

[33] 高炉スラグ砕石コンクリートの内部ひびわれ発生・成長に関する基礎的研究

正会員 ○ 森 島 修 (関東学院大学工学部)
 正会員 大 内 千 彦 (関東学院大学工学部)
 正会員 綾 亀 一 (関東学院大学工学部)
 正会員 加 藤 清 志 (防衛大学校土木教室)

1. まえがき

高炉スラグ砕石コンクリートの变形特異点に関する考察によれば、その物性値は天然骨材コンクリートに比し明らかに異なり、初期ひびわれが発生しにくいことを報告した¹⁾。したがって、高炉スラグ砕石コンクリートの場合、その破壊機構も天然骨材コンクリートと異なることが推測される。本報告では、初期ひびわれとして付着ひびわれを想定し、前報²⁾より得られた構成成分要素の物理常数を用いて圧縮応力場における骨材まわりの応力解析を行ない、前述の発生しにくい理由を理論的に明らかにするとともに、減圧処理¹⁾を含めた高炉スラグ砕石コンクリートのひびわれ発生およびおもな变形特異点に対応するひびわれ成長過程を顕微鏡で観察し、その破壊過程を実験的に明らかにするものである。

2. 骨材まわりの応力解析

2-1 骨材まわりの応力分布

球体が弾性マトリクス中にある場合の界面まわりの応力を求める式は、Goodier³⁾、Hansen⁴⁾らによって表わされているが、前者は球径を考慮しておらず、後者は球体の剛度がマトリクスに比し十分大きい場合以外には一般性がない。加藤⁵⁾は骨材を球体とし、無限マトリクス中で圧縮応力を受けた場合、骨材界面に生ずる半径方向応力度を図-1のようにとると(1)式で与えられるとした。いま、前報²⁾で得られたち密質・やや多孔質・多孔質なスラグ粗骨材の物理常数の諸元をおのおの(1)式に代入し、両極点を含む平面で切断した大円上に骨材まわりの半径方向応力度 σ_{rr} の分布をそれぞれ示せば図-2(a)~(c)のようになる。

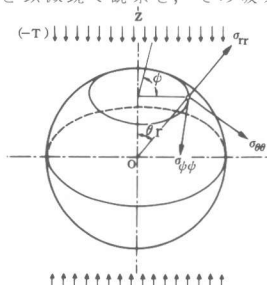


図-1 座標と応力成分

$$\begin{aligned}
 (\sigma_{rr})_{\theta, r=d} / (-T) &= \frac{0.5(k-1)}{(7-5\nu_M)k + (8-10\nu_M)} \times \frac{2(1-2\nu_A)(6-5\nu_M)k + (3+19\nu_A-20\nu_M\nu_A)}{2(1-2\nu_A)k + (1+\nu_A)} \\
 &\quad - \frac{\left\{ (1-\nu_M) \frac{1+\nu_A}{1+\nu_M} - \nu_A \right\} - (1-2\nu_A)k}{2(1-2\nu_A)k + (1+\nu_A)} + \frac{0.5(k-1) \{ (-6+5\nu_M) + (7-5\nu_M)\cos 2\theta \}}{(7-5\nu_M)k + (8-10\nu_M)} \dots (1)
 \end{aligned}$$

ここに、
 $(\sigma_{rr})_{\theta, r=d}$: 図-1に示す半径 $r=d$ の球体上に作用する OZ から θ の傾きをもつ点の半径方向応力度。
 $(-T)$: マトリクスに作用する圧縮応力度。
 E_M, ν_M : マトリクスの弾性係数およびポアソン比。
 E_A, ν_A : 骨材の弾性係数およびポアソン比。
 k : E_M / E_A

