

論文 繊維補強コンクリートの材料分離に関する実験的研究

上原 匠^{*1}・平原 英樹^{*2}

要旨：スランプフロー45cm 程度の鋼繊維補強コンクリートを対象に、材料分離の評価とフレッシュ性状の違いが硬化後の物性に及ぼす影響について、実験を基に検討した。実験は、水粉体容積比と高性能AE減水剤の添加率を調整することで同程度のスランプフローを有する6配合を対象にした。実験から、鋼繊維補強コンクリートの材料分離の傾向が繊維無混入のコンクリートとは異なることと、材料分離の評価手法としてS I試験が鋼繊維補強コンクリートに対しても有効であるとの結果を得た。また、同一水セメント比で同程度のスランプフローを有しても、材料分離の有無により、硬化後の物性に差が生じることを確認した。

キーワード：鋼繊維，材料分離，高性能AE減水剤，水粉体容積比，S I試験

1. はじめに

繊維補強コンクリートは一種の靱性材料であるが、その靱性付与の効果が大きいにもかかわらず、普通コンクリートに比べ施工性が劣るため利用しにくい材料であった。現在は、高性能AE減水剤の性能の向上に加えて、「高流動コンクリート施工指針」¹⁾が発刊されたこともあり、実施工においても高性能AE減水剤を用いて施工性を改善した流動性の高い繊維補強コンクリートが、研究・開発され始めている²⁾。しかし、配合手法ならびにフレッシュ性状の把握方法や材料分離の評価手法などは確立されてなく、フレッシュ性状が硬化後の物性に与える影響についての検討も十分とは言えない。すなわち、個々の構造物を対象に研究されているのが現状である。

そこで本研究では、一般的なコンクリート構造物への適用も考慮して、高流動コンクリートの粗骨材を一部鋼繊維と置換して製作した鋼繊維補強コンクリートを対象に、材料分離の評価について

実験を基に検討した。さらに、フレッシュ時の材料分離の有無と強度特性の関係について把握を試みた。

2. 使用材料

表1に使用材料を示す。セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材および粗骨材は名古屋近郊の生コン工場で使用されている材料を用いた。本研究では、同程度のスランプフローを有するが、粘性や流動性などフレッシュ性状は異なる鋼繊維補強コンクリートを対象とするため、水粉体容積比と高性能AE減水剤の添加率を調整することで配合を検討することとした。また、フレッシュ時の材料分離の有無と硬化後の強度等との関係についても把握を試みた。そこで、水粉体容積比の調整には、結合剤とし

表1 使用材料

材料	種類	記号	物性・成分
セメント	早強ポルトランドセメント	C	密度:3.13g/cm ³ 、比表面積:4550cm ² /g
混和材	石灰石微粉末	LS	密度:2.73g/cm ³ 、比表面積:5090cm ² /g
細骨材	山砂	S	密度:2.56g/cm ³ 、吸水率:1.65%、粗粒率:2.77
粗骨材	砕石2005	G	密度:2.65g/cm ³ 、吸水率:0.61%、粗粒率:6.64
混和剤	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系
短繊維	鋼繊維	SF	密度:7.85g/cm ³ 、長さ:30mm、アスペクト比:50%

*1 名古屋工業大学助教授

工学部社会開発工学科 工博（正会員）

*2 名古屋工業大学文部技官

工学部社会開発工学科（正会員）

てのセメント以外に、非結合材として化学的な活性の小さい石灰石微粉末を粉体として用い、スランプフローの調整にはポリカルボン酸系の高性能 A E 減水剤を用いた。鋼繊維は長さ 30mm、アスペクト比 50% のインデント形を用いた。

3. 実験概要

3. 1 配合設計

材料分離の状態とその程度を把握し、評価を試みることから、対象とする鋼繊維補強コンクリートの配合は、材料分離の程度に差が生じるように設定した。そこで、本研究で検討する鋼繊維補強コンクリートは基本となる高流動コンクリートの粗骨材の一部を鋼繊維に置換して製造することから、山田らの配合を参考にした³⁾。繊維補強コンクリートは、繊維を混入することにより、コンシステンシーが変化し、スランプフローが小さくなることから、基本となる高流動コンクリートのスランプフローが 650mm 以上となるように、高性能 A E 減水剤の添加率を試し練りを基に決定した。表-2 に配合を示す。鋼繊維補強コンクリートの目標スランプフローは 450mm とし、目標強度は設定せず、水セメント比は 65.0, 53.4, および 47.6% の 3 水準とした。また、水粉体容積比は 1.19 と 0.81 の 2 水準とした。ただし、6 配合とも単位水量、単位粗骨材量、単位鋼繊維量は同じである。鋼繊維の混入率はコンクリートの容積比で 1% である。

