

超高強度膨張コンクリートの適用によるプレストレストコンクリート桁の長寿命化とコスト縮減

佐藤 良一

広島大学 工学研究科 社会基盤環境工学 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)



腐食性環境域を有する中国地方においても、既設、新設に関わらず、コンクリート構造物の長寿命化が謳われ、ライフサイクルコストの縮減技術が求められるようになってきた。そこで、新設構造物の長寿命化技術の一つとして、水結合材比(W/B)=0.15で収縮の大きさを3レベルと通常のW/C=0.35の4タイプのプレテンションPC桁を製造し、打ち込み直後からのプレストレス損失、塩分浸透性について検討した。その結果、W/B=0.15ではプレストレス導入以前の自己収縮によって大きなプレストレス損失が生じるが、膨張材、収縮低減剤に廃瓦粗骨材による内部養生を併用することによりかなり抑制できること、また、塩分浸透抵抗性も大幅に向上できることが明らかになった。

キーワード 超高強度膨張コンクリート、PC桁、プレストレス損失

1. まえがき

中国地方は、沿岸域、山間域をともに持ち、この地域の構造物は飛来塩分や凍結防止剤などによる腐食性環境に曝される場合がある。このため、中国地方においても、既設、新設に関わらず、コンクリート構造物の長寿命化が謳われ、ライフサイクルコストの縮減技術が求められるようになってきた。

長寿命化技術の一つに水結合材比(W/B)を飛躍的に低減し、硬化体の組織を緻密化し有害な物質遮断性を高める技術がある。低W/B化は超高強度化も可能とし部材断面の縮小に繋がる。しかし、低W/B化は大きな自己収縮をもたらし、ひび割れ発生リスクを高める。

そこで、本研究では膨張材、収縮低減剤などの

混和材料、さらには混和材料に廃瓦粗骨材による内部養生を併用することにより自己収縮を低減した超高強度膨張コンクリート(EUHSC)をプレテンションプレストレストコンクリート(以下PC)桁に適用し、プレストレスの損失、塩分浸透抵抗性に対する有効性について検討する。

2. 実験の概要

2-1 使用材料・配合

セメントにはシリカフェーム(SF:セメント質量の10%内割り置換)を低熱ポルトランドセメント(L)にプレミックスしたもの(SFLC)と早強セメント(H)を、混和材料には石灰系低添加型膨張材(EX:標準使用量20kg/m³)、収縮低減剤(記号SRA):低級アル

表-1 配合

配合名	(W+SRA) / B ²⁾	空気量 (%)	全粗骨材 容積(m ³)	単位量(kg/m ³)								SP/B ¹⁾ (%)	D/B x100
				W	SFLC	H	EX	S	G	GK	SRA		
B-15	0.15	2	0.319	155	1033	-	-	447	941	-	-	1.9	0.002
G20-EX10-R-15	0.15	2	0.319	149	1023	-	10	447	753	145	6	1.8	0.002
EX20-R-15	0.15	2	0.319	149	1013	-	20	447	941	-	6	1.9	0.002
B-35	0.35	2	0.319	155	-	443	-	872	1035	-	-	1.1	-

1) SPは構成の減水剤

2) Bは水結合材比0.15の場合SFLC+EX, 水結合材比0.35の場合はH

コール系)を使用した。廃瓦粗骨材(GK)は島根県江津産の瓦の不適合品を破砕したもの(表乾密度 $2.27\text{g}/\text{m}^3$ 、吸水率 8.88%)である。廃瓦粗骨材は島根県江津産の瓦の不適合品を破砕したもので、多孔性であるとともに破砕値が 19.60% であり、同様に多孔性である一般的な人工軽量粗骨材の破砕値 36.8% より小さく、廃棄物であるにもかかわらず、骨材自体の強度が高いことから超高強度コンクリートの内部養生用骨材として使用した。

表-1に配合を示すように、 $W/B=0.15$ の基準となる配合(B-15)、廃瓦粗骨材と膨張材(単位膨張材量 $10\text{kg}/\text{m}^3$)と収縮低減剤で低収縮化した配合(G20-EX10-R-15)および膨張材(単位膨張材量 $20\text{kg}/\text{m}^3$)と収縮低減剤で低収縮化した配合(EX20-R-15)と一般的な設計基準強度 $50\text{N}/\text{mm}^2$ とするプレテンションPC桁を想定した $W/B=0.35$ の配合(B-35)の計4種類のコンクリートを製造した。スランプフローは $725\pm 75\text{mm}$ を目標とした。本実験に使用したPC鋼材は、SRPR7BL $\phi 15.2\text{mm}$ である。

