論文 PCa 壁高欄への部材更新時のアンカーおよびエポキシ接着による固 定に関する基礎的研究

坂本 和也*1·審良 善和*2·武若 耕司*3·大貝 麻梨子*4

要旨:プレキャストコンクリートは品質面や施工性などに優れ,コンクリート工の生産性を高める方法とし て非常に有効な手段である。しかしながら,現場打ちコンクリートとの一体性の確保やプレキャスト製品同 士の一体化において,接合部の性能の確保が難しいという課題を抱えている。そこで本研究では,壁高欄の プレキャスト部材による交換技術に着目し,既設の床版とプレキャスト部材を一体化させる方法として,ア ンカーとエポキシ樹脂を併用する新しい工法を提案し,その工法の構造安全性を確認するための一連の実験 を行った。その結果,接合部のコーン状破壊耐力が,エポキシ樹脂併用の効果で向上することを確認した。 キーワード:プレキャストコンクリート,壁高欄,エポキシ樹脂,アンカー,更新技術

1. はじめに

橋梁における壁高欄は、交通事故の際に車両の落下を 防止するための防護柵として極めて重要な部材である。 しかしながら、日本では高度経済成長期に建設された構 造物の老朽化が深刻な問題となっており、壁高欄に関し ても、腐食した鉄筋の膨張圧によりかぶりコンクリート が剥落するなど早急な更新が必要とされている。

また日本では、少子高齢化にともなう熟練技能者の不 足も社会問題化しており、建設分野においてその傾向は 特に顕著である。これらの問題の解決策として、プレキ ャスト部材の利用促進に注目が集まっている。

従来、プレキャスト部材の維持更新需要への適用は、 あくまで老朽化したプレキャストコンクリートの交換と いう形で行われることが多かったが、現場打ちコンクリ ートで建設されたインフラ構造物の部分的補修、部材単 位の交換、長寿命化というような目的での使用に対する 需要が高まりつつある。これは、多品種少量生産に不利 であるというプレキャストコンクリートの特徴に起因す ると考えられるが、壁高欄のように、比較的同一形状が 連続する線状構造物等では、接合方法の改良などにより、 老朽化した現場打ちコンクリートの交換用部材としてプ レキャスト部材を利用できるものと考えらえる。

また壁高欄の更新工事において,既存の壁高欄を撤去 した後,プレキャスト製壁高欄に交換することができれ ば,工期短縮による交通渋滞の軽減など,そのメリット はさらに大きくなる。その際に問題になるのは既存の床 板の厚さや強度不足である。そのためにアンカーの引抜 強度が十分に得られない,また既存の鉄筋が障害になっ

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 (学生会員)
*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科准教授 工博 (正会員)
*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科教授 工博 (正会員)
*4 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科

て所定の位置にアンカーを挿入することができないケー スが多発している。

そこで本研究では、既存の躯体とプレキャスト製壁高 欄を一体化させる方法として、示方書や指針に示された 方法ではなく^{1)~5)}、アンカーとエポキシ樹脂を併用する ことにより、アンカーの本数の削減ならびに埋め込み長 さを低減する新たな工法を提案し、実用化に向け性能評 価を行った。

さらにエポキシ樹脂を橋梁に用いる場合に懸念され る事項としては、充填不良部の発生、硬化収縮による接 着不良部の発生、疲労による経年的な接着力低下が挙げ られる。そこで、あらかじめ2000万回疲労試験により疲 労耐久性が検証されているエポキシ樹脂を用いの、硬化 収縮を低減するための特殊フィラー(珪砂に充填作業性 を向上させるためのフライアッシュを少量混入した)の 混入率を様々に変化させて充填性能、硬化収縮量などに ついての試験も合せて行った。

2. フィラー混入率の違いによるエポキシ樹脂の特性

2.1 試験概要

エポキシ樹脂は力学的特性に優れており,土木分野で は接着剤や被覆材など多用途で利用されている。しかし 接合部の主要材料として使用された事例は少なく,硬化 収縮に伴う内部応力によりエポキシ樹脂自体にひび割れ 等の破損,欠陥が及ぶ事も考えられる。この問題を抑制 するには,フィラーを改質材として混入することが効果 的であるという既往の研究に基づき[¬],今回,エポキシ 樹脂に粒度分布を調整したフィラーを混入し,混入率の 違いによる硬化収縮、充填性能の確認を行った。

2.2 試験方法

(1) 硬化収縮試験

フィラー混入率の違いによる収縮の程度と反応熱を 明確化するために、図-1のようにひずみゲージを用い てエポキシ樹脂の硬化時の収縮量とその時の反応熱を同 時に測定した。エポキシ樹脂の厚さは20mmとし、高さ 10mmの位置に埋め込み型のひずみゲージを固定した。 試験体の種類はフィラー混入率を体積置換で0%、25%、 50%と変化させ、それぞれ2回ずつ測定を行った。混合・ 撹拌はハンドミキサーにて樹脂液(主剤・硬化剤)を2 分間撹拌後、フィラーを加え、さらに2分間撹拌した。 以下の試験に関しても全て同条件の混合・撹拌にて試験 を行った。



