

[1025] 構造物モデルによるコンクリートの異方性調査

正会員 ○十代田知三 (芝浦工業大学工学部)

横尾 和人 (芝浦工業大学大学院)

正会員 小林 幸一 (芝浦工業大学大学院)

1. 緒 言

著者らの研究室では、コンクリート構造物において打設後まだ固まらないうちの分離現象によって生ずる硬化後の欠陥を、内部の巨視的異方構造として捉え、その実態と要因を明らかにして材料・設計・施工上の資料を得るとともに、複合材料としてのコンクリートの品質評価方法を、この観点から確立することを目的として、20年来、実験研究を進めてきている。

これまでの結果を要約すれば、コンクリート中粗骨材下面の欠陥群は打設方向に直交する弱層を形成することから、その内部構造は異方性をもつことを、打設方向およびそれに直角方向の引張強度を求めることにより明らかにし、この異方性はモルタルマトリックスの分離性状と骨材群の架構作用および粗骨材の粒径・量に大きく依存することを示した。また、ブリージング・チャンネルの影響も無視できないことを指摘した。これらの研究の中で、フレッシュコンクリートの分離抵抗性や硬化後の骨材とマトリックスとの付着性の評価、構造欠陥の検出、などに打設方向を考慮した引張試験が有用であることを示した上、新しい材料や工法の評価にも応用した。

上述の結果は主として15cm立方供試体について得られたものであるが、構造物における実態を知るため、実大モデル実験を3シリーズ行った。これらの実験は3年間に亘り、かつ多目的に行われたので、種々の題目により逐時発表されてきたが、今回は3シリーズを通し、異方性の観点から総括し、特に、最近需要の増しつつある高強度コンクリートについても検討を加えた。

なお最近の関連研究としては、Zielinski らの2篇の論文〔1, 2〕がコンクリートを異方性材料として捉える視点の重要性を示すものとして特筆に値すると言えよう。

2. 研究の方法

構造物モデルは、各シリーズとも建築物一層分の鉄筋コンクリートの柱と壁に近い部材を想定して、30cm厚・240 cm高の壁体を3年間に亘り15体打設した。目的は、構造物におけるコンクリートの非均質性および異方性の実態の調査と非破壊試験の可能性の追究とに大別される。調査はフレッシュ時の分離傾向との関係を知るため15体すべて変えた。ここでは、先ず各シリーズごとに引張異方性を検討した上、3シリーズを通して、圧縮強度 300kgf/cm²以上のものを高強度、未満のものを普通強度として分けて比較した。図-1にコアの割裂引張試験法を示す。壁巾、配筋、採取コア数、試験材令などがシリーズにより異なるので表-1に示す。実験概要を表-2に示す。

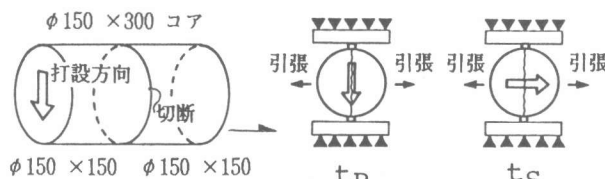


図-1 コアの割裂試験方法と引張強度の表示

表-1 各シリーズの相違点

シリーズ	壁巾 (cm)	配筋 (mm)	コア数 (段×列)	試験材令 (週)
I	240	半分・無筋 半分-D16, ダブル@150・250	6×3	7
II	190	D10, ダブル@200・300	5×2	6
III	220	D10, シングル@300	5×4	6

