

◆ 報 文 ◆

高強度鉄筋の曲げ加工性能に関する基礎的検討

中村英佑* 古賀裕久** 渡辺博志***

1. はじめに

コンクリート構造物の設計の合理化や耐久性の向上を目的として、高強度鉄筋の利用が検討されている。高強度鉄筋を広く普及し良質なコンクリート構造物を供給するためには、実験的根拠に基づいた明確な設計基準を定めておくことが必要である。

ここで、鉄筋の曲げ加工半径の取り方は、曲げ加工部の引張強度や定着強度に影響を及ぼすものであり、鉄筋コンクリート部材において鉄筋とコンクリートの一体性に関わる重要な項目である。鉄筋の曲げ加工半径の最小寸法は各種設計基準の構造細目において規定されているものである。ところが、高強度鉄筋の曲げ加工部の性質については十分に明らかにされていないのが現状である。

一方、こうした設計基準の確立にあたっては、国際標準との整合性についても考慮する必要がある。ISO19338¹⁾ は、コンクリート構造物の設計基準を定める際に、設計基準が有していなければならない必要事項を示したものである。ISO19338によれば、鉄筋の曲げ加工半径については、設計

基準において明示しなければならない構造細目の一つとされている。さらに、ISO19338では、これに適合するとみなされる国家規格をリストの形で明記している。ここには米国のACI318、ACI343、欧州のEurocode 2²⁾ に加え我が国のコンクリート標準示方書³⁾ が含まれており、これらの規格で採用されている最小曲げ加工半径の値が参考になるものと考えられる。しかし、鉄筋加工などを記述している構造細目については、規格間の相違があり、かつその根拠が明確にされていない。

以上のことから、本研究では、異なる曲げ内半径で加工した高強度鉄筋の材料試験を実施し、曲げ加工による鉄筋の引張強度に及ぼす影響を考察した。また、この実験結果に基づいて、日欧の鉄筋コンクリート用鋼材の曲げ内半径に関する規格を比較しつつ、高強度鉄筋に適した最小曲げ内半径を検討することを目的とした。

2. 鉄筋の曲げ加工性能に関する規格の日欧比較

鉄筋コンクリート用鋼材の曲げ加工性能について、我が国ではJIS⁴⁾ やコンクリート標準示方書、道路橋示方書・同解説書⁵⁾ に規格が示されている

Study on the Mechanical Properties of Bending Corner of High Strength Rebars

表-1 各規格における鉄筋の曲げ内半径の比較

JIS G 3112			コンクリート標準示方書		道路橋示方書		Eurocode 2		New-RC		
記号	曲げ角度	曲げ内半径	曲げ内半径		曲げ内半径		記号	Hooks, Bends, Loops 曲げ内半径	記号	曲げ角度	曲げ内半径
			フック	スターラップ	フック	スターラップ					
SR235	180°	1.5φ	2φ	1φ	2φ	1φ	S220	φ < 20 1.25φ φ ≥ 20 2.5φ			
SR295	180°	φ ≤ 16 1.5φ	2.5φ	2φ							
		φ > 16 2φ									
SD295A	180°	φ ≤ 16 1.5φ	2.5φ	2φ	2.5φ	2φ					
		φ > 16 2φ									
SD295B	180°	φ ≤ 16 1.5φ	2.5φ	2φ	2.5φ	2φ					
		φ > 16 2φ									
SD345	180°	φ ≤ 16 1.5φ	2.5φ	2φ	2.5φ	2φ					
		16 < φ ≤ 41 2φ									
		φ 51 2.5φ									
SD390	180°	2.5d	3φ	2.5φ			S400	φ < 20 2φ φ ≥ 20 3.5φ			
SD490	90°	φ ≤ 25 2.5φ	3.5φ	3φ				S500	φ < 20 2φ φ ≥ 20 3.5φ		
		φ > 25 3φ									
									USD685	90°	2φ
									USD785	180°	1.5φ
									USD980	90°	4φ
									USD1275	180°	2φ