2-2 PC桁の製造および養生方法

コンクリートは容量 2.25m^3 の2軸強制練りミキサーを用い、1バッチあたり 1.1m^3 練り混ぜた。廃瓦粗骨材は水中に3日間吸水させて使用した。製作したPC桁の本数は各配合で1体、合計4体である。図-1にPC桁の形状寸法、鋼材の配置およびひずみゲージの貼付位置を示す。部材寸法は、幅 200mm 、桁高 1050mm (有効高さ 950mm)、長さ 8700mm である。PC鋼材は上段3本、下段8本を配置した。PC鋼より

線1本あたりの初期緊張力は 180kN とし、全緊張力を $1980(11\times 180)\text{kN}$ を目標とした。

養生方法としては、打設4時間後から蒸気養生を開始し、3時間かけて養生温度を 20°C とし、次の3時間で養生温度を 45°C に加熱養生した。その後5時間 45°C を保持し、除冷した。材齢18時間でプレストレスを導入し、工場敷地内にて気中屋内暴露環境で約1週間置き、神奈川県研究施設に搬送し、気中屋内暴露環境で約1年間養生した。

2-3 コンクリートの特性

コンクリートの圧縮強度試験および割裂引張強度試験はいずれもJISの方法に従い実施した。試験は所定の材齢で実施した。

塩分遮断性は、電気泳動(非定常)法¹⁾を用いて評価した。装置の概要を図-2に示す。試料は、テストピース($\phi 100\times 200\text{mm}$)を採取後、材齢91日まで封緘養生し、その後気中暴露した。電気泳動開始材齢は119日とし、事前に切断成形した($\phi 100\times 50\text{mm}$)、真空飽和处理を行った。直流電源で電極間に印加する直流定電圧は、 $70\text{V}(14\text{V}/\text{cm}\times 5\text{cm})$ とし、通電期間は6、12、18日とした。ただし、比較用のB-35の試料は、印加する直流定電圧を 40V 、通電期間は6、15、30時間とした。所定の期間通電した試料を割裂し、割裂面に硝酸銀(AgNO_3)を重量にて1%となるように作製したエタノール溶液を噴霧し、塩化物イオンの浸透深さを測定した。

2-5 PC桁の応力損失

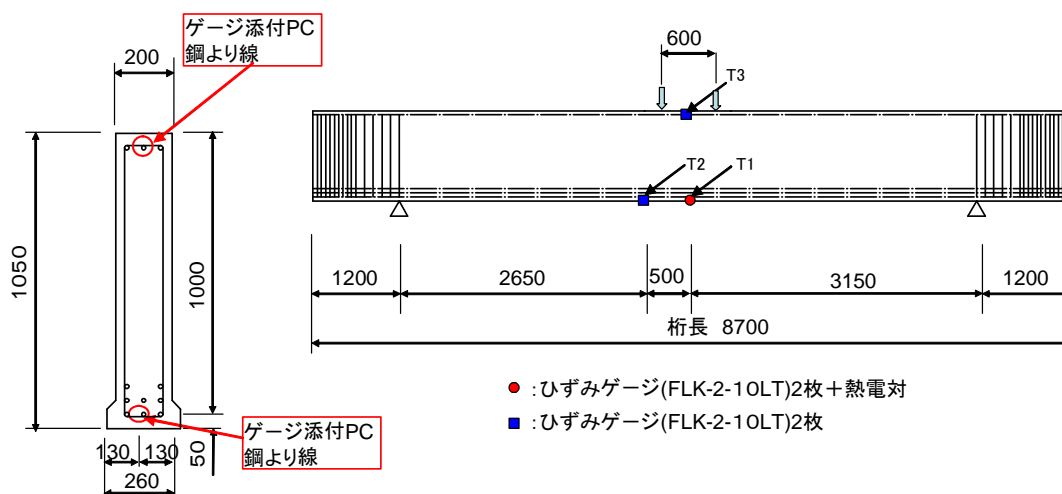


図-1 PC桁ひずみ測定位置

表-2 長期計測終了時の強度特性

	B-15	G20-EX10-R-15	EX20-R-15	B-35
材齢 (日)	488	497	477	483
圧縮強度 (N/mm ²)	164	178	178	101
ヤング係数 (N/mm ²)	56700	54000	58500	48800
割裂引張強度 (N/mm ²)	4.75	5.41	6.41	3.92
単位容積質量 (t/m ³)	2.60	2.56	2.63	2.49

