

論文

[1071] 高性能 AE 減水剤を用いた早強セメントコンクリートの収縮ひびわれ抵抗性能

古島正博^{*1}・鈴木計夫^{*2}・大野義照^{*3}・中川隆夫^{*4}

1. はじめに

コンクリート強度の早期発現はコンクリート工事における型枠の早期脱型を可能とし工期短縮等の多くの利点をもたらす。先にその方法として提案した、早強セメントを用い水セメント比を小さくし、ワーカビリティを流動化剤で得る流動化早強コンクリートの現場実験を行い、よい結果[1]が得られたが、流動化コンクリートの管理に若干の難点が認められた。

本研究では、流動化剤の代わりに最近開発された減水性が大きく、スランプの経時変化の小さい高性能 AE 減水剤を使用した早強セメントコンクリートの乾燥収縮ひびわれ抵抗性能を調べることを目的として、JIS原案の「コンクリートの乾燥収縮ひびわれ試験方法」である一軸拘束ひびわれ試験[2]と縮尺1/2の壁試験体のひびわれ試験を6ヶ月間にわたって行った。比較のため AE 減水剤を使用した早強セメントコンクリートと普通ポルトランドセメントコンクリートについても同時に試験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と調合

表1にコンクリートの調合表を示す。コンクリートはいずれも水セメント比50%、スランプ18cmとして、混和剤にポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いた早強セメントコンクリート (H-SP) とリグニン系 AE 減水剤を用いた早強セメントコンクリート (H-AE) および同じく AE 減水剤を用いた普通セメントコンクリート (N-AE) の3種類のレデーミクストコンクリートを使用した。細骨材は瀬戸内除塩砂(比重2.55, F.M.2.67)・高槻砕砂(比重2.63, F.M.2.95) (各75%, 25%)、粗骨材は最大粒径20mmの長尾山砕石(比重2.69, F.M.6.79)である。

表1 コンクリートの調合

コンクリートの種類	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					スランプ (cm)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
N-AE	普通	50	45.2	195	390	745	947	0.20%	18.5
H-AE	早強	50	43.9	203	406	707	947	0.20%	18.0
H-SP	早強	50	46.2	180	360	789	963	0.75%	18.5

2.2 試験体の種類、形状・寸法

(1) 一軸拘束試験体

図1に一軸拘束ひびわれ試験体を示す。試験体の種類は表1に示すとおりで、試験体数は各3体である。本試験装置は、従来のこの種の装置はコンクリート試験体の拘束枠への固定度が高い

- *1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻(正会員)
- *2 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博(正会員)
- *3 大阪大学助教授 工学部建築工学科、工博(正会員)
- *4 大阪大学技官 工学部建築工学科、(正会員)

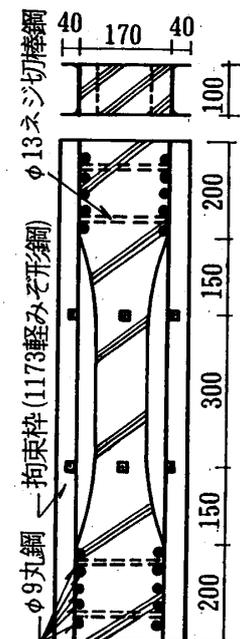


図1 一軸拘束ひびわれ試験体

まいであった点を改良したもので、コンクリート試験体が完全に拘束枠に固定されている[3]ことが特徴である。拘束枠に使用した鋼材は呼び名1173軽みぞ形鋼(実断面積:3.53cm²)で、鋼材比は7.06%である。自由乾燥収縮およびクリープ試験には10×10×50cmの角柱試験体を用いた。クリープ試験における持続応力は圧縮60kgf/cm²、載荷材令14日である。

(2) 壁試験体

図2に壁試験体の形状・寸法を示す。試験体数は表1に示す各種コンクリートについて各1体の計3体である。壁部は無筋コンクリートで壁厚は10cmである。周辺拘束部の配筋量は図に示すように梁16-D25(鉄筋比9.39%),柱16-D25(鉄筋比7.92%),基礎梁24-D25(鉄筋比10.56%)である。