3. 2 試験項目

練混ぜは強制練りミキサを使用し、鋼繊維は粗骨材の前に投入し、全材料投入後の練混ぜ時間を 2 分間とした。排出後 1 分間は静置した後、切り返してフレッ

シュコンクリートの試験に用いた。供試体の製作は、土木学会「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）」に準拠して各配合ごとに 3 本製作し、材齢 28 日までは標準水中養生を行った⁴⁾。

フレッシュコンクリートの試験の項目は、スランプフロー試験および空気量試験である。材料分離の評価は、スランプフロー試験、材料占有率試験、S I 試験、およびコンクリートのフロー試験を基に検討した。スランプフロー試験では、目視判断で材料分離を評価した。材料占有率試験は、スランプフロー試験の試料を用い、スランプフローの中心から半径 15cm 内外の骨材、鋼繊維、およびモルタルの占有率から、材料分離の評価を行う方法である。S I 試験では、モルタルの分離量から判断した。S I 試験とは、5mm のふるいによる粗骨材とモルタルとの分離抵抗性評価試験をさし、SI 値はパイプレータによって 30 秒間振動を与えた場合の（落下モルタル質量）／（全モルタル質量）の百分率である^{3),5)}。フロー試験では、ASTM C 124-66 のフロー試験装置を用いて、フロー値の伸びから材料分離の評価を試みた。

硬化後の強度試験の項目は、圧縮強度試験、弾性係数試験、および曲げ強度試験である。各試験は土木学会「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）」に準拠して行った⁴⁾。

4. 実験結果および考察

4. 1 フレッシュコンクリート

表-3 に試験結果を示す。スランプフローの

表-2 配合表

配合 No.	W/C (%)	水粉体 容積比	LS/(C+LS) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP添加率 C×(%)	
					W	P		S	G		SF
						C	LS				
1	65.0	1.19	38.1	54.9	167	257	158	911	748	79	2.4
2		0.81	56.9	49.8			339	742			
3	53.4	1.19	25.8	54.9	167	313	109	911	748	79	2.2
4		0.81	48.0	49.8			289	742			
5	47.6	1.19	17.8	54.9	167	352	76	911	748	79	2.0
6		0.81	42.3	49.8			257	742			

備考: SF の単位量は全体容積の 1% である

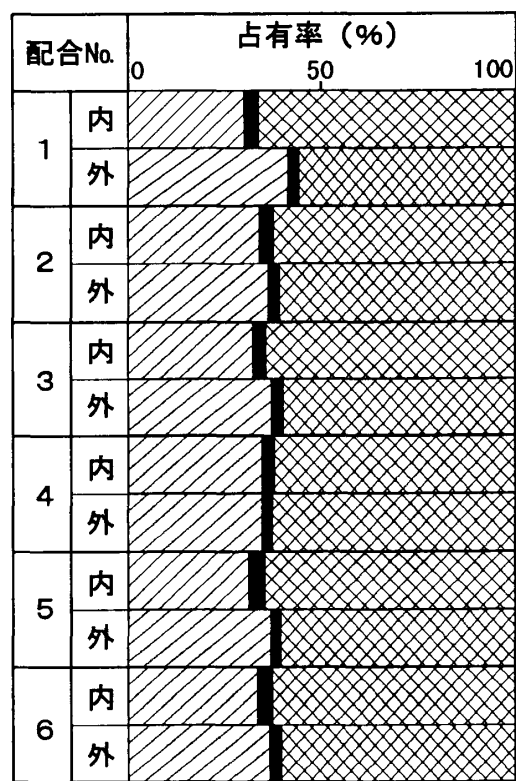
表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