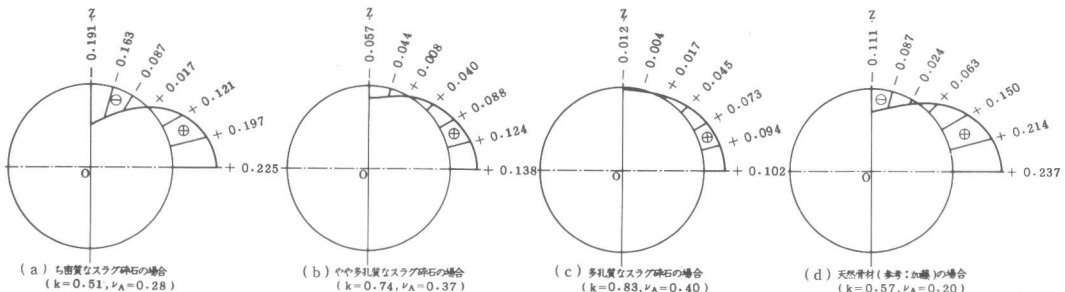
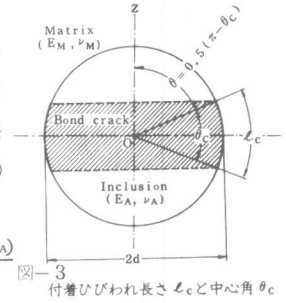


図-2 (a)~(d) 半径方向応力 $\sigma_{rr} / (-T)$ の分布の一例 ($E_M = 216 \text{ tf/cm}^2$, $\nu_M = 0.5$, $k = E_M / E_A$)

2-2 微小な付着ひびわれ発生応力レベル

いま、(1)式で得られた $(\sigma_{rr})_{\theta=90^\circ}$ の半径方向の最大引張応力が付着強度で平衡を保つものと仮定すると、図-3に示すように l_c まで付着ひびわれが生ずることになる。ここで、 $\theta_c = l_c/d$ とおけば(1)式から(2)式が得られる。しかし、初期ひびわれ発生の瞬間では $l_c/d \rightarrow 0$ となり、付着ひびわれ発生応力レベルは(2)式で $\cos(l_c/d) \rightarrow 1$ とすることができる。



$$(\sigma_{rr})_{\theta, r=d}/(-T) = K = \frac{0.5(k-1)}{(7-5\nu_M)k + (8-10\nu_M)} \times \frac{2(1-2\nu_A)(6-5\nu_M)k + (3+19\nu_A-20\nu_M\nu_A)}{2(1-2\nu_A)k + (1+\nu_A)} \quad \text{図-3}$$

$$\frac{\left\{ (1-\nu_M) \frac{1+\nu_A}{1+\nu_M} - \nu_A \right\} - (1-2\nu_A)k}{2(1-2\nu_A)k + (1+\nu_A)} + \frac{0.5(k-1)\{(-6+5\nu_M) - (7-5\nu_M)\cos(l_c/d)\}}{(7-5\nu_M)k + (8-10\nu_M)} \dots (2)$$

ASTM型ブリケット供試体を利用した高炉スラグ碎石粒子の見掛けの付着強度は、モルタルの単純引張強度に対して平均約60%であり、表-1に示した骨材の弾性係数・ポアソン比の諸元を用いると、高炉スラグ碎石骨材の場合の微小な付着ひびわれ発生応力レベルは $(-T)/\sigma_{cB} = 0.19 \sim 0.41$ となり、天然骨材の場合に比し、高い応力レベルで付着ひびわれが生ずる結果となった。ここで、 σ_{cB} はコンクリートの終局圧縮強度を示し、 $E_M = 216 \text{ tf/cm}^2$ 、 $\nu_M = 0.5$ の値を用いた。

表-1 付着ひびわれを生じさせるために必要な圧縮応力比

	E _A (tf/cm ²)	ν _A	k	E _M E _A	K = $\frac{\sigma_{rr}}{(-T)}$	天然骨材の場合 ⁵⁾		本実験値 ⁶⁾	
						$(-T)/\sigma_{cB}$ 0.035/K	$(-T)/\sigma_{cB}$ 0.035/K	$(-T)/\sigma_{cB}$ 0.06/K	$(-T)/\sigma_{cB}$ 0.042/K
天然骨材(加粒 ⁵⁾)	380	0.20	0.57	0.237	0.210	0.148	—	—	
高炉スラグ碎石 ら面質	420	0.28	0.51	0.225	0.222	0.156	0.267	0.187	
やや多孔質	294	0.37	0.73	0.138	0.362	0.254	0.435	0.304	
多孔質	260	0.40	0.83	0.102	0.490	0.343	0.588	0.412	