※割裂試験用のみを示す

表-2 モデル壁体の概要

シリーズ	略号	種類	W/C (%)	砂率 (%)	単位水量 (kg/m³)	AE剤 ^{*1}	混和剤 ^{*2}	骨材最大寸法 (mm)	スランパ (cm)	空気量 (%)	ブリージング率 ^{*3} (%)	圧縮強度 (kgf/cm²) コア	供試体 ^{*4}
I	N	普通軟練	61.0	48.7	196	0.725	—	20	21.0	3.9	1.01	239	255
	N'	non-AE	68.6	49.0	221	0.811	—		21.0	1.2	1.46	204	201
	B	ベース	61.0	48.7	175	0.725	—		12.0	4.0	0.62	212	226
	F	流動化	61.0	48.7	175	0.725	0.35		21.0	4.4	0.89	247	239
	F'	流動化	61.0	48.7	175	0.725 (kg/m³)	0.45 (kg/m³)		23.5	4.2	0.82	223	219
II	N	普通軟練	62.3	45.1	188	0.107	—	40	18.0	4.1	0.63	310	268
	N'	普通参考	58.6	42.9	172	0.105	—		17.0	5.0	0.68	291	259
	B	ベース	60.5	45.5	169	0.100	—		10.0	5.4	0.66	334	298
	S	造殻	60.6	45.3	172	0.100	—		7.5	3.6	0.18	342	320
	F	流動化	59.1	45.7	164	0.100	1.045		19.5	4.8	1.01	296	247
	SF	造殻流動	61.9	45.1	173	0.100 (kg/m³)	1.435 (kg/m³)		18.5	4.5	0.24	323	298
III	N	普通軟練	57.0	44.8	189	0.830	—	40	19.0	3.9	0.35	268	286
	C	分離低減	57.0	44.8	189	0.830	0.664		16.0	4.1	0.31	238	268
	Hh	高強度軟練	37.5	38.2	188	1.335	—		17.5	4.1	0.12	415	441
	Hm	高強度中練	37.5	34.6	173	1.155 (kg/m³)	— (kg/m³)		7.5	4.2	0.10	412	471

^{*1} Iーリグニンスルホン酸塩、IIー天然樹脂酸塩、IIIーリグニンスルホン酸塩、ポリオール複合体
^{*2} Iー流動剤（高縮合芳香族、スルホン酸塩系複合物）、IIー流動剤（ポリアルキルアリルスルホン酸塩）、IIIー分離低減剤（セルロースエーテル）、消泡剤（非イオン系）332g/m²添加、
^{*3} ブリージング率 = $\frac{\text{コンクリート表面におけるブリージング水の総量 (cm)}}{\text{打設直後のコンクリートの容積 (cm)}} \times 100 (\%)$ （ここではJISと異なる表示）
^{*4} Iー現場水中養生（7W）、IIー標準養生（4W）、IIIー現場水中養生（6W）

3. シリーズ別の結果と考察

3.1. シリーズI

各壁体の各部から採取したコアの引張強度・ t_R と t_S の比較を図-2に示す。

N：建築用として標準的な軟練コンクリートである。全体としてみると、 t_S/t_R 比の平均は99%で、やや $t_R > t_S$ の傾向を示すが顕著ではない。強度の中が大きいのは上下差の影響である。

N'：AE剤無添加のもので、Nとスランパは等しいがブリージングは1.5倍で分離傾向が明らかであった。全体的には平均値で $t_R \approx t_S$ であるが、低強度のものに $t_R < t_S$ の傾向がみられる。これは壁上部に多いことから、骨材下面の欠陥よりもブリージング・チャンネルの影響がまさったものと思われる。

B：流動化のベースで、中練コンクリートである。ブリージングは最小であるが t_S/t_R 比は平均で約96%を示した。

F：Bを後添加により流動化したもので、全体として t_S/t_R 比の平均は101%で、 $t_R < t_S$ の傾向がややみられる。ブリージング率は流動化によりBを上回るが、Nよりは低い。

