

報告

[1148] 繊維補強吹付けモルタルによる RC 梁の補強効果に関する実験的研究

正会員○内田美生（住友セメント技術開発センター）
 正会員 峰松敏和（住友セメント技術開発センター）
 正会員 鳥取誠一（鉄道総合技術研究所）
 正会員 牛島 栄（鉄道総合技術研究所）

1. はじめに

コンクリート構造物の補修・補強法の1つとして、鋼繊維またはガラス繊維等の短繊維で補強した超速硬セメントモルタルを吹付け工法で施工する工法（以下、超速硬SF吹付け工法または超速硬GF吹付け工法と称す）が、提案・実用化されている。

本工法においては、現在までに、吹付け材料の諸物性^{1) 2)}や、吹付け施工後の構造物における補強効果の定性的な確認^{3) 4)}はなされているものの、補強効果の定量化に関する検討は不十分である。

本報は、この繊維補強モルタル吹付け工法における補強効果を定量的に把握することを目的として実施したRC梁モデル供試体を用

いた静的載荷試験及び動的試験結果について述べるものである。

2. 試験概要

試験は、表-1に示すように、実際の施工を想定した各種因子を適宜組み合わせ、実施した。

供試体は、図-1に示すRC梁モデル供試体を作製、これに実構

造物を想定したひびわれ導入、エポキシ樹脂注入（以下、樹脂注入）吹付け面処理等の所定の措置を施した後、図

-2に示すシステムを用いて、超速硬SF、超速硬GF吹付けモルタルを施工した。供試体作製手順を図-3に示す。また、今回の試験の使用材料及び吹付けモルタルの目標吐出配合を表-2に示す。また、載荷装置は静的最大荷重75tonf、動的最大荷重50tonfの油圧サーボ式疲労試験機を荷重制御方式で用いることとし、静的載荷試験では、2、4、6、8tonfにて繰返し載荷を

表-2. 使用材料及び目標吐出配合

使用材料	セメント	超速硬セメント、 $\rho=3.04$							
	細骨材	鹿島産川砂、 $\rho=2.62$ 、FM=2.70							
	水	水道水							
	鋼繊維	波型せん断品、 $0.5 \times 0.5 \times 25\text{mm}$ 、 $\rho=7.85$							
配合	ガラス繊維	ロービング状耐アルカリガラス繊維、 $\phi=25\text{mm}$ 、 $\rho=2.70$							
	No.	W/C	S/C	繊維	Vf	単 位 量 kg/m^3			
						セメント	水	細骨材	繊維
	1	45	3	GF	1.5	512	230	1536	40.5
	2	50	3	GF	3.0	491	246	1473	91.0
3	45	4	SF	1.5	427	192	1708	118	

表-1. 試験因子

繊維の種類	無			ガラス繊維			鋼繊維		
	ひびわれの有無			有			有		
樹脂注入の有無	無	有		有			無	無	有
吹き付け厚さcm	0			4	2	4	4		
繊維混入率%	0			3			1.5		
載荷条件	静的試験	60tonf	○	○	○	○	○	○	○
		65tonf	○	○	○				○
	動的試験	70tonf	○	○	○				
		75tonf	○	○	○	○	○	○	○
		80tonf			○				
		85tonf	○		○	○			○

