

MOX燃料加工施設 燃料加工建屋の鉄筋健全性 追加説明資料

2020年12月11日



日本原燃株式会社

本日の主旨

前回(11月24日)面談時のコメントについて回答を行い、今後の対応について説明する。

【2020年11月24日面談におけるコメント一覧】

No.	面談時のコメント	資料
1	D35、D38 の全数の健全性をより確実にするため、エリアごとから「最小径」と「根元部減少率大きい」試験体を採取し引張試験を実施するとしているが、「根元部減少率大きい」試験体を採取する目的を説明すること。	P3
2	鉄筋の計測径と伸びの関係について説明すること。	P6
3	D35、D38 の鉄筋の健全性確認フローにおいて、測定結果のばらつきも含め不合格となる鉄筋を抜けなく確認ができることの説明をすること。	P7
4	伸びだけでなく外径等、JIS規格を満たしていることが必要であり、その確認項目及び方法を説明すること。	P9
5	コンクリートをはつり取った部分の処理について、当該部分がぜい弱にならないよう復旧するために必要な監理について説明すること。	P16

【コメントNo.1】

D35、D38 の全数の健全性をより確実にするため、エリアごとから「最小径」と「根元部減少率が大きい」試験体を採取し引張試験を実施するとしているが、「根元部減少率が大きい」試験体を採取する目的を説明すること。

- 各試験体の径について、部位による比較を図1-1に示す。D29、D32、D35では根元部の径が他の部位（一般部、埋設部）に比べて細くなっている傾向があることがわかり、伸びの低下に影響したものと推定されるため、「根元部減少率が大きい」鉄筋についても試験体を採取する。

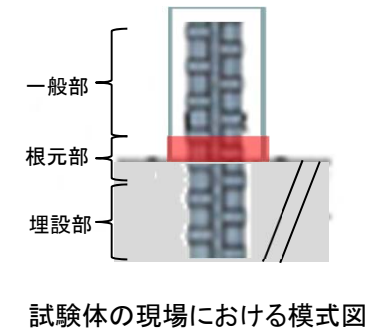
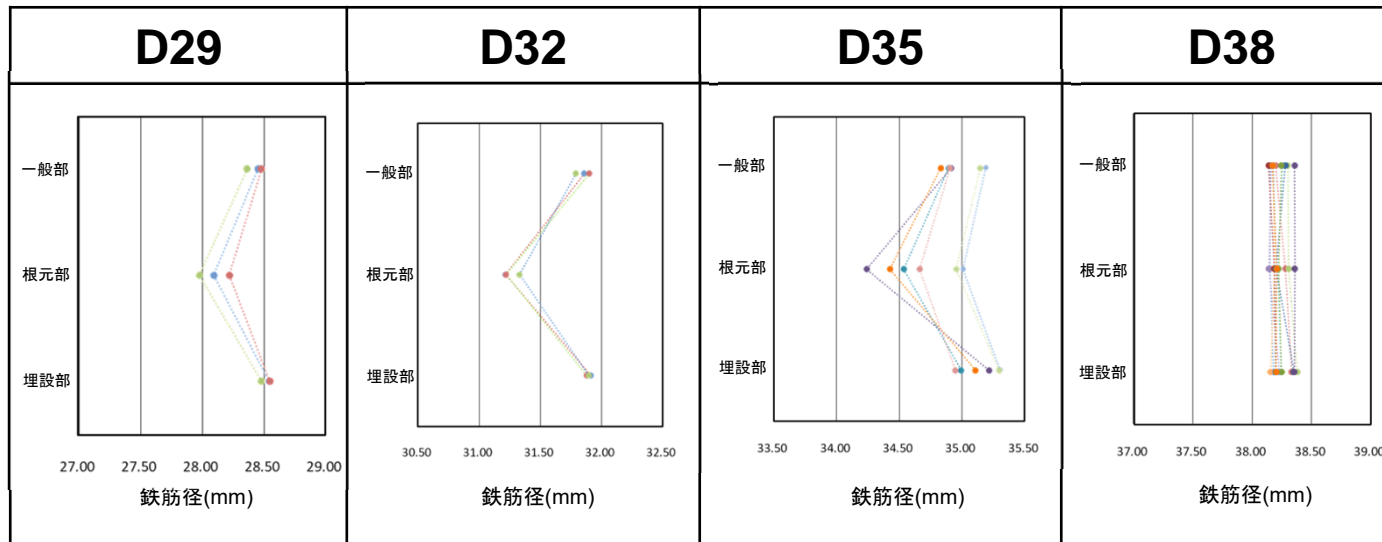


図1-1 鉄筋の部位別径比較

- D29、D32、D35の鉄筋の根元部は他の部位に比べて腐食の速度が早く、部分的な断面減少が発生したと考えられる。その推定原因を次頁に示す。

■ 鉄筋根元部の腐食要因の推定

- 根元部で腐食が進行した要因は以下のように推定される。
- 地下3階床の差し筋は、根元部が雨水により湿潤状態になることが多かったため、以下のマクロ電池構造が形成され、「マクロセル腐食」と呼ばれる現象が起こった結果、腐食したと考えられる。

鉄筋埋設部： カソード(陰極)

鉄筋露出部： アノード(陽極)

- 鉄筋根元部が常時乾燥した状態であれば、マクロ電池の作用が届きにくく、腐食は軽微であったと思われる。D38の根元部の腐食が一般部に比べ進展している傾向が見られなかったのは、D38が主に配置されている外周壁の打継部の差し筋は床面ではなく立上り壁の上部にあり、水はけがよかったのでマクロ電池構造が顕著に発生しなかったためと考えられる。

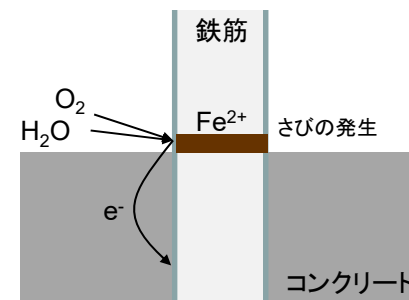
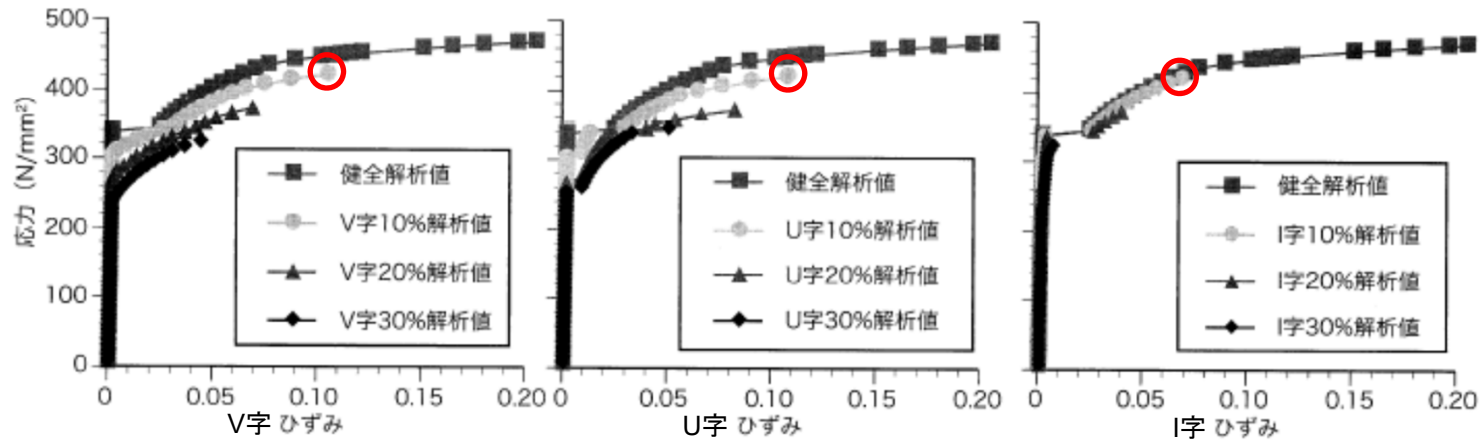
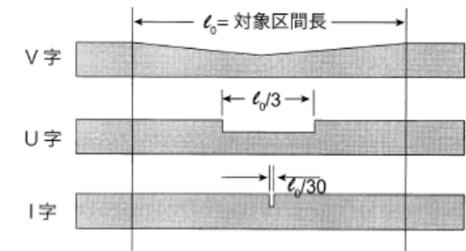