各部位の自由乾燥収縮量を調べるために、各試験体とも梁、壁、基礎梁、柱と同一断面形状を有する長さ100cmの無筋コンクリート試験体を、H-SP試験体については梁、基礎梁、柱に対応する鉄筋を配した乾燥収縮試験体も作製した。

2.3 実験方法

コンクリートの打設は6月17日に行い、打設後は湿布養生を行い、材令5日に脱型し乾燥を開始した。試験は実験室地下ピットで行った。図3に試験期間中のピット内の温・湿度の経時変化を示す。

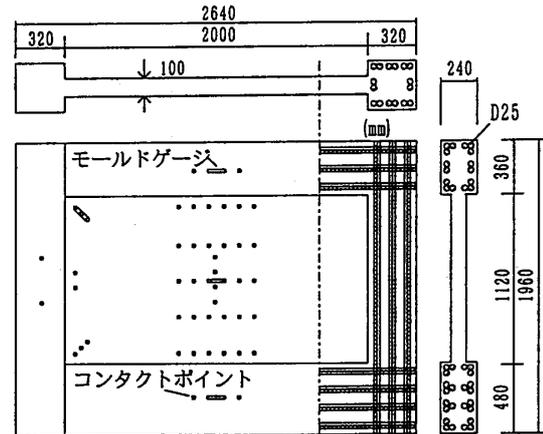


図2 壁試験体

ひずみの測定は一軸拘束試験体については試験体中央30cm間のコンクリートと拘束鋼材のひずみをコンタクトストレインゲージで、壁試験体はコンタクトストレインゲージ(検長10cm,30cm)と埋込型ひずみ計(温度も測定可能)を用いて行った。なお壁試験体のひずみ測定位置は図2中に示す。ひびわれ幅は検長10cmのコンタクトストレインゲージにて測定した。

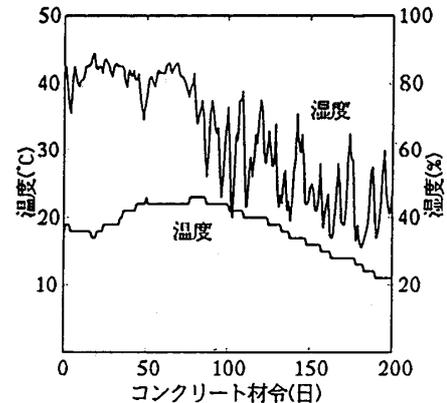


図3 試験体保存場所の温湿度

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮試験および割裂試験

図4に圧縮強度および割裂強度の経時変化を示す。H-SPの圧縮強度はN-AEに比べて材令2日で52.1%、材令28日で20.7%大きく、高性能減水剤を用いた早強コンクリートの早期強度発現が認められる。材令28日におけるヤング係数はN-AEは 2.34×10^5 , H-AEは 2.42×10^5 , H-SPは 2.74×10^5 (kgf/cm²)である。

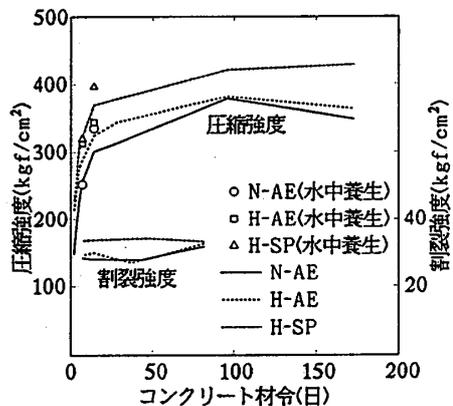


図4 圧縮強度および割裂強度

割裂強度はN-AEとH-AEはほとんど変わらず、H-SPは材令28日ではN-AEと比べて23.7%増加している。

3.2 乾燥収縮およびクリープ係数

図5に自由乾燥収縮を、図6にクリープ係数を示す。図中のひずみは線膨張係数を $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ として外気温

