鉄筋コンクリート構造の力学的特性把握を目的とした中性子回析法の利用可能性に関する研究

Study on the mechanical characteristics of reinforced concrete structure with neutron diffraction technique

勅使川原正臣[1)]、田才晃[2)]、椛山健二[3)]、楠浩一[2)]、真田靖士[4)]、
Masaomi TESHIGAWARA, Akira TASAI, Kenji KABAYAMA, Koichi KUSUNOKI, Yasushi SANADA,
丸山　一平[1)]、向井智久[5)]、畠中雄一[2)]、鈴木　裕士[6)]
Ippei MARUYAMA、Tomohisa Mukai, Yuichi HATANAKA, and Hiroshi SUZUKI

[1)]名古屋大学　[2)]横浜国立大学　[3)]芝浦工業大学　[4)]豊橋技術科学大学、
[5)]建築研究所　[6)]原子力機構

鉄筋およびコンクリートに打ち込まれたアンカー筋に一定に作用した引張力がコンクリート中に伝達する「付着応力」の分布を計測した。計測時にばねを用いることで、一定応力を長期間保持して加力することが可能であった。また、鉄筋の定着長さは、D10 ではおよそ 100mm と、一般的に予測されている定着長さよりも短いことが分かった。また、あと施工アンカー試験体では、定着長さは 73mm であったが、あと施工アンカー打設用の削孔の径が 13mm であり、その外径に対する平均付着応力度で計算すると D10 を用いた付着試験結果他ほぼ同じ平均付着応力度となった。

キーワード：RESA、鉄筋コンクリート、付着応力

１．目的

鉄筋コンクリートは、鉄筋とコンクリートによって構成される。コンクリートは引張に対しては耐力が非常に低いが、圧縮に対しては高い強度を有している。一方、鉄筋は圧縮に対しては容易に座屈するが、引張に対しては塑性域を含めて十分な延性を有している。鉄筋コンクリート構造の性能は、この相補完しあう材料によって達成される。負担する応力は、鉄筋とコンクリートの付着抵抗機構（接触面での応力伝達機構）によって、伝達される。つまり、付着抵抗機構は、鉄筋コンクリート構造の要である。

これまでは、非常に粗いピッチで貼付されたひずみゲージにより、鉄筋のひずみを計測し、そこから応力を推測する方法が取られていた。従来の方法では、鉄筋の数点に貼付したひずみゲージから、鉄筋のひずみが離散的に分かるだけであった。そのため、鉄筋まわりの応力状態は、推定するしかなかった。また、ひずみゲージを表面に貼付すると、鉄筋の付着性能自体に大きな影響を与えてしまう。

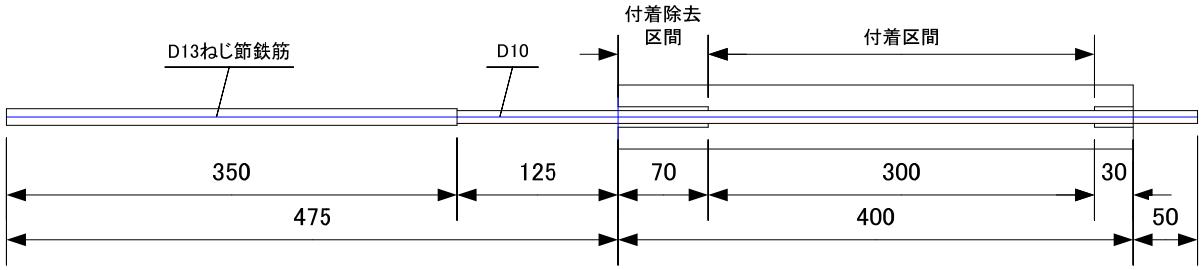
鉄筋の引張存在応力を直接計測することが出来れば、鉄筋まわりの応力状態がより精確に把握することが出来、これまでの耐震設計式の検証が可能となり、建築物の耐震性向上に寄与することが出来る。そのため，鉄筋の存在応力の直接計測が望まれており，それを可能にするのは，中性子応力測定のほかには無い。そこで、本研究の目的は、コンクリート中の鉄筋のひずみ分布およびひずみ変化を中性子回折法により直接計測し、ひずみゲージを貼付して行った実験結果と比較することである。過去に実施した RESA による実験結果では、コンクリートを絶乾状態にすることが、計測精度を極めて改善することが分かっていたが、コンクリートのクリープにより、一定荷重を作用させることが困難であった。そこで、本実験ではばねを用いて導入力を一定に保ち、RESA による計測を実施した。さらに、コンクリートに穴を開けて有機系樹脂を用いて鉄筋をコンクリートに留める、接着系アンカーを打ち込んだアンカー筋の付着応力の計測も実施した。