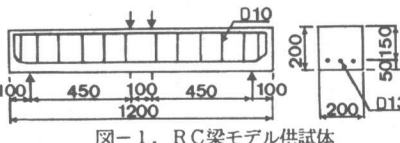


図-1. RC梁モデル供試体

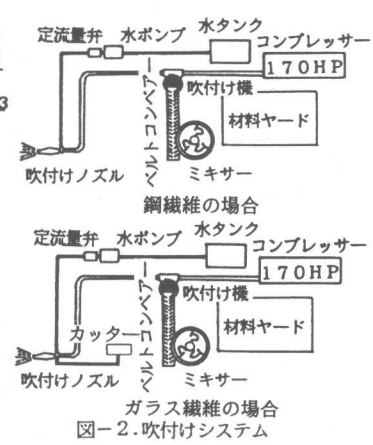


図-2. 吹付けシステム

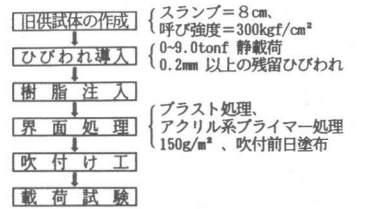


図-3. 供試体作製手順

経た後、破壊に至るまで載荷した。載荷及び除荷速度は0.01tonf/secとし、試験時の測定項目は、載荷荷重、主鉄筋ひずみ、スパン中央部のたわみ及びコンクリートひずみとした。一方、動的試験は下限荷重を0.9tonf、上限荷重を6.0~8.5tonf に適宜設定し、載荷波形は正弦波、振動数は3Hzの部分片振りを実施した。なお、下限荷重=0.9tonfは実構造物における死荷重相当分の主鉄筋応力(720kgf/cm²)から決定した。また、動的試験においては、各応力レベルにおける疲労破壊振動数を確認するとともに、ひびわれの進展状況を目視確認し、更に、所定の繰返し数で試験を中断、上限荷重までの静的載荷(載荷及び除荷速度はいずれも0.01tonf/sec)を実施することとした。試験時の測定項目は、載荷荷重、主鉄筋ひずみ、スパン中央部のたわみ及びひびわれ幅とした。なお、試験はいずれも吹付け後1日以上で実施した。

3. 試験結果

3.1 樹脂注入の影響

未補修の梁モデル供試体(以下、未補修と称す)及び樹脂注入のみを実施し、吹付けを施さない供試体(以下、注入供試体)における静的載荷試験結果を図-4に示し、両供試体の動的試験結果を図-5に示す。図-4より、注入供試体は未補修と比べ、初期ひびわれの導入に起因する初期剛性の低下が樹脂注入のみで、完全に回復しておらず、同一荷重における鉄筋ひずみも未補修に比べ大きい。これは、エポキシ樹脂とコンクリートの弾性係数の違いに起因するものと考えられる。また、図-5より、樹脂注入のみを実施した供試体の疲労性状は、特に高荷重域において劣っている。これは、初期ひびわれ導入時に発生したマイクロクラックまたは主鉄筋の付着切れなどの影響によるものと考えられる。

図-6及び図-7には、樹脂注入後、超速硬SF吹付けモルタル(厚さ=4cm、繊維混入量=1.5%)を施工した供試体と、樹脂注入を実施せずに同様のモルタルを施工して作成した供試体の静的載荷試験結果及び動的試験結果を示す。図-6より、樹脂注入ありの供試体は、樹脂注入なしの供試体に比べ、試験の全域にわたり同一荷重におけるたわみ量、鉄筋ひずみが大きく、特に、両者の差はたわみよりも、主鉄筋ひずみの測定結果において、より顕著である。これは、樹脂注

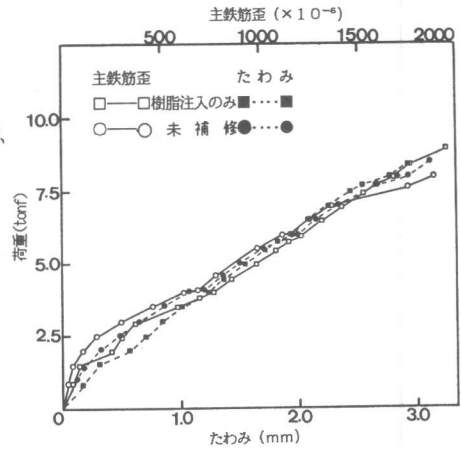


図-4. 静的載荷試験結果(樹脂注入の影響)

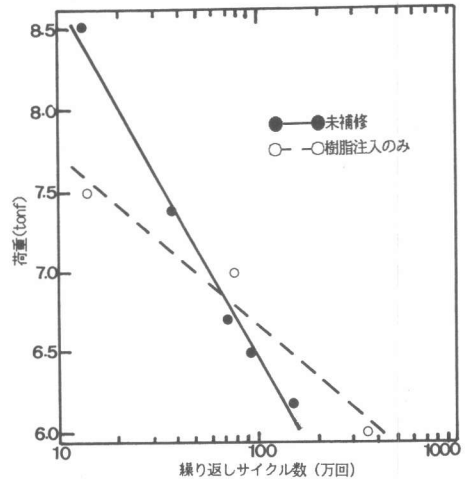


図-5. 動的試験結果(樹脂注入の影響)