る。高強度鉄筋に関しては、旧建設省のNew-RCプロジェクト⁶⁾において検討がなされている。一方、欧州では、「Eurocode 2: Design of Concrete Structures」に鉄筋コンクリート用鋼材の規格が示されている。これらを比較するため、表-1に各規格で明示されている鋼材種類とその曲げ内半径を示す。これより、我が国のJIS、コンクリート標準示方書、道路橋示方書・同解説書と欧州のEurocode 2に規定されている鉄筋コンクリート用鋼材の曲げ内半径には相違点があることが読みとれる。より詳細な比較のため、図-1に降伏点400N/mm²程度の鉄筋の曲げ内半径についてEurocode 2とコンクリート標準示方書の規定値を図示する。例えば、せん断補強筋として鉄筋径10mmの鉄筋を用いる場合を考えると、我が国ではコンクリート標準示方書に準拠し2.5φ(φ：鉄筋の直径)の曲げ内半径で曲げることができるのに対し、欧州では2φまで曲げることが可能である。すなわち、コンクリート構造物の設計を行う際、日欧どちらの規格を採用するかにより、帯筋の曲げ内半径に違いが生じることとなる。こうした問題意識の下、本研究では、高強度鉄筋の曲げ加工性能を材料試験により検討する。

3. 実験概要

3.1 使用材料

本研究では高強度鉄筋の曲げ加工性能を検討することを目的としているため、国内で鉄筋コンクリート用鋼材として一般的に用いられているSD345よりも強度の高いSD390、SD490、SD785、SD1275を用いて実験を行った。図-2に各鉄筋の表面形状を示す。ここでわかるように、本研究で用いた各鉄筋の表面形状はそれぞれ異なっており、SD390とSD490の表面には大きなふしがあるのに対し、SD785とSD1275の表面のふしは比較的小さい。そこで、ふしの有無が試験結果に与える影響を評価するため、ふしのない丸鋼SR235についても同様の試験を実施することとした。これらの

検査証明書における機械的性質を表-2に示す。

3.2 実験内容

高強度鉄筋の曲げ加工性能を検討するため、まず各鉄筋を数種類の曲げ内半径で図-3のように各3本を90°に曲げ加工し、90°曲げ部の内側と外側における亀裂の有無を日視と磁粉探傷試験により確認した。磁粉探傷試験とは、試験体を磁化し、蛍光着色された細かな磁粉を溶液にしてその磁界に流すことにより、亀裂による磁力線の乱れ部分に蓄積した蛍光磁粉を観察し亀裂の有無を調査するものである。次に、これらの鉄筋の引張試験を行い、引張強度および破断状況、破断位置を記録した。破断位置の記録は、90°曲げ部およびそれ以外で分類した。また、曲げ戻しの影響を検

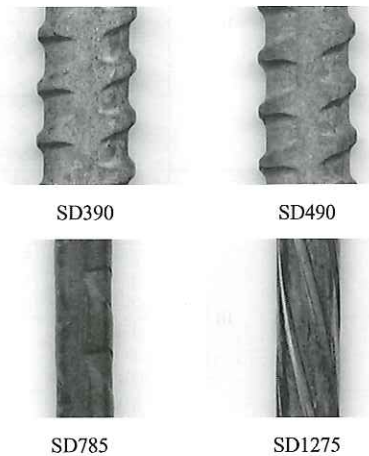


図-2 鉄筋の表面形状

表-2 鉄筋の機械的性質

鋼種	直径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
SR235	16	198.6	330	474
SD390	16	198.6	463	650
SD490	16	198.6	557	743
SD785	10	71.3	939	992
SD1275	10.7	90.05	1388	1477

