

論文 環境配慮コンクリートを用いたプレキャストカーテンウォールの日射熱による熱変形性および耐久性に関する実験

杉山 智昭*1・渡邊 悟士*1・今井 和正*1・黒岩 秀介*1

要旨: コンクリート材料起因の CO₂ 排出量削減を目的として、セメントを産業副産物の混和材で置換した環境配慮コンクリートが開発されている。本研究では環境配慮コンクリートのうち、セメントを使用しないコンクリートおよび CO₂ 排出量収支がマイナスとなるコンクリートをプレキャストカーテンウォールへ適用することを目指している。本論文は、基礎的な性能把握を目的として日射熱における熱変形性および耐久性について JSTMJ7001 に準じた試験および曲げ試験を実施した。試験結果より環境配慮コンクリートを用いた試験体は、ややひび割れ易い特性を有するが普通コンクリートに近い性状であることを示した。

キーワード: 環境配慮コンクリート, プレキャストコンクリート, 外壁, 曲げ, ひび割れ

1. はじめに

コンクリート材料起因の CO₂ 排出量のうち約 9 割はセメント製造に起因している。そのため CO₂ 排出量削減を目的として、セメントを産業副産物の混和材で置換した環境配慮コンクリートが開発されている。筆者らは JIS R 5210 などに規定されるセメントを使用せずに高炉スラグ微粉末にカルシウム系刺激材を添加することで硬化させた環境配慮コンクリートや CO₂ 排出量収支がマイナスとなるコンクリートを開発し、これまでに建築物の非構造部材等へ適用している^{1,2)}。

本研究では、CO₂ 排出量のさらなる削減に向けて、環境配慮コンクリートをプレキャストカーテンウォール（以下 PCaCW）へ適用することを目的としている。本論文では、環境配慮コンクリートとしてセメントを使用しないコンクリート、および、CO₂ 排出量収支がマイナスとなるコンクリートの 2 種類を対象に PCaCW へ適用した場合の基礎的な性能を把握することとした。ここでは、（一財）建材試験センター規格「実大外壁等の日射熱による熱変形性及び耐久性試験方法 JSTMJ 7001:1996」³⁾（以下、耐久性試験と呼ぶ）による試験、さらに、同試験の有無を要因とする曲げ試験を実施し、環境配慮コンクリートと普通コンクリートの試験結果を比較検討することで基礎的な熱変形性、耐久性および剛性・耐力等の構造的な性能の差異を把握することとした。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は、PCaCW の PC 板の平板部分を想定し、JSTM J 7001:1996³⁾ の耐久性試験が実施可能な形状とした。表 1 に試験体要因一覧、図 1 に試験体形状および

表 1 試験体要因一覧

No.	耐久性試験	使用コンクリート	配筋
T1	有	NC	D10@150 (3-D10)
T2		CR	
T3		CZ	D10@75 (5-D10)
T4			
N1	無	CR	D10@150 (3-D10)
N2		NC	
N3		CZ	D10@75 (5-D10)
N4			

・ N1～N4 は耐久性試験を実施せず、曲げ試験のみ実施
 ・ D10(SD345)：降伏点 393(N/mm²), 引張強さ 573(N/mm²), ヤング係数(公称断面積で算出)1.79×10⁵(N/mm²)

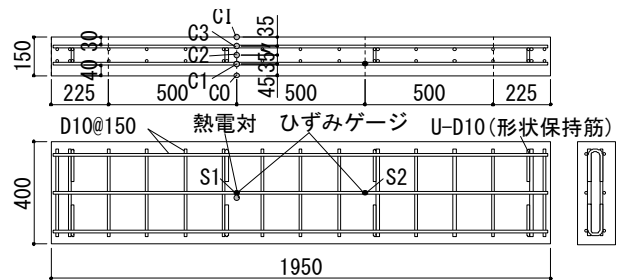


図 1 試験体形状・配筋図 T1～3, N1～3 (単位 mm)

表 2 調査表 (使用材料)

調査記号	W/P (%)	スランブ (フロー) (cm)	空気量 (%)	粗骨材の絶対容積 (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)								添加率 (P×%)		収縮低減剤 (kg/m ³)
					W	粉体 P					S	G	Aw	Aa	
						C	BFS	St2	St3	Cc					
NC	46.0	8.0±2.5	4.5±1.5	370	160	341	—	—	—	—	828	973	0.85	—	—
CR	30.3	(60±10)	6.0±1.5	313	175	—	263	55	—	260	622	824	1.45	3.0	3
CZ	25.0	(60±10)	6.0±1.5	330	170	—	590	—	90	—	525	868	0.65	—	—