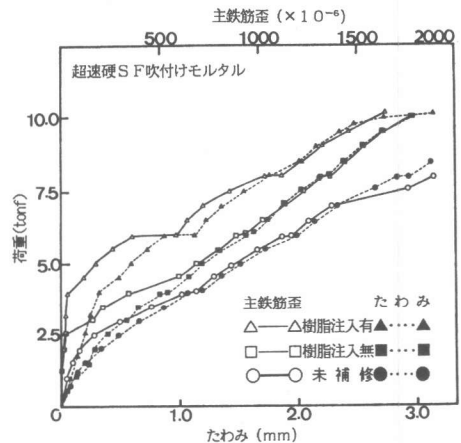


図-6. 静的載荷試験結果(樹脂注入の影響、SF)

入を実施することにより、ひびわれ部における変形の集中が緩和され、鋼繊維がより有効に機能するためと考えられる。一方、図-7より、動的試験結果においては、樹脂注入の有無による顕著な相違は認められない。今回は供試体数が2体と少なく、この原因を特定するには至らないが、後述する吹付け部の付着切れが影響をおよぼしていると推察される。

3. 2 吹付け厚さの影響

図-8及び図-9には、吹付け厚さを变化させた（超硬SF吹付けモルタルの場合、4cmと6cm、GFの場合、2cmと4cm）供試体の静的荷重試験結果を、SF及びGFに分けて示す。また、図-10には、動的試験結果を示す。図-8及び図-9より、吹付け厚さが増加すると、供試体の初期剛性及びひびわれ発生荷重は若干向上するものの、変形が増大するに従い、その差は減少し、終局耐力はむしろ吹付け厚さが薄い場合に高い耐力を示した。また、図-10より、動的試験においても、吹付け厚さの増加に伴う疲労寿命の延長は認められず、むしろ吹付け厚さが薄い場合に疲労寿命は長期化した。吹付け厚さの増加にともない、補強効果が必ずしも向上しなかった原因としては、吹付けモルタルと吹付け面との付着切れが考えられる。今回の試験においては、図-11に示すような吹付けモルタルと吹付け面との付着切れが動的試験中に発生した。この付着切れは、吹付け厚さが厚いほど、また、繊維混入量が多いほど発生しやすく、換言すれば、吹付けモルタル層の引張耐力または剛性が高いほど発生しやすい。吹付け後の供試体における補強効果は、旧コン