(2) 充填性能試験

プレキャスト製壁高欄の底板部を模擬した図-2に示 す供試体を作製し,フィラー混入率を0%,25%,50%, 60%と変化させたエポキシ樹脂を注入ポンプにて充填し, 完全に充填されるまでの時間と,硬化後の接着状況につ いて確認した。合せて撹拌直後のフロー値,および粘度 もそれぞれ測定した。



2.3 試験結果

(1) 硬化収縮試験

内部収縮量の時間変化を図-3に、またその時の温度 変化を図-4に示す。図-4よりフィラー混入率0%時は 硬化開始とともに著しく温度が上昇した。一方、フィラ ーを混入することで温度上昇を抑える効果が確認できる。 エポキシ樹脂は硬化反応により発熱する。フィラーを混 入することで、エポキシ樹脂の全体割合が減少すること と、さらに反応熱をフィラーがある程度吸収または熱伝 達を低減することにより,発熱が抑えられていると考え られる。また図-3,図-4より,エポキシの温度上昇に 伴い,いったんエポキシ樹脂が膨張し,その後温度が下 がるにつれてエポキシ樹脂が収縮し徐々に安定していく ことが分かる。硬化収縮の原因は内部応力(収縮力)の増 大と考えられる。内部応力は硬化冷却時に増大するとい われており,その為,発熱温度が高いほど,収縮は大き くなると考えられる。それと比較してフィラー混入率 25%と 50%のエポキシ樹脂には著しい温度上昇や極端な 内部収縮は見られない。これは発熱温度が低いため,収 縮量も小さくなったと考えられる。



(2) 充填性能試験

供試体の種類と、それぞれの試験結果を表-1に示す。 フィラーの混入量が多くなると、粘度の値は増加し、フ ロー値は減少した。充填時間を比較すると、25%混入が 最も短く、次に50%混入の結果になった。しかし硬化後 の空気量を確認すると、写真-1のように、25%混入し た供試体の上面に残留した空気(未接着部分)が最も多 くなっていた。これは全て同一の方法で撹拌を行ってお り、粘性が低い樹脂混合物は、より樹脂単体に近くなる ため、空気を巻き込んでしまったと考えられる。

これらの結果を踏まえ以下の試験については、エポキ

シ樹脂にフィラーを50%混入させたエポキシ樹脂混合物 (以下,エポキシモルタル)を選定した。



写真-1 フィラー混入率 25%の供試体状況

7,5	フロー値 (mm)		业上正式	空気量	充填
ノイフー			相度	面積率	時間
氓八平	縦	横	(Pa•s)	(%)	(秒)
0%	350	265	0.5	6.7	233
25%	265	260	1.9	38.5	108
50%	195	195	11.3	0.4	153
60%	170	170	28.7	1.6	234

表-1 供試体の種類と試験結果

3. 引抜試験による効果検証

3.1 試験方法

アンカーの引抜耐力は、使用するアンカーの径や埋め 込み長さ、さらに充填材の性能により変化する。そこで、 エポキシモルタル併用の効果を確認するため、プレキャ スト部材に同一条件にてアンカーを埋め込み、簡易引張 試験機を用いてアンカー引抜耐力を測定した。比較用と して a) アンカーのみ、b) アンカー+無収縮モルタル、 c) アンカー+エポキシモルタルの3つの条件で3体ずつ 試験を行った。試験の概要を図-5 に示す。またアンカ 一部の定着には、無機系充填材を使用し、コンクリート 面は型枠面(乾燥状態)とした。



3.2 試験結果

試験結果を表-2に示す,結果は3体の平均値である。 アンカーの破壊モードには,アンカーボルトの降伏,お よび破断,コンクリートのコーン状破壊,アンカーボル トと樹脂との付着破壊があるが,今回の破壊形態は全て コンクリートのコーン破壊によるものであった。引抜耐 力を見ると,供試体 c が最も大きく,供試体 a が最も小 さい。これは写真-2および写真-3に示すように、アン カーのみの場合よりもアンカーとエポキシモルタルを併 用した場合の方がコーン破壊による円錐底面積、すなわ ち有効水平投影面積が大きくなっており、結果的にアン カーの最大引張荷重も大きくなったと考えられる⁸。図 -6にコーン状破壊の概念図を示す。

これに対し,供試体 b の引張耐力は,供試体 a とほぼ 同等の結果であった。これは,無収縮モルタルとエポキ シモルタルの付着強度の違いによるもので,供試体 b で は引張試験の途中で無収縮モルタルが,コンクリート躯 体から完全に剥離してしまうため,アンカーの引抜耐力 向上に寄与しないためと考えられる。