図1-2 鉄筋根元部のマクロセル腐食状況(予想図)

■ 部分的な断面減少が発生した場合の伸びへの影響

- 一般部の鉄筋径に比べて根元部の鉄筋径が比較的小さい場合、鉄筋の根元部に応力集中が発生し、最大荷重点まで鉄筋が軸方向に一様に伸びる過程で伸びが根元部に集中し、伸びの低下に繋がったと考えられる。文献※1においても、幅広い範囲の断面欠損(V字型、U字型)よりも部分的な断面欠損(I字型)が生じている試験体の方が伸びが小さいことが示されている(図1-3参照)。
- D35は大丈夫だが、D32は満足しないと考える。
- 伸びが低下する詳細な原理については参考資料1に記載する。



凡例 ○ : 断面欠損10%の破断位置

図1-3 鉄筋の断面欠損の形状が応力-ひずみ関係に与える影響(※1より引用)

※1 小林孝一, 松岡慎一郎: 塩害による腐食が鉄筋の力学的性状に与える影響, コンクリート工学論文集, Vol19, No.3, 31-39, 2008

【コメントNo.2】

鉄筋の計測径と伸びの関係について説明すること。

- D35については、「公称径の下限值」※¹を満足していれば、伸びのJIS規格値を満足していた。
- D38については、「公称径の下限值」に対して十分余裕があった。伸びについてもJIS規格値を満足していた。
 なお、伸びの小さな試験体があったが、これは破断位置C(標点間外での破断)による、正しい伸びがカウントされていないデータであり、伸びの性能は確保されていると考えられる。(参考資料2参照)

※1:JISに示されている質量許容差から算出される径をここでは公称径の下限值と称する。算出方法は参考資料3参照

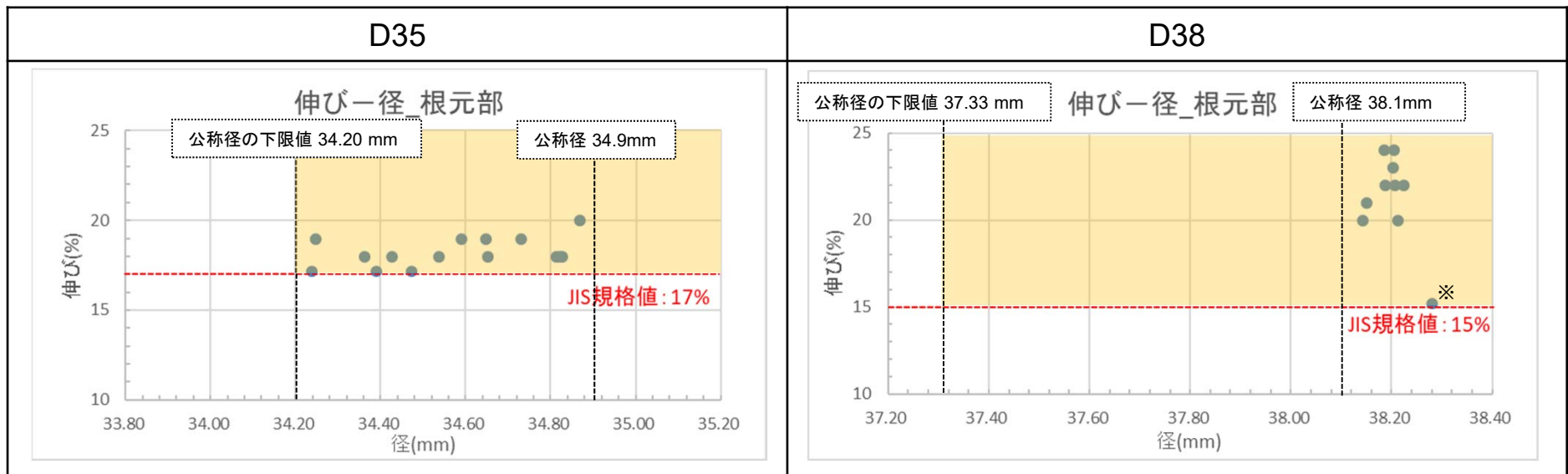


図2-1 計測径と伸びの関係

 : JIS規格値を満足する範囲

【コメントNo.3】

D35、D38の鉄筋の健全性確認フローにおいて、測定結果のばらつきも含め不合格となる鉄筋を抜けなく確認ができることの説明をすること。

- ・JISでは機械的性質を確認する方法として引張試験(破壊試験)を行っているが、非破壊の基準として、質量許容差の下限值(=公称径の下限值)を設けて、形状面からの健全性担保を示している。
- ・図2-1に示すように抜取り試験による伸びは、径が公称径の下限值以上であれば規格値を満足していることから、健全性の確認は、計測した各鉄筋径を公称径の下限值と比較することにより確認できる。
- ・なお、更なるデータの拡充のため、最小径の鉄筋について引張試験を行い伸びの実測を行うと共に、根元部減少率の大きい鉄筋についても引張試験を実施することで健全性を確認する。
- ・また、現場ではD35、D38(合計16,200本)全ての鉄筋径を計測し、公称径の下限值以上であることを確認するのでばらつきの影響を排除し全数を抜けなく確認出来ると考えている。(参考資料4参照)
- ・鉄筋の健全性確認フローを次頁の図3-1に示す。