・ W/P：水粉体比, W：水, C：普通ポルトランドセメント, BFS：高炉スラグ微粉末 4000, St2, St3：カルシウム系刺激材 (St2 は文献 4)と同様のもの, St3 は文献 4)の St1 を構成する複数種類の粉体の構成比率が異なるもの, Cc：炭酸カルシウム粉末, S：砕砂 (硬質砂岩), G：砕石 2005 (硬質砂岩), Aw：高性能減水剤, Aa：硬化促進剤 (1種)

・ CR と CZ は, PP 繊維を 1kg/m³ 混入

*1 大成建設 (株) 技術センター 博士 (工学) (正会員)

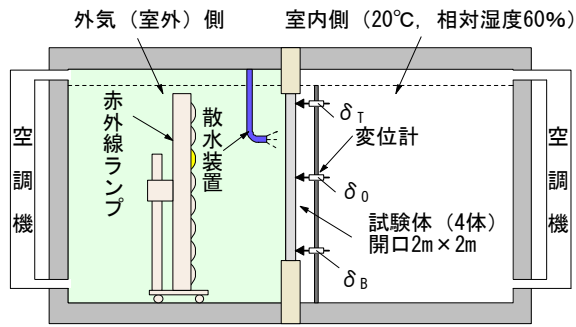


図-2 日射による熱変形性および耐久性試験装置³⁾



図-3 試験体設置状況

び配筋図を示す。試験体の形状は、厚さ 150mm、幅 400mm、長さ 1950mm とし、実験要因は使用コンクリート、壁配筋量および耐久性試験の有無とした。使用コンクリートは、普通コンクリート (NC)、高炉スラグ微粉末にセメントを使用せずカルシウム系刺激材を添加することで硬化させたコンクリート (以下、CZ) と CZ をベースにした調合に CO₂ を吸収して製造された炭酸カルシウム粉末を添加して CO₂ 排出量収支をマイナスにしたコンクリート (以下、CR) とした。コンクリートは設計基準強度を 30N/mm² とし、環境配慮コンクリートは文献 4) に準じて表-2 に示す調合および使用材料とし、所定の空気量およびスランプ (フロー) にて製造した。コンクリートの打込みは室内側となる面から実施した。板の補強筋は室内外ともに D10@150 (3-D10) ないし D10@75 (5-D10) とした。引張補強筋比 (p_t) は、それぞれ 0.46%、0.77% となりつり合い鉄筋比以下の補強量である。

具体的な試験体は、表-1 のように T1・N1 を基準試験体 (NC) とし、使用コンクリートが CR の T2・N2、CZ の T3・N3、CZ で配筋量が 1.5 倍の T4・N4 を設定した。T1~T4 は耐久性試験を実施した後に曲げ試験を行う試験体、N1~N4 は曲げ試験のみ行う試験体である。

試験体は、図-1 に示すようにひずみゲージ (2 か所/体)、および、耐久性試験に使用する熱電対 (壁内 3 点/体、表面は試験時に貼付け) を設置して製作した。

2.2 熱変形性および耐久性試験

試験は、JSTM J 7001 に従い図-2 に示す (一財) 建材試験センター保有の装置を使用して実施した。試験体は、図-3 に示すように装置内に同時に 4 体 (T1~T4) を並べて設置して実施した。室内側の温湿度条件は、温度 20 ± 1°C、相対湿度 60 ± 3% に維持した。試験における室外側日射等の温度サイクルは、JSTM J 7001:1996 に準じたが、同試験方法は、熱容量の大きい PCaCW では十分な温度変化を与えられないので、文献 5) と同様に一部を変更して図-4 に示すサイクルで実施した。室外側表面温度は、加熱時に 60°C 程度となるように日射を模擬した赤外線ランプを照射し、冷却時には氷点下 (0°C 以下) となるように制御した。試験のサイクルは、1 サイクル