の温度補正を行っている。自由乾燥収縮はH-SPがN-AEの87.3%に、H-AEの93.8%に減少している。これは表1に示すように高性能AE減水剤の使用によって、H-SPの単位水量を減少できたことによるものである。クリープ係数はH-SPがN-AEと比べて69.0%に、H-AEとでは82.6%に減少している。コンクリート材令80日位までは湿度が80%程度とかなり高いため、各試験体の乾燥収縮の差は小さい。材令80日以降は湿度が低くなり、各試験体に明瞭な差が認められる。なお図中の曲線は後のクリープ解析に用いた材令80日までの近似曲線である。

3.3 一軸拘束ひびわれ試験

(1) 拘束試験体のひずみ

図7にコンクリートおよび拘束鋼材のひずみの経時変化の1例を示す。同図中の曲線は逐次解析[3],[5]によるクリープ解析値であり、ひびわれ発生までクリープ解析値はほぼ実測値と一致している。なお、クリープ解析には本実験で得られた乾燥収縮およびクリープ試験の材令82日(ひびわれ発生時)までの結果を最小自乗法で近似した実験曲線を用いた。またコンクリートと拘束棒のひずみがほぼ等しく、コンクリートの拘束棒への固定度はほぼ完全であるといえる。

(2) ひびわれ発生日

表2にひびわれ発生日を示す。H-AE試験体の2体はそれぞれコンクリート材令48,49日に、他の7体の試験体はすべて材令82日にひびわれが発生した。拘束鋼材比が同じである既往の実験[3]と比較して、このようにひびわれ発生日が遅いのは今回の実験は試験室内の相対湿度(80~70%)が高く、乾燥収縮の進行が緩やかであったことによるものである。

またN-AE3体とH-SP3体が同時期に発生したのは、その時点での自由乾燥収縮がそれぞれ 4.07×10^{-4} と 3.80×10^{-4} で、拘束鋼材ひずみから求めた収縮応力は $19.5 \sim 20.0$ (kgf/cm²)および $16.7 \sim 20.0$ (kgf/cm²)とかなり大きい。図3からわかるように湿度が大きく変化し応力が変動したことによるものと考えられる。湿度の急変がなければN-AEに比べてH-SPの収縮応力は小さく、割裂引張強度は大きいことから、H-SPのひびわれの発生はN-AEより遅くなったものと考えられる。

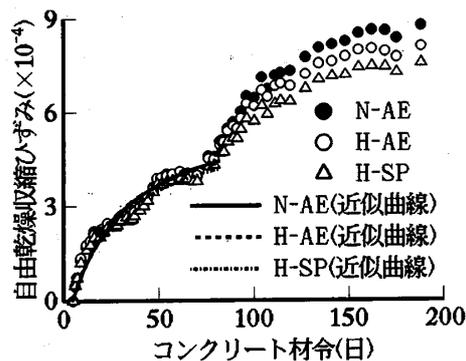


図5 自由乾燥収縮ひずみ

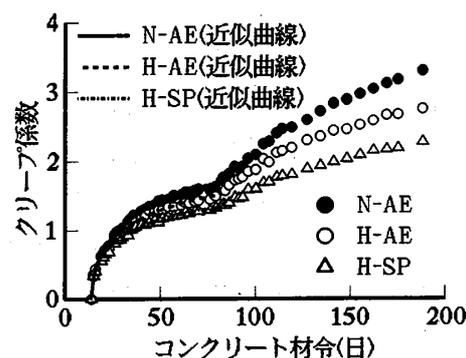


図6 クリープ係数

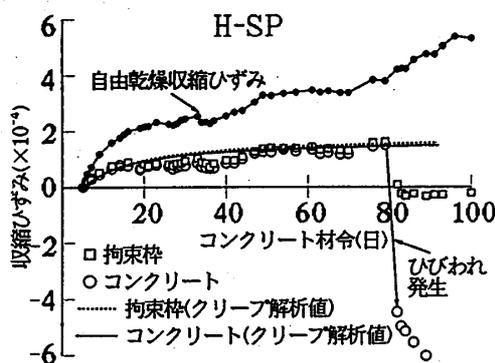


図7 一軸拘束ひびわれ試験体のひずみの経時変化

表2 一軸拘束ひびわれ試験結果一覧

試験体名	P	day	σ_c	ϵ_R	ϵ_{sh}	ω_0	ω	
N-AE	1	●	82	20.0	2.94	4.07	0.22	0.57
	2	○	82	20.0	2.82	4.07	0.25	0.57
	3	○	82	19.5	2.76	4.07	0.24	0.54
H-AE	1	●	82	17.5	2.88	4.01	0.23	0.55
	2	○	48	15.8	2.20	3.15	0.19	0.59
H-SP	1	○	82	16.7	2.78	3.80	0.19	0.46
	2	●	82	17.8	2.77	3.80	0.22	0.51
	3	○	82	20.0	2.78	3.80	0.25	0.53

