

論文 少量の合成短繊維による収縮ひび割れの抑制機構

細田 暁^{*1}・高梨 大介^{*2}・高木 亮一^{*2}・我彦 聡志^{*3}

要旨：比較的少量の合成短繊維を添加することで、ペーストのプラスチック収縮ひび割れが抑制されることを示した。繊維の物性を種々変化させたプラスチック収縮ひび割れ試験結果とブリーディング試験結果から、繊維がペースト中の水分を捕捉してペーストの体積変化が抑制されることと、架橋効果によりプラスチック収縮ひび割れが抑制されるとの考察を示した。また、JIS A 1151 に準じた試験を行い、コンクリートの拘束収縮ひび割れに対しても少量の繊維がひび割れ抑制効果を発揮することを示した。

キーワード：合成短繊維，収縮ひび割れ，ブリーディング抑制，親水性処理，繊維長さ

1. はじめに

コンクリートの剥落対策で少量の合成短繊維が添加される事例が増えてきている。JR 東日本の剥落対策^{1), 2)}は、設計・施工・検査の各段階における対策をとった上で、さらに少量の合成短繊維を添加することとしている。そして、実構造物の剥落対策にすでに使用されている各種の合成短繊維は、ペーストのプラスチック収縮ひび割れを抑制することを筆者らは確認している³⁾。

一般に短繊維をコンクリートに添加することで、ひび割れ発生後のひび割れ分散性が向上したり、ひび割れ幅が抑制されることは従来から知られている。しかし、あたかも膨張材を添加したかのように、少量の合成短繊維がペーストやコンクリートのひび割れ抵抗性を向上させる可能性があるのである。このような効果が明らかにされれば、すでに剥落対策に使用されており、少量で施工性に与える影響も小さいために、合成短繊維は汎用的にコンクリートのひび割れ対策に用いられる可能性がある。また、ひび割れ抑制のメカニズムが解明されれば、最適な繊維の使用・開発も可能となる。

本研究では、プラスチック収縮ひび割れ試験

とブリーディング試験を通して、繊維がペーストのプラスチック収縮ひび割れを抑制するメカニズムについて考察を行う。また、コンクリートの乾燥収縮を拘束することによりひび割れを発生させる JIS A 1151 により、コンクリートの収縮ひび割れに対しても少量の合成短繊維がひび割れ抵抗性を向上させることを示す。

2. 実験概要

筆者らは既報⁴⁾において、少量の合成短繊維がコンクリートのブリーディングを抑制することを示した。本研究では、そのブリーディング試験結果の中で合成短繊維のプラスチック収縮ひび割れ抑制機構と関連するものを再度取り上げる。

また、ブリーディング試験結果と関連付けて、ポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維）を用いてペーストのプラスチック収縮ひび割れ試験を行った。これらの結果を総合して、プラスチック収縮ひび割れを繊維が抑制する機構について考察する。

さらに、単位水量が 220kg/m^3 の配合で JIS A 1151 により拘束収縮ひび割れ試験を実施し、ナイロン繊維と PP 繊維の収縮ひび割れ抑制効果を

*1 横浜国立大学大学院 工学研究院 助教授 博（工）（正会員）

*2 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム専攻（正会員）

*3 横浜国立大学工学部 建設学科

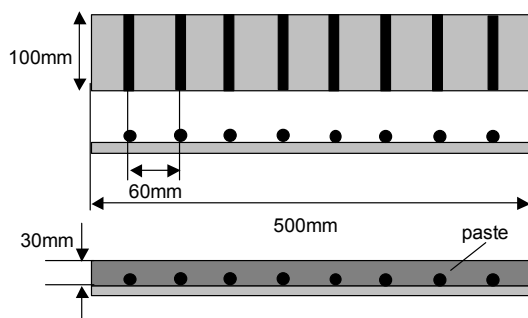


図-1 プラスチック収縮ひび割れ試験体

調べた。

2.1 プラスチック収縮ひび割れ試験

図-1 に示すように、鋼板に拘束体として異形鉄筋(D10)を溶接し、それを型枠の底面として、厚さ 30mm のペーストを打設した。ペーストは普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 30%のものである。以下に説明するシリーズ A, シリーズ B は異なる時期に実施し、用いたセメントは異なるロットのものである。しかし、どちらのセメントも密度は 3.16g/cm^3 、比表面積は $3300\text{cm}^2/\text{g}$ である。