配合 No.	スランブ (cm)	スランブフロー (mm×mm)	空気量 (%)	状 態 (目視)	材料占有率 (％)									SI ₃₀ (%)	フロー試験による フロー値の伸び (mm)
					内側			外側			内外差				
					G-in	F-in	M-in	G-out	F-out	M-out	Δ G	Δ F	Δ M		
1	21.0	450×420	3.2	やや分離	30.0	3.8	66.2	41.4	2.8	55.9	+11.4	-1.0	-10.3	57.4	225.0
2	22.0	415×415	5.0	良好	34.1	3.7	62.2	36.1	3.2	60.7	+2.0	-0.5	-1.5	45.1	145.0
3	19.5	500×495	3.5	分離	32.1	3.6	64.3	37.0	2.9	60.2	+4.9	-0.7	-4.1	57.5	185.0
4	23.5	530×475	4.0	良好	34.5	3.4	62.1	34.5	3.1	62.4	0	-0.3	+0.3	45.8	142.5
5	22.0	520×500	3.5	分離	31.4	3.9	64.8	36.8	2.7	60.4	+5.4	-1.2	-4.4	56.0	217.5
6	21.0	420×410	3.2	良好	33.7	3.6	62.7	36.8	3.0	60.2	+3.1	-0.6	-2.5	49.0	欠測

-in: 中心30cm内の材料占有率, -out: 中心30cm外の材料占有率

目視判断では、スランブフロー先端部に骨材と鋼繊維が伴わずモルタルだけで縁取られる帯が見られる場合を分離と判定した。配合No.1は一部にモルタルの帯が確認されたことから、やや分離と表記した。目視による材料分離の程度が大きいものは、No.3, No.5, No.1の順番であった。スランブフロー値は、No.4を除き材料分離と判定された場合にやや大き目の500mm程度を示し、良好と判定された場合は420mm程度と小さくなる傾向を示した。これはモルタルによるスランブフローの伸びに起因すると考えられる。

図-1に占有率試験結果を示す。スランブフロー試験結果の30cm内外での各材料の変化の少なさが材料分離の程度を表していると考えられる。内外差は、外側に多く存在する場合を正で表す。材料占有率の内外差からは、粗骨材の外側での増加傾向、鋼繊維とモルタルの減少傾向が顕著なほど材料分離の程度が大きいと推測される結果が得られた。一般に、スランブフロー試験結果に対する目視判断による材料分離は、粗骨材が中心に留まりスランブフロー先端部での粗骨材の均一な分散が見られない状態を判定の目安にするが、材料占有率試験では逆の結果となった。すなわち、繊維補強コンクリートの材料分離は、粗骨材は中心から遠くへ、鋼繊維とモルタルは中心に留まる傾向を示すことが実験から明らかとなった。このことは、鋼繊維に置換したことによる表面積の増加によりモルタルが拘束されることが原因と考えられ、繊維を投入することでスランブフローが小さくなる現象と一致する。粗骨材に着目すると、内外差の



▨ : 粗骨材、■ : 鋼繊維、▩ : モルタル

図-1 占有率試験結果

値が3%程度を基準に材料分離の有無が評価される結果となった。材料占有率試験結果、すなわち、材料占有率の内外差から、粗骨材に着目した材料分離の程度が大きいものは、No.1, No.5, No.3の順番で大きくなり、スランブフローの目視判断とは異なる結果となった。

図-2に材料分離評価試験結果の比較を示す。対象とした配合では、目視判断にしたがうと、SI値が50%を境に材料分離の有無が判定される結果となった。また、占有率試験結果での材料分離の評価もSI値50%を境とする判定と一致する結果となった。したがって、今回対象と

した配合に対しては、S I 試験は鋼繊維補強コンクリートの分離抵抗性の評価方法として有効であることが明らかとなった。

フロー試験によるフロー値の伸びは、表-3に示すように、材料分離が生じている配合では185mm以上、良好な配合では145mm以下

であった。スランプフローの伸びは、材料分離が生じたコンクリートの場合はモルタルがスランプフローの先端に常に存在するが、良好なコンクリートは粗骨材と鋼繊維が一体となって移動することが確認された。したがって、同じ外力を与えても、スランプフローの伸びは小さく現れると考えられる。今回の結果から、フロー試験による評価も可能であるとの見通しを得た。