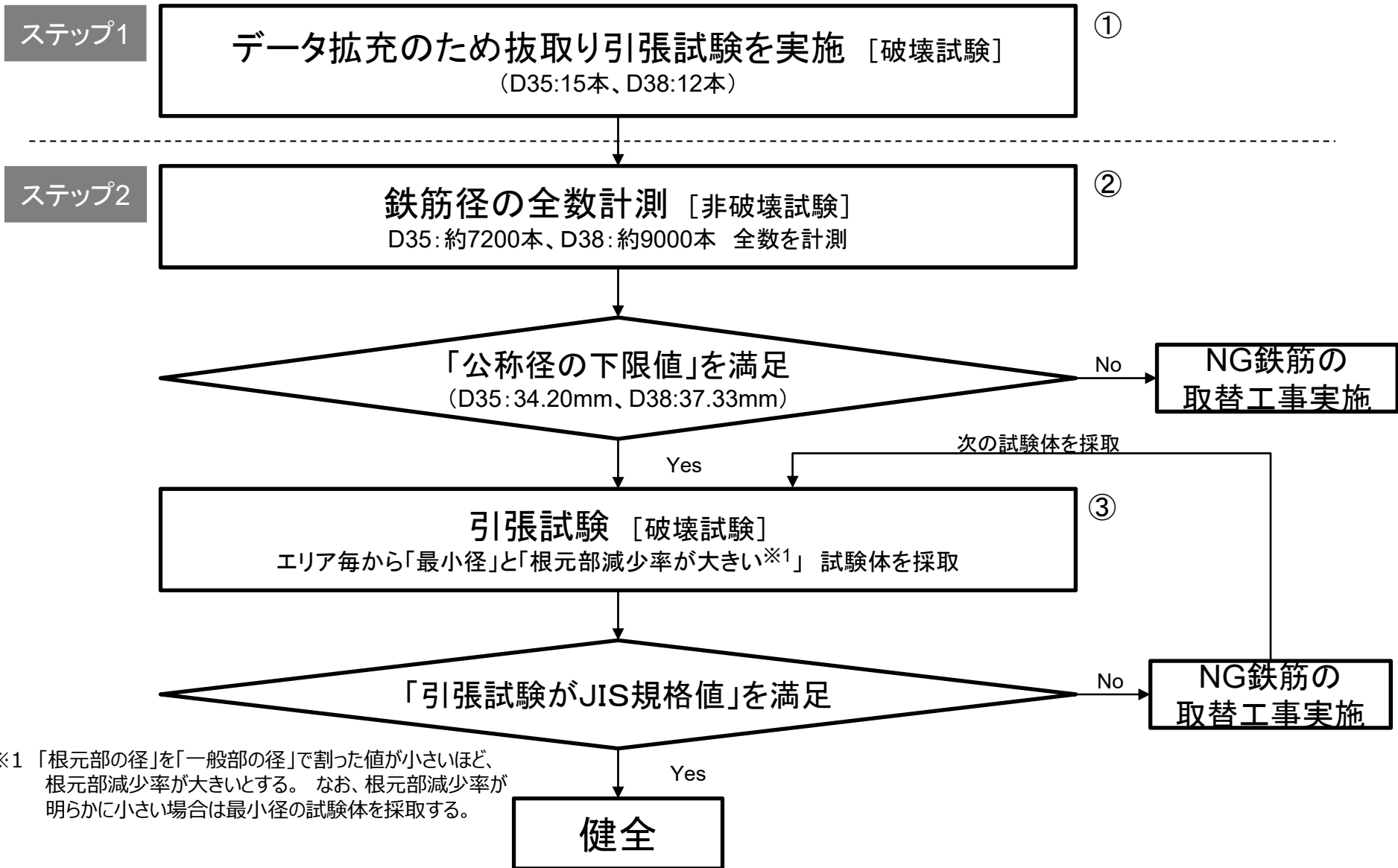


図3-1 鉄筋の健全性確認フロー

【コメントNo.4】

伸びだけでなく外径等、JIS規格を満たしていることが必要であり、その確認項目及び方法を説明すること。

・JIS G 3112(鉄筋コンクリート用棒鋼)にて規定されている確認項目と判定基準を以下の表4-1に示す。

表4-1 D35,D38のJIS規格項目と判定基準

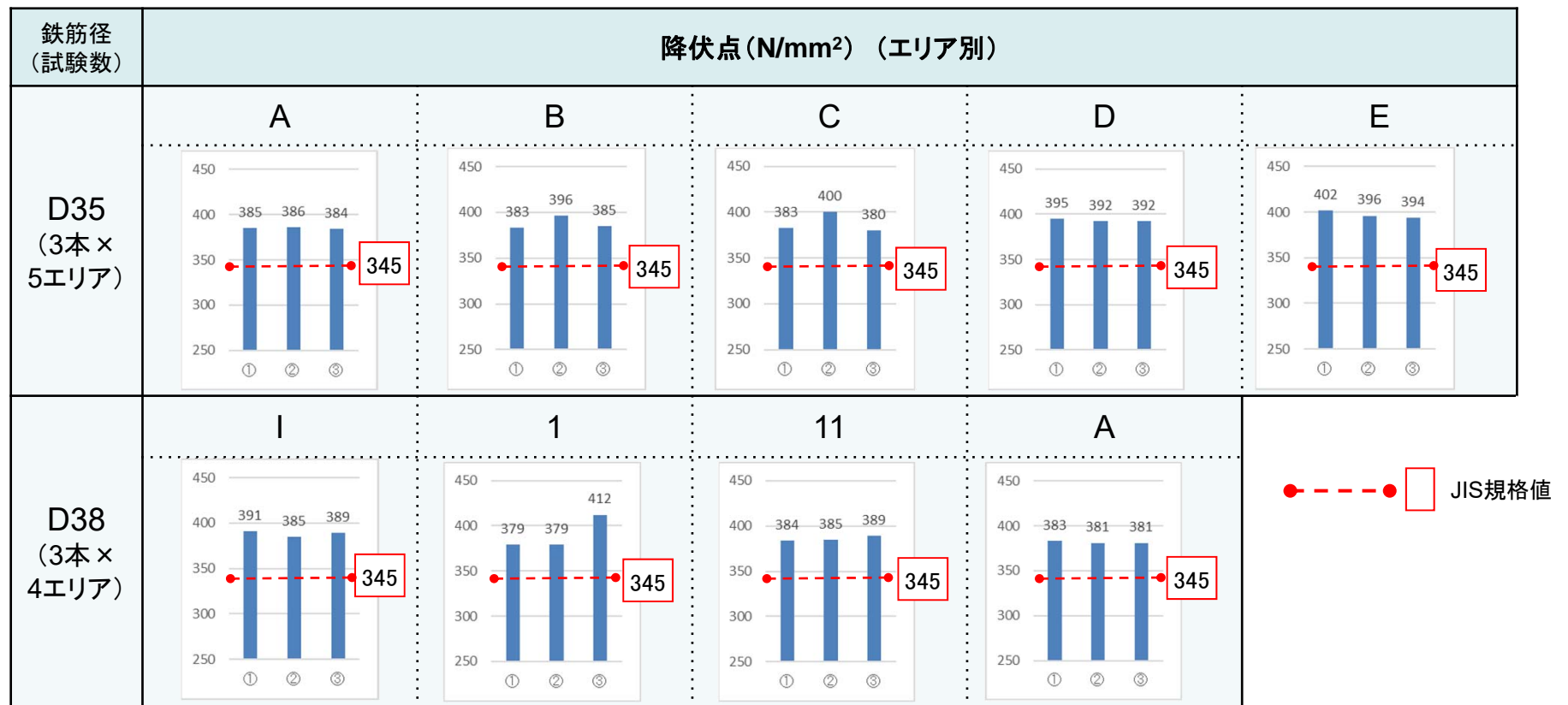
JIS規格項目		判定基準
化学成分		C、Si、Mn、P、S、 $C+\frac{Mn}{6}$ の成分含有率が規定値以下
機械的性質	降伏点または耐力	345(N/mm ²) ~ 440(N/mm ²)
	引張強さ	490(N/mm ²)以上
	伸び	D35: 17%以上、D38: 15%以上
	曲げ性	曲げ角度: 180°、内側半径: 公称直径の2倍 その外側に亀裂を生じないこと
形状・寸法・質量	単位質量	規定値(D35: 7.51(kg/m)、D38: 8.95(kg/m))の許容差(±4%)以内
	節の高さ	D35: 1.7(mm) ~ 3.4(mm)、D38: 1.9(mm) ~ 3.8(mm)
	節の平均間隔の最大値	D35: 24.4(mm)、D38: 26.7(mm)
	節のすき間の合計の最大値	D35: 27.5(mm)、D38: 30.0(mm)
	節と軸線との角度	45° 以上
外観		使用上有害なきずがあってはならない

なお、直径・周長・断面積については公称値が記載されているのみで判定値は無い。

■ 降伏点について

- 現場から採取した試験体の「降伏点」を表4-2に示す。
- D35,D38ともにJIS規格値を逸脱するものはなかった。

表4-2 引張試験結果(降伏点)