繊維はペーストに体積比で 0.3% を添加した。その理由は、先に述べた剥落対策²⁾においては、繊維をコンクリートの体積比で 0.1% 以下で使用しており、これをコンクリート中のペーストに対する体積比に換算すると約 0.3% 程度となるためである。

(1) シリーズ A

プラスチック収縮ひび割れ試験のシリーズ A では、PP 繊維を使用した。繊維は棒状の繊維で、表面に物理的な突起などを有していない。また、繊維断面を円形と仮定したときの計算上の直径が $65\mu\text{m}$ である。

シリーズ A では、後に述べるブリーディング試験結果と関連させて試験条件を決定した。二つ大きな着目点がある。着目点の一つは、繊維表面の親水性処理の有無である。親水性処理とは、もともと疎水性の PP 繊維に対してペーストとのなじみを良くするために表面を化学薬品でコーティングしたものである。もう一つの着目点は、繊維の添加時期である。標準的なものは

表-1 プラスチック収縮ひび割れ試験 (シリーズ A)

供試体番号	繊維種類	親水性処理	ペースト体積に対する繊維の体積割合	繊維添加時期	繊維長
1	No Fiber	—	—	—	—
2	PP65-12	○	0.30%	練混ぜ後	12mm
3	PP65-12NC	×	0.30%	練混ぜ後	12mm
4	PP65-12	○	0.30%	練混ぜ水添加前	12mm
5	PP65-12NC	×	1.00%	練混ぜ後	12mm
6	PP65-6NC	×	0.30%	練混ぜ後	6mm

ペーストを練混ぜた後に繊維を添加し、それに対して練混ぜ水を加える前に繊維とセメントを空練りしたもの(先添加)をパラメータに加えた。その他、繊維添加量、繊維長を短くしたものなどを加え、試験を行った。試験体は各パラメータに対して 1 体である。

ペーストを型枠内に充填した直後から、温度 30°C 、相対湿度 30% の恒温恒湿槽に入れた。30 分後にペーストの表面をコテで長さ方向に 1 往復ならした。打設後 30 分経過するまでに、場所によって、ペースト表面に鉄筋位置に沿って非常に小さな沈下ひび割れが認められた。コテによるならしは沈下ひび割れをなくす配慮であり、ならした後に数時間で発生するひび割れをプラスチック収縮ひび割れであると判断した。ひび割れ発生材齢を計測し、ひび割れ総面積(ひび割れ幅×ひび割れ長さ)を算出した。

(2) シリーズ B

シリーズ B では、シリーズ A と同じ PP 繊維で親水性処理の有るものを用いた。繊維の長さに着目し、12mm, 6mm, 2mm のもので試験を行った。試験方法はシリーズ A と同様であるが、恒温恒湿層内の温度は 32°C 、湿度は 28% であった。試験体は各パラメータに対して 2 体である。

表-2 コンクリートの使用材料

材料	物性値など
普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm^3 , 比表面積 $3290\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	千葉県君津市法木産, 密度 2.61g/cm^3 , 吸水率 1.57%, 粗粒率 2.58
粗骨材	埼玉県秩父郡両神村産, 密度 2.72g/cm^3 , 吸水率 0.60%, 粗粒率 6.58

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 剤 (ml/m ³)
20	22	55	1.6	65	220	400	1087	603	300

2.2 コンクリートの収縮ひび割れ試験

これまでに少量の合成短繊維がプラスチック収縮ひび割れを抑制することは筆者も報告しており³⁾、本研究でそのメカニズムの解明に迫ろうとしている。しかし、コンクリートの収縮ひび割れを抑制することについてはデータがほとんどない。唯一、上田らがナイロン繊維を用いて JIS A 1151 に準じた試験を行い、繊維の添加によりひび割れ発生材齢が遅くなることを示している⁵⁾。