4. 2 硬化コンクリート

表-4に硬化コンクリートの試験結果を示す。表に示す各試験結果は供試体3本の平均値である。圧縮強度と弾性係数は水セメント比が小さくなるにしたがって値が大きくなる傾向が見られるが、曲げ強度は水セメント比 53.4%の値が 65.0%より小さな値となった。

図-3に圧縮強度試験結果を示す。材料分離の有無に関わらず、供試体による値のバラツキは小さいとの結果となった。しかし、同一水セメント比における圧縮強度差は、材料分離の有無により、水セメント比 65.0%で 24.4N/mm²、53.4%で 18.8N/mm²、47.6%で 10.0N/mm²となった。検討した配合では、粉体としてセメントに加えて強度増進への影響の少ない石灰石微粉末を使用しているが、LS/(C+LS)=25%程度で、材齢 28 日強度は約 20%程度増進するとの報告がある⁹⁾。この場合石灰石微粉末の使用に起因する強度差は、水セメント比 65.0%で 8.9N/mm²、53.4%で 12.7N/mm²、47.6%で 15.7N/mm²とな

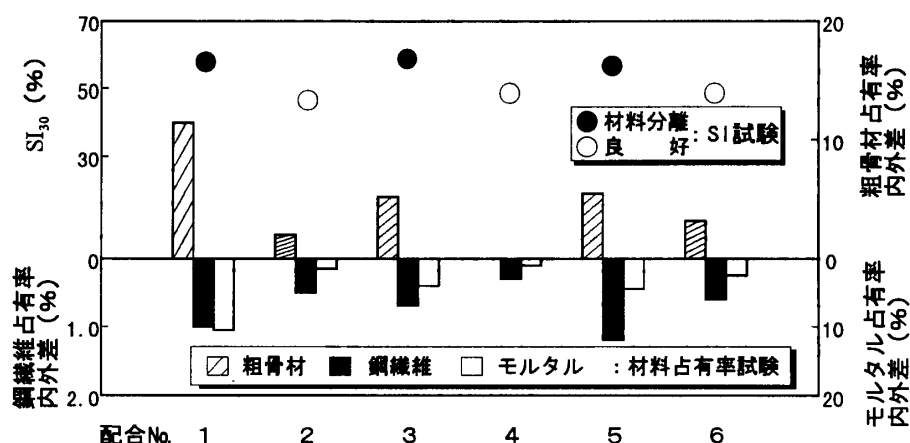


図-2 材料分離評価試験結果の比較

表-4 硬化コンクリートの試験結果

配合No.	W/C (%)	材料分離判定	硬化コンクリート		
			圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
1	65.0	やや分離	31.5	2.83	8.95
2		良好	55.9	3.44	8.98
3	53.4	分離	53.6	3.79	8.81
4		良好	72.4	3.87	8.79
5	47.6	分離	68.3	3.79	10.55
6		良好	78.3	3.92	10.54

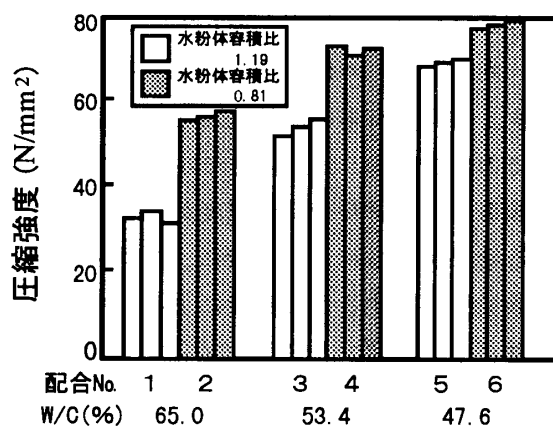


図-3 圧縮強度試験結果

る。ただし、山田らの配合による高流動コンクリートでは圧縮強度の差は見られず³⁾、また、筒井による石灰石粉を用いたコンクリートに関する研究でも、強度への影響はほとんど見られないと報告されている⁷⁾。水セメント比 65.0%の配合 No.2 の圧縮強度が 55.9N/mm² と一般的な水セメント比と強度の関係よりも大きくなっ