※ 高炉スラグ碎石を用いた場合の付着強度を基準にして付着ひびわれ発生応力レベルを表わしたものを。

さらに粒径を考慮し、一定長さ l_c の付着ひびわれを生じさせるために必要な圧縮応力比を(2)式より求め、その応力比と粒径との関係を図-4に示す。これより、高炉スラグ碎石を用いた場合、物理常数が同一な骨材では粒径が小さく、付着ひびわれ長さが大なるほど高い圧縮応力を必要とするものの、骨材粒径が25mm以上では一定の圧縮応力比で付着ひびわれが生じ、表-1に示したそれぞれの圧縮応力比に収束することがわかった。

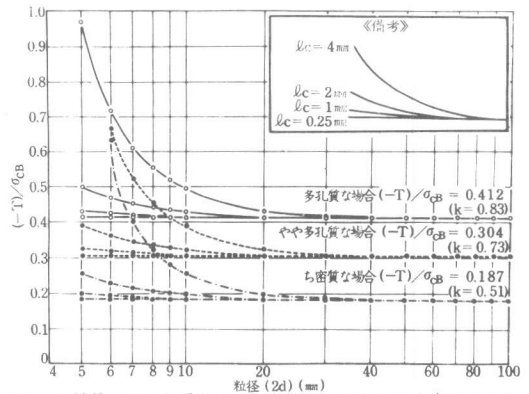


図-4 付着ひびわれ長さ l_c を生じさせるための応力レベルと粒径との関係

3. 高炉スラグ碎石コンクリートの破壊過程

3-1 実験概要

(1) 使用材料・配合 使用したセメントはN社製早強ホルトランドセメントで比重3.14。細骨材は千葉県君津産の混合山砂で表乾比重264，吸水率153%，粗粒率267，粗骨材はS社製高炉スラグ碎石2505Bで絶乾比重240，吸水率280%，粗粒率700のものを使用した。なお、混和剤としてK社製空気非連行型高性能減水剤を適量使用した。配合は表-2に示すどおり、単位水量を153kgf、水セメント比および細骨材率をおのおの45%と一定にし、スランブの範囲が $7 \pm 1 \text{ cm}$ になるよ

表-2 配合および管理供試体の強度特性等

	配合比および単位量						管理供試体の強度特性					
	W/C ^s /a (%)	W (%)	C (kgf)	S (kgf)	G (kgf)	減水剤 (kgf)	スランブ (cm)	空気量 (%)	終局圧縮強度 σ_{cB} (kgf/cm ²)	E _p (tf/cm ²)	σ_p/σ_{cB} ⁶⁾ σ _{cB} /σ _{cB}	
N	45	45	153	340	818	1.36 (C×0.4%)	8.0	2.8	520	422	0.46	0.78
V					947	2.04 (C×0.6%)	6.0 (15.0)	1.9 (2.7)	570	557	0.56	0.91

うに高性能減水剤で調整した。その添加量は高炉スラグ碎石コンクリートの場合、セメント重量の0.4%，減圧処理した場合は0.6%であった。

(2) 実験方法 練りませ方法は前報⁶⁾に準じて行なったが減水剤の添加方法をあと添

ここに、N：高炉スラグ碎石コンクリート、V：減圧処理された高炉スラグ碎石コンクリートで、スランブおよび空気量の()内の値は減圧処理前の値である。
E_p：見掛けの比例限度の弾性係数
 σ_p/σ_{cB} ：見掛けの比例限度応力比
 σ_{cB}/σ_{cB} ：臨界応力比

加⁷⁾とし、スランプの調整を行なった。なお、コンクリートのスランプおよび空気量は表-2に示すとおりであった。このまだ固まらないコンクリートを10×10×53cmの曲げ用型わくにてん充し、所定の水中養生後(材令14日; 20±3°C), コンクリート用ダイヤモンドカッターで約10×10×10cmの立方体に切断成形した。その後、供試体を室内で十分自然乾燥させ、有効長60mmのひずみゲージを供試体の縦・横、さらに有効長6mmのひずみゲージを供試体のはぼ中央部のモルタルおよび骨材におのおの縦・横、モルタルと骨材との界面にそれぞれ写真-1