本研究では、上田らの研究を参考にし、JIS A 1151（拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法）に準じた試験を実施した。繊維としては、ナイロン繊維（直径 19 μm、繊維長 12mm）と PP 繊維（直径 28 μm、繊維長 12mm）を用いた。PP 繊維はプラスチック収縮ひび割れ試験で用いたものとは異なるが、親水性処理は有するものである。繊維の添加量はコンクリートとの体積比で 0.1%とした。

コンクリートに使用した材料を表-2 に、またコンクリートの配合を表-3 に示した。単位水量を 220kg/m³ とかなり多くし、その条件で適切な

フレッシュ性状を確保するために細骨材率を 65%と大きくしたのが配合上の特徴である。

型枠は JIS A 1151 で規定されたものを用いた。脱枠は材齢 1 日で行い、温度 20±2℃、湿度 60±5%の室内で乾燥させた。拘束形鋼のひずみ、および同配合の角柱供試体（100×100×400mm）の自由収縮ひずみを計測した。

3. ブリーディング試験結果

ブリーディング試験の詳細な結果は既報⁴⁾を参照されたいが、PP 繊維、ナイロン繊維、PVA 繊維のすべてでブリーディング抑制効果が確認された。また、PP 繊維に関しては、0.02vol%（コンクリートに対する体積比）のごく少量から抑制効果が認められ、添加量が増加するにつれて抑制効果も大きくなったが、頭打ちの傾向が見られた。

3.1 繊維添加時期の影響

図-2 は PP 繊維（直径 300 μm）を 0.1vol% 添加し、繊維の添加時期の影響を見たものである。繊維の添加時期はコンクリート練混ぜ後に添加したもの（後添加）と、練混ぜ水を加える前に添加してセメントおよび細骨材と空練りしたものの（先添加）である。

後添加の場合は顕著にブリーディングを抑制しているが、先添加の場合はほとんどブリーディング抑制効果がない。この原因は現時点では明らかとなっていない。しかし、現在の剥落対策²⁾などでは、合成短繊維はアジテータ車に直接投入して高速攪拌により分散しているため、実施工においては繊維のブリーディング抑制効果は期待できると思われる。

