

論文 クリープ・乾燥収縮のばらつきとコンクリート部材の長期挙動について

高海克彦*1・浜田純夫*2

要旨：コンクリートはり構造物のクリープ・乾燥収縮挙動特性の把握において、用いるクリープ・乾燥ひずみ予測式の構成因子のばらつきを考慮した解析を行い、予測式構成因子のばらつき程度が構造物の挙動への与える影響を検討した。その結果、各モデルには主要因子があり、予測式の適用にあたり、ばらつき特性を考慮することが重要であることを指摘した。

キーワード：クリープ・乾燥予測式、挙動のばらつき、1次近似2次モーメント法

1. はじめに

鉄筋コンクリートはりや PRC はりなど、ひび割れ発生を許すはり部材の時系列的な挙動を把握する解析法の研究が色々とされている。解析精度の高度化には解析手法の精密化と共に、用いる材料特性の信頼性の向上が大きく関わってくる。コンクリート構造の長期解析にあたっては、コンクリートのクリープ・乾燥収縮特性が数多い実験データに基づき、わが国ならびに欧米でも様々な予測式として提案されている^{1)~4)}。この予測式を用いた構造解析法は、確定した材料特性を与え、確定した応答解を得ることから確定論的手法に分類される。しかし、コンクリートのクリープ係数や乾燥収縮ひずみは、弾性係数に比べて格段のばらつきがあるとされ、予測式と実験結果では 40%ものばらつきがあるとの研究もある。ばらつきを有する材料を用いたコンクリート構造の挙動に対する材料特性のばらつきの影響度の把握は、解析結果の検証の上からも重要な事項と考える。

著者らは先に、クリープ・乾燥予測式のうち、CEBコード式(CEBモデル)、コンクリート標準示方書式(JSCEモデル)、B3モデルとその簡易式のB3Sモデル(B3FモデルおよびB3Sモデル)に付いて、コンクリート長期構造解析に用いられる材齢修正有効弾性係数のばらつき感度と各構成因子のばらつきが材齢修正有効弾性係数に与える影響を1次近似2次モーメント法で検討し、各モデルの

特性を明らかにした⁵⁾。また、鋼-コンクリート合成桁およびPRCはりの長期挙動解析において、材料の特性値および環境要因のばらつきがはりの長期挙動に及ぼす影響を、1次近似2次モーメント法により評価する手法を提示した⁶⁾が、考慮した予測モデルならびに影響因子は限られたものであった。

本論文では、クリープ・乾燥ひずみ予測式として先のCEBモデル、JSCEモデルおよびB3Sモデルを対象とし、それらを構成する因子すべてを確率変数として扱い、PRCはりの確率長期解析を行った。さらに、この因子のばらつきが構造物の挙動(たわみ、応力)に与える影響を影響係数として把握し検討を加えた。

2. 予測式の形態と構成因子

クリープ係数・乾燥ひずみについてのCEBモデル、JSCEモデル、B3Sモデルの詳細な記述は参考文献^{1), 2), 4)}に譲るが、それらを構成する因子は表-1(後述)⁵⁾のとおりである。クリープに関して、CEBモデルはクリープ係数(ϕ)で与えられるが、JSCEモデルとB3Sモデルはクリープコブライアンスで(J)与えられる。クリープ係数とクリープコブライアンスは次の関係を有している。

$$\phi(t_2, t_1) = E_c(t_1)J(t_2, t_1) - 1 \quad (1)$$

ここに、 t_1 , t_2 は载荷開始材齢と着目材齢、 $E_c(t_1)$ は载荷時のコンクリートの弾性係数である。

*1 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 工博(正会員)

*2 山口大学教授 工学部社会建設工学科 Ph.D(正会員)

3. PRCはりの長期挙動確率解析法

3.1 長期挙動の確定解析

PRCはりの確定的長期解析は、著者が提案した有限要素解析手法を用いる。この手法はPRCはりの短期ならびに長期の軸および曲げ剛性を、コンクリートの引張軟化則を用いて平均応力—平均ひずみ関係で評価したもので、比較的簡単なアルゴリズムで解析可能である。PRCはりの長期解析の剛性方程式は次のように表される。

$$[K]\{u\} = \{G\} \quad (2)$$

ここに、 $[K]$ はコンクリート、鉄筋およびPC鋼材から成るPRCはり要素の長期解析剛性マトリクス、 $\{u\}$ は長期変位ベクトルおよび $\{G\}$ はクリープ係数ならびに乾燥ひずみから成る荷重ベクトルである。