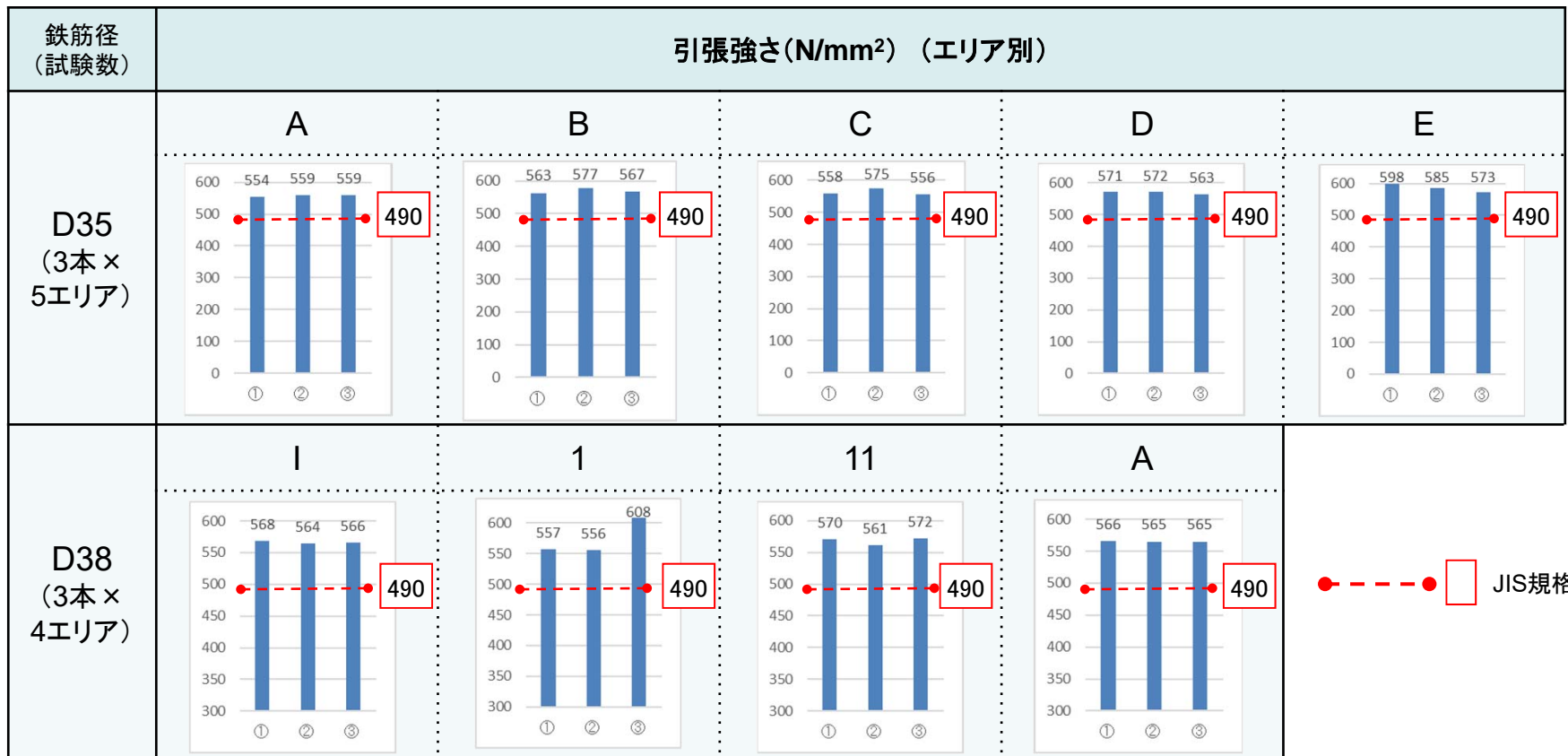


エリア図については、参考資料5参照

■ 引張強さについて

- 現場から採取した試験体の「引張強さ」を表4-3に示す。
- D35,D38ともにJIS規格値を逸脱するものはなかった。

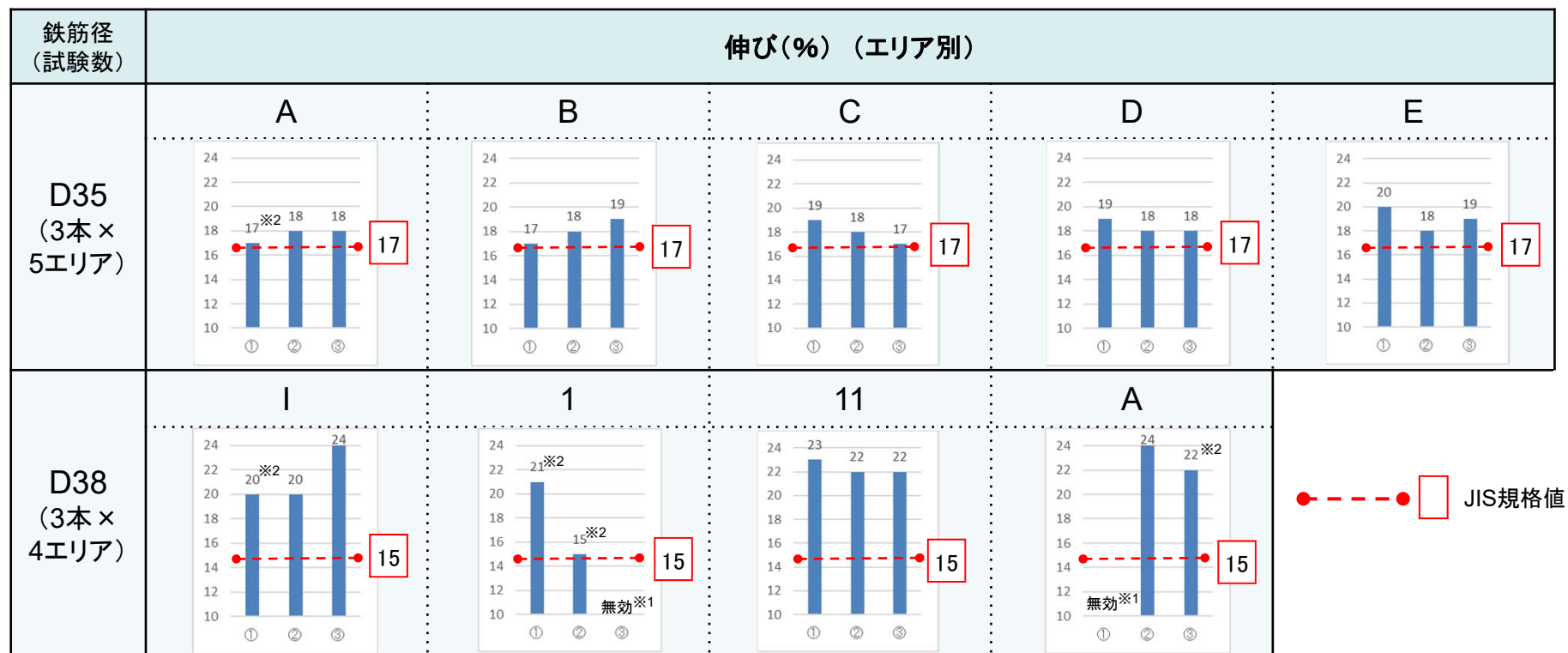
表4-3 引張試験結果(引張強さ)



■ 伸びについて

- 現場から採取した試験体の「伸び」を表4-4に示す。
- D35,D38ともにJIS規格値を逸脱するものはなかった。

表4-4 引張試験結果(伸び)



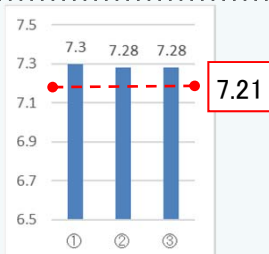
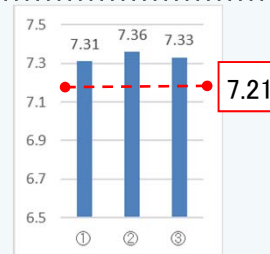
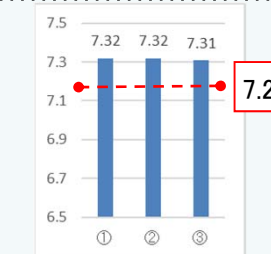
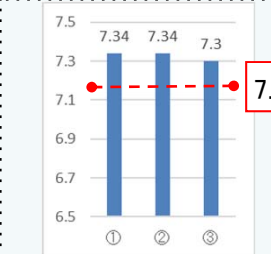
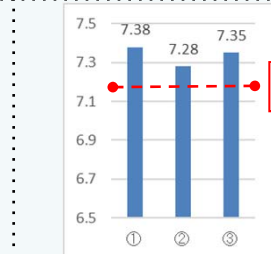

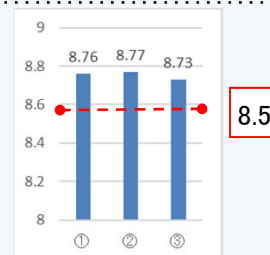
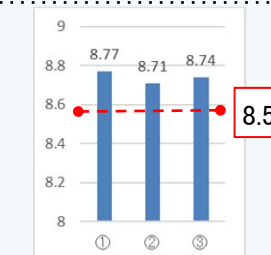
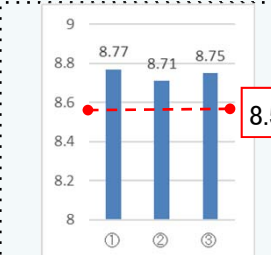
※1:JISの規定に基づき、標点間の外側(試験体中央から大きく外れている)で破断し、伸びが規定値未満となった結果は無効。