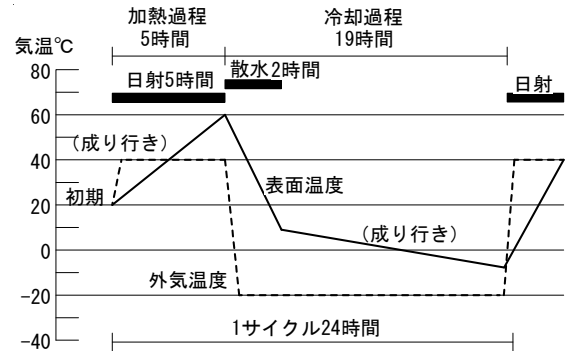


図-4 耐久性試験温度条件

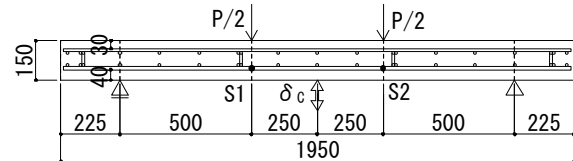


図-5 曲げ試験加力方法模式図

表-3 使用コンクリート材料試験結果一覧

種別	試験体	実施日 ※	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
NC	T1, N1	開始時	84	51.7	3.01	4.69
		終了時	125	53.8	3.09	4.48
CR	T2, N2	開始時	84	40.3	2.84	3.66
		終了時	125	44.0	3.01	3.67
CZ	T3, N3	開始時	83	58.4	3.12	4.84
		終了時	124	64.0	3.24	5.17
	T4, N4	開始時	83	58.5	3.29	-
		終了時	124	64.6	3.35	-

※終了時：耐久性試験終了時であり、曲げ試験実施時に相当供試体は N1~N4 の部材と同一養生 (現場封緘養生)

を 24 時間とし、5 時間加熱後に 19 時間冷却して 30 サイクル実施した。なお、14 サイクル目までは加熱 4 時間、冷却 20 時間として実施したが、加熱時の壁体表面温度がやや低い性状となったため加熱時間を前述のように 5 時間に変更して実施した。冷却時の室外側の気温は -20°C とし、冷却開始時に 1L/m²・min の散水を 2 時間行った。試験体コンクリートの材齢は試験開始時で 83~84 日であり、終了時は 124~125 日である。

計測は、室内外の温湿度とともに、各試験体 (T1~T4) の室内外の表面および壁体内の温度 (図-1 中の CO, CI および C1~C3)、室外側の補強筋ひずみ (図-1 中の S1 および S2)、試験体の面外方向変位 (図-2 中の δ_a , δ

T および δ_B)について実施した。

2.3 曲げ試験

曲げ試験は耐久性試験終了後に実施し、耐久性試験を実施しないN1~N4もT1~T4と同時期に加力した。加力方法は、図-5のように室外側を下面(引張側)とする4点曲げ(2点集中載荷)とした。支点間隔は1500mm, 純曲げ区間は500mm, せん断区間は左右で各500mmである。加力は、曲げ補強筋の仮想応力 σ_t を100, 215(長期許容応力度), 345(短期許容応力度) N/mm^2 とした目標荷重 P ($P=2 \cdot \sigma_t \cdot \Sigma a_t \cdot (7/8 \cdot d)/a$), a_t :引張鉄筋断面積 = 213 or 355 mm^2 , d :有効せい=104.5mm, a :せん断スパン=500mm)を各2回繰り返した後、試験体の中央変位 δ_c が15mmになるまで単調載荷で実施した。

表-3に使用コンクリートの材料試験結果を示す。NCやCZに比べてCRでやや強度が低く, CR, CZで耐久性試験終了時材齢の強度上昇がやや大きい傾向にある。

3. 熱変形性および耐久性試験の結果

3.1 試験結果概要

試験は20サイクル終了時に空調機の故障により約7日間中断したが, 中断後は室内外の温度を再度20°Cに維持した後に21~30サイクルを実施した。

試験終了後の室外側の壁体表面状況を図-6に示す。T1(NC)試験体では, 加熱中および加熱後において2cm程度の長さのひび割れが3本程度観察された。T2(CR)は普通コンクリートのT1よりもひび割れ本数がやや多く, T3(CZ)では亀甲状のひび割れが観察された。T3より補強筋量を多くしたT4では, ひび割れの本数と長さがT3よりも少なく・短くなっている。最終サイクル(30サイクル目)加熱時のひび割れ幅は, T3で最大0.04mm程度あり, その他の試験体で0.04mm以下の計測できない程度であった。また, ひび割れ幅は, 試験終了時には小さくなり, T3試験体でも目視でわずかに確認できる程度であった。

10~30サイクル間の室内側および室外側の気温を図-7に, T1(NC)およびT2(CR)試験体の壁体表面および壁体内(C0, CIおよびC1~C3)の温度履歴を図-8に示す。図-7に示すように室外側の室温は, +60~-20°Cで制御されており, 図-8のようにT1(NC)の室