に示すように張り付け、以下に示す方法で載荷試験を行なった。管理供試体(10φ×20cm)よりコンクリートの終局強度(表-2参照)を求め、載荷レベルを12tf(約 $\alpha_{CB}/5 \approx 120 \text{ kgf/cm}^2$)に決定した。その載荷レベルに達することに荷重を解放し、顕微鏡観察(倍率60倍)によってマイクロクラックを追跡しクラッキングマップを作成した。

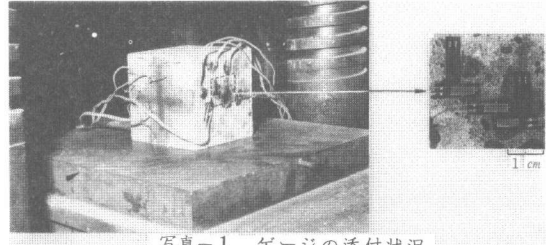


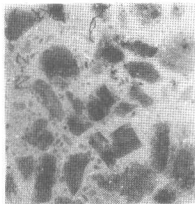
写真-1 ゲージの添付状況

また、これより各ひびわれ長さをマップメーター(キルビメーター)で計測した。

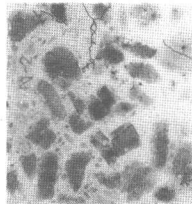
3-2 実験結果および考察

高炉スラグ砕石コンクリートのひびわれ発生・成長過程 高炉スラグ砕石コンクリートの応力レベル上昇に伴うクラッキングマップの一例を図-5(a), (b)にそれぞれ減圧無処理, 減圧処理おのおの場合について示す。

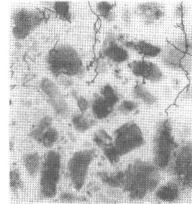
また、圧縮応力履歴に伴う各ひびわれ長さおよび成長過程を整理したものを表-3に示した。天然骨材を用いた普通コンクリートの場合⁸⁾ 附着



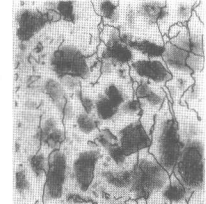
応力レベル115 (kgf/cm²)
(応力比24%)



応力レベル230 (kgf/cm²)
(応力比48%)



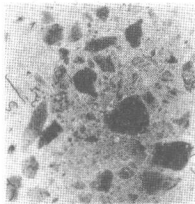
応力レベル345 (kgf/cm²)
(応力比72%)



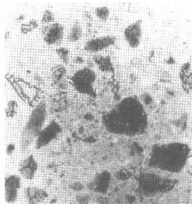
応力レベル478 (kgf/cm²)
(応力比100%)

図-5(a) 高炉スラグ砕石コンクリートの応力レベル上昇に伴うクラッキングマップ

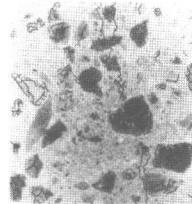
ひびわれが起因し、モルタルひびわれが発生・成長するとされ、独立してモルタルひびわれ



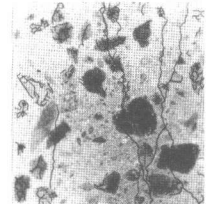
応力レベル111 (kgf/cm²)
(応力比24%)



応力レベル222 (kgf/cm²)
(応力比48%)



応力レベル333 (kgf/cm²)
(応力比72%)



応力レベル462 (kgf/cm²)
(応力比100%)

図-5(b) 減圧処理した高炉スラグ砕石コンクリートの応力レベル上昇に伴うクラッキングマップ

が発生することは少なく、また、骨

材ひびわれはわずかでありその値は全ひびわれ長さ

の約3%以下である。したがって、骨材ひびわれはコンクリートの破壊につながる大きな要因にはならないとされている。いま、“見掛けのひびわれ長さ”を附着ひびわれ・モルタルひびわれ・骨材ひびわれの和と定義する。高炉スラグ砕石コンクリートの