P : ひびわれ発生位置
 (○30cm検長内, ●30cm検長から5cm以内)
 day : ひびわれ発生日(日):コンクリート材令で表示
 σ_c : ひびわれ発生直前のコンクリートの収縮応力(kgf/cm²)
 ϵ_R : ひびわれ発生直前の拘束ひずみ($\times 10^{-4}$)
 ϵ_{sh} : ひびわれ発生直前の乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-4}$)
 ω_0 : ひびわれ発生時のひびわれ幅(mm)
 ω : 材令188日におけるひびわれ幅(mm)

なお、ひびわれは5体には中央30cm区間に、残りの4体では30cm区間外5cm以内に生じた。

(3) 拘束ひずみおよびひびわれ発生時の応力

表2にコンクリートの引張ひずみ能力を示すひびわれ発生前日の拘束ひずみ（自由収縮ひずみ－拘束試験体コンクリートひずみ）を示す。拘束ひずみは、早くひびわれが生じたH-AEの2体は 2.2×10^{-4} と比較的小さいが、N-AEは $2.76 \times 10^{-4} \sim 2.94 \times 10^{-4}$, H-SPは $2.77 \times 10^{-4} \sim 2.78 \times 10^{-4}$ である。これらの結果は従来の研究[4]よりもかなり大きくなっている。これはひびわれ発生が遅くクリープひずみが大きくなったためであると考えられる。

拘束鋼材ひずみから求めたひびわれ発生前日のコンクリート応力も表2に示す。コンクリート応力の割裂引張強度に対する割合は、N-AEが62.6%, H-AEが53.2%, H-SPが54.6%で、従来の研究より小さいのは湿度の急変による応力の増加分が含まれていないことによるものと考えられる。

(4) ひびわれ幅

前掲の表2に初期ひびわれ幅（ひびわれ発生時）および材令188日における全ひびわれ幅を示し、図8にひびわれ幅の経時変化を示す。ひびわれ幅はコンクリート打込面とその反対面における測定値の平均値である。初期ひびわれ幅はひびわれの発生による応力の解放にともなう拘束鋼材の弾性回復変形（伸び）とコンクリート試験体の弾性回復変形（収縮）の和として表れる。従ってひびわれ発生直前の拘束応力が大きいほどまたコンクリートのヤング係数が小さいほどひびわれ幅は大きくなる。以上のことから、ひびわれ発生が早く拘束応力の小さいH-AEの2体のひびわれ幅は0.17, 0.19mmと、拘束応力の大きい他の試験体のひびわれ幅0.22～0.25mmより小さい。またN-AEとH-SPとを比べると、拘束応力が小さくヤング係数の大きいH-SPの方が小さくなっている。

長期付加ひびわれ幅はコンクリート試験体のクリープ回復変形とひびわれ発生後の乾燥収縮変形の和として表される。材令188日における全ひびわれ幅は、N-AEとH-AEは0.54～0.59mm程度でほぼ同じ値を示している。H-AEは、ひびわれ発生が早くひびわれ発生後の自由乾燥収縮量がN-AEよりも大きい、初期ひびわれが小さく全自由乾燥収縮量も小さいためにほぼ同じとなっている。H-SPの全ひびわれ幅がN-AEよりも小さいのは、N-AEより初期ひびわれ幅が小さいこと、ひびわれ発生後の自由乾燥収縮も小さいこと、およびクリープの回復変形が小さいことによるものである。