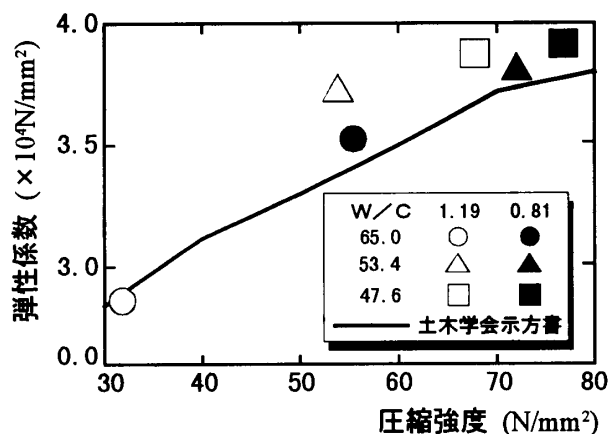


図-4 圧縮強度と弾性係数の関係

た原因については石灰石微粉末の影響も考えられる。しかし、今回の結果からは、石灰石微粉末の圧縮強度への影響が定量的に把握されていないことから、図に示される値の差は、材料分離が大きく影響していると考えられる。したがって、繊維補強コンクリートのフレッシュ時の状態が、硬化後の圧縮強度に大きく影響すると言えよう。ところで、圧縮強度試験結果は材料占有率からの判定に一致することから、繊維補強コンクリートの材料分離の評価はスランプフロー試験結果の目視判断だけでは不十分であると考えられる。

図-4に圧縮強度と弾性係数の関係を示す。弾性係数は圧縮強度に比例することから、材料分離の有無、すなわち、本配合での水粉体容積比の差は直接弾性係数に影響しないと考えられる。また、材料分離が認められないコンクリートの圧縮強度と弾性係数の関係は、示方書に提示される関係と一致することが確認された。

図-5に曲げ強度試験結果を示す。材料分離と判定した配合では、供試体による値のバラツキが大きく現れた。しかし、水セメント比53.4%の値は、材料分離の有無にかかわらず曲げ強度は小さく現れた。この原因については実験結果からは解明できなかった。

図-6に荷重-たわみ曲線を示す。図に示すように同一水セメント比の配合でも、材料分離と判定される場合には、供試体間の差が大き

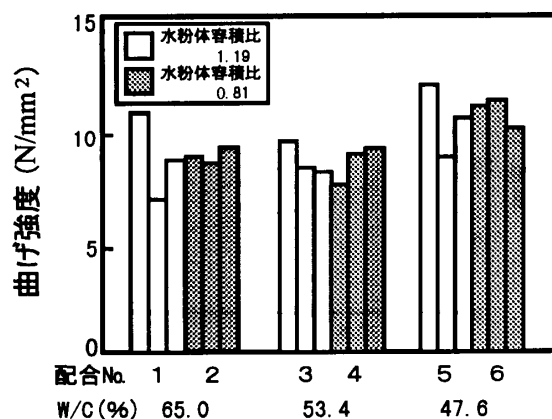


図-5 曲げ強度試験結果

く現れ、バラツキが大きくなるとの結果が得られた。したがって、繊維を混入することにより靱性の付与を目的にコンクリートを設計しても、材料分離の有無によりその効果には大きな差が生じると言えよう。

5. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 鋼繊維補強コンクリートの材料分離の傾向は、粗骨材が中心より外側へ、鋼繊維とモルタルが中心に留まる割合が大きくなる現象と捉えることができる。
- (2) 鋼繊維補強コンクリートを対象とした場合にも、振動時間を30秒に設定することでS I試験は有効である。今回対象とした配合においての材料分離の判定基準はS I値で50%程度である。
- (3) 同一水セメント比で同程度のスランプフローが得られても、材料分離の程度の違いにより、圧縮強度に差が生じ、曲げ強度試験では荷重-たわみ曲線のバラツキが大きくなることが実験より確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，1998
- 2) 野村朋宏他：鋼繊維を混入した高流動コンクリートの配合特性，コンクリート工学年次論