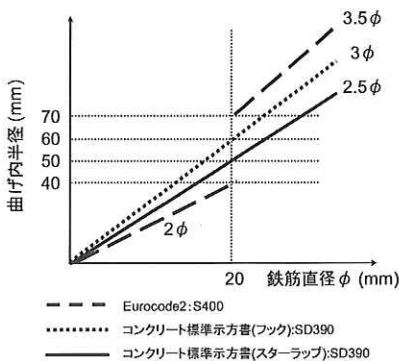


図-1 鉄筋の曲げ内半径の比較

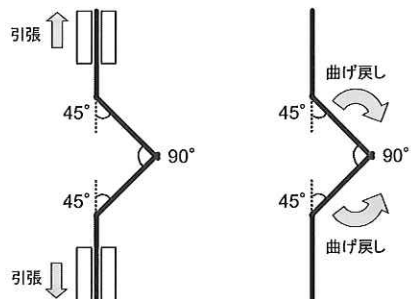


図-3 鉄筋の加工形状

表-3 磁粉探傷試験と引張試験の結果

鋼種	曲げ内半径	鉄筋径 (mm)	番号	磁粉探傷試験による曲げ内側の亀裂の有無	引張試験		破断状況		
					引張強度 (N/mm ²)	検査証明書の引張強度に対する割合	破断位置 (90°曲げ部 or その他)	破断面での紋りの有無	破断後の曲げ内側の亀裂の有無
SR235	1φ	16	①	×	453	96%	その他	○	×
			②	×	452	95%	その他	○	×
			③	×	455	96%	その他	○	×
	1.5φ		①	×	454	96%	その他	○	×
			②	×	455	96%	その他	○	×
			③	×	450	95%	その他	○	×
2φ	①	×	455	96%	その他	○	×		
	②	×	452	95%	その他	○	×		
	③	×	452	95%	その他	○	×		
SD390	1.5φ	①	×	656	101%	90°曲げ部	×	○	
		②	疑	506	78%	90°曲げ部	×	○	
		③	疑	387	60%	90°曲げ部	×	○	
	2φ	①	×	660	102%	90°曲げ部	疑	○	
		②	×	658	101%	90°曲げ部	疑	○	
		③	×	659	101%	その他	疑	○	
	2.5φ	①	×	656	101%	その他	○	×	
		②	×	661	102%	その他	○	×	
		③	×	661	102%	その他	○	×	
	3φ	①	×	661	102%	その他	○	×	
		②	×	576	89%	その他	○	×	
		③	×	655	101%	その他	○	×	
SD490	1.5φ	①	疑	23	3%	90°曲げ部	×	×	
		②	疑	723	97%	90°曲げ部	×	○	
		③	疑	280	38%	90°曲げ部	×	○	
	2φ	①	疑	506	68%	90°曲げ部	×	○	
		②	疑	737	99%	90°曲げ部	疑	○	
		③	疑	731	98%	90°曲げ部	×	○	
	2.5φ	①	×	752	101%	その他	○	×	
		②	×	745	100%	その他	○	×	
		③	×	743	100%	その他	○	×	
	3φ	①	×	747	101%	その他	○	×	
		②	×	744	100%	その他	○	×	
		③	×	750	101%	その他	○	×	
SD785	1.5φ	①	疑	870	88%	90°曲げ部	○	疑	
		②	疑	896	90%	その他	○	疑	
		③	疑	899	91%	その他	○	疑	
	2φ	①	×	907	91%	90°曲げ部	○	×	
		②	疑	912	92%	90°曲げ部	○	×	
		③	×	913	92%	その他	○	×	
	2.5φ	①	×	914	92%	その他	○	疑	
		②	×	913	92%	その他	○	疑	
		③	×	933	94%	その他	○	疑	
	3φ	①	×	951	96%	その他	○	×	
		②	×	931	94%	その他	○	×	
		③	×	920	93%	その他	○	×	
SD1275	1.5φ	①	×	1290	87%	90°曲げ部	○	×	
		②	×	1285	87%	90°曲げ部	○	×	
		③	×	1289	87%	90°曲げ部	○	×	
	2φ	①	×	1318	89%	90°曲げ部	○	×	
		②	×	1327	90%	90°曲げ部	○	×	
		③	×	1327	90%	90°曲げ部	○	×	
	2.5φ	①	×	1336	90%	その他	○	×	
		②	×	1348	91%	その他	○	×	
		③	×	1358	92%	その他	○	×	

注) 網掛けは検査証明書と比較して強度が80%以下となったものを示す。

注) 鉄筋破断位置 90°曲げ部: 90°曲げ部で破断、その他: 90°曲げ部以外で破断

討するため、曲げ内半径1.5φで曲げ加工した鉄筋を曲げ戻し、亀裂の有無を目視と磁粉探傷試験で調べた。各鉄筋3本ずつ曲げ・曲げ戻し加工を

行い、亀裂が生じていると疑われる箇所についてはSUMP試験により微細な亀裂の有無を確認した。SUMP試験とは、目視や磁粉探傷試験で確認

できない微細な亀裂を確認するために、鉄筋表面に5%硝酸アルコール溶液を塗布して鉄筋組織を浮き上がらせ、対象位置にSUMPフィルムをアセトンで密着させ、フィルムに浮き出た亀裂を顕微鏡で観察するものである。