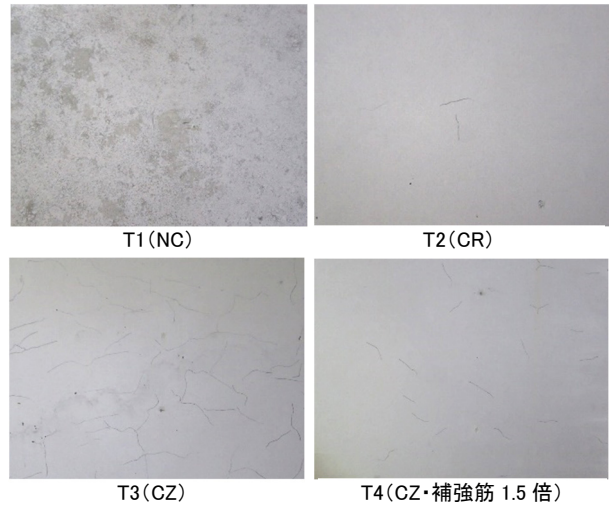


図-6 試験終了後表面(ひび割れを鉛筆で図示)

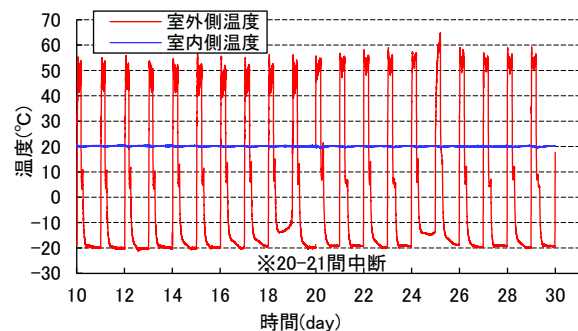


図-7 室外側および室内側温度

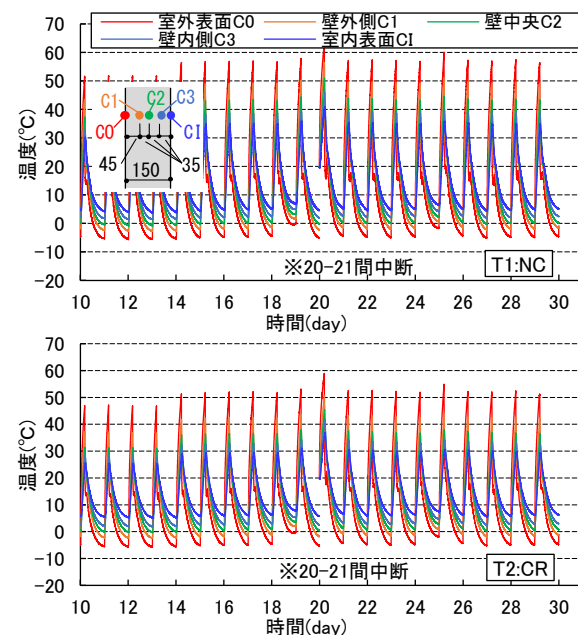


図-8 表面および壁体内コンクリート温度(T1, T2)

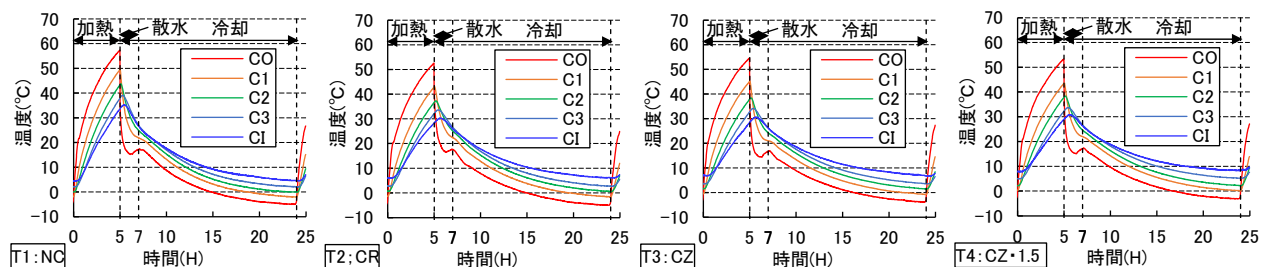


図-9 表面および壁体内コンクリート温度・22サイクル(22日)目

外側表面温度は、加熱時の最高温度で60℃、冷却時の最低温度で-5℃程度であり、計画で目標とした温度環境であることが確認できる。図-8の上段、下段に示すようにT1(NC)とT2(CR)ともに、温度履歴に伴い室外側から室内側まで温度変化(勾配)を持つ性状である。

1サイクルの温度変化の一例として、全サイクルの平均的な挙動であった22サイクル時の壁体表面および壁体内(CO, CIおよびC1~C3)の温度履歴を図-9に示す。すべての試験体で加熱時の温度は、室外側のCOで最も高く、室内側のCIで最も低い温度勾配である。冷却時では、冷却・散水に伴って室外側(CO等)の温度が急激に低下して室内側のCIで温度が最も高くなり、温度勾配が加熱時と逆転している。これらの壁体内の温度挙動は、試験体要因による大きな差異は見られない。