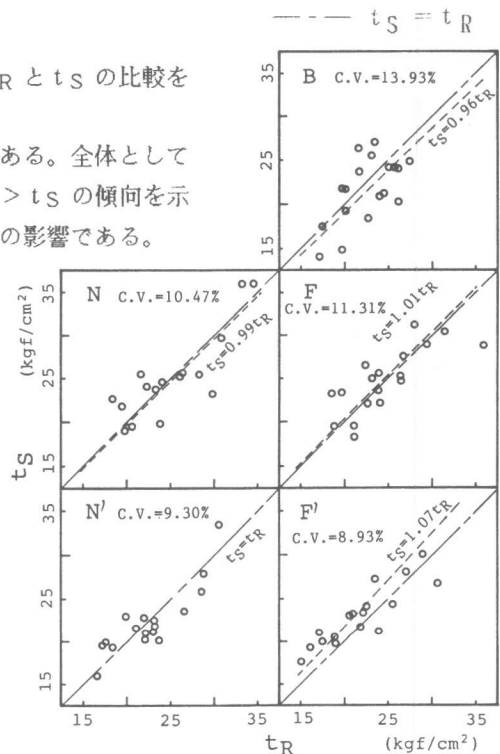


図-2 t_R と t_S との関係（シリーズI）

F': Fの流動化剤標準量添加に対し1.3 倍の過剰添加したものである。ブリージング率はFと大差なかったが、スランプと分離傾向は増した。 t_S / t_R 比の平均値は約107 %で全体に $t_R < t_S$ の傾向が顕著である。初期のブリージング速度が高かったこと、および壁体端部の上部において $t_R < t_S$ のものが多かったことから、チャンネリング現象により t_R の低下が大きかったと考えられる〔3, 4〕。

以上のように、分離—特にブリージグ—は t_S にも t_R にも影響するため、 t_S / t_R 比のみを単に欠陥度の指標としてとらえるのは不十分であり、強度の絶対値や圧縮強度との相対値をみるなど、総合的に考察する必要がある。

全体の傾向をみるため、 t_S / t_R 比の度数分布を図-3 に示す。平均値101 %に示されたみかけの等方性は、二つのピークにより、骨材下面の欠陥の支配とブリージグ・チャンネルの支配との相殺であるとみることができ、供試体ではあまり強くなかったチャンネリングの影響が、実大の打設深さにより顕在化したといえよう〔3, 4, 5〕。比較のため、図-4 に15 cm立方供試体による結果〔6〕を例示する。

3.2. シリーズII

各壁体の各部から採取したコアの引張強度・ t_R と t_S の比較を図-5 に示す。

N: 建築用として標準的な軟練コンクリートである。全体としてやや $t_R > t_S$ の傾向を示し、 t_S / t_R 比の平均は約95%である。

N': Nより砂率を低くしたもので、圧縮強度スランプとブリージグ率はほぼ等しいが、分離傾向があった。 $t_R > t_S$ の傾向は顕著で、 t_S / t_R 比の平均は約93%である。

B: 以下の三種のコンクリートのベースに相当する中練コンクリートである。 $t_R > t_S$ の傾向を示し、 t_S / t_R 比の平均は約97%である。

S: 砂の表面水率を一定に調整し、投入水量を二段階に分けて混練した砂造殻コンクリートである。ブリージグはBの1/3 以下となった。

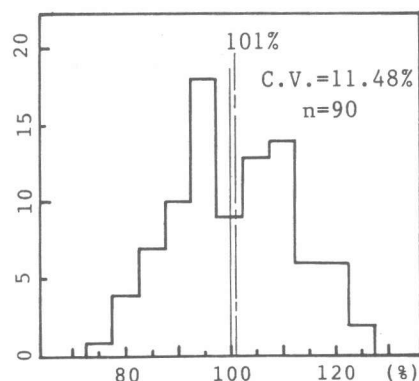


図-3 t_S / t_R 比の度数分布 (シリーズI)

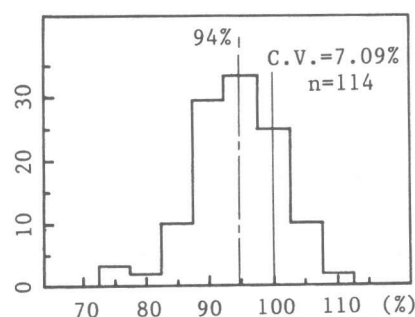


図-4 t_S / t_R 比の度数分布 (立方供試体)

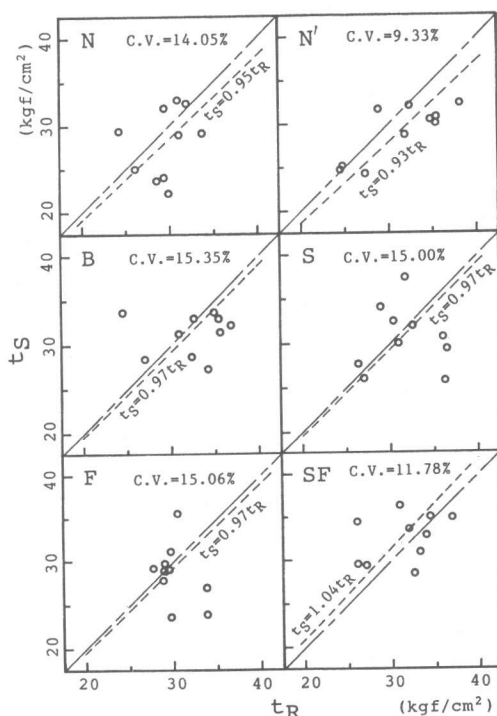


図-5 t_R と t_S との関係 (シリーズII)

t_S / t_R 比は平均では約97%となったが、個々では一定の傾向がつかめない。分離抵抗性の効果は打設方向や水平方向の品質変動に示された〔7〕が引張特性には特に顕著ではない。造殻間の保水のバラツキの影響とも思われるが、なお検討を要する。