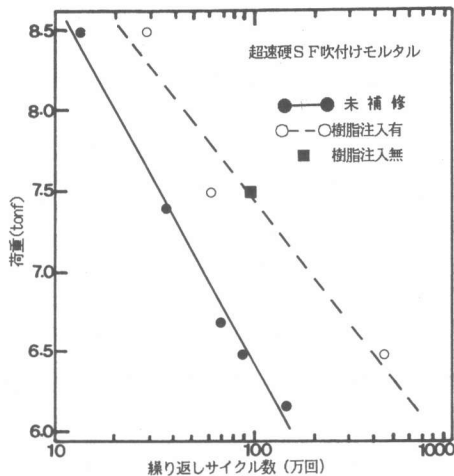


図-7. 動的試験結果（樹脂注入の影響、SF）

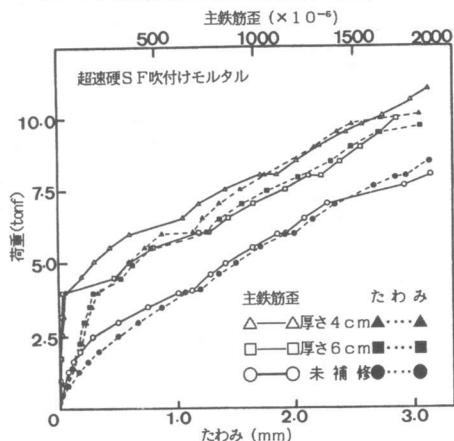


図-8. 静的荷重試験結果（吹付け厚さの影響、SF）

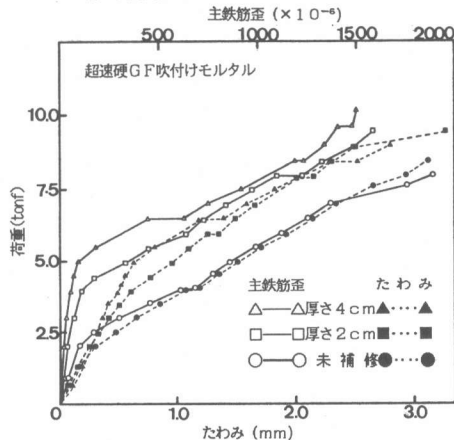


図-9. 静的荷重試験結果（吹付け厚さの影響、GF）

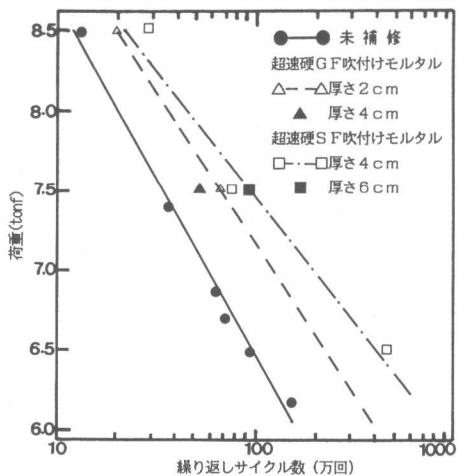


図-10. 動的試験結果（吹付け厚さの影響）



図-11. 動的試験時のひびわれ状況

クリート部から吹付け部へのせん断伝達により達成される。ここで、吹付け界面におけるせん断応力度を $\tau = S/bz$ で評価すると、載荷荷重=7.5tonf の時、 $\tau \approx 17.3 \text{ kgf/cm}^2$ となる。吹付け施工時における打継目引張強度から推定される打継目せん断強度⁵⁾と比較すれば、このせん断応力度は若干低いものの、繰返し載荷による影響及びハンチの存在による応力集中の影響で、せん断伝達能が不足し、付着切れが生じ、補強効果の低下につながったと思われる。

3. 3 繊維種類の影響

図-12には、吹付け厚さを4cm、繊維混入量を1.5% (一定)としたSFまたはGF吹付けモルタルを施工した供試体の静的載荷試験結果を示し、図-13には、動的試験結果を示す。図-12より、超速硬SF吹付けモルタルの供試体の剛性は、載荷試験の全域にわたり、GFモルタルを上回っている。SF吹付けモルタルとGF吹付けモルタルの引張力分担能を曲げ引張強度で比較すると $V_f=1.5\%$ の場合、 $\sigma_{bSF}=80 \text{ kgf/cm}^2$ に対し、 $\sigma_{bGF}=100 \text{ kgf/cm}^2$ 、換算曲げ強度で比較した場合には、 $\sigma_{bSF}=35 \text{ kgf/cm}^2$ に対し、 $\sigma_{bGF}=50 \text{ kgf/cm}^2$ となる。この事で両繊維による補強効果を考えた場合には、GFモルタルによる補強効果はSFモルタルを上回ると考えられる。しかしながら、試験結果はこの予測と相反する結果となった。これも吹付け厚さの影響の場合と同様に、吹付けモルタルの付着切れに起因するものと考えられ、これは、図-13からも推定される。

3. 4 繊維混入量の影響

図-14に超速硬GFモルタルの繊維混入量を変化させた供試体における静的曲げ試験結果を示し、図-15に動的試験結果を示す。図-14より、繊維混入量が1.5%から3%に増加すると、載荷試験の全域にわたり、部材剛性は大きく向上し、更に、終局耐力も大きく増加している。従って、図-14のみから判断すると、超速硬GFモルタルの施工による補強効果を有効に利用するためには、繊維混入量を増加することが有効であると考えられる。しかしながら、図-15に示したように、繊維混入量3%の場合には、必ずしも疲労寿命は延長していない。この原因もまたせん断伝達能の不足による付着切れの影響と思われる。