3.2 試験体要因の比較

22サイクル時の壁体表面温度(室外:CO, 室内:CI)の試験体比較を図-10に示す。室外側(CO)の温度は、環境配慮コンクリートを使用したT2~T4で普通コンクリートを使用したT1よりも若干低い傾向にある。これは、環境配慮コンクリート(CR, CZ)では高炉スラグ微粉末を使用しているため色調が白く、灰色の普通コンクリートよりも明度が高いため、日射による熱吸収が小さくなることで生じたと推測される。このことから室内側(CI)側の最大温度も環境配慮コンクリート(T2~T4)では普通コンクリート(T1)よりも小さくなる傾向にある。これら室外側最高温度の差異による影響が若干あるものの、全体の温度履歴は概ね同様である。

図-11に試験体中央での面外変位を示す。変位は、壁体内の温度差(温度勾配)により生じており、加熱時の室内外の温度差が大きいことから室外側への変形が大きい。最大変位は、T1(NC)に比べて環境配慮コンクリートのT2~T4で大きい傾向にある。また、冷却時は、加熱時に比べて温度勾配が小さいため面外変形量も小さ

い。変位の増減のタイミングや変化量に若干の差があるが、全体の挙動は要因による差異が小さい。

図-12に室外表面(CO)の温度と中央変位 δ_c および、補強筋ひずみ度(図-1中のS1とS2の平均)の関係を示す。図は、1, 10, 20および30サイクル(1c~30c)毎に示した。図-12上段のように δ_c は、1サイクル目よりもそれ以降のサイクルで温度上昇時(20℃→60℃)の値が大きく、その差は環境配慮コンクリート(T2~T4)が普通コンクリート(T1)より大きい傾向にある。一方で繰り返しによる変形の増大は試験体によらず小さい。図-12下段に示すように補強筋のひずみは、1サイクル目の温度低下(60℃→0℃)時にひずみが残留する傾向にある。その後の繰り返しでは、若干ひずみが累積する傾向もみられるが、大きな変化は生じていない。

以上のように、本試験の範囲では、温度変化の繰り返し

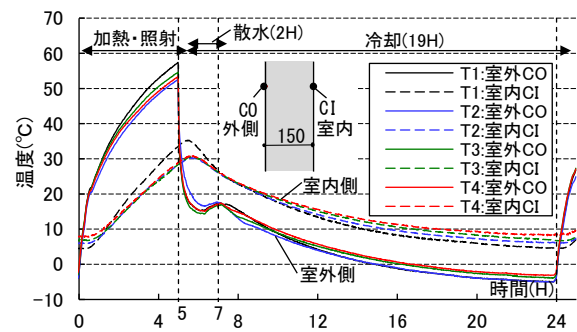


図-10 壁体表面温度比較(22サイクル目)

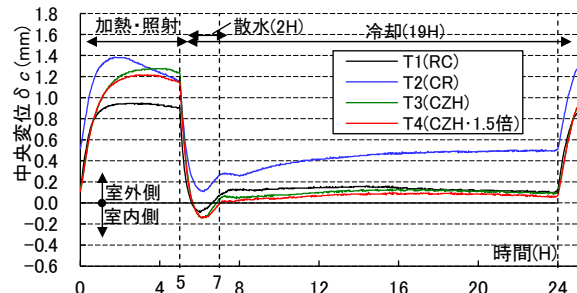


図-11 試験体中央変位 δ_c 比較(22サイクル目)