※2:JISの規定に基づき、標点間の外側(試験体中央から大きく外れている)で破断したが、伸びが規定値以上となった結果は有効。

■ 単位質量について

- 現場から採取した試験体の「単位質量」を表4-5に示す。
- 測定の結果、D35,D38ともにJIS規格値を下回るものはなかった。

表4-5 単位質量測定結果

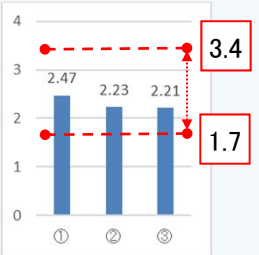
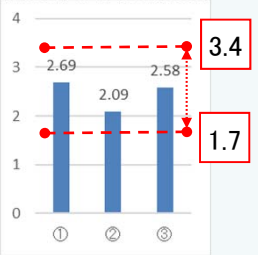
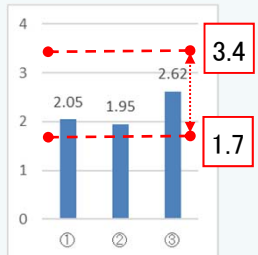
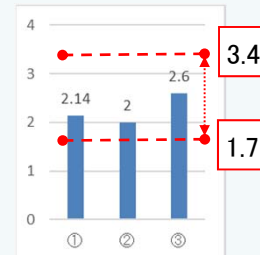
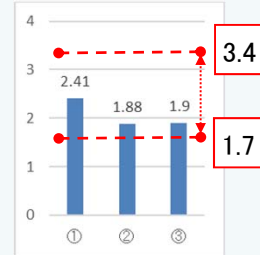
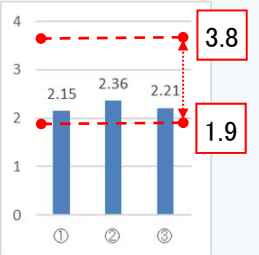
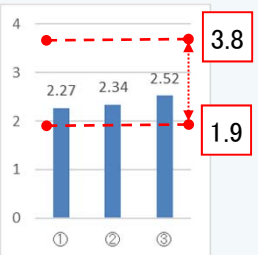
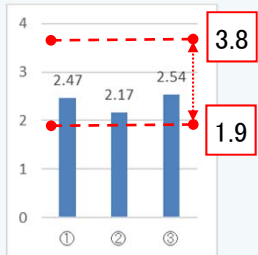
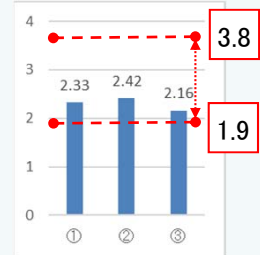

鉄筋径 (試験数)	単位質量(kg/m) (エリア別)				
D35 (3本× 5エリア)	A	B	C	D	E
					
	I	1	11	A	
					

● - - - ● □ : JIS 許容差下限値(-4%)

■ 節高さについて

- 現場から採取した試験体の「節高さ(根元部)」を表4-6に示す。
- 測定の結果、D35,D38ともにJIS規格値を逸脱するものはなかった。

表4-6 節高さ(根元部)測定結果

鉄筋径 (試験数)	節高さ(mm) (エリア別)				
D35 (3本× 5エリア)	<p style="text-align: center;">A</p> 	<p style="text-align: center;">B</p> 	<p style="text-align: center;">C</p> 	<p style="text-align: center;">D</p> 	<p style="text-align: center;">E</p> 
D38 (3本× 4エリア)	<p style="text-align: center;">I</p> 	<p style="text-align: center;">1</p> 	<p style="text-align: center;">11</p> 	<p style="text-align: center;">A</p> 	 <p>JIS規格値</p>

■その他の項目を含めた総括評価

JIS G 3112(鉄筋コンクリート用棒鋼)にて規定されている項目に関する評価を以下の表4-7に示す。

表4-7 D35,D38のJIS規格項目

JIS規格項目		評価
化学成分		腐食している鉄筋表面が腐食減少しても材料内部の変化はないため、問題ないとする
機械的性質	降伏点または耐力	P10に示す通り規格値を満足している
	引張強さ	P11に示す通り規格値を満足している
	伸び	P12に示す通り規格値を満足している
	曲げ性	評価対象である差し筋には曲げ加工を行うものはないため、評価不要とする
形状・寸法・質量	単位質量	P13に示す通り規格値を満足している
	節の高さ	P14に示す通り規格値を満足している
	節の平均間隔の最大値	腐食により鉄筋の軸方向の節の位置は変わらないため、問題ないとする
	節のすき間の合計の最大値	
	節と軸線との角度	
外観		抜取った鉄筋の目視において「使用上有害なきず」はないため、問題ないとする

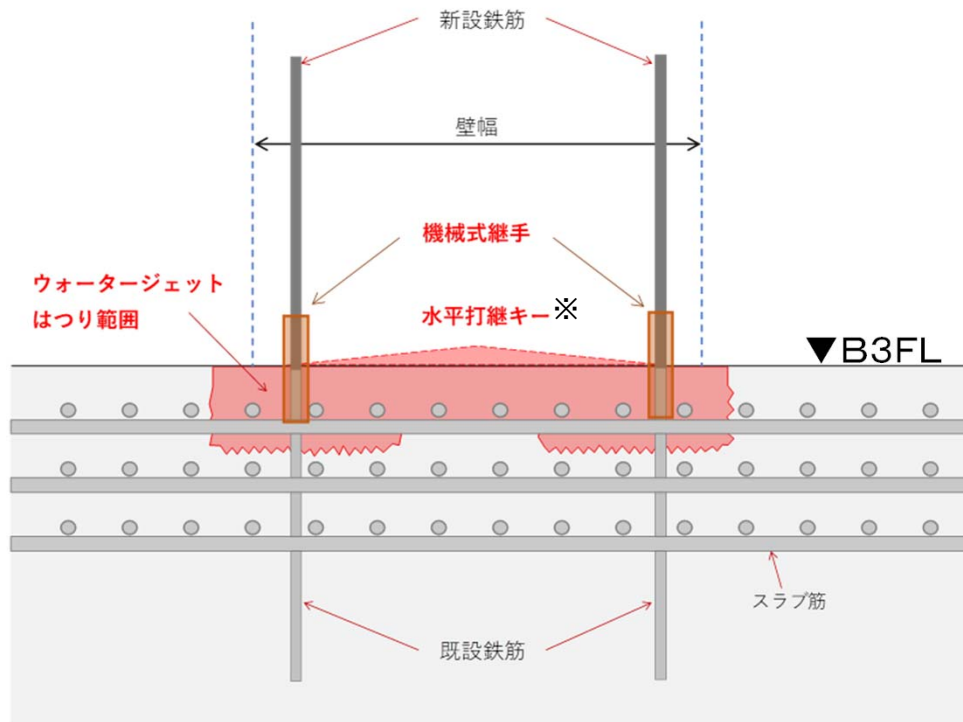
以上により、D35、D38の試験体について、JIS規格への適合性を確認・評価した。

構造健全性による考察について、参考資料6参照

【コメントNo.5】

コンクリートをはつり取った部分の処理について、当該部分がぜい弱にならないよう復旧するために必要な監理について説明すること。

■はつり部がぜい弱にならない復旧手順と検査項目を以下に示す。



- ① 差し筋根元部周辺のコンクリートはつり
(機械式継手を取付できる範囲まで)
- ↓
- ② 取替対象鉄筋を床スラブ面で切断
- ↓
- ③ 新設鉄筋の接続 } 【材料検査】、
(機械式継手) } 【構造検査】
- ↓
- ④ コンクリートはつり部に
コンクリート充填 } 【構造検査】、
(壁との接続部に水平 } 【強度検査】
打継キー※を設ける)

※水平打継キーとは、構造耐力の低下防止として、壁縦筋内面の打継部のコンクリート面を盛り上げる形状をいう。

検査内容(抜粋)については、参考資料7参照

詳細な施工手順は次頁に示す。

■ はつり取った部分がぜい弱とならないために、以下の手順に従い復旧する。

- ウォータージェットによりはつり取った基礎スラブ(はつり深さ約150mm～250mm程度)については、既存の基礎スラブと同じ設計基準強度($F_c=30\text{N/mm}^2$)のコンクリートにより、はつる前の状態まで復旧する。充填部の施工は以下の手順で行う。
 - 1) 既存の基礎スラブの鉄筋がウォータージェットにより削られないようウォータージェットの圧力管理を行い施工するとともに、コンクリート打設前に有害な傷等がないことを目視確認する。
 - 2) エアーにより、はつり部の清掃を行い、はつりカスを除去する。
 - 3) 機械式継手の施工に際しては、カップラーへの鉄筋挿入長さ確認のための鉄筋マーキングがカップラー端部にかかっていること。および接合用グラウト材が排出口からあふれ出していることで充填状況を確認する。
 - 4) 既存の基礎スラブの鉄筋と既存のコンクリート躯体の隙間に、コンクリートが確実に充填されるよう、締固め用の棒で突き固めながらコンクリートを打設する。

差し筋取替部の応力伝達については、参考資料8参照

※下線部は重点監理項目

■前頁の復旧に際しては、以下の方法に基づき監理する。

- はつり取った部分を復旧するコンクリート工事の監理については、既認可で制定された鉄筋コンクリート工事に関する使用前検査実施要領書の内容を踏襲した、使用前事業者検査実施要領書の検査項目で管理する。
- 管理方法は、当社の建築工事管理細則(鉄筋、型枠、鉄筋コンクリート工事)のQC工程表に従う。