4. 補強効果に関する考察

前項においては、繊維補強吹付けモルタルの施工による補強効果を未補修と比較して考察した。しかしながら、繊維補強モルタルの吹付け施工を実施した供試体は、終局耐力またはたわみ及び主鉄筋ひずみの測定結果に基づくと、繊維の引張力分担能に起因する補強

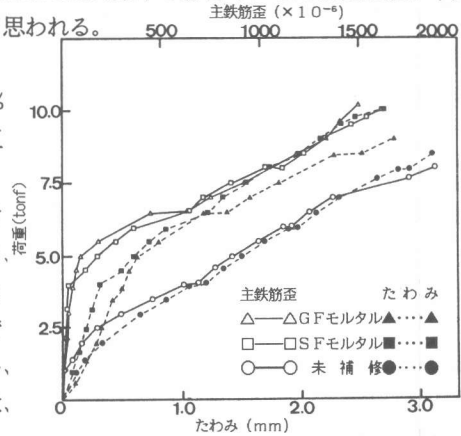


図-12. 静的載荷試験結果 (繊維種類の影響)

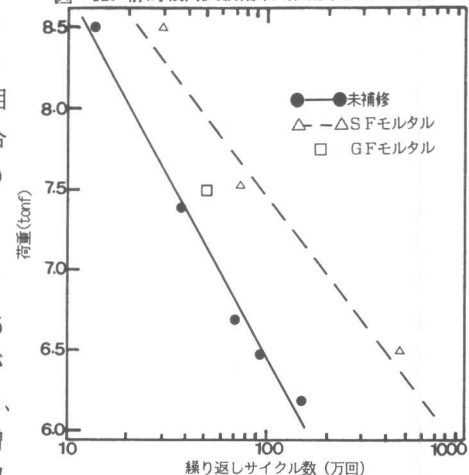


図-13. 動的試験結果 (繊維種類の影響)

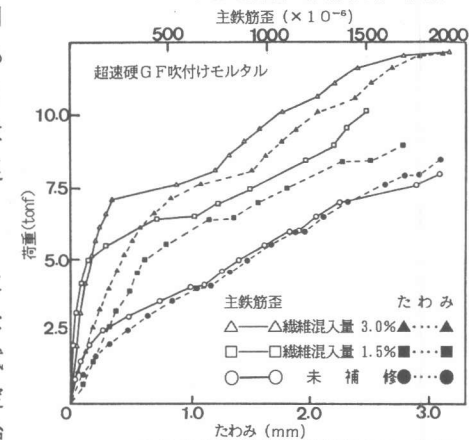


図-14. 静的載荷試験結果 (繊維混入量の影響)

効果が認められる。従って、繊維補強吹付けモルタル施工後の部材における補強効果の検討は、吹付け施工後の耐荷性状に基づくことが必要である。図-16は、今回の動的試験結果をまとめたS-N曲線であるが、S軸には、動的試験時の測定結果から求めた上・下限荷重作用時の主鉄筋応力差を用いた。図-16より、注入供試体のS-N曲線は、未補修のS-N曲線の上方に位置し、繊維補強モルタルの吹付けを実施した供試体のS-N曲線は、疲労破壊振動数が低い場合（載荷荷重が比較的高い場合）には、未補修の下方に位置する。しかしながら、疲労破壊振動数が増加した場合（載荷荷重が比較的低い場合）には、この関係はむしろ逆転する。従って、載荷荷重が比較的高く、主鉄筋応力差が大きい場合、吹付けを実施した部材の疲労性状は、未補修の場合よりも劣ると考えられる。これは、吹付けモルタル中に混入した繊維が高荷重作用時、すなわち、変形が比較的大きい場合には効果を発揮しにくく、一方、変形が比較的小さい場合、繊維の補強効果が顕著になるものと考えられる。また、樹脂注入のみを実施した供試体のS-N曲線は常に未補修の場合の上方にあり、初期ひびわれ導入により発生したマイクロクラックまたは鉄筋の局部的な付着切れが樹脂注入のみでは完全に回復出来ず、動的荷重作用時の主鉄筋ひずみが集中しにくい傾向にあるためと考えられる。