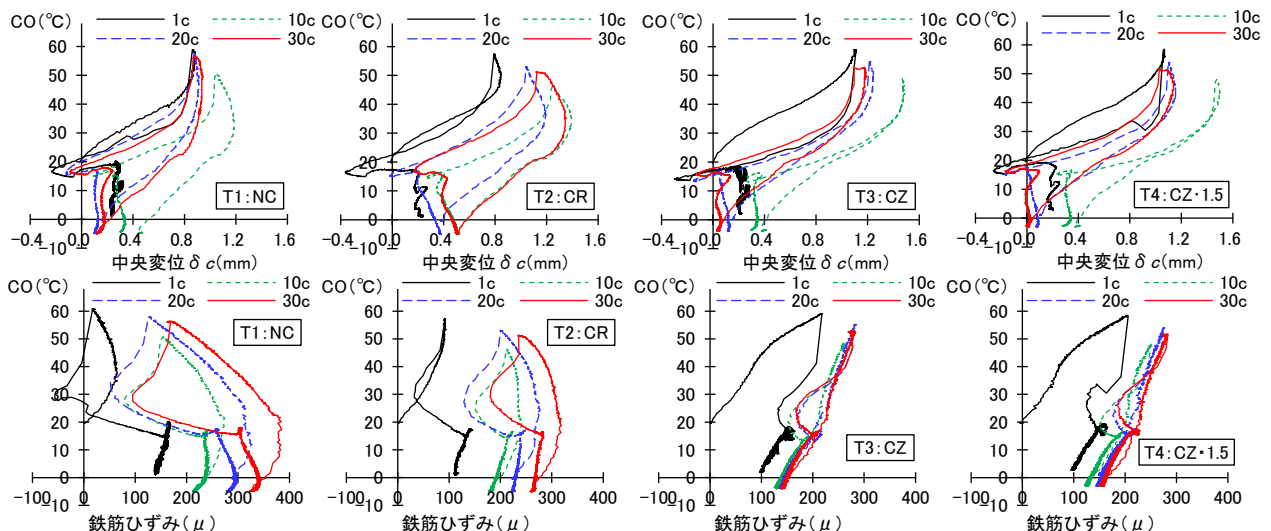


図-12 表面温度COと中央変位 δ_c (上段、 δ_c は正が室外側の変位)および補強筋ひずみ度(下段)関係

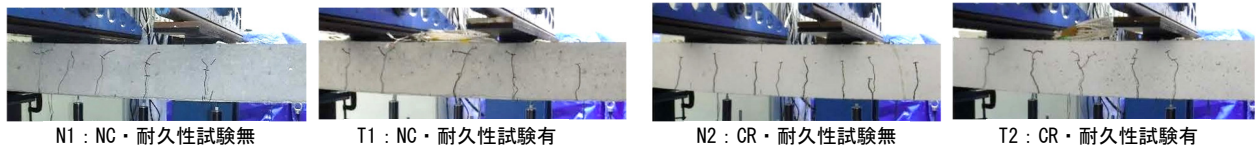


図-1-3 曲げ試験 最終破壊状況の一例

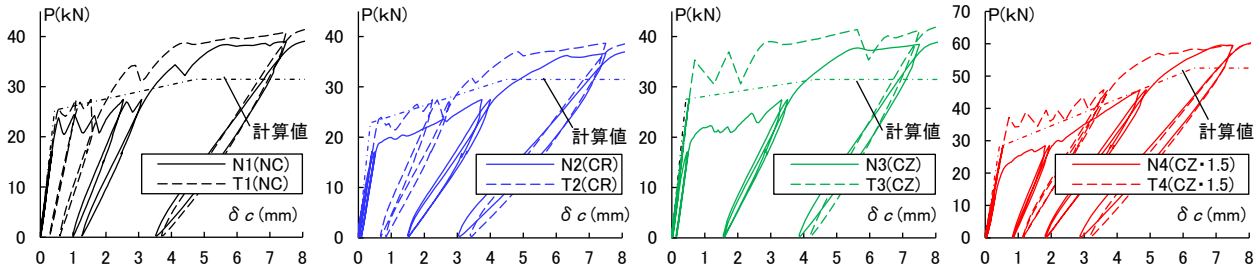


図-1-4 曲げ試験 荷重 P —中央変位 δ_c 関係

表-4 実験・計算耐力一覧

	曲げひび割れ(kN)			曲げ降伏(kN)		
	実験	計算	実/計	実験	計算	実/計
N1	23.8	25.3	0.94	38.4	31.5	1.22
T1	25.7		1.02	38.7		1.23
N2	18.9	22.8	0.83	36.3	52.5	1.15
T2	23.9		1.05	37.0		1.17
N3	20.5	27.5	0.74	37.7	52.5	1.20
T3	35.4		1.28	41.4		1.31
N4	21.9	28.1	0.78	59.6	52.5	1.14
T4	37.3		1.33	57.0		1.09

・曲げひび割れ発生および曲げ降伏点は、荷重-変形関係の剛性変化で判別

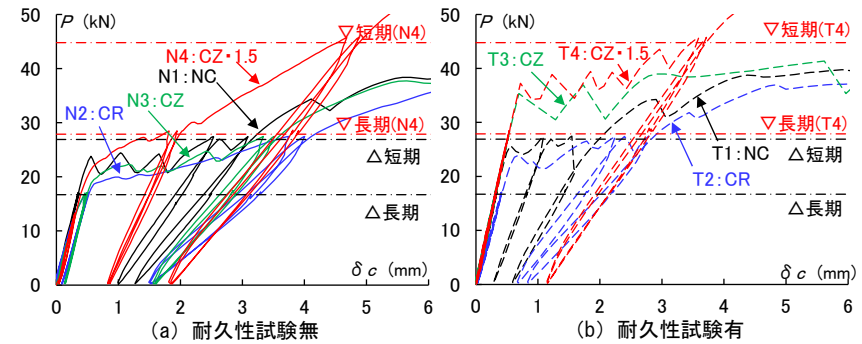


図-1-5 荷重 P —変位 δ_c 関係比較

しによる劣化は小さいと推測される。また、環境配慮コンクリートの試験体 (CR, CZ) は、ひび割れが生じやすい傾向にあるが、全体挙動では普通コンクリート (NC) と概ね同様の結果であった。