２．方法

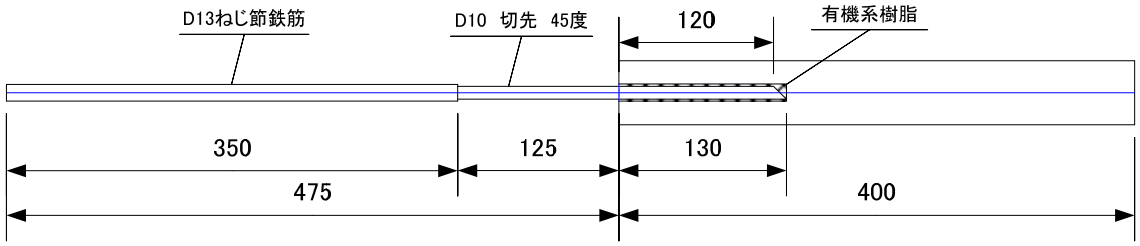
試験体を図－1 に示す。試験体は２体で、１体は図－1(a)に示すように、鉄筋を型枠の中にあらかじめ配して、コンクリートを打設した通常の付着試験体である。定着部外での鉄筋の降伏、定着部での付着破壊の防止を目標として、図－1(a)に示す試験体の付着領域の長さを決定した。もう一体は、図－1(b)に示すように、有機系接着剤を用いてあと施工アンカーとして D10 鉄筋を打設した試験体である。引き抜き試験のため、アンカーの埋め込み長さを 12d（d は主筋の公称径で、今回は 10mm）とし、先端は 45 度の角度でカットした。あと施工アンカー試験体は、あらかじめ無垢のコンクリートの円柱を作製し、ドリルで直径 13mm、深さ 130mm の穴を削孔し、カプセル型の接着剤を用いて、定着した。

加力は、図－2 に示すように、コンクリート内に埋め込んだ D10 鉄筋を、センターホールジャッキ（SLP-355、OX ジャッキ製）で引抜くことにより行った。鉄筋は、ロードセルを介して反力の耐圧版に固定するため、先端部は D13 のねじ節鉄筋を圧着してある。D10 は、付着領域外でひずみゲージによりそのひずみを測定した。付着試験体では、コンクリート内で鉄筋との付着を取り除いた区間を設けた。また、作用応力を一定に保つため、材料寸法φ21mm、コイル中心径 76mm、長さ 130mm、ばね定数 1245N/mm のコイルばねを挟んだ。

中性子回折法により、鉄筋軸方向のαFe(110)の格子ひずみ変化を測定した。中性子線の回折角 2θは約 56°である。鉄筋に導入した応力は、付着試験体では 250N/mm^2(実測 240N/mm^2)、125N/mm^2（実測 1378N/mm^2)、20N/mm^2（実測 18N/mm^2）の順に３種類、あと施工アンカー試験体では 250N/mm2（実測 233N/mm^2）である。ひずみ測定点は、付着試験体では付着なし区間 10mm と付着あり区間約 120mm の計約 130mm を、243N/mm^2 では１mm 刻みで、137N/mm^2、18N/mm^2 では 2mm 刻みで計測した。各計測時間は 8 分であった。あと施工アンカー試験体では、端部から 130mm 分を 2mm 刻みで、各計測点は、計測時間を 20 分とした。スリットの大きさは３×15mm、ラジアルコリメーターは 3mm、波長は２Åとした。