3. 4 壁拘束ひびわれ試験

(1) 壁拘束試験体各部位の自由乾燥収縮ひずみ

図9にH-SPにおける $10 \times 10 \times 50$ (cm)の試験体から求めた標準自由乾燥収縮ひずみおよび梁、柱、基礎梁（以上有筋）、壁（無筋）と同断面を有する各部材の自由乾燥収縮ひずみを示す。自由乾燥収縮ひずみでは材令188日において有筋の梁、地中梁、柱は $1.12 \times 10^{-4} \sim 1.53 \times 10^{-4}$ で無筋の壁の 6.70×10^{-4} に比べると約 5×10^{-4} 小さくなっている。この収縮差による拘束によって壁部には収縮応力が生じる。

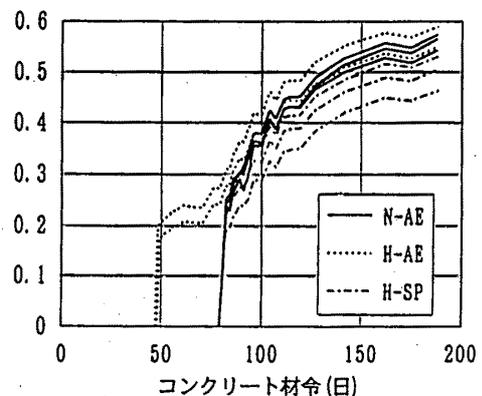


図8 一軸拘束ひびわれ試験のひびわれ幅

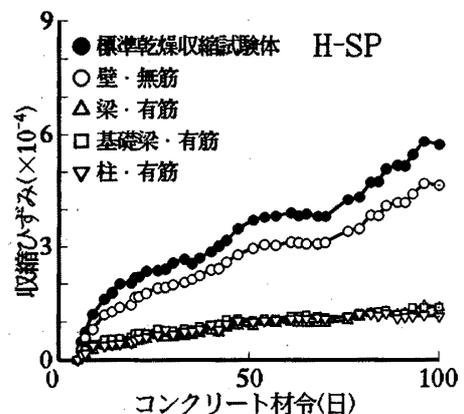


図9 壁試験体各部位の自由乾燥収縮ひずみ

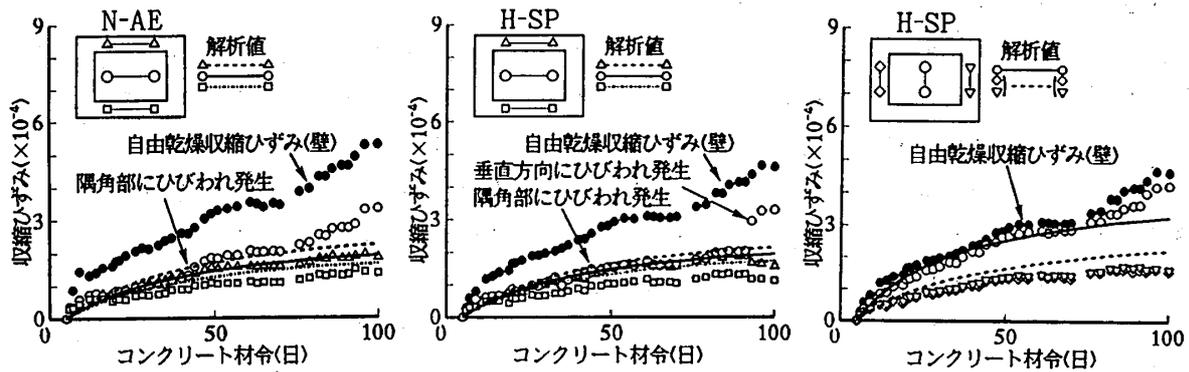


図10 壁試験体の水平および垂直方向のひずみ

(2) 各部位のひずみ

図10に梁、壁中央、基礎梁における水平方向および壁中央、柱における垂直方向のひずみの経時変化の1例を示す(記号は測定位置を示している)。外気温の温度補正を行っている。これらの図における●印の自由乾燥収縮ひずみと○印の壁ひずみの比較から、壁中央では水平方向の収縮が梁と基礎梁により大きく拘束され、垂直方向の収縮はほとんど拘束されていないことがわかる。