4. 曲げ試験の結果

4.1 試験結果概要

図-1-3に最終破壊状況の一例を示す。純曲げ区間の曲げひび割れ本数は、環境配慮コンクリート (CR, CZ) で普通コンクリート (NC) よりやや多く、耐久性試験を実施した試験体 (T1~T4) で実施の無い試験体 (N1~N4) より少ない傾向にあるが、発生状況に大きな差異はない。

図-1-4に耐久性試験の有無を比較した荷重 P —中央変位 δ_c 関係を示す。図中には、RC 規準⁶⁾に準じてひび割れ発生点と曲げ降伏点を折れ点とする Tri-linear で評価した計算値も示している。表-4に曲げひび割れおよび降伏時の実験値と計算値の一覧を示す。すべての要因において、耐久性試験を実施した試験体 (T1~T4) の曲げひび割れ発生荷重が試験を実施していない試験体 (N1~N4) よりもやや大きい傾向にある。T1~T4 試験体で曲げひび割れ発生荷重が高い原因は、室外側表面で日射による加熱と散水を受けたことで強度発現が助長されたためと考えられ、CZ では特にその傾向が強い。また、実験の骨格曲線全体は概ね計算値に対応しているが、前述の CZ の耐久性試験有り (T3~T4) でひび割れ発生荷重

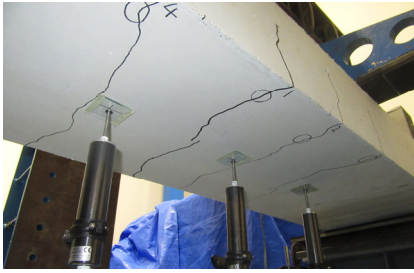
が計算値よりもやや高い結果である。

図-1-5 (a)に耐久性試験を実施していない N1~N4 試験体の P — δ_c 関係比較を示す。長期許容応力度レベル ($\sigma_t=215\text{N/mm}^2$) では全体的に弾性挙動であり、許容荷重が大きく曲げひび割れが生じた N4 でもひび割れ発生時からやや変形が増加した範囲にある。N1 では曲げひび割れ発生時に大きな音とともにやや荷重が低下する性状が見られたが、N2~N4 ではひび割れ発生時の音と荷重低下が小さい性状であった。表-4のように環境配慮コンクリートを使用した N2~N4 では、普通コンクリートの N1 と比較して曲げひび割れ発生荷重の実験値と計算値の比が小さく、剛性低下も早期に生じており、ひび割れが生じやすい傾向にある。曲げひび割れが純曲げ区間全域で発生した短期許容応力度レベル ($\sigma_t=345\text{N/mm}^2$) 以降では、若干 N2 (CR) で変形が大きい傾向にある。

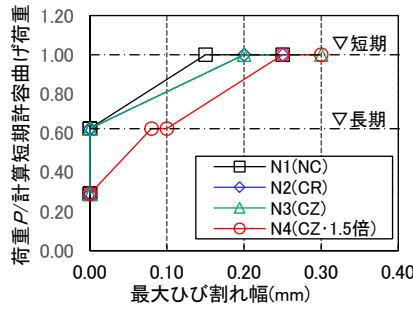
図-1-5 (b)に耐久性試験を実施した試験体 (T1~T4) の P — δ_c 関係比較を示す。耐久性試験を経た場合には、CZ の T3 と T4 で曲げひび割れ強度の上昇が大きいものの、荷重変形関係の差異は、耐久性試験を経ない場合と同様であり、若干 T2 (CR) で変形が大きい傾向にある。N2 および T2 でやや変形が大きい理由として、表-3にあるように割裂強度およびヤング係数が他の試験体よりも相対的に小さいためと考えられる。

4.2 ひび割れ幅およびひずみ性状

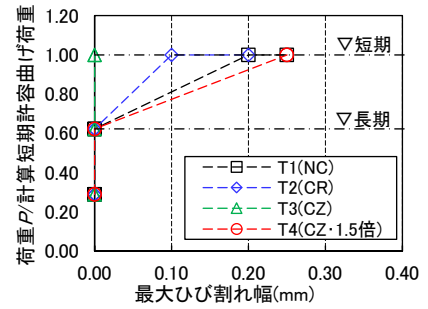
図-1-6に曲げひび割れの計測状況および荷重—最大



(a) ひび割れ計測位置 (底面○位置)