F : Bを後添加により流動化したものである。 t_S / t_R 比は平均で約97%とS同様であるが一定の傾向がつかめない点でもSと同じである。

SF : Fの流動性とSの分離抵抗性の両方の効果か、一点を除けば $t_S \approx t_R$ で、強度の絶対値も高い。 t_S / t_R 比は平均で約104 %である。

以上、このシリーズは一段につき2個のコアしかない上、ダブル配筋のためあってバラツキが大きく、傾向がつかみにくかったが、シリーズ全体では、図-6にみられるように t_S / t_R 比が約97%を中心にはば正規分布を示す。

3.3. シリーズⅢ

各壁体の各部から採取したコアの引張強度・ t_R と t_S の比較を図-7に示す。

N : 建築用として標準的な軟練コンクリートである。全体としてやや $t_R > t_S$ の傾向があるが顕著ではない。 t_S / t_R 比の平均は97%である。

C : Nに分離低減のためセルロースエーテルと消泡剤を添加したものである。ブリージング率はNの約1/7 となった。 $t_R > t_S$ の傾向が顕著で t_S / t_R 比の平均は約92%である。分離抵抗性の効果は、壁体内の諸性質の変動に対して〔8〕また供試体実験〔9〕でも明らかであったが、本実験にはみられない。この傾向は、同じくブリージング率の低いHm にも認められ、骨材粒径が大きいと僅かのブリージングによっても下面の欠陥が顕在化することを示すといえよう。

Hh: 高強度軟練コンクリートである。 t_S / t_R 比の平均は約99%で引張異方性は小さいが等圧縮強度のHm と比較すると t_S はほぼ等しいが t_R が約10%低い。これは主としてHm と

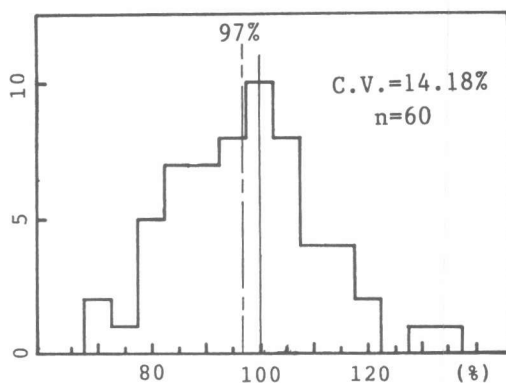


図-6 t_S / t_R 比の度数分布 (シリーズⅡ)

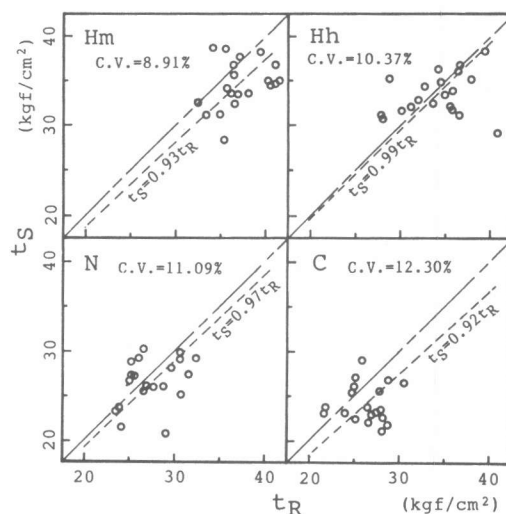


図-7 t_R と t_S との関係 (シリーズⅢ)