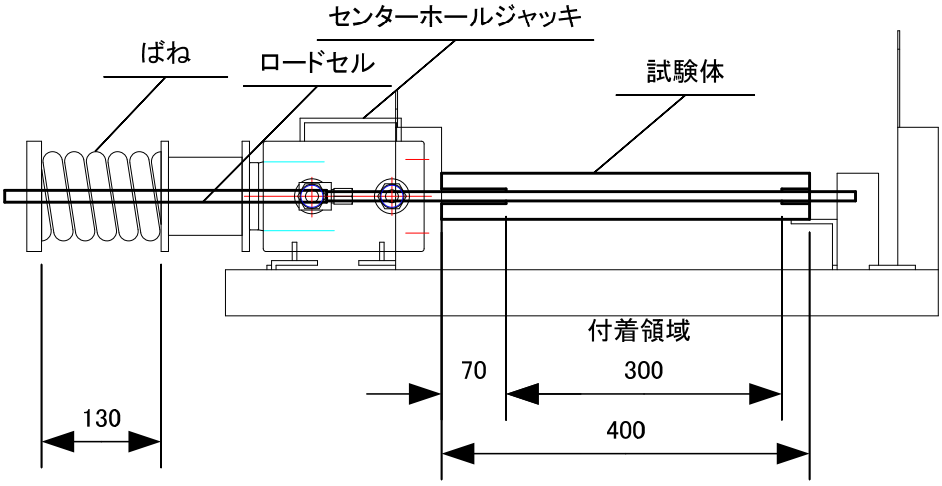


(a)　定着試験体

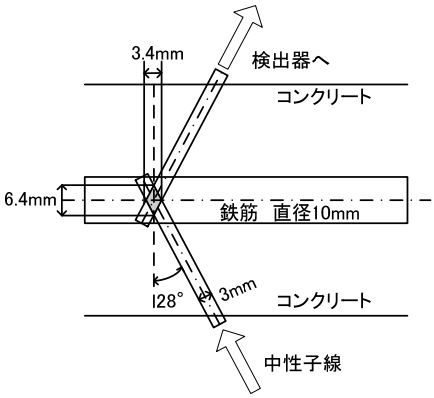


(b) アンカー試験体

図－1　試験体概要



図－2　加力装置



図－3　計測方法

３．研究成果

試験体のコンクリートは、付着試験体、あと施工アンカー試験体ともに、２月２日に東京理科大学野田キャンパス、兼松研究室で打設した。コンクリートの調合表を表－1 に、材齢 28 日での材料試験結果を表－2 に示す。その後、材齢８日であと施工アンカー試験体に削孔し、材齢９日～24 日まで促進中性化、材齢 25 日～31 日まで乾燥炉で乾燥を行った。なお、アンカー試験体は、材齢 25 日～29 日で乾燥を行い、その後アンカー筋の打設を行った。

表－1　コンクリートの調合表

調合強度	スランプ	空気量	水セメント比	粗骨材の最大寸法	細骨材率	単位水量	絶対容積(l/m3)			質量(kg/m3)			AE減水材
							セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	
N/mm2	cm	%	%	mm	%	kg/m3							ml
34.5	18	4.0	60.0	10	49.0	185	99	331	345	308	859	914	ポゾリス No.70

表－2　材齢 28 日での材料強度

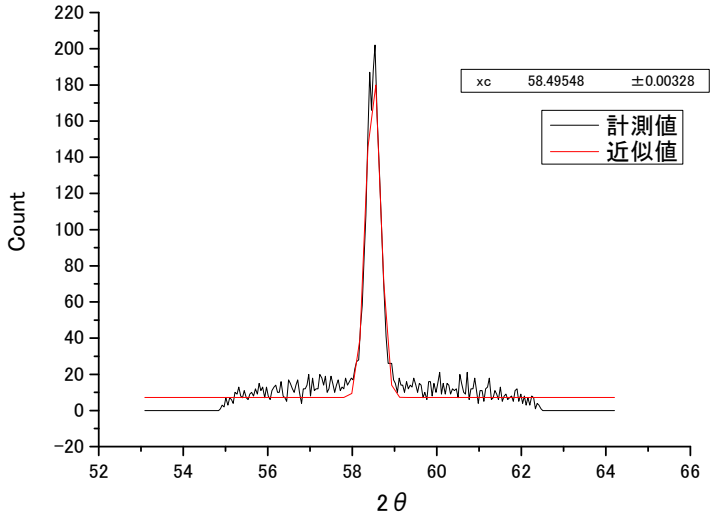
No	材齢	養生方法	圧 / 引	直径(mm) d1	d2	(d1+d2)/2	高さ(mm)	重量(g)	最大荷重(kN)	強度(N/mm2)	平均(N/mm2)
1	28 日	水中	圧	99.3	99.7	99.5	198.8	3613.6	335	43.1	41.4
2				100.0	101.0	100.5	199.0	3647.6	323	40.7	
3				100.0	99.6	99.8	196.0	3592.7	315	40.3	
1	28 日	水中(3 日間)→気乾	圧	100.3	99.7	100.0	197.7	3493.8	321	40.9	42.0
2				100.5	100.4	100.5	198.3	3555.1	350	44.2	
3				100.6	99.2	99.9	197.7	3508.1	321	41.0	