PC桁に導入されたプレストレスの導入直後から材齢 480-500 日までの損失量を、鋼材のひずみの経時変化を測定することにより検討した。図-1 にひずみの計測位置を示す。

3. コンクリートの特性

材齢と圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度の試験結果を表-2 に示す。W/B=15%のコンクリートの圧縮強度は材齢 480 日においていずれも 160N/mm² を越え、また廃瓦を用いたコンクリート(G20-EX10-R-15)の圧縮強度は、ヤング係数が若干低いものの、およそ 180N/mm² に達し基準コンクリート(B-15)よりかなり大きいことが認められた。

電気泳動(非定常)法¹⁾により得られた塩化物イ

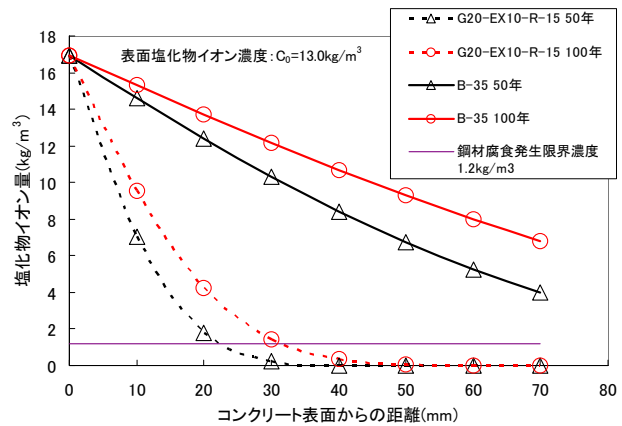


図-3 塩化物イオンの分布の比較

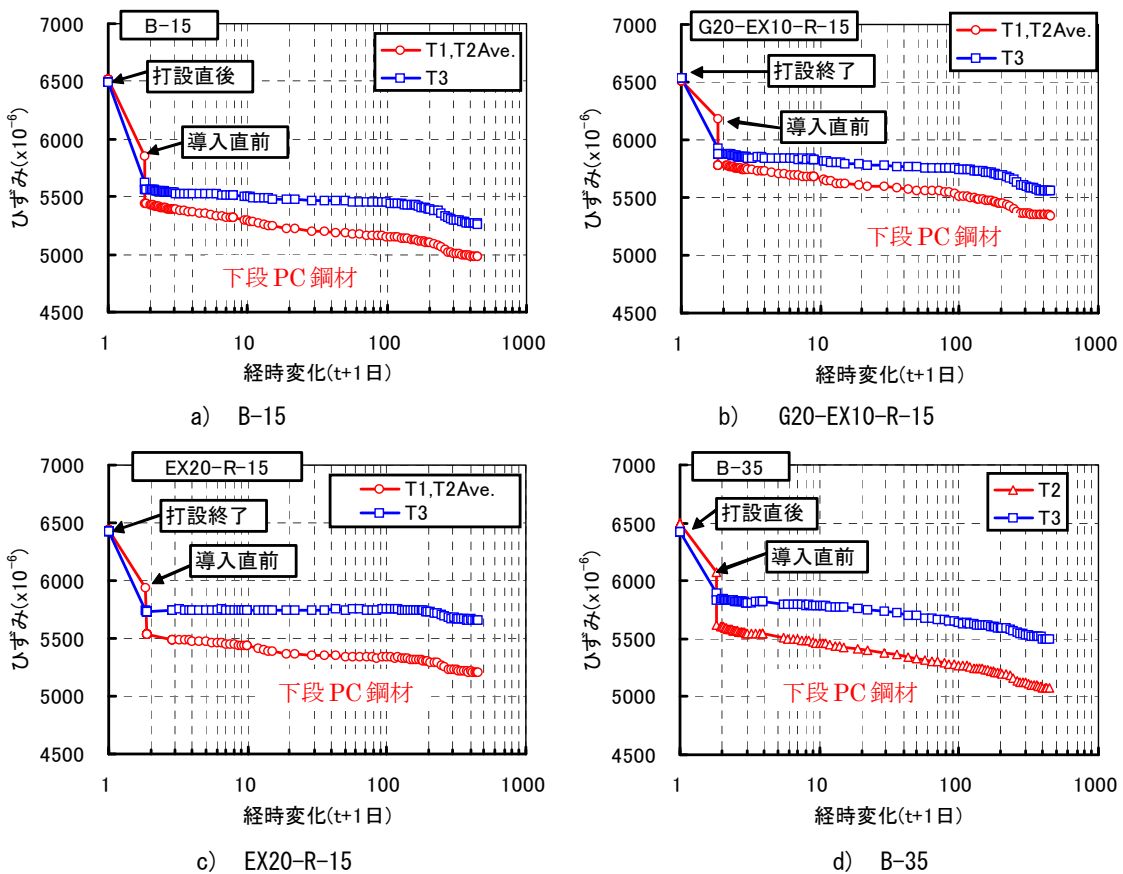


図-4 プレストレスの経時変化

オンの浸透深さから求めた塩化物イオン移動速度、実効拡散係数は、G20-EX10-R-15 の場合およそ 22(cm/年)、0.04(cm²/年)、W/B=0.35 の場合およそ 300(cm/年)、1.0(cm²/年)と実効拡散係数では超高強度と普通 PC 用強度で 25 倍の差が認められた。W/B=0.35 の実効拡散係数 D_eとコンクリート標準示方書[設計編：標準]解説 表 3.2.2²⁾ に示す設計拡散係数 D_a(0.35 cm²/年)とが等しいとし、また G20-EX10-R-15 と 0.35 の実効拡散係数の相違の仕方が設計拡散係数にも適用できるとして、G20-EX10-R-15 の設計拡散係数を設定すればおよそ 0.015cm²/年である。