4. 実験結果

4.1 曲げ加工による亀裂の有無

表-3に、折り曲げた鉄筋の亀裂の有無、引張試験の結果ならびに鉄筋の破断状況を示す。90°曲げ部の亀裂の有無を目視により観察したが、亀裂を確認することはできなかった。ところが、図-4に示すように磁粉探傷試験を行うと、SD390、SD490、SD785では曲げ内半径を小さくするほど鉄筋の内側に亀裂と思われる磁粉の蓄積した溝を確認することができた。しかし、これらの溝が単にふしの付け根に磁粉が蓄積されてできたものか、亀裂が存在したためにできたものか区別することが困難であったため、表-3では「疑」と判定することとした。また、表面にふしの無い丸鋼SR235とふしの小さいSD1275では、亀裂と思われる箇所を発見するには至らなかった。以上のことから、曲げ加工を施した鉄筋表面の亀裂の有無は、鉄筋のふし形状の影響を強く受けるものと思われる。

一方、鉄筋の曲げ外側には亀裂を確認することができなかった。JISでは曲げ試験において鉄筋の外側に生じた亀裂を確認するよう規定しているが⁷⁾、本研究では鉄筋の内側で亀裂と思われる溝が確認された。このため、鉄筋の曲げ加工部の亀裂の有無を確認する際には、曲げ外側の亀裂だけでなく、曲げ内側の亀裂の有無も確認することが必要と考えられる。

4.2 引張強度と破断状況

次に、同じ試験体を用いて引張試験を実施した。

表-3からわかるように、曲げ内半径を小さく加工したものには十分な強度を発揮できずに破断に至るものが多く存在した。検査証明書の引張強度と比較すると、SD390とSD490では6割程度、SD785とSD1275では9割程度に強度が低下したのも見受けられた。曲げ内半径1.5φで加工したSD490においては、僅か23N/mm²の強度しか発揮できずに破断したものも存在した。この傾向は、先の磁粉探傷試験で亀裂と思われる磁粉の溝が存在しなかったSD1275においても見られる。

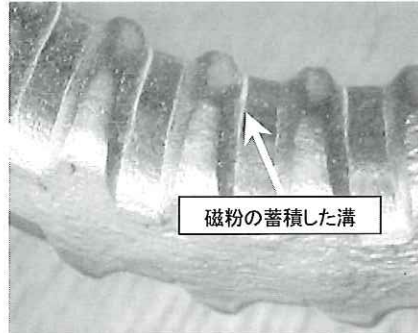


図-4 磁粉探傷試験による亀裂の探査

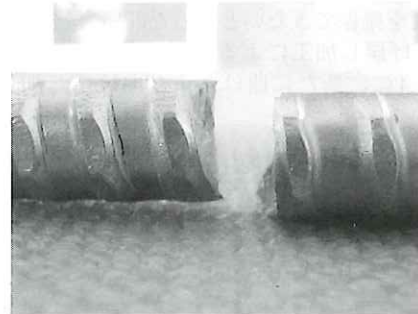


図-5 脆性破断した鉄筋

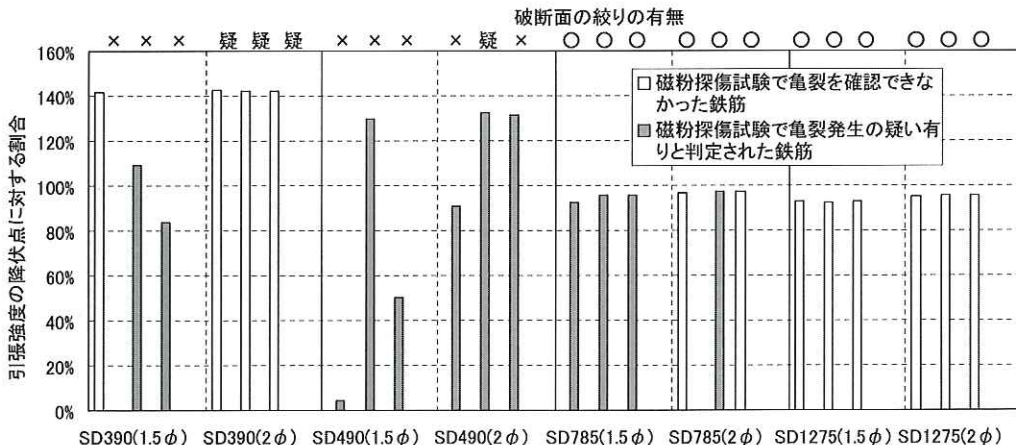


図-6 引張強度の降伏点に対する割合、破断面の紋りの有無、鉄筋表面の亀裂の有無の比較

鉄筋の破断状況に着目すると、曲げ内半径が小さいものほど90°曲げ部で破断するケースが多い。また、破断面を観察すると、SD390とSD490では、曲げ内半径が小さいものほど、図-5のように、鉄筋断面に絞りがなく脆性的な破断が起きるケースが多く、破断箇所周辺に数本の亀裂も確認された。この傾向は、先の磁粉探傷試験で亀裂と疑われる傷が観察された鉄筋で多く発生していた。