この式に、クリープ係数・乾燥ひずみを形成する材料の期待値を入力すると、応答の期待値を得ることができる。

3.2 長期挙動確率解析とその評価

いま、各クリープ係数および乾燥ひずみモデルを構成する因子(設定圧縮強度、相対湿度、単位水量 etc.)を x_i とし、剛性方程式(2)をこの x_i で変微分すると次の長期変位変動率方程式が得られる。

$$[K] \frac{\partial \{u\}}{\partial x_i} = - \frac{\partial [K]}{\partial x_i} \{u\} + \frac{\partial \{G\}}{\partial x_i} \quad (3)$$

これは、確率変数の単位変動に対する長期変位の変動率を表している。

応答のばらつきを評価する1次近似2次モーメント法に上の式を代入すると長期変位の分散が次の式で表される。

$$Var[\{u\}] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial \{u\}}{\partial x_i} \right)_{x_i} \left(\frac{\partial \{u\}}{\partial x_j} \right)_{x_j} cov[x_i, x_j] \quad (4)$$

ただし、 $cov[x_i, x_j]$ は確率変数 x_i と x_j の共分散を表す。1次近似2次モーメント法によると長期変位の期待値は、確率変数の平均値を用いて式(2)の剛性方程式を解くことにより得られる。また、載荷材齢 t_1 から着目材齢 t_2 までのコンクリートの応力変動の期待値と分散は次のように表される。

期待値

$$\sigma_c(t_2, t_1) = E_a \langle B_c \rangle \{u\} - \frac{E_a}{E_c(t_1)} \sigma(t_1) \phi(t_2, t_1) - E_a \varepsilon_{sh}(t_2, t_0) \quad (5)$$

分散

$$Var[\sigma_c] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial \sigma_c}{\partial x_i} \right)_{x_i} \left(\frac{\partial \sigma_c}{\partial x_j} \right)_{x_j} cov[x_i, x_j] \quad (6)$$

ここに、 E_a は材齢修正有効弾性係数、 $E_c(t_1)$ は載荷時のコンクリート弾性係数、 $\langle B_c \rangle$ はコンクリートのひずみ形状関数ベクトル、 $\{u\}$ は長期変位ベクトルの期待値、 $\sigma(t_1)$ は載荷時にコンクリートに作用する応力、 $\varepsilon_{sh}(t_2, t_0)$ は乾燥開始時から着目時までの乾燥ひずみである。

同様に、鋼材の応力変動の期待値と分散は次式で表される。

期待値

$$\sigma_s(t_2, t_1) = E_s \langle B_s \rangle \{u\} \quad (7)$$

分散

$$Var[\sigma_s] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial x_i} \right)_{x_i} \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial x_j} \right)_{x_j} cov[x_i, x_j] \quad (8)$$

ここに、 E_s は鋼材の弾性係数、 $\langle B_s \rangle$ は鋼材のひずみ形状関数ベクトルである。

また、構成因子のばらつきが、PRCはりの挙動(例えば鋼材応力 σ_s)のばらつきに与える影響の程度(影響係数)は次のように与えられる。

$$\alpha_i = \frac{V(\sigma_s)_{x_i}}{V_{x_i}} \quad (9)$$

ここに、 V_{x_i} は影響因子 x_i のばらつきの変動係数であり、 $V(\sigma_s)_{x_i}$ は影響因子 x_i のみのばらつきによる鋼材応力のばらつきの変動係数である。

4. 計算例

図-1A, 1Bの2つの断面を有するT型PRC桁を対象⁸⁾に、クリープ・乾燥収縮ひずみ構成因子の

ばらつきが桁の長期挙動に及ぼす影響を検討する。A 桁と B 桁は、コンクリート全断面に対する鉄筋比がそれぞれ 0.007 と 0.014 とほぼ 2 倍であり、ク