土木学会コンクリート標準示方書に示されている拡散方程式を適用し、最も条件の厳しい飛沫帯を対象に、W/B=0.15 (G20-EX10-R-15)と 0.35(B-35)の供用後50年と100年におけるコンクリート表面からの塩化物イオンの分布状況を比較すれば図-3に示すようになる。ここで、コンクリート表面における塩化物イオン濃度は、予測のばらつき(安全係数 1.3)を考慮して 17 kg/m³としている。

道路橋において塩害の影響が激しい対策区分 S で適用される最小かぶり 70mm においても、B-35 では供用後 50 年で既に鋼材腐食発生限界濃度 1.2kg/m³ の 3 倍以上の濃度に達しているのに対して、G20-EX10-R-15 では供用後 100 年でかぶり 35mm でも鋼材腐食発生限界濃度以下である。仮定を含む計算ではあるが、廃瓦を用いた場合であっても、耐久性を極めて向上させることができるといえよう。

4. PC 鋼材ひずみの経時変化

図-4は、各PC桁の打込み直後からおよそ材齢480日までのPC鋼材ひずみの経時変化を示す。同図に示すT1, T2Aveは下段PC鋼材の2箇所計測したひずみの平均値を、T3は上段のPC鋼材ひずみを表す。ただし、B-35に関してはひずみゲージが損壊したため、T2を下段ひずみとして示している。

プレストレスは導入直前までの収縮による緊張力の低減の差が明確で、特に廃瓦で内部養生したG20-EX10-R-15のひずみ減少は最も小さく、収縮低減の図らない基準コンクリートB-15は最も大きなひず