H-SPは最初に壁上隅角部にひびわれが発生したが、ひびわれ幅は大きく進展せずその後壁に垂直方向のひびわれが生じた。そのひびわれの発生により、水平方向の拘束が解放されているのがわかる。

一方、N-AEとH-AEはH-SPと異なって、壁の隅角部に生じたひびわれがかなり大きく進展したために水平方向の拘束が緩和され、垂直方向には小さなひびわれが生じたものの大きなひびわれの発生には至っていない。

なお、図中の曲線は各部位の無筋コンクリートの乾燥収縮の実験曲線を用いて、有限要素法によって求めたクリープ解析[4]値であるが、実測ひずみと概ね一致している。

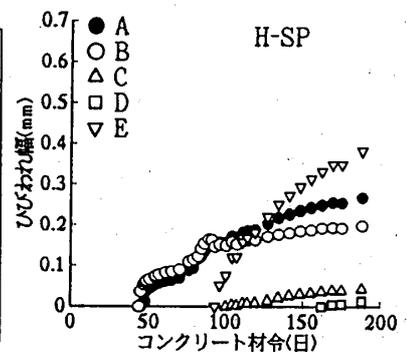
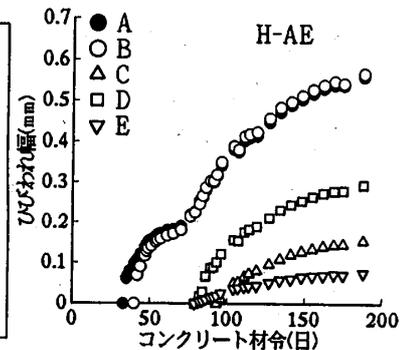
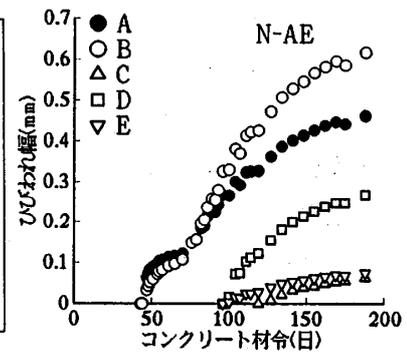
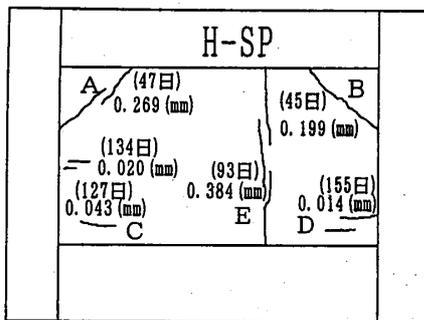
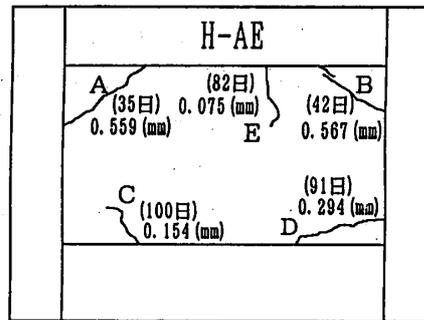
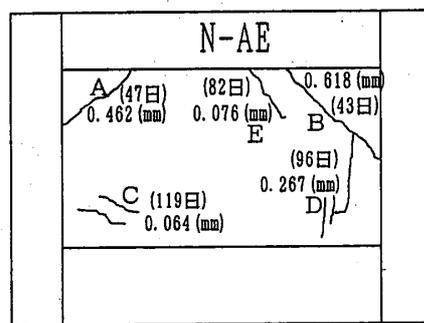


図11 壁体のひびわれ状況 図12 壁体のひびわれ幅の経時変化

(3) ひびわれ状況とひびわれ幅

図11に壁部の表裏面を貫通したひびわれの発生状況を示す。図中の数値は材令188日におけるひびわれ幅(mm)を、()内の数値はひびわれ発生時の材令を示す。また図12に壁部に生じた主なひびわれの中央付近(最も幅の大きい位置)での幅の経時変化を示す。

N-AE, H-AEは、梁および柱部の拘束によって上部隅角部に大きな斜めひびわれが発生し、下部隅角部にもひびわれが生じている。また垂直ひびわれも梁近傍の上部のみに生じている。