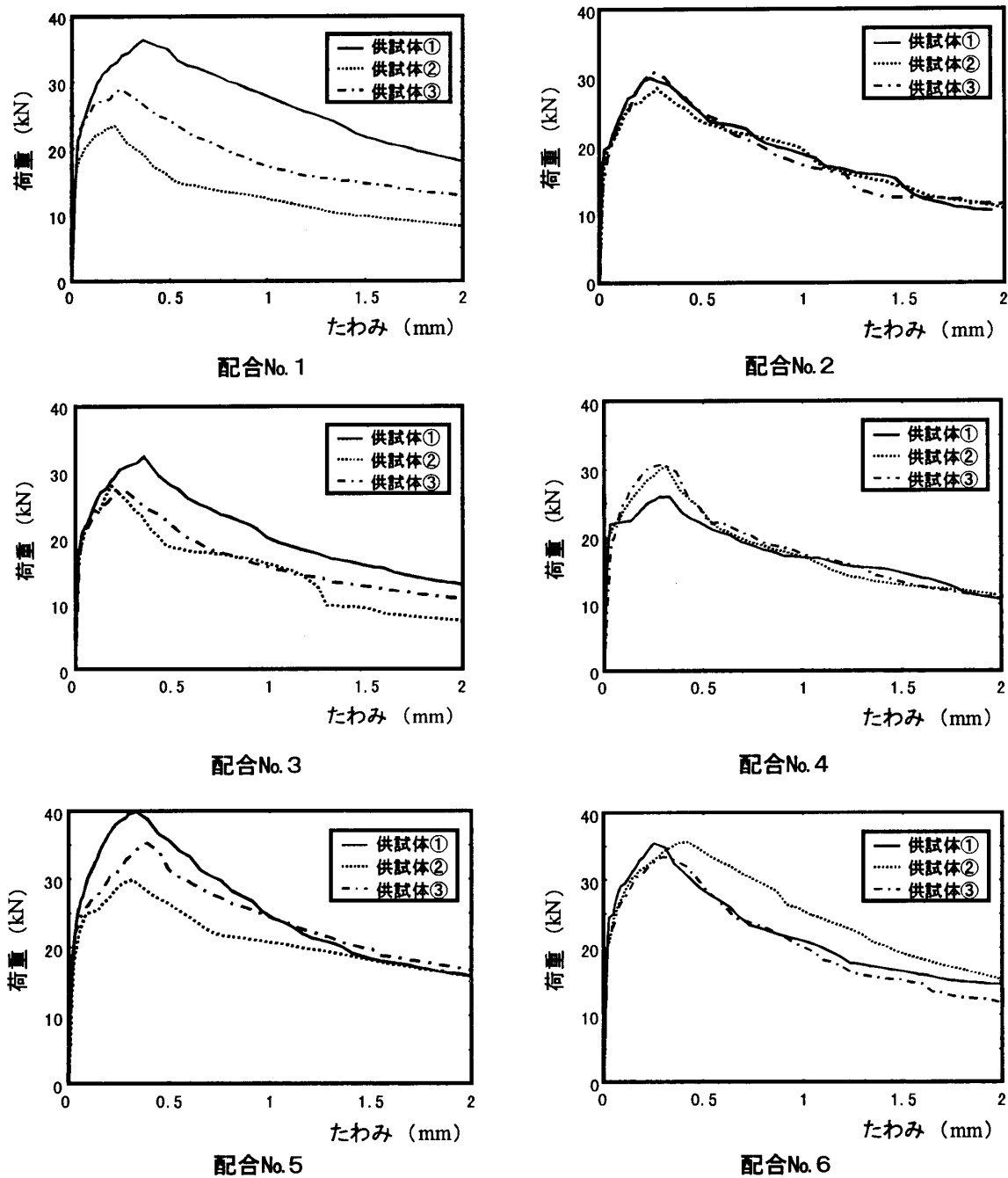


図-6 荷重-たわみ曲線

文報告集, Vol.19-1, pp.151~156, 1997

3) 山田尚義他: 高水セメント比における粉体系高流動コンクリートの物性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21-2, pp.457~462, 1999

4) 土木学会: 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針 (案), 1983

5) 上原匠他: 微粒珪砂を混入した高流動コンクリートの物性に関する研究, コンクリート工

学年次論文報告集, Vol.21-2, pp.469~474, 1999

6) 日本コンクリート工学協会: 「石灰石微粉末研究委員会報告」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20-1, pp.49~58, 1998

7) 筒井茂位: 石粉混入コンクリートの性質-石灰石粉を用いたコンクリートの性質-, 生コン技術大会研究発表論文集, 第10回, pp.95~100, 1999