表-2 引抜試験の結果

供試体	а	b	с		
引抜耐力(kN)	12.8	13.3	21.9		



写真-2 供試体 a のコーン破壊状況



写真-3 供試体 c のコーン破壊状況



4. 静的載荷試験による固定方法の効果検証

4.1 試験概要

本試験では、実構造物の壁高欄の取換えを想定し、プ レキャスト部材と既設床版を模擬したブロックを作成し、 それらを実際の施工と同様の方法で接合させ、静的曲げ 載荷試験により接合部の性能を確認した。供試体の形状 を図-7に示す。



4.2 供試体の作製

供試体は、床版部を模擬したブロックに開口部 (φ35 mm, 深さ90 mm)を設け、そこに写真-4 のように壁高 欄の底板部を模擬したブロックにあらかじめねじ込まれ ているアンカー筋 (SD345, D16, 長さ 100mm)を挿入 し、それぞれのブロックの間に20 mm の隙間が出来るよ う固定し、その隙間およびアンカー挿入部にエポキシモ ルタルを注入した。なおコンクリート面はどちらも型枠 面とし、乾燥した状態で充填作業を行った。



写真-4 供試体作製状況

それぞれのブロックの大きさは、長さ800 mm×幅300 mm×厚さ465 mmで、アンカーの位置や径、長さ、および接合部の幅は実際のプレキャスト製壁高欄の設計に基づいたものである。比較用として、隙間充填部分に無収縮モルタルを使用した供試体と、アンカーを使用せず(開口部も設けない)エポキシモルタルのみで接合した供試体を作成し、同様に静的載荷試験を行った。表-3 に供試体の種類を示す。

表-3	供試体の種類
-----	--------

	アンカー	エポキシ モルタル	無収縮 モルタル
供試体 A	0	0	—
供試体 B	0	_	0
供試体 C	_	0	

供試体の使用材料を表-4,配合を表-5に示す。また 材齢 14 日での円柱供試体による圧縮強度の平均値は 41.6MPa であった。

表-4 供試体の使用材料

ナイン (10)	普通ポルトランドセメント
モメンド(C)	密度 3.15
プロアン 一般が大の	炭酸カルシウム
石灰石倾杤木(P)	密度 2.71
細骨材(S)	密度 2.66, 粗粒率 2.70
粗骨材(G)	密度 2.63, 粗粒率 6.60
河和刘(▲□)	高性能 AE 減水剤
化比不日月小(AD)	密度 1.065

表-5 供試体の配合

W/C	単位量(kg/m³)					
(%)	W	С	Р	S	G	AD
51.5	172	334	201	755	903	5.80

4.3 試験方法

試験方法は図-7に示すように,支持スパン 1395 mm の供試体に対し,載荷スパンを 465 mm とする 2 点静的 載荷で行った。



写真-5 静的載荷試験状況

載荷は**写真-5** に示すように大型 2 軸試験機を用いて 行い,供試体が破壊するまで単調載荷し,破壊までの供 試体接合部のひずみ,アンカーのひずみ,破壊後の供試 体状況を確認した。

4.4 試験結果

供試体の破壊荷重の結果を表-6に示す。供試体Aと 供試体Bでは、破壊荷重はAの方が大きく、エポキシモ ルタル併用の効果が確認できる。破壊の状況を写真-6, 写真-7に示す。それぞれ左側が側面、右側が正面から 撮影した写真である。

表-6 静的載荷試験の結果

供試体	А	В	С
破壊荷重(kN)	135.0	70.2	121.0



写真-6 供試体 A の破壊状況



写真-7 供試体Bの破壊状況

これらの写真を見ると、3. 引抜試験による効果検証の結 果と同様に、供試体 A の方がコーン破壊の円錐の角度が 緩やかになっており、それに起因して引抜耐力が大きく なったと考えられる。これは参考文献 8)における式(1) および式(2)から導かれるコーン破壊角と引抜耐力の関 係、即ち破壊角の角度が広がると引抜耐力が向上すると いう結果と、定性的に一致する。

$$P_c(x) = \sigma_{cone} A_c(x) \tag{1}$$

$$A_c(\mathbf{x}) = \pi \left\{ (\mathbf{x} + u_{\theta}) \tan \theta + \frac{D}{2} \right\}^2 - \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2$$
(2)

x:表面からアンカー先端までの深さ, θ: コーン破壊角, Pc(x):アンカーの引抜耐力, σ cone:コンクリートのコー ン破壊強度, Ac(x):有効水平投影面積, D:アンカー径。