(b) 耐久性試験無



(c) 耐久性試験有

図-16 曲げ試験 曲げひび割れ幅

ひび割れ幅の関係を示す。ひび割れ幅は、図(a)に示すように純曲げ区間(加力点間の500mmの区間)に発生したひび割れ全数について底面位置でクラックスケールを用いて目視により計測した。図(b),(c)は、荷重と曲げひび割れ幅の関係であり、縦軸の荷重は計算の短期許容曲げモーメント時荷重(短期許容応力度)との比で示している。図(b)に耐久性試験無し(N1~N4)、図(c)に耐久性試験有り(T1~T4)の結果を各々示した。両図ともに曲げひび割れ発生荷重の小さいCRで曲げひび割れ幅が大きい傾向にあるが、短期許容荷重レベルの繰り返し時はその差が小さく、試験体によらず0.2~0.3mm程度であった。曲げ補強筋量が多く許容荷重が大きい値のN4, T4においても各許容荷重(応力度)レベルのひび割れ幅は、N1~N3およびT1~T3と大きな差はなく、ひび割れに対する補強筋の効果の差は小さいと判断される。

図-17にN1~N4試験体における荷重Pと引張側補強筋のひずみの平均値(図-5中のS1とS2の平均値)を示す。縦軸の荷重は、計算短期許容曲げモーメント時荷重との比で示している。ひずみが増加する荷重は、各試験体の曲げひび割れ発生荷重の差で異なるが、短期許容荷重時には、すべての試験体で長期許容応力度($=215\text{N/mm}^2$)相当のひずみであり差が小さい。部材中の局所的なひずみでは試験体毎で差が生じていると推測されるが、平均的なひずみではその差が小さいといえる。そのため、荷重-変形関係等の部材全体挙動に対する使用コンクリートの影響が小さくなったと考えられる。

5. まとめ

環境配慮コンクリートのうち、セメントを使用しないコンクリート(CZ)およびCO₂排出量収支がマイナスとなるコンクリート(CR)をプレキャストカーテンウォールへ適用することを目指して、JSTMJ7001に準じた日射熱における熱変形性および耐久性試験および曲げ試験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) 耐久性試験の結果より、環境配慮コンクリートではひび割れが生じやすいものの、全体挙動は概ね普通コンクリートに近い。
- 2) 曲げ試験の結果より、環境配慮コンクリートは、普通

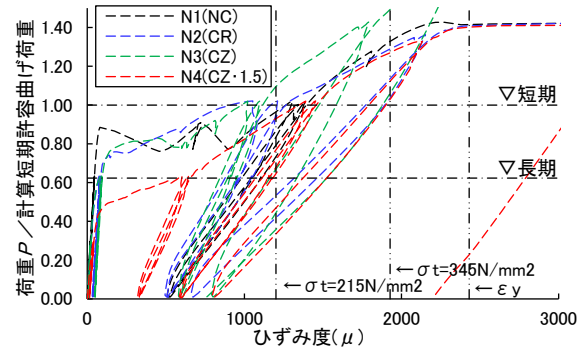


図-17 曲げ試験 荷重-補強筋ひずみ度関係

コンクリートよりも曲げひび割れが早期に生じやすい傾向だが、荷重-変形関係などの部材全体挙動への影響は小さい。また、耐久性試験実施の影響は小さく、日射熱による室外側表面の強度上昇も認められる。今後も性能検証を継続し、環境配慮コンクリートの適用性について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 宮原茂禎, 荻野正貴, 岡本礼子, 丸屋剛: 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの水和反応と組織形成, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1969-1974, 2013
- 2) 今井和正ほか: CO₂排出量収支がマイナスとなる環境配慮コンクリートの建築物への適用(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.627-632, 2023
- 3) (一財) 建材試験センター; 実大外壁等の日射熱による熱変形性及び耐久性試験方法, 建材試験情報, Vol.32, pp.26-33, 1996.7
- 4) 加藤優志, 渡邊悟士, 山本佳城, 黒岩秀介: 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮コンクリートの建築物への適用に向けた基礎物性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1108-1113, 2023
- 5) 佐々木哲也, 小山明男, 菊田学, 宮井俊章, 本田智明: アーキテクチャルコンクリートを用いたPCa版の打継ぎ性能に関する実験的研究(その3 耐久熱変形試験), 日本建築学会学術講演梗概集, A-1.材料施工 pp.911-912, 2008.9
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 8条, 2018