- ・現在、進めているD35、D38の健全性確認調査については、鉄筋径の全数計測結果がまとまり次第、1月中を目途に改めて報告する。
- ・D32以下の取替が必要となっている鉄筋については新しい鉄筋に取替が終了しだい、P16で述べた検査項目に基づき使用前事業者検査を行い、設工認の既認可範囲についてコンクリート打設等の躯体工事を行う。
- ・「公称径の下限値」を満足しているD35、D38の鉄筋については、錆による腐食の進展を抑制する観点からも、P8に示す健全性確認フローに基づく使用前事業者検査を行い、設工認の既認可範囲についてコンクリート打設等の躯体工事を行う。

【参考資料1】鉄筋の引張と伸びの原理

- 部分的な断面減少の無い鉄筋の場合、最大荷重点まで一様に伸びた後くびれが生じ、伸びがくびれ部に集中した後に破断する。*
- 一方、腐食により最初から部分的な断面減少(くびれ)がある場合、本来最大荷重点まで一様に伸びる過程に至る前に、くびれ部が伸びて破断する。くびれが生じるまでの一様伸びが減ることから、腐食の無い鉄筋と比べ伸びが低下すると考えられる。

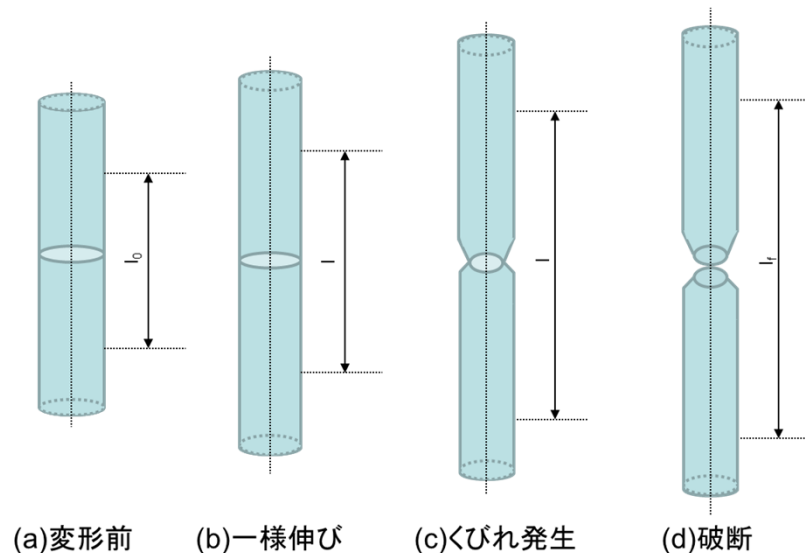


図1 引張試験時の変形概要図
(部分的な断面減少の無い鉄筋)

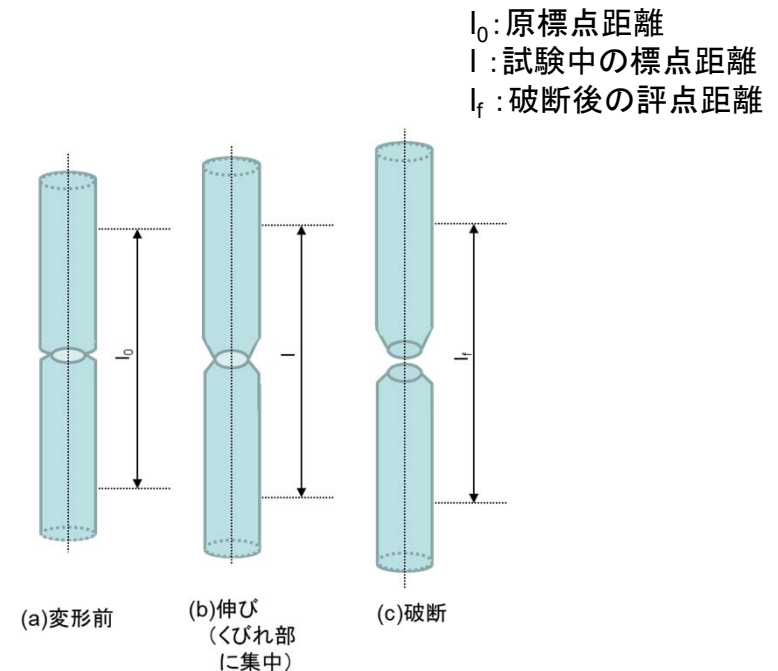
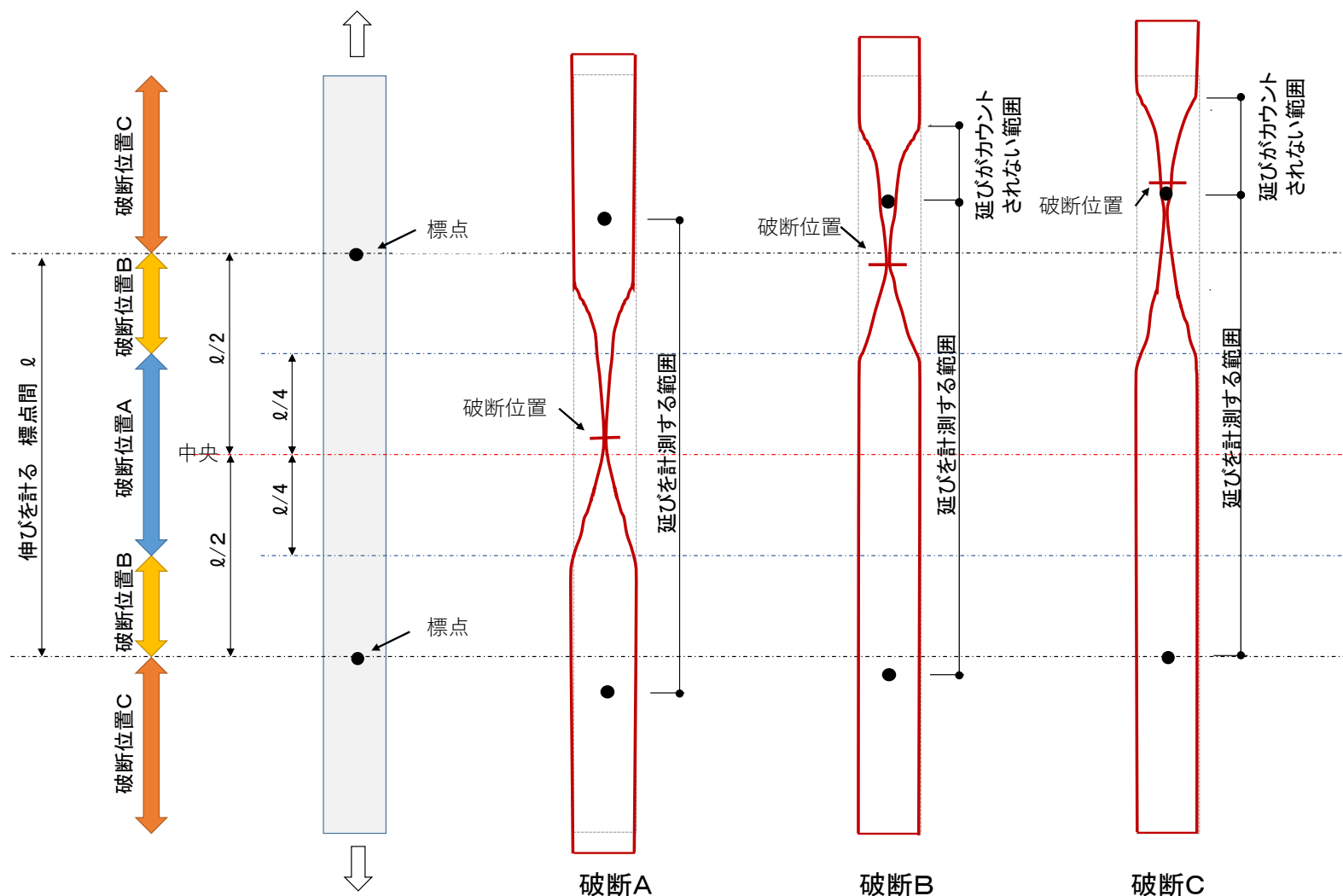


図2 引張試験時の変形概要図
(部分的に断面が減少している鉄筋)