表-5 プレストレス損失の要因分析

	B-15		G20-EX10-R-15		EX20-R-15		B-35	
	収縮考慮	収縮無視	収縮考慮	収縮無視	収縮考慮	収縮無視	収縮考慮	収縮無視
自己収縮ひずみがPC鋼材の拘束により生じる桁下縁応力：①	-1.75 (-10.6%)	0	-0.8 (-4.8%)	0	-1.31 (-8.1%)	0	-1.11 (-6.8%)	0
自己収縮ひずみにより低下した鋼材緊張力(kN)/本	18.4(=180.6-162.2)	0	9.5(=180.7-171.2)	0	14.0(=178.6-164.6)	0	14.0(=180.0-166.3)	0
桁下縁の導入応力(N/mm ²): ②	14.87	16.44	15.79	16.51	15.08	16.25	15.28	16.25
緊張力低下による桁下縁の導入応力の低下量(N/mm ²): ③	-1.57 (-9.5%)	0	-0.72 (-4.4%)	0	-1.17 (-7.2%)	0	-0.99 (-6.1%)	0
収縮に起因してプレストレスを低減する引張応力の合計値：④=①+③	-3.32 (-20.1%)	0	-1.52 (-9.2%)	0	-2.48 (-15.3%)	0	-2.1 (-12.9%)	0
導入後のクリープ、収縮による緊張力低下による桁下縁の導入応力の低下量(N/mm ²): ⑤	-1.34 (-8.1%)	-1.34 (-8.1%)	-1.23 (-7.5%)	-1.23 (-7.5%)	-1.01 (-6.2%)	-1.01 (-6.2%)	-1.57 (-9.7%)	-1.57 (-9.7%)
全損失量(N/mm ²): ⑥=④+⑤	-4.66 (-28.2%)	-1.34 (-8.1%)	-2.75 (-16.7%)	-1.23 (-7.5%)	-3.49 (-21.5%)	-1.23 (-7.6%)	-3.67 (-22.6%)	-1.57 (-9.7%)
載荷直前の桁下縁のプレストレス(N/mm ²)	11.78(=16.44-4.66)	15.10	13.76(=16.51-2.75)	15.28	12.76(=16.25-3.49)	15.24	12.58(=16.25-3.67)	14.68
全損失量を考慮した、収縮が無い場合の導入応力に対する有効係数	71.8%	91.9%	83.3%	92.5%	78.5%	92.4%	77.4%	90.3%
④による損失応力を補償する為に要する下縁側PC鋼材量の増加率と本数	1.28 10.3	1.00 8*	1.11 8.9	1.00 8*	1.19 9.6	1.00 8*	1.17 9.3	1.00 8*
有効係数の順位	4	3	1	1	2	2	3	4

表中のマイナスは引張応力を意味する

() 内の数値は収縮が無い場合の桁下縁の導入応力に対する比率

8* : 本研究のPC桁下縁側の鋼材本数で、収縮が無い場合を基準本数とした

み減少を示した。導入直後からのひずみ減少は、B-35が大きい傾向が認められた。

従来、有効プレストレスの設計は、プレストレス導入以降のクリープと収縮を考慮して、行われている。しかし、図-4に示したように、プレストレス導入以前の収縮であっても、無視し得ない圧縮ひずみをPC鋼材に生じさせる。そこで、導入時までの自己収縮ひずみの影響を検討する。

表-5に、実測ひずみに基づいて求めた自己収縮がプレストレスの損失に及ぼす影響の要因分析結果を示す。プレストレス導入時までの自己収縮ひずみの影響を、①PC鋼材の拘束によるコンクリートに生じる自己収縮応力、②収縮によりPC鋼材は圧縮され導入直前の鋼材緊張力の低下、の観点からまとめている。前者はプレストレスの有無に関わらず、鋼材拘束によりコンクリートに引張応力が生じることを意味したものであり、後者は、ひずみの減少は緊張力の低下を意味することを考慮したものである。表の結果によれば、自己収縮の影響は、前者、後者でほぼ同程度であること、収縮低減の図らない超高強度コンクリート(B-15)では収縮がないとした場合の導入応力のおよそ20%(3.32N/mm²)の低下をもたらしてもっとも損失率が高いこと、廃瓦粗骨材で内部養生しかつ膨張材と収縮低減剤で収縮低減を図った場合(G20-EX10-R-15)は応力損失率9.2%(1.52N/mm²)と最も小さいこと、膨張材と収縮低減剤で収縮低減を図った場合(EX20-R-15)は応力損失率15.3%(2.48N/mm²)と特に低減効果が高くないが導入後の損失は比較的小さいこと、既存のPC用コンクリート(B-35)であっても12.9%(2.10N/mm²)の損失率があり、さらに導入後の損失が大きいことなどが明らかとなった。