あと施エアンカー試験体に用いた有機系樹脂の主成分は、ビスフェノール A 型エポキシメタクリレート樹脂　10～40（Wt%）、スチレン　8～12（Wt%）、過酸化ベンゾイル　0～10（Wt%）、および硫酸カルシウム（石膏）　0～10（Wt%）である。接着剤はカプセル型である。

図－４に RESA による計測結果の一例を示す。ピークの値は高く、また相対的にバックグラウンドも低い。その為、Wavelet 変換等を用いなくとも充分な制度を有していると判断して、全ての点での計測結果を直接 Gauss 分布に近似して、ピークでの 2θ を計測した。

式１から、鉄筋の弾性ひずみ分が計算される。ここで、$2\theta_0$ は無負荷時の回析ピーク強度での回析角である。また、式１を用いて求めた弾性ひずみ ε に、110 回折のヤング係数 E（$=2.25\times10^5$）をかけて応力を算出する。ここで、$2\theta_0$ は、同一ロットの無垢の鉄筋の 2 点で 30 分計測し、その後、位置を 1mm ずつずらしながら３点を各 10 分計測したときの回析角（58.533 度、58.544 度、58.542 度、58.536 度、58.53 度）の平均値 58.537 度を用いた。

$$\varepsilon = -\frac{2\theta - 2\theta_0}{2}\frac{1}{\tan(2\theta_0/2)} \qquad \text{式１}$$



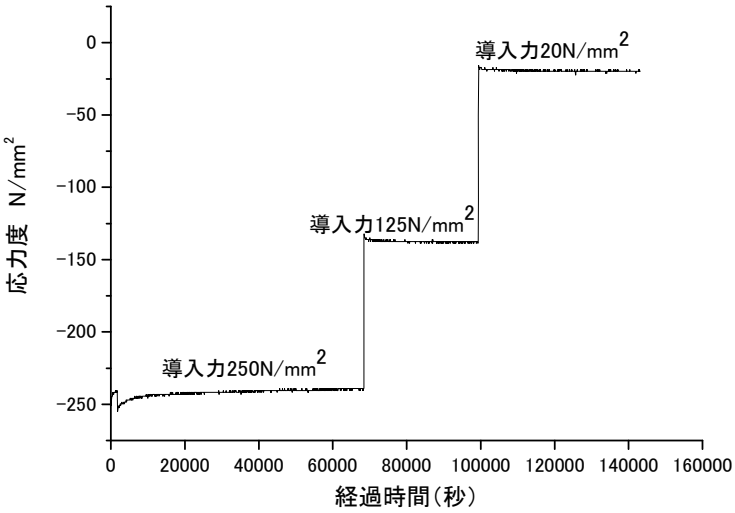
図－4　計測結果の一例

図－5 に、RESA で計測中に間隔１分間でインターバル測定した導入応力の推移を示す。応力導入にばねを用いたため、ほぼ一定の応力が作用していることが分かる。付着試験体で 250N/mm^2 を目指した導入力では加力終了時点で 240N/mm^2、125N/mm^2 を目指した導入力では加力終了時点で 138N/mm^2、20N/mm^2 を目指した導入力では加力終了時点で 18N/mm^2、あと施工アンカー試験体で 250N/mm^2 を目指した導入力では加力終了時点で 233N/mm^2 であった。