※中島尚正 他 編:機械工学ハンドブック, 朝倉書店, 2011

【参考資料2】破断箇所の違いによる伸びの計測イメージ



- 上記の破断位置Aの範囲内で破断した場合、試験結果は有効である。
 - 破断位置BまたはCの位置で破断した場合、試験結果は無効である。
- しかし、伸び(%)が規定値以上の場合には、破断位置に関係なく試験結果は有効である。
(JIS Z 2241 「金属材料引張試験方法」)

【参考資料3】質量許容差から算出される鉄筋径の下限値の設定



■ JISの質量許容差を用いた公称径の下限値の設定

JISに径の判定値（下限値）は無いが、単位質量の許容差は示されているため、単位質量の許容差下限値を公称断面積の式に代入することで、公称径の下限値を算出することができる。

＜JISに示されている値と式＞

- ・鉄筋径D29以上の質量許容差は± 4 %
- ・径(d)から公称断面積、単位質量を算出する式

$$\left(\text{公称断面積}(S) = \frac{0.7854 \times d^2}{100} \quad \text{単位質量} = 0.785 \times S \right)$$

表-1 JISの質量許容差を用いて設定した鉄筋径の下限値および算出過程の各値

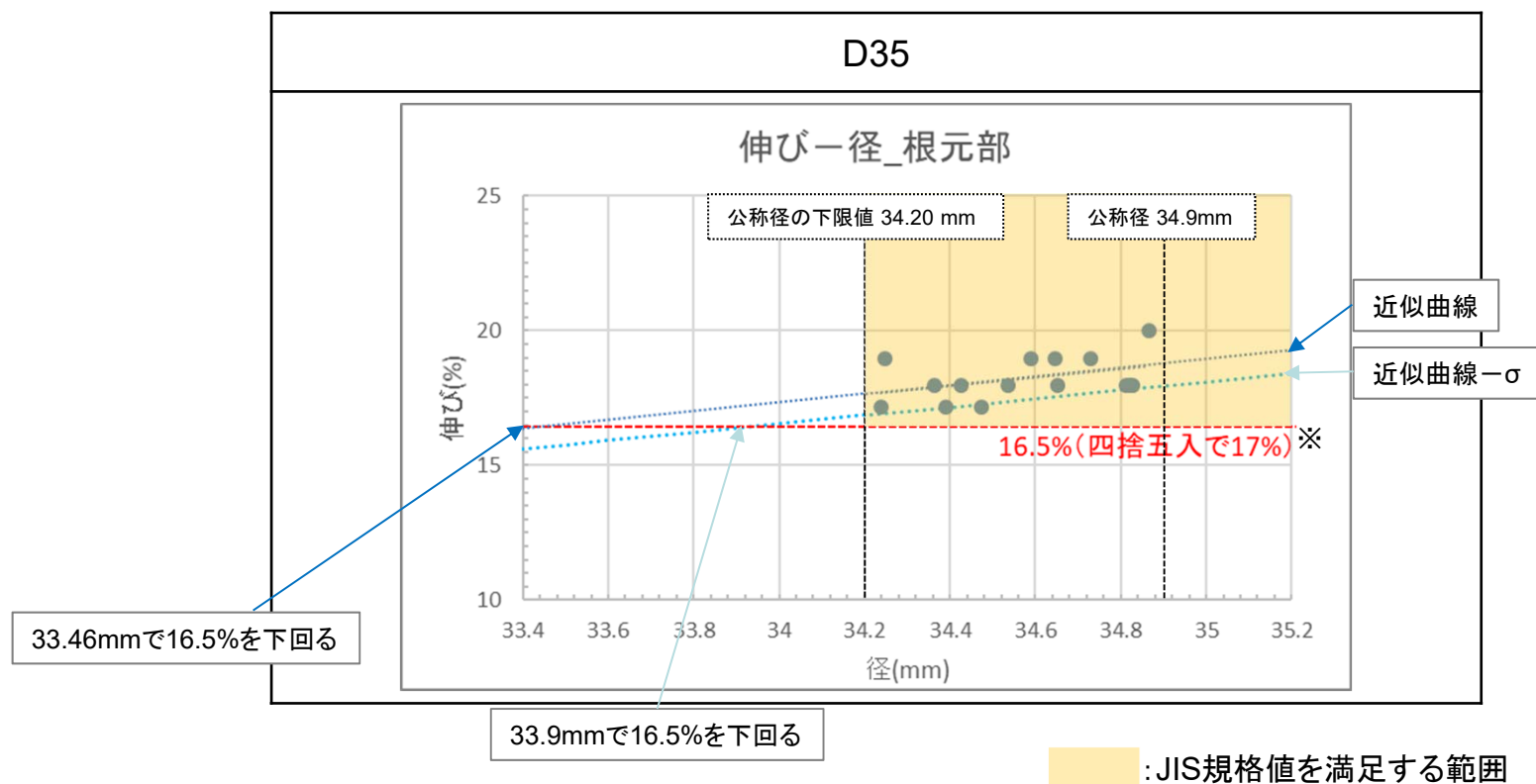
呼び名	単位質量 (kg/m)	公称断面積 (cm ²)	公称直径 (mm)	-4%単位質 量(kg/m)	-4%断面積 (cm ²)	-4%直径 (mm)
D35	7.51	9.566	34.9	7.21	9.185	34.20
D38	8.95	11.40	38.1	8.59	10.94	37.33

上記から、公称径の下限値として、
D35 : 34.20、D38 : 37.33 を設定する。

「節部と腹部」での直径測定と公称径の関係を参考資料9に示す

【参考資料4】ばらつきを考慮した考察


- 鉄筋径と伸びの相関の近似曲線と、標準偏差分(1σ)ばらついた場合の近似曲線が左図となり、1σばらついたときに伸びがJIS規格値を下回るのは、鉄筋径33.90mmである。よって、今回設定した公称径の下限值で管理するのはばらつきを考慮しても安全側と考える。



※: JIS規格値では、伸びの値は整数として扱っているが、試験データのまるめを考慮した場合の下限値を想定



地下3階平面図

 は核不拡散上の観点から公開できません

【参考資料6】構造健全性に関する考察

- 構造耐力上必要となる差筋根元部の伸びは、文献※¹によれば、約1,500 μ (0.15%)以下であり安全率を見込んだとしても、必要な伸び性能は数パーセント程度である。
すなわち、現場の差筋は錆により伸びの性能の低下は見られるものの、耐震安全性の面では、なんら問題にならないと言える。
また、現場の差筋は曲げ加工を行うことはないので、曲げ性能の有無が耐震安全性に影響を与えることはない。
以上から、現状のD35,D38の鉄筋が本質的な耐震安全性を損なうことはないと言える。

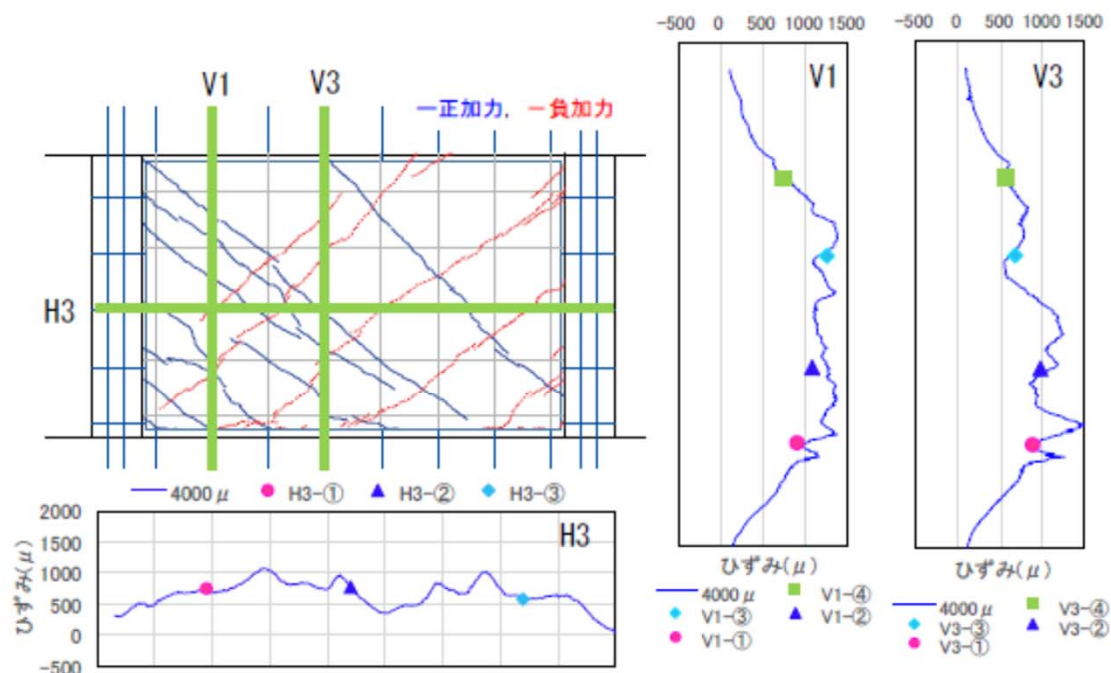


図1 鉄筋材軸方向の線的ひずみ分布 (※1より引用)
(鉄筋コンクリート造耐震壁モデルに対するせん断加力試験結果(壁のせん断ひずみ $\gamma=4000\mu$ 時))