場合、図-5(a)および表-3より終局強度時のそれぞれの値は、1210mm, 263mm, 373mm, 574mmとなり骨材ひびわれが全ひびわれ長さの約47%を占め、

天然骨材コンクリートに比し明らかに骨材ひびわれ

表-3 圧縮応力履歴に伴うひびわれ発生頻度と成長過程

項目	応力比の範囲 (%)			
	0 ~ 48 (24tf) (比例限度範囲)	0 ~ 72 (36tf)	0 ~ 100 ($\sigma_{CB} \approx 50 \text{ tf}$)	
高炉スラグ砕石コンクリート	骨材ひびわれ	0% ※ 10% (121mm)	21% (257mm)	47% (574mm)
	附着ひびわれ	2% ※ 6% (72mm)	10% (121mm)	22% (263mm)
	モルタルひびわれ	1% ※ 3% (36mm)	9% (108mm)	30% (373mm)
	ひびわれ成長状況	応力比約20%で骨材ひびわれおよび附着ひびわれが発生。	さらに附着ひびわれ、骨材ひびわれが増加するがモルタルひびわれは少ない。	σ_{CR} 近傍で附着ひびわれ、骨材ひびわれが増加し、モルタルひびわれが急激に発生し、連続ひびわれとなって破壊に至る。
減圧処理された高炉スラグ砕石コンクリート	骨材ひびわれ	0% ※ 44% (489mm)	53% (593mm)	60% (669mm)
	附着ひびわれ	1% ※ 3% (30mm)	6% (71mm)	10% (117mm)
	モルタルひびわれ	1% ※ 3% (38mm)	6% (62mm)	29% (327mm)
	ひびわれ成長状況	応力比約20%で骨材ひびわれが発生するが、附着ひびわれは少ない。	さらに骨材ひびわれは増加し、破壊時の骨材ひびわれの約80%にも達するが、附着ひびわれは少ない。	骨材ひびわれからモルタルひびわれが成長する傾向が多く、連続ひびわれは附着ひびわれを介して形成され破壊に至る。

各ひびわれの発生頻度は破壊時の全ひびわれ長さに対する割合の累積であり、また()内は各応力時のひびわれ長さを示す。
※: 潜在ひびわれ(載荷前にすでに生じたひびわれ)

が多く発生することがわかった。また、応力レベルが48%の比例限度範囲内でも骨材ひびわれ長さは全ひびわれ長さの約10%にも達するが、付着ひびわれ長さは約6%と骨材ひびわれの約1/2であった。その後、応力レベルの上昇に伴い両者ともに倍増する。しかし、モルタルひびわれは応力比72%で約9%と少ないが、臨界応力近傍で急激に発生し終局強度時で約30%の値となった。したがって高炉スラグ砕石コンクリートの場合、骨材ひびわれおよび付着ひびわれがともに応力レベルの低い時点で発生し、この両者に起因して臨界応力近傍でモルタルひびわれが急激に進展・連続化し、組織が分断され、耐力を失い破壊に至ることがわかった。なお、このときの圧縮応力に対する鉛直方向の骨材界面のひずみ分布を図-6(a)に示すが、載荷に伴い多少圧縮ひずみが增大するものの応力比約50%以上では引張ひずみが増大し、終局強度近傍では約1000 μ 以上にも達した。このことより終局強度近傍で付着ひびわれが急激に進展していることがわかる。また、顕微鏡観察によりこの付着ひびわれの成長を確認した。さらに、高炉スラグ砕石コンクリートを減圧処理した場合、図-5(b)および表-3より減圧処理しない場合に比し骨材ひびわれが増大し、終局強度時では約60%にも達するが、付着ひびわれは約1/2に減少していることがわかった。このことは減圧処理することで付着強度が増大し、この増分に伴い付着ひびわれが減少したと思われる。したがって、高炉スラグ砕石コンクリートを減圧処理することで、骨材ひびわれが起点となってひびわれが連続化され、破壊に至る傾向が多く見られた。なお、図-6(b)より骨材界面のひずみ分布は、比例限度を越えれば圧縮ひずみが増大し骨材ひびわれが卓越していることがわかった。