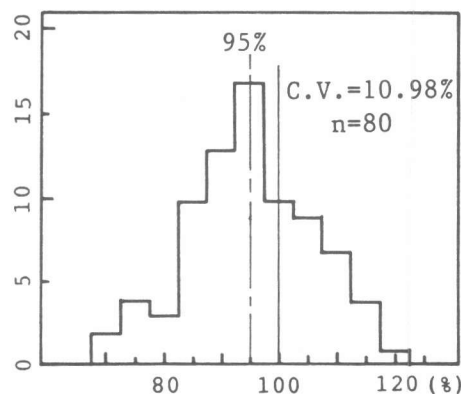


図-8 t_S / t_R 比の度数分布 (シリーズⅢ)

比べて約3倍のブリージング率および速度が t_R をも低下させたためであろう〔3, 4, 5〕。

Hm：高強度中練コンクリートである。 t_S / t_R 比は平均で93%で、 $t_R > t_S$ の傾向が顕著である。ブリージング率が少なくてもブリージング速度の低さは内在ブリージングを示唆し、粗骨材の大きさと多さは粒子単体あるいは群としての架構作用により下面の欠陥を顕在化させたものとみられる〔3, 5〕。

以上の全体の傾向をみるため、 t_S / t_R 比の度数分布を図-8に示す。約95%を中心にはば正規分布を示す。

4. 全シリーズを通しての総合的考察

4.1. 共通する結果

シリーズに共通して認められたことを以下に記す。

(1) モデル壁体の一部位から採取した一つのコアであっても、これを二分断して求めた t_R と t_S はほとんど等しくならない。引張強度の構造敏感性を示すものといえよう。

(2) 軟練コンクリートや分離ぎみのコンクリートは一般に $t_R > t_S$ の異方性の傾向が認められ、粗骨材下面の欠陥が推察される。しかし、壁体上部では $t_R < t_S$ の傾向もあり、ブリージング・チャンネルの発生がブリージング速度等から推察される。

(3) 分離抵抗性が大いと考えられるようなコンクリート、例えば中練りコンクリートも $t_R > t_S$ の傾向を示した。ごく僅かのブリージングでも骨材下面のマトリックスとの付着を低下させ、一般に粗骨材量の多いことは架構作用によりこれを助長する。一方、水セメント比が小さいことからマトリックスにはチャンネルング現象は生じにくく、 t_R への影響はあまりない〔6〕。

4.2. 骨材最大寸法の影響

概括的にみると、シリーズIに比べ、IIとIIIは $t_R > t_S$ の傾向がよりはっきりしている。これは、骨材最大寸法がIの20mmに対してIIとIIIは40mmであることが主因と考えられる。これは立方供試体による結果〔3, 5〕から推察される。シリーズIにおいてチャンネルングの影響が顕在化したのも、粗骨材の粒径が小さく量が少ないことから架構作用が生じにくくモルタル分に対するブリージング起動力を助長したといえよう。

4.3. 高強度コンクリートの異方性

一般に高圧縮強度を高強度コンクリートと呼んでおり、ここでは 300kgf/cm^2 以上の調査を高強度コンクリートとして、それ未満の普通強度コンクリートと、引張異方性を t_S / t_R 比の度数分布で図-9に比較した。どちら

も異方性が認められ t_R / t_S の傾向を示す。これは立方供試体による比較結果〔10〕と変わらない。一般に、高強度コンクリートは、内部的には骨材とマトリックスの付着性が高いはずである。したがって、僅かのブリージングや沈下によって生じた骨材下面の付着性の低下との差は、より際立って表れることになると考えられる。