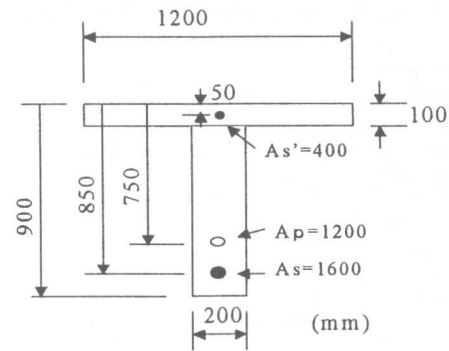


図-1A 対象断面(A 桁)

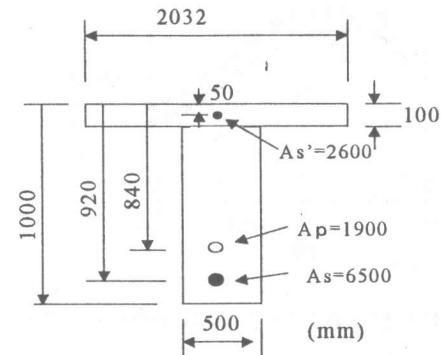


図-1B 対象断面(B 桁)

リーブ・乾燥収縮の拘束程度が異なると思われるので選定した。

いずれも、支間 18m の単純はりで、A 桁には 27.16kN/m の等分布満載荷重と 1250kN の初期プレストレス力を、B 桁には 56.1kN/m の等分布満載荷重と 2700kN の初期プレストレス力を材齢 14 日に与える。用いるコンクリートの平均値と変動係数およびクリープ・乾燥ひずみ各モデルの構成因子は A 桁については表-1 に示したとおりである。ただし、各因子の相関はないものとする。また B 桁については、A 桁を示した表-1 中の部材仮想厚さと有効断面厚さのみが異なり、それぞれ 215.4mm と 212.8mm である。これらも A 桁に比べほぼ 2 倍弱となっている。コンクリートの載荷時弾性係数については、各モデル準拠のコードに従うものとするが、本例ではいずれも 27GPa 程度である。鋼材の弾性係数はいずれも 200GPa とする。

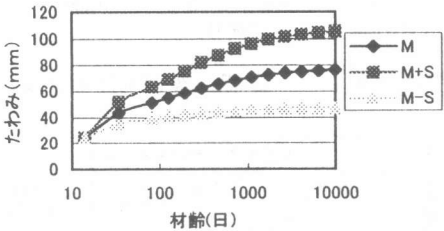


図-2 A 桁たわみ経時変化(CEB モデル)

表-1 モデル別長期挙動影響因子の平均値と変動係数(A 桁)

構成因子 (確率量)	単位	平均値	変動 係数 (%)	CEB モデル		JSCE モデル		B3S モデル	
				クリー プ	乾 燥 ひずみ	クリー プ	乾 燥 ひずみ	クリー プ	乾 燥 ひずみ
圧縮強度 fck	MPa	30	15	○	○	x	x	○	○
相対湿度 RH	%	70	20	○	○	○	○	○	○
部材仮想厚さho	mm	133.3	5	○	○	x	x	x	x
有効断面厚さvso	mm	132.8	2	x	x	○	○	○	○
単位水量	kg/m³	168	3	x	x	○	○	x	○
単位セメント量	kg/m³	298	2	x	x	○	○	x	x
単位骨材量	kg/m³	1834	3	x	x	x	x	x	x
乾燥開始材齢to	日	14	10	x	○	○	○	○	○
載荷開始材齢t1	日	14	5	○	x	○	x	○	x
載荷時弾性係数 Ec(t1)	MPa	—	20	x	x	x	x	x	x

注) ○: 構成因子, x: 非構成因子

図-2, 3にA桁とB桁の支間中央たわみのCEBモデルによる期待値(M)と標準偏差(S)のばらつき範囲を含んだ経時変化を示す。A桁とB桁は、断面形、載荷荷重および導入プレストレスが異