※1 岩島他:地震時のRC躯体のひび割れ評価に関する検討 その4 せん断加力試験結果の考察, 日本建築学会大会学術梗概集(関東)2020年9月

【参考資料7】検査内容(1/3)



- 使用前事業者検査実施要領書の検査項目で管理する。
- 管理方法は当社の建築工事管理細則(鉄筋、型枠、鉄筋コンクリート工事)に従う。

(1)材料検査

イ. 鉄筋材料検査 (ミルシートによる記録確認)

工程		管理項目	管理値	検査時期	検査方法	頻度
施工前及び施工中	鉄筋の受入れ検査	材料照合	「鉄筋マニュアル」による	受入時	タグプレートとミルシート (太径電炉鉄筋の場合は試験成績書を含む)の照合	全数
		外観			目視にて確認	
	機械式継手定着板	材質、寸法	認定書または評価書に示された仕様に基づいていること	受入時	納品書、ミルシートの確認	全数

ロ. コンクリート密度検査 (しゃへいを要求される部分のみ)

項目	試験方法	判定基準	時期回数
遮蔽コンクリートの乾燥単位容積質量	フレッシュコンクリートの単位容積質量による管理: JIS A 1116	JASS 5N-2013 11.4 表11.9: 試験結果が所定の値以上であること	構造体コンクリートの圧縮強度試験用の供試体採取時

(2) 構造検査

イ. 鉄筋の組立検査（抜粋）

工程		管理項目	管理値	検査時期	検査方法	頻度
施工時	鉄筋の加工組立て	径	設工認及び設計図書に合致すること	組立中または組立後随時	コンベックス等による測定及び目視にて確認	全数
		本数、ピッチ 段数				
		機械式継ぎ手	認定書又は評価書に示すとおりに施工されていること		目視にて確認	
		継手及び定着の位置長さ	JASS5N(2013)10. 7の規定及び解説表10. 13、解説表10. 17. 及び設計図書に適合すること		コンベックス等による測定及び目視にて確認	

ロ. コンクリート打上がり検査（抜粋）

工程		管理項目	管理値	検査時期	検査方法	頻度
施工後	部材の位置・断面寸法	基礎の断面寸法	-5mm ~ +(規定せず)	型枠解体後	コンベックス等で測定	全数
	表面状態	コンクリート表面の状態	有害な打込み欠陥(空洞、豆板、打継ぎ欠陥、気泡、砂縞、硬化不良、コールドジョイント、ひび割れなど)がないこと		目視にて確認	

(3)強度検査

イ. コンクリート強度検査

項目	試験方法	判定基準	時期回数
圧縮強度	JIS A 1108 JIS A 1132	JASS 5N-2013 11.4 表11.9:レディーミクストコンクリートの判定基準による。	構造体コンクリートの圧縮強度試験用の供試体採取時

【参考資料8】差し筋取替部の応力伝達

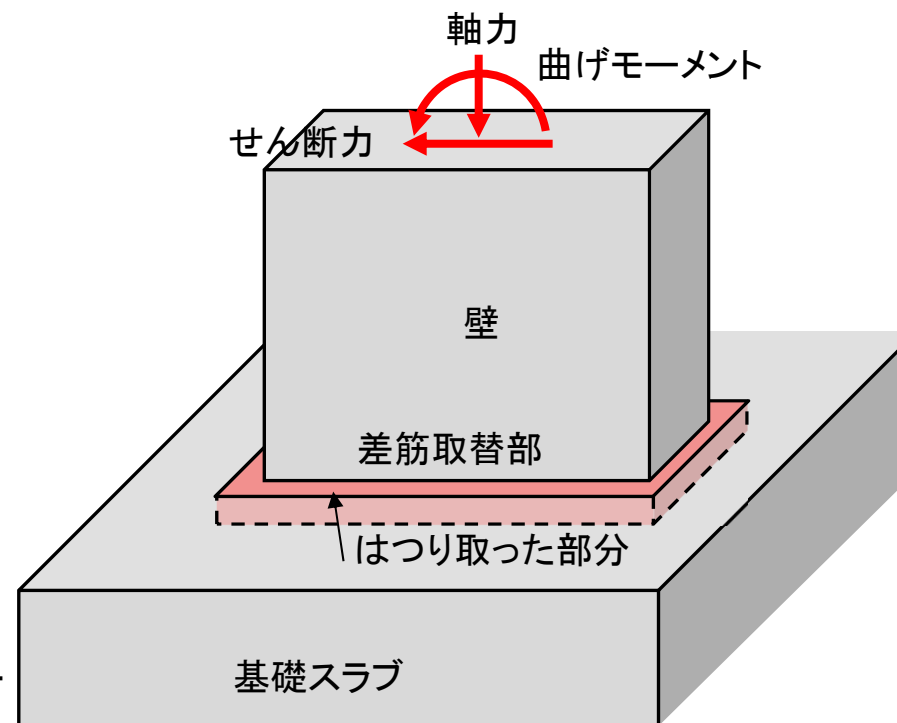
■ はつり取った後の補修により、当該部分がぜい弱にならない構造的な評価を以下に示す。

差し筋の取替作業を実施する「差し筋取替部」には、壁に作用する面内力(軸力、曲げモーメントおよびせん断力:右図参照)を、確実に基礎スラブに伝達させる役割が求められる。

差し筋取替部には、軸力と曲げモーメントにより圧縮力と引張力が、せん断力によりせん断応力が生じる。

圧縮力とせん断力はコンクリートにより、引張力は鉄筋によりそれぞれ基礎スラブに伝達される。したがって、差し筋取替部には、既存の基礎スラブと同じ設計基準強度を有するコンクリートを密実に打設する必要がある。

上記伝達機構を鑑み、差し筋取替部分に要求される性能として、「基礎スラブと同程度以上の圧縮強度を有するコンクリート」が必要なため、確実に施工・監理を実施していく。

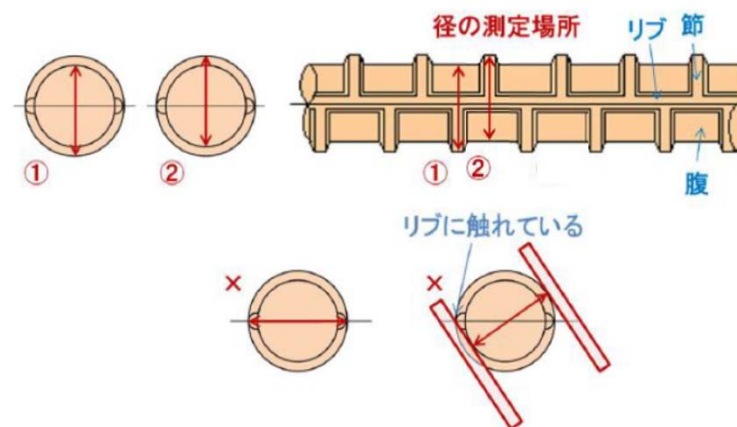


【参考資料9】「節部と腹部」での直径測定と公称径との関係

抜取った引張試験体のコンクリート埋設部(新品同様に健全な状態)における「節部と腹部」での直径の測定結果は、公称直径値※¹に近いことを確認した。
よって、「節部と腹部」(根元部および一般部)での直径測定値を腐食による評価に使用することが合理的であると言える。

埋設部鉄筋径の測定結果

呼び名	JIS公称直径 (mm)	測定直径 平均値 (mm)	標準偏差
D35	34.9	34.93	0.24
D38	38.1	38.18	0.18



図「節部と腹部」の計測イメージ図

※1 公称直径は単位長さ当たりの重量から算出される値で、鉄筋表面の突起(凹凸)を真円断面の丸棒にならしたと想定したときの直径に相当する。

鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説