また供試体 C の破壊状況を写真-8 に示す。 供試体 C の破壊形態は,最大荷重到達直後のエポキシモ ルタルとコンクリートとの接着面近傍における,コンク リートの脆性的な凝集破壊であり,制御破壊の観点より, アンカーとの併用が望ましいと考えられる。

図-8に供試体 A の荷重を載荷した際の隙間充填部の ひずみ(エポキシモルタル)と荷重の関係を,図-9 に 供試体 B の隙間充填部のひずみ(無収縮モルタル)と荷 重の関係を示す。またその時の接合部のゲージの位置を 図-9 に示す。

供試体 B に関しては, 無収縮モルタルとの接着が十分 でなく, 載荷初期より界面に目開きが生じている状況で あった。このことから、接合面のひずみが発生しなかっ たと推察される。それに対し供試体 A では、上面と側面 上は圧縮側、側面中、側面下、下面は引張側にひずみ量 が計測されており、エポキシモルタルとプレキャスト部 材が完全に一体化し、接合部に応力伝達がなされている ことが確認できる。また、荷重が 80kN 程度までは概ね 線形であり、弾性域にあると推察される。



写真-8 供試体 Cの破壊状況



次に内部の引張側のアンカーについて、荷重とひずみの関係を図-11および図-12に示す。また引張アンカーに貼り付けたゲージの位置を図-10に示す。





図-11より,供試体 A の引張側のアンカーのひずみは 100kN あたりまでは比較的小さな値を示しているが, 100kN を超えたあたりからひずみの傾きが大きくなって いることが分かる。これは図-8 の結果の, 100kN を超 えたあたりで接合部の下面のひずみが減少している時期 と合致しており,エポキシモルタルとコンクリート界面 に付着切れが生じたと同時に,アンカーが荷重を負担し はじめた結果であると考えられる。これに対し図-12か ら分かるように,供試体 B では載荷直後から,アンカー にひずみが生じており,ひずみが 800µc を超えた直後に, コンクリートのコーン破壊耐力が限界に達し,破壊に至 ったと考えられる。いずれにしても,破壊荷重は,供試 体 A の方が供試体 B に比べ2 倍程度大きく,エポキシ接 着による効果とともに,高い一体性を保持していること を確認した。

5. まとめ

プレキャストコンクリートの維持補修分野での適用を 目的とし,既存のコンクリートとの一体化を図る方法と して,エポキシ樹脂とアンカーを併用する新しい工法を 提案し,その構造安全性を評価すべく,各種の性能評価 試験を実施した。その結果得られた知見は,以下の通り である。

- (1) エポキシ樹脂にフィラーを混入することで硬化収 縮率を大幅に低減できることが確認できた。また作 業性や充填率を考慮すると、その混入率は全体容積 の50%が最も適していた。
- (2) アンカーとエポキシモルタルを併用することで、コンクリートのコーン破壊時の有効水平投影面積を拡大することが可能となり、アンカーのみの場合と比較して、埋込み長さやアンカー径が同一条件であっても、引抜耐力を向上できる可能性が示唆された。

本実験で,アンカー材とエポキシモルタルを併用する ことでコンクリートのコーン破壊による引抜耐力が向上 することが確認できた。これらの結果はアンカーの埋め 込み深さを長く取れない場合,また本数を多く取れない 場合などにおいて,必要耐力を確保するために有効な手 段である可能性を示唆している。今後これらの結果を解 析結果と照合するなどして,より信頼性の高い技術とし て確立すべく,さらなる検証を進めたいと考える。

参考文献

- (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説(I共通編 IVコンクリート橋編), 2012.3
- (社)日本道路協会:防護柵の設置基準・同解説,2008.1
- (社)日本道路協会:車両用防護柵標準仕様・同解説, 2004.3
- 4) 建設土木研究所道路部交通安全研究室、日本道路公 団試験研究所、(社)セメント協会他:高速化対応型 コンクリート製防護柵に関する共同研究報告書、 Vol.207, 1998.6
- 5) 日本建築学会:各種合成構造設計指針・同解説(第4 編 各種アンカーボルト設計指針),2010
- 6) 篠原敬冶、小林行雄:多数回疲労を受けたエポキシ 樹脂モルタルの疲労挙動―第2報―2000万回の圧縮 疲労、神奈川県産業技術総合研究所研究報告、9, 25-29(2003)
- 7) Ferdous, W., Manalo, A., Aravinthan, T., Erp, G. V.: Properties of Epoxy Polymer Concrete Matrix: Effect of Resin-To-Filler Ratio and Determination of Optimal Mix for Composite Railway Sleepers, Construction and Building Materials, Vol.124, pp.287-300, July.2016
- 前野裕文,後藤芳顯,小畑 誠,松浦 聖:引き抜き力を受ける付着型アンカーボルトの定着部の破壊機構に関する研究,土木学会論文集, Vol.17, No.441/I-18, pp.185-192, 1992.1