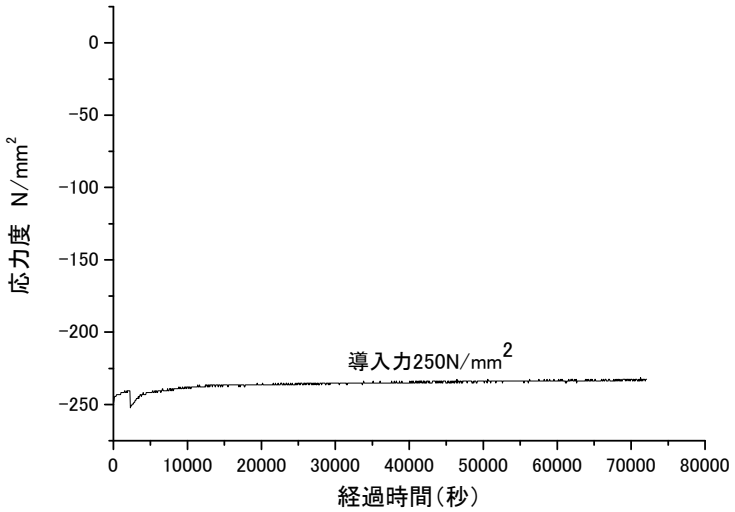
図－6～図－8 に付着試験体でそれぞれ、250N/mm^2、125N/mm^2、および 20N/mm^2 での計測結果から求めた各地点での鉄筋の応力を示す。また、図－9 にあと施工アンカー試験体で 250N/mm^2 での計測結果から求めた各地点での鉄筋の応力を示す。鉄筋の付着域で鉄筋の応力が低下していることが分かる。また、40N/mm^2 程度の幅のふらつきがあることも分かる。

付着試験体では、125N/mm^2 の試験体では、およそ 50mm まで引張力が一定、つまり付着力が０となっている区間がある。これは、250N/mm^2 の導入力を最初に導入したため、この 50mm の区間で徐々に付着が失われたと考えられる。なお、計測は付着開始区間から実施したため、250N/mm^2 加力時には比較的早い段階で計測が行われた区間であったため、図－6 では同様の傾向が見受けられないと思われる。20N/mm^2 導入時には、端部での引張力計測値は、導入力と一致していない。一方、250N/mm^2 および 125N/mm^2 導入時では、端部での引張力計測値は導入力と良好に一致している。