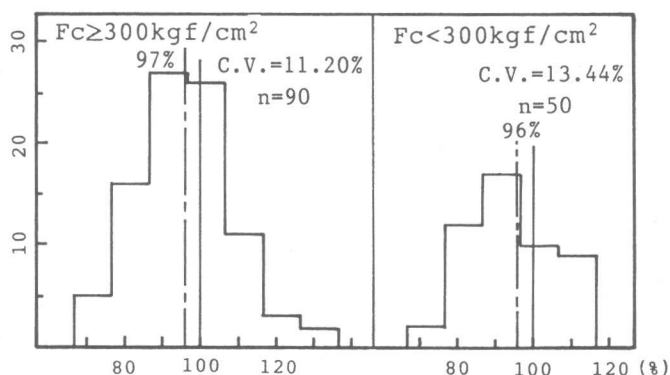


図-9 t_S / t_R 比の分布の強度別比較

4.4. 打設深さと内部欠陥の関係

全体的に $t_R > t_S$ の傾向が顕著であったシリーズⅡとⅢは、打設深さに沿って各引張強度を検討すると傾向が異なる。Ⅱでは、 t_S が上から下へ直線的に増加し、 t_R は上部付近のみの低下が目立つ。これは、骨材下面の欠陥が圧密により下部ほど改善される一方、圧密により助長されたブリージングのチャネリング現象により上部ほどその跡が残されやすいからと思われる。これは水平鉄筋の引抜付着性状によっても裏付けられた〔4〕。これに対し、Ⅲでは $t_R \cdot t_S$ とも上下差があまり認められない。この違いは、打設速度の差に主因があると思われる。すなわち、Ⅱはポンプを使用し、実際よりやや念入りにした程度で、Ⅲはバケットを使用し、その容量の関係もあって3/5と2/5の二回に分け、しかも一壁体当り40分～80分かけて打設した。この結果は、打設速度を遅らせることにより、上下差は少くなるが、圧密による骨材下面欠陥の改善度は小さくなることを示唆しており、今後の一課題である。

5. 結 語

供試体による実験室実験で得られた知見は、実大モデル実験により裏付けられ、さらに打設深さの増大等により広げられた。特に、圧縮強度の高い調合や単位水量の比較的少ない調合・ブリージングの少ない調合にも認められた引張異方性の傾向は、骨材下面の欠陥の存在のみならず水平鉄筋や垂直鉄筋ふしあるいはPCシースなどの下面の欠陥をも示唆するものである。これらの欠陥がコンクリート構造物の耐力や耐久性に与える影響が大きいことを考えると、材料の選択・調合の決定から詳細を含めた設計・仕様、さらに施工管理・検査まで一貫して“複合材料”という視点を失わないことが肝要と思われる。とりわけ、最近の傾向である高強度化や鉄筋の太径化にあたっては慎重な検討と計画が望まれる。

■ 謝 辞

各シリーズにおける共同研究者の各位や実験にご協力いただいた方々に深甚の謝意を表する。なお、シリーズⅠ、Ⅱは昭和55年～56年度文部省科学研究費の助成を受けたものである。

■ 文 献

- 〔1〕 Zielinski, A. et al.: Experiments on concrete under uniaxial impact tensile loading, *Materials & Structures*, vol.14, No.80, pp 103-112, 1981.
- 〔2〕 Zielinski, A. et al.: Experiments on concrete under repeated uniaxial impact tensile loading, *Materials & Structures*, vol.14, No.81, pp 163-169, 1981.
- 〔3〕 十代田、井川：コンクリート中の欠陥の発生について〔打設後の分離がコンクリートの内部構造におよぼす影響・Ⅲ〕建築学会論文報告集、240号、pp 1～8, 1976.
- 〔4〕 十代田：コンクリート品質の上下差の要因に関する一考察、材料研究連合講演会、26回 No.303, 1982.
- 〔5〕 十代田：コンクリートの引張異方性におよぼす調合および粗骨材の影響〔打設後の分離がコンクリートの内部構造におよぼす影響・Ⅱ〕建築学会論文報告集、235号、pp 1～8, 1975.
- 〔6〕 十代田：引張強度にみられるコンクリートの異方性〔打設後の分離がコンクリートの内部構造におよぼす影響・Ⅰ〕建築学会論文報告集、230号、pp 1～9, 1975.
- 〔7〕 十代田、野崎、山本、服部：造設混練コンクリートに関する実大実験、建築学会大会梗概集、pp 323～324, 1982.
- 〔8〕 Soshiroda, T. et al.: Effects of cellulose ether on homogeneity of concrete in structures, *Adhesion between Polymer and Concrete*, Chapman and Hall, pp 125～133, 1986, London.
- 〔9〕 早川、十代田：セメント-骨材界面および打継面の付着に及ぼすセルローズエーテル添加の影響、JCI年次講演会論文集、8回、pp 889～892, 1986.
- 〔10〕 十代田：コンクリートの異方性に関する研究(XIV) 高強度コンクリートについて、建築学会大会梗概集、pp 123～124, 1986.
- 〔11〕 十代田、野崎、中山：流動化コンクリートの均質性、JCI年次講演論文集、3回、pp 41～44, 1981.