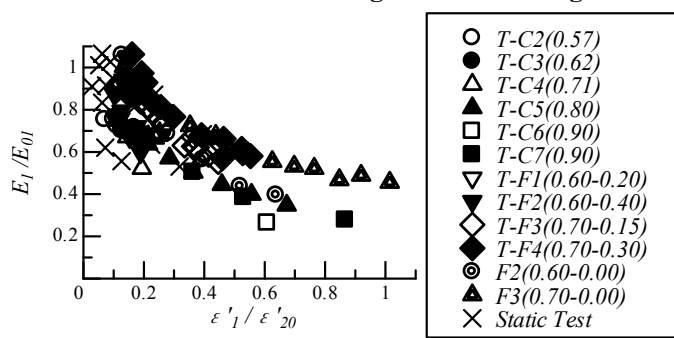


Fig.7 Lateral Young's Modulus and Lateral Strain

す。縦軸は除荷時の弾性係数を初期弾性係数で除した値、横軸は軸方向ひずみを静的試験の軸方向の終局ひずみで正規化した値である。

軸ひずみの増加に対して、持続荷重 $\sigma_{max}/f'_c=0.71$ 以下、繰返し荷重 $\sigma_{max}/f'_c=0.62$ で最小応力が 0 でない供試体では弾性係数はほぼ一定であった (Fig.6(a))。 $\sigma_{max}/f'_c=0.80$ 以上の持続荷重を受けるコンクリートでは弾性係数の低下が見られた。

Fig.6(b)に示す繰返し荷重の影響は、応力振幅が大きいほど弾性係数は低下した。また、最小応力が 0 の F2, F3 の供試体において最も弾性係数の低下が大きいことから、最小応力が 0 であることはよりコンクリートの損傷を進行させるといえる。

次に、軸方向の残留ひずみと軸ひずみの関係を Fig.6(c)に示す。縦軸の残留ひずみは、静的試験の軸方向の終局ひずみで正規化した値である。

残留ひずみの最大応力と応力振幅による影響は、同じ軸ひずみで比較した場合最大応力が小さい方が大きくなった。

3.6.2 荷重軸直角方向

荷重軸直角方向ひずみと弾性係数の低下割合を Fig.7 に示す。作用荷重による弾性係数の低下は軸直角ひずみの増加にともない、静的試験結果と持続および繰返し荷重を受けるコンクリートともほぼ一様に低下した。また、持続および繰返し荷重を載荷後、単調増加載荷によって破壊させた供試体の弾性係数の低下も軸直角ひずみの増加により一様に低下している。このことから、コンクリートの損傷の進行は軸直角ひずみで一義的に表しえるといえる。

3.6.3 非弾性変形によるひずみ

持続荷重および繰返し荷重を受けるコンクリートの軸直角方向の弾性係数の低下および残留ひずみは軸直角ひずみにより表しえることが、分かった。しかし、弾性係数の低下および残留ひずみは軸ひずみで表しえない。そこで軸方向の弾性係数の低下を軸直角方向のひずみで、また、軸方向の残留ひずみを軸直角方向のひずみを示す (Fig.8)。

Fig.8(a)より軸方向の弾性係数の低下も軸直角ひずみの増加により、一様に低下しているといえる。しかし、軸方向の残留ひずみは軸直角ひずみの増加に対して一義的に表しえない。

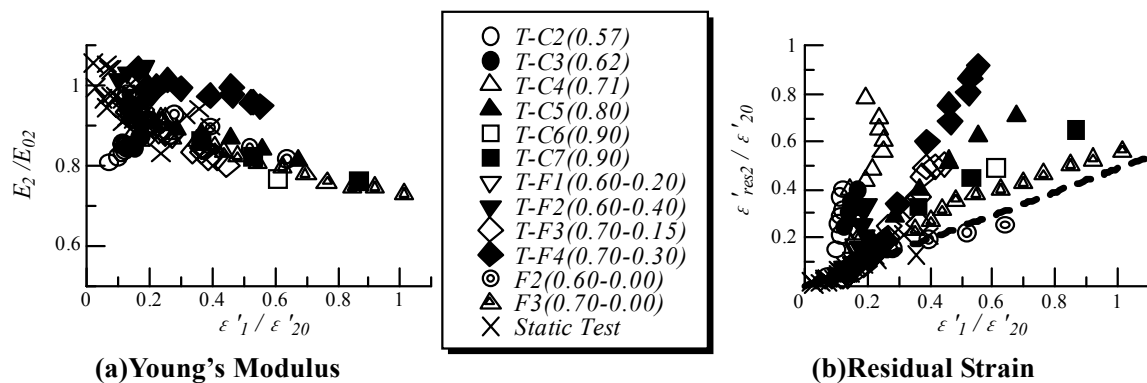


Fig.8 Axial Young's Modulus and Lateral Strain

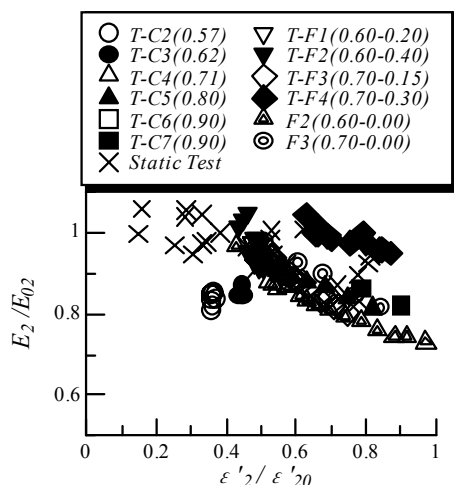


Fig.9 Influence of Non-elastic Deformation

Shah らは持続および繰返し荷重を受けるコンクリートの変形にはコンクリート内部のペーストでおこる体積の緻密化とコンクリートが複合材料からなることに起因するひび割れの成長の2種類が存在すると述べている。本研究では軸方向の残留ひずみ中に含まれる前者を非弾性ひずみ、後者を塑性ひずみとした。

そこで、Fig.8(b)に示す静的試験結果の近似式と軸方向の残留ひずみの差を非弾性ひずみとして、軸ひずみから非弾性ひずみを差し引いた値と弾性係数の関係を Fig.9 に示す。Fig.6(a),(b)との比較において弾性係数は概ね一様に低下した。この結果から、持続および繰返し荷重を受けるコンクリートの変形は、非弾性ひずみを考慮することによって静的な荷重を受けるコンクリート同様に荷重による損傷過程を表すことが可能となるといえる。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 高応力下 ($\sigma_{max} / f'_c > 0.60$) の持続および繰返し荷重においては、等しい最大応力で比較した場合、中間応力が高いほどクリープひずみは大きくなる。
- 2) 持続および繰返し荷重を受けるコンクリートの損傷過程は、軸直角ひずみにより一義的に表せる。
- 3) 持続および繰返し荷重を受けるコンクリートの変形は、非弾性ひずみを考慮することによって静的な荷重を受けるコンクリート同様に荷重による損傷過程を表すことが可能となるといえる。

謝辞

研究を進めるにあたり、北海道大学大学院の上田多門助教授には貴重なご意見をいただきました。

参考文献

- 1) 佐藤公紀, 佐藤靖彦, 角田與史雄: 繰返し荷重を受けるコンクリートの変形性状について, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, 2001
- 2) C.P.Whaley, A.M.Neville: Non-elastic deformation of concrete under cyclic compression, Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.84, September 1973
- 3) Surendra P.Shah, Sushil Candra: Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading, ACI Journal, No.67-49, pp816, October 1970