また、曲げ内半径1.5φと2φの鉄筋に着目し、引張強度の検査証明書の降伏点に対する割合と破断状況を図-6に示す。一般にコンクリート構造物の設計には鉄筋の降伏点が用いられる。SD390とSD490では、降伏点以上の強度を確保できているものが比較的多いが、曲げ内半径を小さくすると強度が降伏点を大幅に下回り脆性的な破断に至った事例もある。これに対しSD785とSD1275では、脆性的な破断はなく概ね降伏点に近い強度を確保できている。従って、SD390とSD490においては、曲げ内半径を小さく加工すると何らかの損傷が鉄筋に生じ、十分な強度を発揮できずに90°曲げ部で脆性的な破断を起こす可能性が高くなるものと推察される。また、強度が降伏点以下に大幅に低下することもあり、今後さらに部材での試験等で確認を要するものの、構造物の設計上十分な強度を確保できないといった問題も懸念される。

4.3 曲げ戻し加工による亀裂の有無

表-4に、新たに曲げおよび曲げ戻し加工を施

した鉄筋表面の亀裂の有無を示す。先述したように、SD390、SD490、SD785では、曲げ加工した時点で亀裂と思われる傷を観察できたが、明確に亀裂と判定することができなかったため「疑」と判定した。ところが、90°曲げ部を曲げ戻すと、SD390とSD490では目視で明らかに亀裂を確認することができた。SD785では、図-7に示すように亀裂と疑われる傷を確認したため「疑」と判定した。また、SR235とSD1275においては、亀裂は生じていなかった。

次に、曲げ・曲げ戻し加工によって「疑」と判定されたSD390、SD490の曲げ試験体各1本、SD785の曲げおよび曲げ戻し試験体各3本、SD1275の曲げおよび曲げ戻し試験体各1本に対してSUMP試験を実施し、鉄筋表面の亀裂の有無を顕微鏡で観察した。鉄筋の選択においては、目視で亀裂が生じていると思われたものを選びSUMP試験を実施した。SUMP試験により顕微鏡で観察した鉄筋表面の状態を撮影したものの一例を図-8に示す。10本の鉄筋に対してSUMP試験を実施したが、亀裂を確認することはできなかった。すなわち、目視や磁粉探傷試験により「疑」と判定された鉄筋に亀裂は生じていなかった。これは、これまで「疑」と判定された鉄筋の表面で観察された傷が鉄筋表層のみで生じたものであり、鉄筋内部まで深く進展した亀裂ではなかったことが原

表-4 曲げ・曲げ戻し試験、SUMP試験の結果

鉄筋強度	加工形状	曲げ内半径	鉄筋径 (mm)	番号	亀裂の有無		
					磁粉探傷試験 曲げ戻し前	曲げ戻し前	SUMP試験
SD390	曲げ	1.5φ	16	①	疑	—	×
				②	疑	—	—
				③	×	—	—
	曲げ戻し			④	×	○	—
				⑤	×	○	—
				⑥	×	○	—
SD490	曲げ	1.5φ	16	①	疑	—	×
				②	疑	—	—
				③	疑	—	—
	曲げ戻し			④	疑	○	—
				⑤	疑	○	—
				⑥	疑	○	—
SD785	曲げ	1.5φ	10	①	疑	—	×
				②	疑	—	×
				③	疑	—	×
	曲げ戻し			④	疑	疑	×
				⑤	疑	疑	×
				⑥	疑	疑	×
SD1275	曲げ	1.5φ	10.7	①	×	—	—
				②	×	—	—
				③	×	—	×
	曲げ戻し			④	×	×	×
				⑤	×	×	—
				⑥	×	×	—