これらの結果に基づき、導入直前までの自己収縮の影響をPC鋼材の本数を増加することにより補償するとすれば、収縮が無いとした場合に概略1.3~1.1倍の本数のPC鋼材が必要となる。ただし、鋼材の増加に伴う収縮の影響は無いものとしている。本研究で用いた8本の鋼材数をプレストレス導入前の収縮が無い場合の基準本数とすれば、10.3本~8.9本必要ということになり、低収縮化は特に超高強度コンクリートにおいては、3本増加すべきところ(B-15)を1本に抑制でき(G20-EX10-R-15)、鋼材増加の抑制に有効といえる。なお、

通常のPC桁の場合であっても1本強の鋼材増加が必要という結果になっており、これに対しては、クリープ、収縮等の設計用値やその他の方策で、経験的にひび割れに関わる安全性を確保してきたと考えられる。

5. 結論

プレストレスコンクリート(PC)桁の長寿命化とライフサイクルコスト削減の実現を最終の目的として、膨張材と収縮低減剤の併用とこれら混和材料と廃瓦粗骨材による内部養生の併用により、自己収縮の低減を図った超高強度膨張コンクリートを適用した実大規模のプレテンションPC桁のプレストレスの損失、曲げおよびせん断特性、塩化物イオンの遮断性、ライフサイクルコストについて、収縮低減を図らなかった超高強度コンクリートを用いたPC桁および通常のPC桁と比較、検討した結果、本研究の範囲内の主な結論は以下のようである。

1. これまで考慮されていない、プレストレス導入直前までに生じる自己収縮がプレストレスの損失に及ぼす影響は、初期緊張力(180kN/本)に対し最大20%(収縮低減なし、W/B=0.15)、ついで15.3%(膨張材(標準使用量)、収縮低減剤の併用、W/B=0.15)、3番目が12.9%(通常のPC用コンクリート、W/C=0.35)、最小9.2%(廃瓦、膨張材(標準使用量の半分)、収縮低減剤の併用、W/B=0.15)であり、無視しえないことが明らかとなった。さらに、通常のPC桁であっても10%を超える損失が認められた。
2. プレストレス導入直前までの自己収縮ひずみによる応力損失は、PC鋼材の拘束によりコンクリートに生じる自己収縮応力と自己収縮による緊張力の低下の2要因によりもたらされる。
3. プレストレス導入後1年強の期間に生じるクリープ・収縮がプレストレスの損失に及ぼす影響は、初期緊張力(180kN/本)に対し最大9.7%(通常のPC用コンクリート、W/C=0.35)、ついで8.2%(収縮低減なし、W/B=0.15)、3番目が7.5%(廃瓦、膨張材(標準使用量の半分)、収縮低減剤の併用、W/B=0.15)、最小6.2%(膨張材(標準使用量)、収縮低減剤の併用、W/B=0.15)であり、収縮低減を図った超高強度コンクリート桁の損失は、通常桁の77~64%であった。

4. 本研究で使用した水結合材比(W/B)0.15の超高強度コンクリートの塩分遮断性は、電気泳動法(非定常)によれば、水結合材比0.35の通常のPC用コンクリートと比較して極めて高く、実効拡散係数は約1/25となった。
5. 本研究の試算結果により、超高強度コンクリートのライフサイクルコストは、通常強度のPC桁との比較から、桁高やかぶり厚さの低減による初期コストの低減ばかりでなく、維持管理費も抑制できることにより、縮減できる可能性を示した。

あとがき

本研究に対する社団法人中国建設弘済会の助成に深甚より感謝の意を表したい。

本研究は、(株)ピーエス三菱 鈴木 雅博氏、オリエンタル白石(株)手塚 正道氏、三井住友建(株)藤田 学氏を学外担当者として協力を得実施したも

のである。予算の制約から、鈴木氏にはPC桁2体(G20-EX10-R-15、B-35)の追加製作、および載荷試験の実施に絶大な協力をいただいた。また、手塚氏には電気泳動実験からライフサイクル評価までを行っていただいた。これらに対し厚くお礼を申し上げます。

(参考文献)

- 1) 渡辺豊、河野広隆、渡辺博志：コンクリートの急速塩分浸透性試験による塩化物イオン拡散係数の算定について、コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 663-668, 2002
- 2) 土木学会：「コンクリート標準示方書[設計編：標準]2007年制定」、3編 耐久設計、3章 耐久性に関する簡易設計法、pp. 324、2007