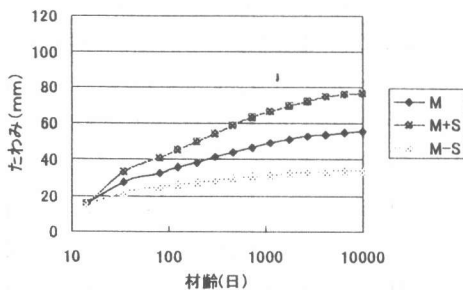


図-3 B桁たわみ経時変化(CEBモデル)

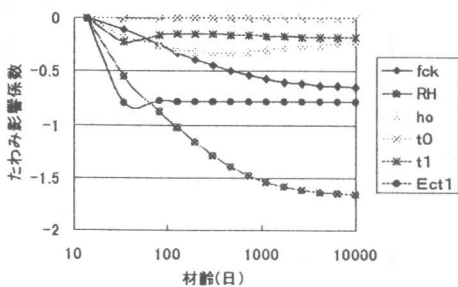


図-4 A桁たわみ影響係数(CEBモデル)

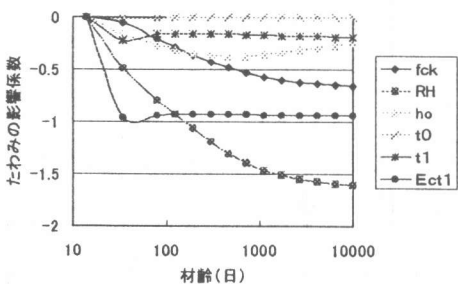


図-5 B桁たわみ影響係数(CEBモデル)

なるため、たわみの期待値は当然異なる。しかし、材齢の進捗に伴うばらつき増大傾向はほぼ同じで、材齢 10000 日ではたわみの変動係数はいずれも 38%となっている。

A, B 桁の支間中央たわみの影響係数の経時変化を図-4, 5に示す。図からたわみの影響係数も両桁ともほぼ同じで、材齢 100 日までは載荷時の弾性係数影響が強いが、それ以降では相対湿度の

影響が大きくなることがわかる。

図-6, 7, 8, 9には、A桁とB桁の引張鉄筋応力と、それに対するコンクリート各因子による影響係数の経時変化を示す。A桁の引張鉄筋応力の期

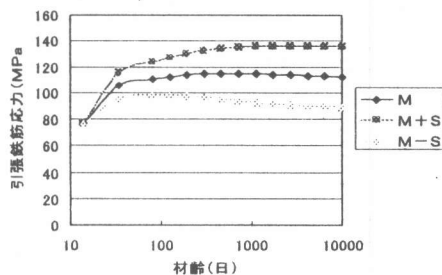


図-6 A桁引張鉄筋応力(CEBモデル)

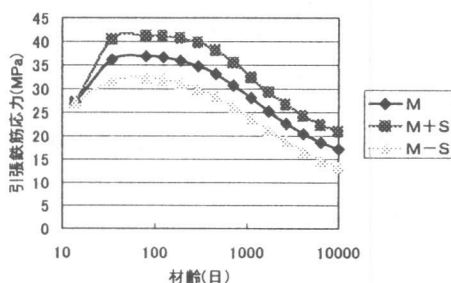


図-7 B桁引張鉄筋応力(CEBモデル)

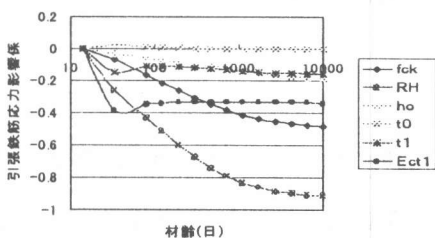


図-8 A桁引張鉄筋応力影響係数(CEBモデル)

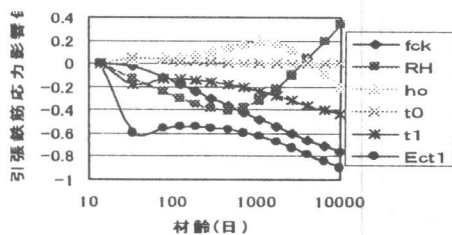


図-9 B桁引張鉄筋応力影響係数(CEBモデル)