3.2 繊維の親水性処理の影響について

図-3 は、PP 繊維（表-1 に示したものと

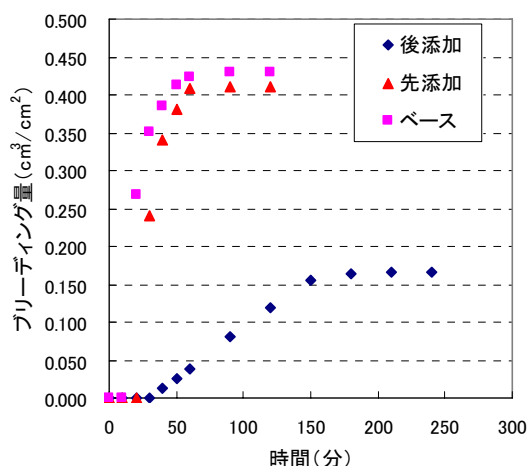


図-2 ブリーディング抑制効果に及ぼす繊維の添加時期の影響（PP 繊維，0.10%）

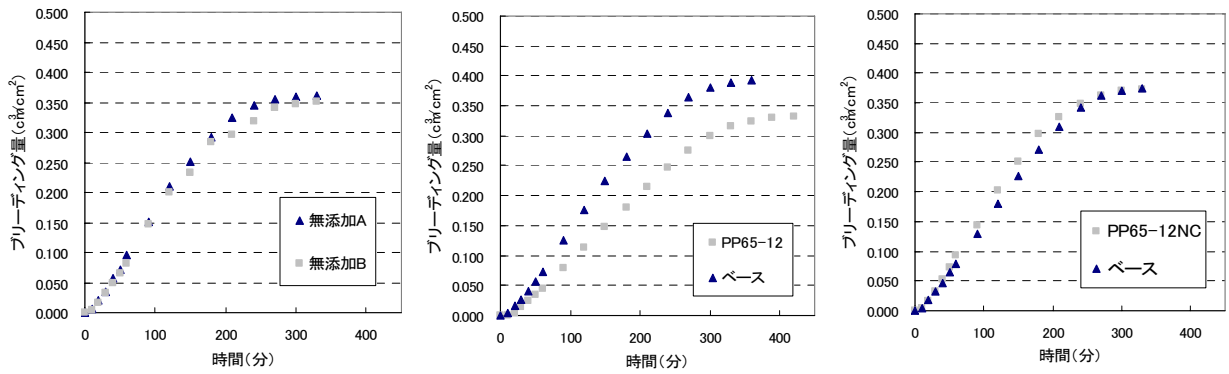


図-3 PP 繊維の親水性処理がブリーディング抑制効果に及ぼす影響

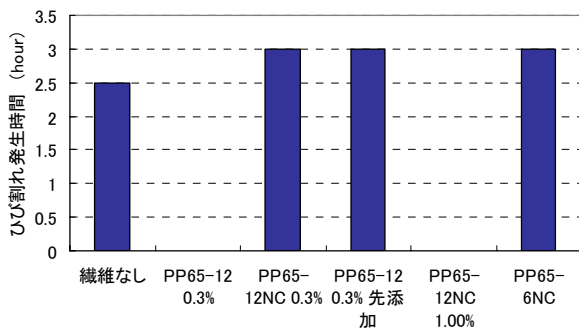


図-4 ひび割れ発生材齢 (シリーズ A)

じ) の親水性処理の影響を調べたものである。ブリーディング試験の精度を高めるために、1バッチのコンクリートを 2 つに分けて繊維添加とベースコンクリートを比較した。PP 繊維が親水性を持つ場合はブリーディング抑制効果が認められるが、親水性処理を施さない場合は効果がほとんどない。

この親水性の有無に関する結果から、少量の合成短繊維がブリーディングを抑制する機構を考察した。ブリーディングはコンクリート中で水が上方に移動する現象であるが、繊維がその移動の障害となって抑制するのではなく、繊維がコンクリート中の水分を表面に捕捉することにより抑制されると考えたのである。

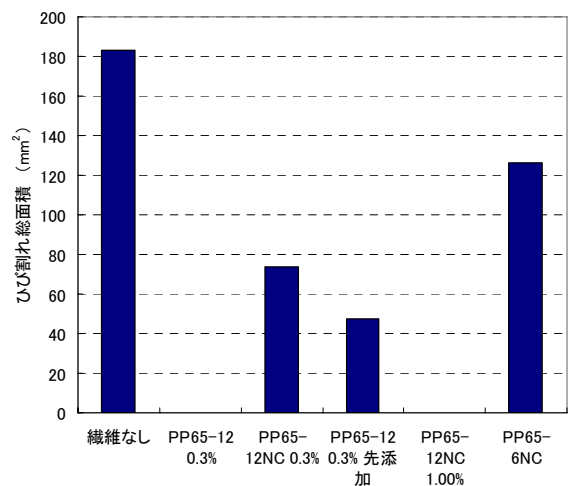


図-5 ひび割れ総面積 (シリーズ A)

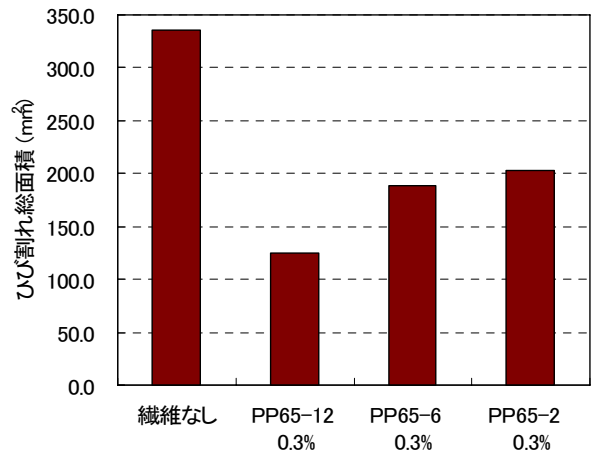


図-6 ひび割れ総面積 (シリーズ B)