あと施工アンカー試験体では、端部での引張力計測値が導入力を下回っているが、定着長も付着試験体よりも短く見受けられる。

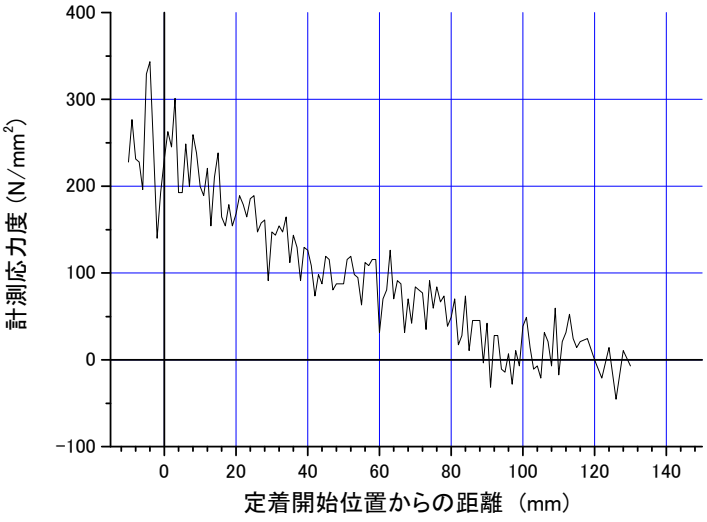


(a) 付着試験体

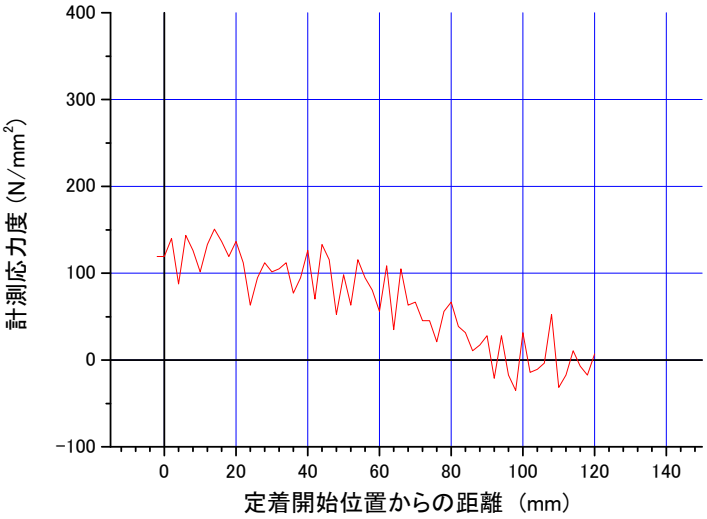


(b) あと施工アンカー試験体

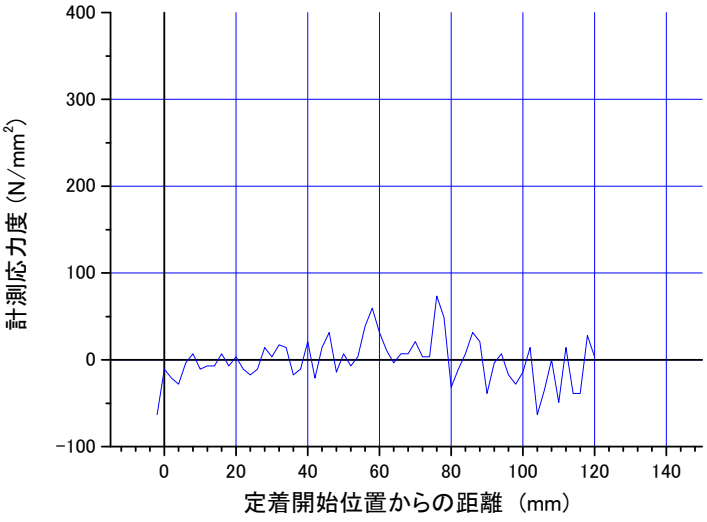
図－5　ロードセルによる応力度の推移



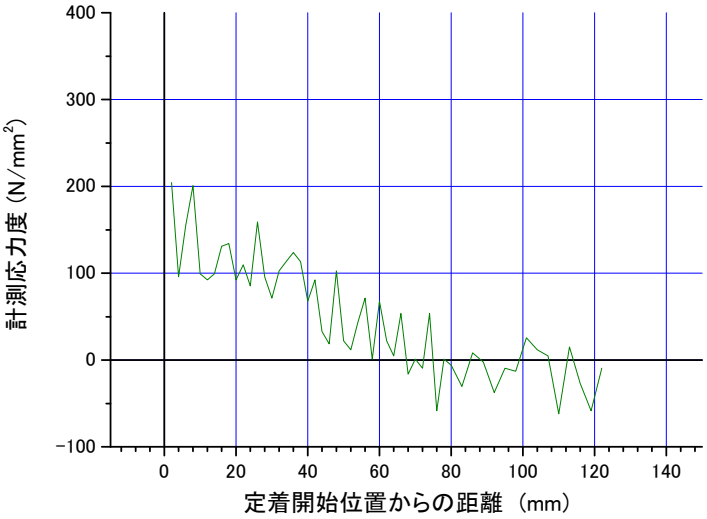
図－6　算出した応力度（250N/mm^2）



図－7　算出した応力度（125N/mm^2）



図－8　算出した応力度（20N/mm^2）



図－9　算出した応力度（あと施工アンカー試験体、250N/mm^2）

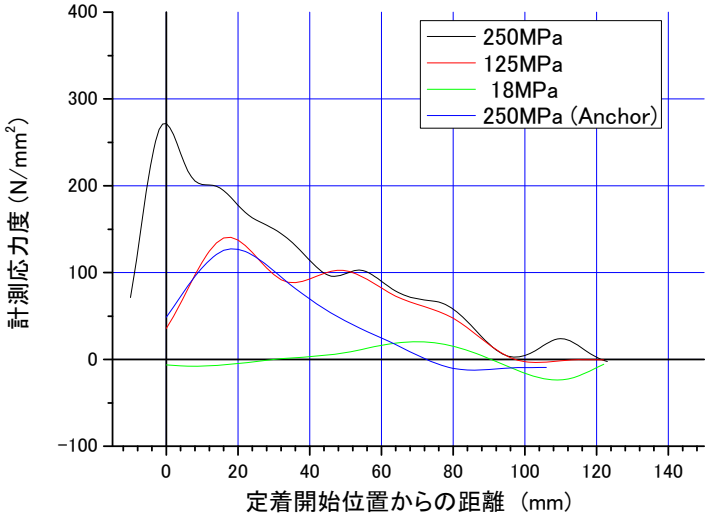
４．結論・考察

計測結果から、40N/mm^2 程度の幅のふらつきを分離して定着長さの傾向を検討するために、計測結果の Wavelet 変換を試みた。変換では、1mm の長さを 1sec 刻みの時刻歴データと考えて、Wavelet 変換を適用した。観測記録から g_1～g_3 成分（T=２～16mm）を除去した F3 を図－10 に示す。なお、Wavelet 変換の特性から、端部応力値が０ではないが、変換後に一部成分を除去したため、端部で０点を指向する傾向を示している。

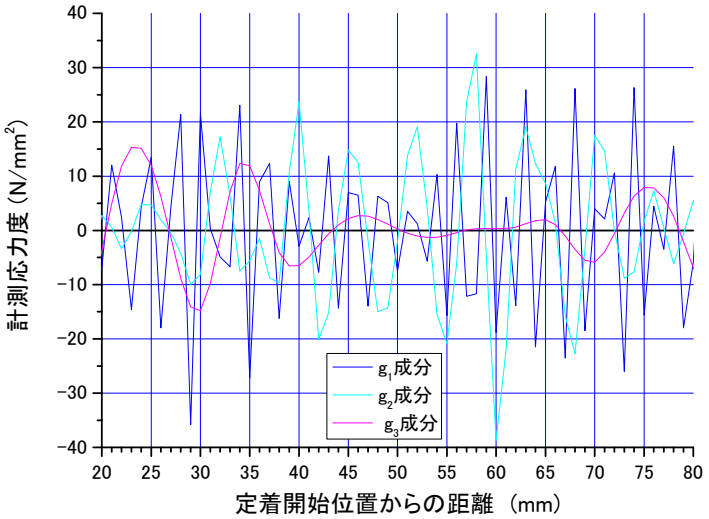
付着試験体では、250N/mm^2 導入時には定着長がおよそ 100mm であること、125N/mm^2 導入時では、およそ 50mm を超えたところから、250N/mm^2 導入時と同じ曲線となっていることが分かる。20N/mm^2 導入時では、ばらつきの方が大きく、引張力が 0 付近となっている。