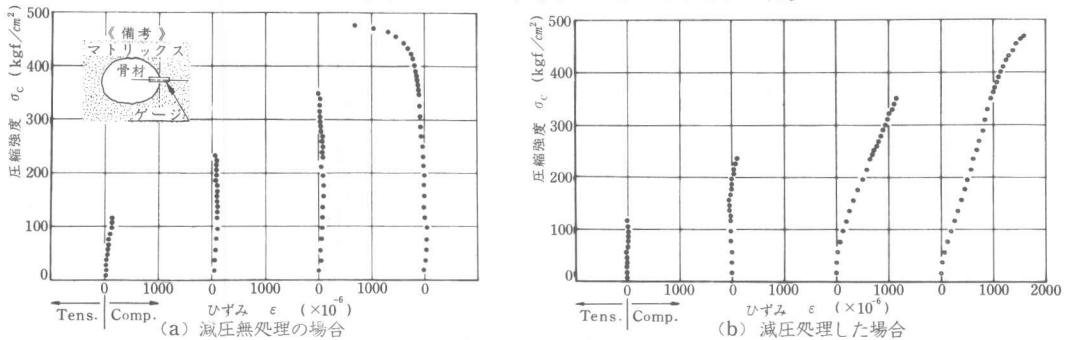


図-6 骨材界面のひずみ

4. むすび 以上の結果、本実験の範囲内で次のことが明らかとなった。(1) 高炉スラグ砕石の物理常数を用いて、微小な付着ひびわれを発生させるための圧縮応力比を算出すると約19~41%となり、多孔質なものほど高い応力比を必要とすることがわかった。(2) 付着ひびわれ長さが大なるほど、また、粒径が小なるほど高い応力レベルを必要とするが粒径が25mm以上では一定の応力比で付着ひびわれが生ずることがわかった。(3) 顕微鏡観察の結果、高炉スラグ砕石コンクリートの場合は骨材ひびわれと付着ひびわれの両者が起点となり、また減圧処理した場合は骨材ひびわれが起点となってひびわれが連続化されていることが確認された。(4) 減圧無処理・減圧処理高炉スラグ砕石コンクリートともに低い応力レベルで骨材ひびわれが発生し、コンクリートの内部ひずみエネルギーの一部は骨材によって吸収されていることが明らかとなった。

5. あとがき 本研究を行なうにあたり、丸山晴久、岩本直登、柿沼宏行卒研生ほか、増田隆一、沢山重樹学生諸氏の助力を受けた。付記して謝意を表する。

6. 参考文献

- 1) 大内・綾・加藤：高炉スラグ砕石を用いた高強度コンクリートの圧縮強度特性に関する基礎的実験研究，土木学会 第35回年講，昭和55年9月，pp. 217~218.
- 2) 森島・綾・加藤：高炉スラグ砕石および高炉スラグ砕石コンクリートの強度特性に関する基礎的実験研究，開大研究報告第32-2巻，1980. 3，pp. 35~43.
- 3) Goodier, J.N.: Concentration of Stress Around Spherical Inclusion and Flaws, J. A. M., V. 55, 1933, pp. 39~44.
- 4) Hansen, T.C.: Cracking and Fracture of Concrete and Cement Paste, ACI Publication SP-20, No. 3, 1968, pp. 43~66.
- 5) 加藤清志：ブレンコンクリートの付着ひびわれ発生機構に関する実験研究，土論 235, 1975. 3, pp. 99~109.
- 6) 大内・森島・綾・加藤：減圧処理された高炉スラグ砕石コンクリートの諸特性に関する実験研究，第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集，昭和55年6月，pp. 37~40.
- 7) 服部健一：スランブrosのメカニズムおよびその対策，材料，日本材料学会，第29巻第318号，昭和55年3月，pp. 240~246.
- 8) 加藤清志：ブレンコンクリート中のマイクロクラックと物性，土論 188, 1971. 4, pp. 61~72.