待値は長期材齢ではほとんど変化がないのに対し、B 桁の鉄筋応力の期待値はかなりの減少を示す。これは、B 桁はコンクリート断面が大きいので、図-2に示した材齢進展に伴うたわみの変化による応力増大より、乾燥収縮による圧縮ひずみの影響を強く受けたためと考えられる。

また、図-8、9に示す引張鉄筋応力の影響係数においては、A 桁では相対湿度の影響係数が材齢と共に小さくなる。即ち、湿度が上がると鉄筋応力は減少することを示す。一方 B 桁では湿度が上がると鉄筋応力は材齢と共に減少から増加へ変化する。B 桁では、鉄筋応力影響係数の値から、載荷時の弾性係数と圧縮強度の影響が長期材齢では他に比して大きいことがわかる。

5. モデルに対する検討

4. で行った計算を A, B 桁に対して各モデルで行い、材齢 10000 日におけるたわみおよび圧縮側コンクリート応力、および引張鉄筋の影響係数を表-2, 3, 4 に示す。なお、表中の下線は、各モデルにおいて影響因子の最大値を示し、それに対応する因子の影響が大きいことを表す。

表-2のたわみの影響係数において、CEB モデルでは相対湿度のばらつきの影響が他の因子に比べて大きく、A 桁、B 桁ともほぼ同じである。これに対して JSCE モデル、B3S モデルでは A 桁 B 桁ともそれぞれ単位水量および載荷時弾性係数のばらつきの影響が大となり、モデルごとに主要因子が異なっている。

表-3のコンクリート応力影響係数では、JSCE モデルと B3S モデルは、たわみの影響係数と同様に

表一2 モデル別支間中央たわみ影響係数

注) x: 非構成因子

構成因子 (確率量)	単位	平均値	変動 係数 (%)	CEB モデル		JSCE モデル		B3S モデル	
				A 桁	B 桁	A 桁	B 桁	A 桁	B 桁
圧縮強度 fck	MPa	30	15	-0.64	-0.64	x	x	-1.5	-1.56
相対湿度 RH	%	70	20	<u>-1.66</u>	<u>-1.60</u>	-0.61	-0.80	-1.96	-1.72
部材仮想厚さ h_0	mm	——	5	-0.23	-0.24	x	x	x	x
有効断面厚さ v_{so}	mm	——	2	x	x	-0.23	-0.27	-0.34	-0.46
単位水量	kg/m ³	168	3	x	x	<u>3.23</u>	<u>3.40</u>	0.17	0.18
単位セメント量	kg/m ³	298	2	x	x	-1.33	-1.34	x	x
単位骨材量	kg/m ³	1834	3	x	x	x	x	x	x
乾燥開始材齢 t_0	日	14	10	0	0	-0.04	-0.03	0.14	0.12
載荷開始材齢 t_1	日	14	5	-0.18	-0.18	-0.19	-0.22	-0.79	-0.85
載荷時弾性係数 $E_c(t_1)$	GPa	——	20	-0.78	-0.94	-0.36	-0.43	<u>2.26</u>	<u>2.27</u>

表一3 モデル別支間中央コンクリート応力影響係数

注)x: 非構成因子

構成因子 (確率量)	単位	平均値	変動 係数 (%)	CEB モデル		JSCE モデル		B3S モデル	
				A 桁	B 桁	A 桁	B 桁	A 桁	B 桁
圧縮強度 fck	MPa	30	15	-0.55	-0.53	x	x	-1.9	-1.79
相対湿度 RH	%	70	20	<u>-1.46</u>	-1.31	-0.16	-0.20	-2.27	-1.79
部材仮想厚さ h_0	mm	——	5	-0.23	-0.22	x	x	x	x
有効断面厚さ v_{so}	mm	——	2	x	x	-0.01	-0.08	-0.40	-0.47
単位水量	kg/m ³	168	3	x	x	<u>2.00</u>	<u>1.85</u>	0.04	0.05
単位セメント量	kg/m ³	298	2	x	x	-0.85	-0.74	x	x
単位骨材量	kg/m ³	1834	3	x	x	x	x	x	x
乾燥開始材齢 t_0	日	14	10	0	0	-0.02	-0.01	0.22	0.17
載荷開始材齢 t_1	日	14	5	-0.19	-0.18	-0.12	-0.12	-1.01	-0.99
載荷時弾性係数 $E_c(t_1)$	GPa	——	20	-1.4	<u>-1.36</u>	-0.54	-0.51	<u>2.35</u>	<u>2.27</u>