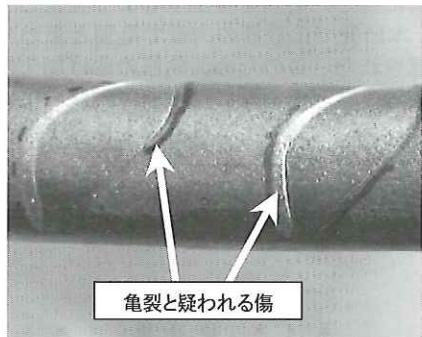


図-7 亀裂と疑われる鉄筋表面の傷

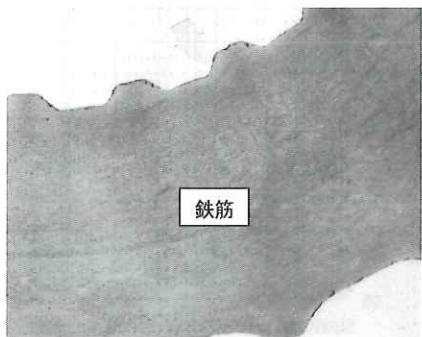


図-8 SUMP試験により観察した鉄筋表面

因とみられる。

4.4 鉄筋の曲げ性能に関する規格の妥当性

上記の試験結果を踏まえると、鉄筋は曲げ内半径を小さくするほど強度が低下し、曲げ部で脆性的な破断が生じる傾向にあることが明らかとなった。SD390とSD490では、曲げ内半径 1.5ϕ と 2ϕ の鉄筋でこの傾向が現れることが確認できた。表-1で示したように、Eurocode 2では、400、500N/mm²程度の鉄筋を 2ϕ の曲げ内半径で曲げ加工できる。しかし、これらの鉄筋をEurocodes 2に従って曲げ内半径 2ϕ で曲げ加工した場合、本研究の実験結果の範囲では曲げ部の脆性的な破断など鉄筋コンクリート用鋼材として望ましくない事態が生じる可能性がある。また、SD785とSD1275についてはNew-RCプロジェクトにおいて規格を定めているが、ここでも上記と同様の原因により若干の引張強度の低下が予測される。

5. 結論

本研究では、高強度鉄筋の曲げ加工性能を実験的に検討し、この結果を日欧の規格に照らして考察した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 高強度鉄筋を異なる曲げ内半径で曲げ加工した結果、曲げ内半径を小さくするほど鉄筋内側に亀裂と疑われる傷を確認することができた。ただし、これには鉄筋表面のふしの形状の影響が大きく、ふしが比較的大きいSD390とSD490で顕著にこの傾向が現れた。
- (2) 曲げ戻し加工の結果、ふしの比較的大きいSD390やSD490は目視で亀裂を確認できた。ふしの小さいSD785では亀裂と思われる傷を観察できたが、これらを顕微鏡で観察しても亀裂と判定するには至らなかった。これは、亀裂と疑われた傷が鉄筋表層のみに生じたものであり、鉄筋内部まで深く進展した亀裂ではなかったことが原因ではないと思われる。
- (3) 引張試験の結果、曲げ内半径を小さく加工すると引張強度が低下し、90°曲げ部で脆性的な破断を起こす傾向にあった。SD390とSD490においては、今後さらに検討を要する

ものの、強度が降伏点以下に低下し、構造物の設計上求められる強度を十分に確保できないといった問題も懸念される。

- (4) 日欧の規格を比較すると、高強度鉄筋の曲げ内半径に関する規格には相違点がある。今回検討した鉄筋径10~16mm程度の鉄筋では、欧州の規格で定められた曲げ内半径の規定値の方が小さく、曲げ部の脆性的な破断など鉄筋コンクリート用鋼材として好ましくない事態が生じる可能性がある。

上記の鉄筋の曲げ加工性能に関する材料試験の結果には、鉄筋の表面形状、とりわけふしの形状が与える影響が大きい。本研究では国内で普及している高強度鉄筋を用いて材料試験を行った。このため、欧州で一般に普及している鉄筋を用いた場合には、これとは異なる実験結果が得られることも起こり得る。従って、今後は国外で実際に用いられている高強度鉄筋を用いて材料試験を実施することも必要である。また、本研究で検討した高強度鉄筋の曲げ加工性能以外の規格についても、引き続き検討を加えていく必要がある。

参考文献

- 1) ISO: ISO19338 Performance and assessment requirements for design standards on structural concrete, 2003
- 2) British Standards: Eurocode 2 Design of Concrete Structures, 1991
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造的照査編），2002
- 4) JIS G 3112：鉄筋コンクリート用棒鋼，1995
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説書，2002
- 6) 建設省総合技術開発プロジェクト：鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発（略称：New RCプロジェクト），1993
- 7) JIS Z 2248：金属材料曲げ試験方法，1996

中村英佑*



独立行政法人土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム研究員
Eisuke NAKAMURA

古賀裕久**



独立行政法人土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム主任研究員
Hirohisa KOGA

渡辺博志***



独立行政法人土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム主席研究員
Hiroshi WATANABE