一方H-SPは上部隅角部に斜めひびわれが発生後、梁下端から壁の上下を横切って基礎梁上端に至る大きな垂直ひびわれが発生した。その後下部隅角部にもひびわれが生じている。H-SPのみに大きな垂直ひびわれが生じたのは、上部隅角部に生じたひびわれがN-AE, H-AEに比べ比較的小さく、N-AE, H-AEでは水平方向のひずみが梁、基礎梁から解放されるのに対して、H-SPでは拘束されているためである。ひびわれ幅の大きさを比較するとH-SPが他に比べて抑制されていると云える。

(4) 拘束収縮応力度(クリープ解析値)と割裂引張強度

図13に収縮応力解析値の経時変化を示す。前述のように一軸拘束ひびわれ試験では割裂強度の約60%の応力でひびわれが生じた。その応力比を解析結果に適用するとN-AE, H-AEでは材令20日でひびわれが生じることになるが貫通ひびわれが生じたのは、収縮解析値がコンクリートの割裂強度を多少超えてからであった。この原因としては、微細なひびわれ発生が一軸拘束試験体では直ちに貫通ひびわれに結びつくが、壁試験体の場合には直ちに貫通ひびわれにつながらず、むしろ拘束度が低下し応力緩和を生じさせるためと考えられる。

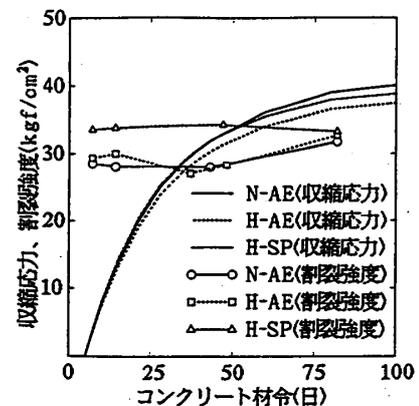


図13 コンクリート応力と割裂引張強度

4. まとめ

高性能A E減水剤を使用した早強コンクリートの乾燥収縮によるひびわれの特性を、一軸拘束試験と壁試験体によって調べた6カ月間の本実験結果をまとめると次のようになる。

- 1)高性能A E減水剤を用いた早強コンクリートの乾燥収縮は、A E減水剤を用いた普通コンクリートの87.3%、A E減水剤を用いた早強コンクリートの93.8%に低減できた。
- 2)ひびわれ発生時期は一軸拘束試験と壁試験ともに、A E減水剤を用いた早強コンクリートが最も早く、高性能A E減水剤を用いた早強コンクリートとA E減水剤を用いた普通コンクリートとはほぼ同時期となった。
- 3)ひびわれ幅は一軸拘束試験と壁試験ともに、A E減水剤を用いた普通コンクリートとA E減水剤を用いた早強コンクリートとほぼ同じで、高性能A E減水剤を用いた早強コンクリートが最も制御され、高性能A E減水剤早強コンクリートの一軸拘束試験における材令6ヶ月でのひびわれ幅はA E減水剤普通コンクリートの89.3%であった。

謝辞：本研究は綿長谷工コーポレーションと崎竹本油脂との工期短縮化工法に関する共同研究の一環として行ったものであり、両社には多大な協力をいただいたことを記して謝意を表します。

参考文献

- [1]鈴木計夫ほか：高流動化剤の工期短縮への応用に関する実験的研究，第6回コンクリート工学年次論文集，pp.13~16，1984
- [2]仕入豊和・青柳征夫・川瀬清孝：コンクリートのひびわれ試験法(案)，コンクリート工学，Vol.23，No.3，pp.40~44，1985
- [3]鈴木計夫・大野義照ほか：コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験，第3回コンクリート工学年次論文集，pp.25~28，1981
- [4]鈴木計夫・大野義照・三浦義礼：コンクリートの一軸拘束ひびわれ試験と壁試験体の収縮ひびわれ性状，コンクリート工学年次論文報告集，第10巻第2号，1988.6
- [5]Neville, A.M.: Creep of Concrete Plain, Reinforced and Prestressed, North-Holland, 1970