一方、あと施工アンカー試験体では、０～20mm 付近までは Wavelet 変換で一部成分を除去した影響が大きいが、20mm 以降を見ると、およそ 72mm 付近で引張応力が 0 となっていることが分かる。

一例として、付着試験体 250N/mm^2 導入時の 20mm～80mm 間の g_1、g_2、g_3 成分を図－11 に示す。図から、40N/mm^2 程度の幅のふらつき部分に有意な周期性は認められなかった。



図－10　計測された応力とひび割れの関係（F3 成分のみ）



図－11　g_1、g_2、g_3 成分

以上のように、付着試験体の鉄筋の応力計測から、主筋の応力が 240N/mm^2 では定着長が 100mm であることが分かった。D10 の公称断面積が 71mm^2、周長が 30mm であることから、鉄筋の付着応力度 τ は、

$$\tau = \frac{240\,N/mm^2 \times 71mm^2}{30mm \times 100mm} = 5.68\,N/mm^2$$

であることが分かった。また、あと施工アンカー試験体では、アンカー筋の応力が 233N/mm^2 では定着長が 73mm

であることが分かった。アンカー筋の付着応力度τは、

$$\tau = \frac{233\,N/mm^2 \times 71mm^2}{30mm \times 72mm} = 7.66\,N/mm^2$$

であることが分かった。なお、アンカー用の削孔の径が13㎜のため、径13㎜として計算すると、

$$\tau = \frac{233\,N/mm^2 \times 71mm^2}{13mm \times \pi \times 72mm} = 5.63\,N/mm^2$$

となり、鉄筋の定着時とほぼ同じ値となる。

５．引用(参照)文献等