繊維補強吹付けモルタルの施工による補強効果が終局耐力の向上にも貢献することは、前述の試験結果により明らかであるが、今回の動的試験結果のS軸を載荷荷重比（動的試験時の上限荷重/静的試験時の終局耐力）とすると図-17となる。この図における超速硬SF吹付けモルタルのS-N曲線の傾きは、前述した低荷重域における補強効果を反映しているが、この点を除けば、未補修、吹付け施工供試体とも、ほぼ直線的な関係にある。低荷重域のSFモルタルの補強効果は、實際上安全側に作用し、これは繊維補強吹付けモルタル施工後の部材における終局耐力を的確に把握できれば、部材の疲労性状も同時に把握できることを示している。換言すれば、繊維補強モルタルの吹付け施工により、終局耐力が向上した部材においては、耐疲労性状も同時に改善されていると考えられる。

表-3には、今回作製した各供試体の各耐力の計算値を実測値と比較して示す。なお、繊維補強モルタルの応力-ひずみ曲線については、純引張試験時の応力-ひずみ関係をモデル化すべきである

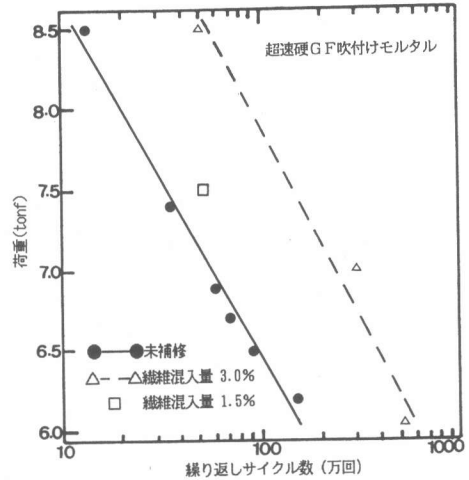


図-15. 動的試験結果（繊維混入量の影響）

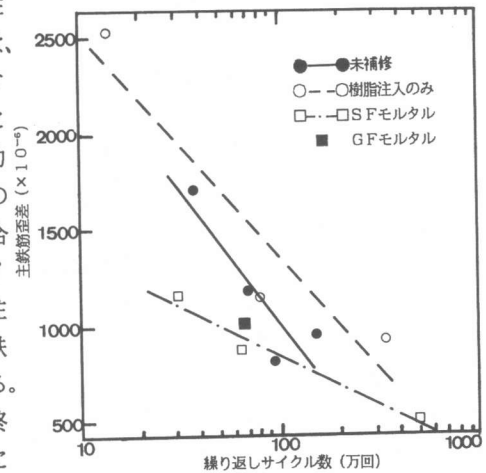


図-16. 主鉄筋応力度と疲労破壊振動数の関係

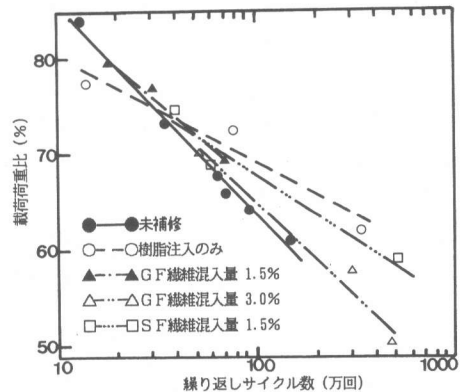


図-17. 載荷荷重比と疲労破壊振動数の関係

が、吹付けモルタルを用いた純引張試験が困難であるため、図-18に示す曲げ試験時の荷重-たわみ曲線から算出した換算曲げ強度(σ_b)を用いて、 $\sigma_b = \frac{1}{2}\sigma_c$ (const.) と仮定した。表-3より、今回の試験における終局耐力の計算値は実測値をほぼ反映して