4. プラスチック収縮ひび割れ試験結果

ひび割れが発生した場合は図-1 に示す拘束鉄筋とほぼ同じ位置に発生した。

図-4 にシリーズ A のひび割れ発生材齢を示した。また、図-5 には材齢 24 時間におけるひび割れ総面積を示した。これらを見ると、親水

性処理の有る繊維を 0.3% 添加した場合は、ひび割れが発生しなかったことが分かる。これに対して、親水性処理の有る繊維 0.3% を先添加した場合と、親水性処理の無い繊維 0.3% を添加した場合は、ひび割れが発生した。これら 2 つはブリーディング抑制効果の無かった条件であり、

その条件ではプラスチック収縮ひび割れの抑制効果も減少したのである。さらに図-5は、親水性処理の無い繊維を1.0%と多量に添加するとひび割れが発生しなかったことを示している。

これらの結果とブリーディング試験結果を合わせて、PP繊維がプラスチック収縮ひび割れを抑制する機構について以下のように推察した。

ブリーディング試験の結果より、繊維はペースト中の水分を繊維の表面に捕捉していると考えられる。また、ブリーディング試験で抑制効果の無かったパラメータは、プラスチック収縮ひび割れ抑制効果も小さかったことから、ペースト中の水分が繊維表面に捕捉されることがプラスチック収縮ひび割れの抑制機構に関連していると考えた。

ブリーディング抑制効果の無かった条件（PP65-12NC 0.3%およびPP65-12 0.3%先添加）においても、ひび割れ幅は抑制されていることから、繊維の架橋効果がプラスチックひび割れ抑制機構の一つであると考えられる。そのため、親水性処理の無い繊維を多量に添加した場合は、架橋効果が大きくなりひび割れが発生しなかったものと思われる。もう一つの効果は、親水性処理が有る場合の水分捕捉効果である。

図-6は、親水性処理の有る繊維の繊維長を変化させた場合の結果である（シリーズB）。繊維長2mmと架橋効果がほとんど期待できないと思われる場合でも、繊維を添加しない場合に比べるとひび割れ幅が抑制されている。このことから、繊維が親水性処理を持つ場合、ペースト中の水分が捕捉され、ペーストの体積収縮変化が小さくなることにより、プラスチック収縮ひび割れが抑制される機構が存在するのではないかと推察した。

図-6より、繊維長2mmの場合と6mmの場合でひび割れ総面積がほとんど同じである。繊維長2mmにおいて架橋効果はほとんどないと考えていたが、6mmでも架橋効果はほとんどないと考えてよいであろう。