図一4 モデル別引張鉄筋応力影響係数

注) x:非構成因子

構成因子 (確率量)	単位	平均値	変動 係数 (%)	CEB モデル		JSCE モデル		B3S モデル	
				A 桁	B 桁	A 桁	B 桁	A 桁	B 桁
圧縮強度 f_{ck}	MPa	30	15	-0.48	-0.75	x	x	-1.40	-2.60
相対湿度 RH	%	70	20	-0.91	0.33	0.90	4.1	-1.21	-0.52
部材仮想厚さ h_o	mm	——	5	-0.18	-0.20	x	x	x	x
有効断面厚さ v_{so}	mm	——	2	x	x	0.13	1.07	-0.23	0
単位水量	kg/m ³	168	3	x	x	2.33	2.39	-0.28	-1.5
単位セメント量	kg/m ³	298	2	x	x	-1.16	-1.60	x	x
単位骨材量	kg/m ³	1834	3	x	x	x	x	x	x
乾燥開始材齢 t_o	日	14	10	0	0	-0.03	-0.04	0.10	0.17
載荷開始材齢 t_l	日	14	5	-0.16	-0.43	-0.17	-0.2	-0.74	-1.5
載荷時弾性係数 $E_c(t_l)$	GPa	——	20	-0.34	-0.88	-0.16	-0.26	2.45	4.8

それぞれ単位水量と載荷時弾性係数のばらつきの影響が大きい。一方,CEB モデルを用いた場合,, A 桁と B 桁では傾向が異なり,A 桁ではたわみの影響係数と同じく相対湿度の影響が大きい,B 桁では載荷時弾性係数の影響が相対湿度の影響より若干大きくなる。

表・4 の引張鉄筋応力の影響係数をみると,CEBモデルでは総じて影響係数が1.0以下であり,予測式構成因子のばらつきは,鉄筋応力のばらつきへの影響が少ない。一方,JSCE モデルを用いた A 桁での単位水量, B 桁での相対湿度,および B3S モデルを用いた A 桁および B 桁での載荷時弾性係数の影響係数は他の因子のそれに比べて極めて大きく,そのばらつきは鉄筋応力をばらつかせる因子であることがわかる。

6.まとめ

クリープ・乾燥収縮予測モデルの構成因子のばらつきがコンクリートはり構造の挙動のばらつきに与える影響を,2種類の PRC 桁を対象に,CEB モデル,JSCE モデル,および B3S モデルを用いて検討した。その結果,用いるモデルおよび対象とする桁ごとに,長期挙動に対する影響因子とその

程度は異なることを示した。したがって,コンクリートはり構造物の長期挙動を予測するにあたり,対象とするはりの諸元と,用いる予測式の主要因子のばらつきを検証することが必要である。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編],土木学会, pp.26・33, 1996
- 2) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON: CEB-FIP MODEL CODE 1990
- 3) ACI: ACI MANUAL OF CONCRETE PRACTICE 1994
- 4) Bazant, Z. P. and Baweja, S.: Short Form of Creep and Shrinkage Prediction Model B3 for Structures of Medium Sensitivity, Material and Structures, Vol.29, pp.587-593, Decem.1995
- 5) 高海克彦, 浜田純夫:クリープ・乾燥収縮モデルのばらつき感度,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20-2, pp.697-702, 1998.6
- 6) 高海克彦, 浜田純夫:クリープ係数のばらつきを考慮したPPCはりの長期解析,第51回土木学会年次学術講演会概要集, V, pp. 906 - 907, 1996. 9
- 7) 高海克彦:PPC はりのクリープ有限要素法,コンクリート工学論文集, 第 6 巻, 第 1 号, pp.65 ~72, 1995
- 8) Ghali, A. and Favre, R.:コンクリート構造物の応力と変形[クリープ・乾燥収縮・ひび割れ], 技法堂出版, 1995