表-3. 終局耐力一覧

	分類	σ_b	Pu (cal)	Pu (spe)	Pu-cal (%)	Pu-spe (%)	備考
1	旧供試体	—	8.75	10.15	100	100	
2	旧供試体	—	—	9.66	—	95	樹脂注入のみ
3	GF-4	25	10.22	10.76	117	106	
4	GF-4	25	10.22	10.14	117	100	樹脂注入なし
5	SF-4	25	10.22	11.06	117	109	
6	SF-4	25	10.22	10.74	117	106	樹脂注入なし
7	GF-2	25	9.51	10.79	109	106	
8	GF-4	55	11.96	12.14	137	120	

おり、樹脂注入を実施していない場合を除けば、終局耐力の算出値はすべて安全側にある。しかしながら、前項でも述べたように、繊維補強吹付けモルタル層の引張力分担能が大きい場合、すなわち、吹付け層が厚いまたは繊維混入量が多い場合には、計算値との整合性が低下しており、これは吹付けモルタル層の付着切れの影響と推察される。従って、今後は、旧コンクリート部から繊維補強モルタル層へのせん断伝達能を考慮した、終局耐力等の算定方法について検討することが必要であると考えられる。

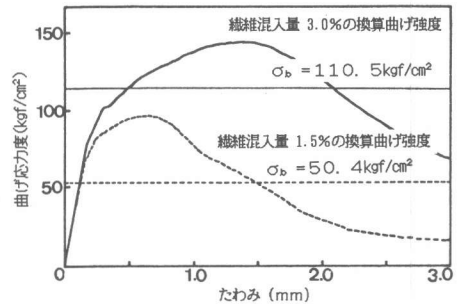


図-18. 荷重-たわみ曲線 (GF吹付けモルタル)

5. まとめ

(1) 繊維補強モルタルの吹付け施工時には、エポキシ樹脂注入等を用いて、ひびわれ部における変形の集中を緩和することは、繊維混入による補強効果を発揮させるうえで有効である。

(2) エポキシ樹脂注入等の処置を施した後、繊維補強吹付けモルタルを施工した部材においては、ひびわれ発生前の部材剛性の回復が期待できる。

(3) 繊維補強吹付けモルタルを施工して、所定の補強効果を得るためには、吹付けモルタルの引張性状のみならず、旧コンクリートと吹付けモルタルとの付着性状に留意し、両者間のせん断伝達能に基ずく補修設計を実施する必要がある。

(4) エポキシ樹脂注入等の所定の措置を施した後、繊維補強吹付けモルタル施工した部材の疲労破壊振動数は、未補修と比較して著しく向上し、特に低荷重レベルにおける延命効果に優れる。更に、施工後の終局耐力を算出することにより、疲労破壊振動数を推定できる。

(5) 繊維補強吹付けモルタル施工後の部材の終局耐力は、繊維補強吹付けモルタルの応力-ひずみ関係を把握することにより、算出することができるが、今後、繊維補強吹付けモルタルの補強効果を定量化し、更に合理的な補修設計を実施するためには、諸係数の精度向上を図る必要がある。

6. 参考文献

- 1) 峰松敏和、内田美生、松崎邦彦、佐藤雅男：超速硬セメントと鋼繊維を用いた吹付けモルタルの諸性状、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、pp.437~pp.440
- 2) 牛島栄、鳥取誠一、宮田尚彦、峰松敏和：ガラス繊維と超速硬セメントを用いた吹付けモルタルの施工方法及び諸性状、第9回コンクリート工学年次講演会論文集、1987、pp.479~pp.482
- 3) 浅野昭一、西岡哲、峰松敏和：超速硬セメントと鋼繊維を用いた吹付けコンクリートによる急速補修工事、コンクリート工学、Vol.23、No.2、1985、pp.28~pp.35
- 4) 内田美生、田中喜樹、牛島栄、鳥取誠一：ガラス繊維と超速硬セメントを用いた吹付けモルタルの施工例、第9回コンクリート工学年次講演会論文集、1987、pp.483~pp.486
- 5) 峰松敏和、野村和弘、内田美生：超速硬セメントコンクリートと既設コンクリートとの打継目付着特性、セメント技術年報、Vol.40、1986、pp.245~pp.248