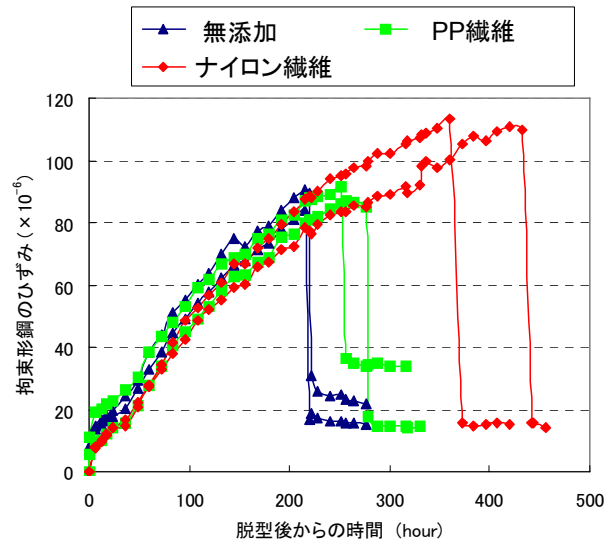


図-7 拘束形鋼のひずみ

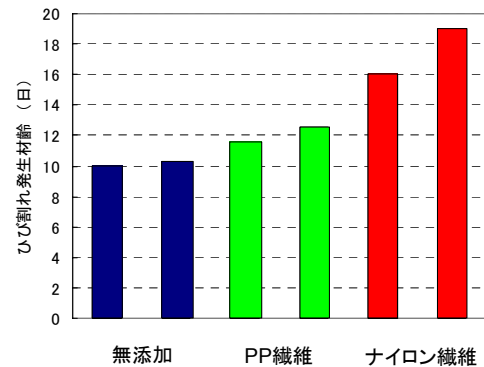


図-8 ひび割れ発生材齢

5. コンクリートの収縮ひび割れ試験結果

図-7に、JIS A 1151に準じたコンクリートの収縮ひび割れ試験での拘束形鋼のひずみを示した。ひずみが大きく低下したところでひび割れが発生している。ひび割れ発生材齢は、2体の平均で無添加が10.1日、PP繊維が12日、ナイロン繊維が17.5日となった。少量の繊維を添加することで、コンクリートのひび割れ抵抗性が向上したのである。特にナイロン繊維の場合において、ひび割れ発生時の拘束形鋼のひずみも大きくなっており、ひび割れ発生時のコンクリートの引張応力が大きくなっていることを示している。一般に、短繊維をコンクリートに添加すると、架橋効果によりひび割れ発生後にひび割れを分散させる効果やひび割れ幅の低減効果はよく知られている。しかし、本研究のように少

量の添加量において、ひび割れ抵抗性を向上させる効果はこれまでほとんど報告されていない。あたかも膨張材を添加したかのように、少量の短繊維によりコンクリートのひび割れ抵抗性が向上したのである。

上田らは、ナイロン繊維を用いて本研究と同様の試験を行うことでひび割れ発生材齢が遅くなることを示している⁵⁾。さらに、圧縮強度、引張強度、ヤング係数、収縮ひずみに対して繊維の添加がほとんど影響を与えないことから、繊維の架橋効果がコンクリートの微細なひび割れの進展を抑制したために、ひび割れ発生材齢が遅れたと考察している。

しかし、本研究のプラスチック収縮ひび割れの結果を見ると、繊維がコンクリート中の水分を捕捉し、ごく若材齢における体積変化が抑制されることによる影響もあるのではないかと思われる。特に、本研究で用いたナイロン繊維は直径が $19\mu\text{m}$ と非常に細く、少量の添加でも総表面積が非常に大きくなる。水分捕捉効果も大きくなるものと考えている。今後、このような観点からコンクリートのひび割れ抵抗性向上の機構の解明に取り組む予定である。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 少量の合成短繊維はコンクリートのブリーディングを抑制する。しかし、PP 繊維を練混ぜ水より先に添加する場合と、PP 繊維が親水性を持たない場合は、ブリーディング抑制効果がほとんどなかった。
- (2) 少量の PP 繊維はペーストのプラスチック収縮ひび割れを抑制する。上記(1)のブリーディング抑制効果がなかった条件では、プラスチック収縮ひび割れの抑制効果も低減した。また、繊維長が 2mm と極端に短くした場合でもプラスチック収縮ひび割れ抑制効果が認められた。
- (3) 上記(1)と(2)の結果から、短繊維はペースト中の水分を表面に捕捉し、それによりコンクリートのブリーディングが抑制され、またペーストの体積変化が抑制されるためにプラスチック収縮ひび割れが抑制されると考察した。また、繊維の架橋効果もプラスチック収縮ひび割れを抑制する要因であるとの考えを示した。
- (4) 少量の短繊維により、コンクリートの収縮ひび割れに対する抵抗性が向上することを示した。特に直径の細いナイロン繊維の効果が大きかった。

【謝辞】本研究は、文部科学省の科学研究費補助金(課題番号 16760430, 研究代表者:細田 暁)によって実施した。

参考文献

- 1) 菅野貴浩：JR 東日本におけるコンクリート構造物の長寿命化への取り組み、コンクリート工学, vol.40, No.5, pp.74-81, 2002.5
- 2) 細田 暁, 菅野貴浩, 石橋忠良：合成短繊維添加によるコンクリート片の剥落対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.275-280, 2003
- 3) 細田 暁, 秋浜圭太：合成短繊維補強コンクリートの曲げタフネスと収縮ひび割れ抑制効果, セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.413-418, 2004
- 4) 高梨大介, 細田 暁, 臼井明子：合成短繊維添加によるブリーディングの抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.253-258, 2005
- 5) 上田賢司, 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 広原寿竜：短繊維補強コンクリートの強度特性と乾燥収縮ひび割れ, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.211-216, 2001