

施工 15 年経過した鋼板接着工法使用エポキシ樹脂の性能に関する調査研究

PERFORMANCE STUDIES ON EPOXY RESIN USED FOR STEEL BONDING SYSTEM,
FOR WHICH 15 YEARS HAVE ELAPSED SINCE ITS PRACTICAL APPLICATION

川村 勝* 林田 充弘** 吉川 紀*** 石崎 嘉明**** 藤田 洋佐*****
Masaru KAWAMURA, Mituhiro HAYASHIDA, Osamu YOSHIKAWA, Yoshiaki ISHIZAKI and Yosuke FUJITA

* 阪神高速道路公団 保全施設部 保全技術課 保全設計係長(〒541 大阪市中央区久太郎町)

** 阪神高速道路公団 保全施設部 保全技術課 主査(〒541 大阪市中央区久太郎町)

*** 財団法人阪神高速道路管理技術センター 理事(〒541 大阪市中央区南本町)

**** 財団法人阪神高速道路管理技術センター 調査部 調査第二課 調査係長(〒541 大阪市中央区南本町)

***** 株式会社 構造建設 営業部 次長(〒540 大阪市中央区南船場)

Hanshin Expressway Corporation suffered from major damages occurred on reinforced concrete slab in 1972. As the subsequent countermeasures, steel bonding system combining steel with epoxy resin was investigated and put into its execution. In order to verify a long term effectiveness of epoxy resin used in this system, we have conducted quality control test over long period of time, at the intervals of zero year, 2 years, 5 years, 10 years and 15 years since 1980, and we are pleased to report the aforesaid results that we have kept on making tracing survey of its performance.

Key Words : epoxy resin, reinforced concrete slab, steel bonding system, tracing survey of performances.

1. はじめに¹⁾

鉄筋コンクリート床版は、直接輪荷重を支えている構造部材で、過酷な荷重状態にあり、ひとたび損傷を生じると輪荷重の作用、雨水の浸透などによって短期間のうちに損傷が進展する。昭和47年に鉄筋コンクリート床版に穴があくという事故が発生した。その後、全国の道路橋の床版に破損事故が相次ぎ全国的な問題となった。阪神高速道路公団(以下、「公団」という)では、損傷事故発生以来、鉄筋コンクリート床版に関する実験的・理論的解析を行うと同時に床版損傷に関する補修工法もあわせて行った。実験の結果は、増設縦桁工法、鋼板接着工法の両工法とも補強効果が期待できるが、公団では鋼板接着工法単独で十分補強効果があるとの研究結果から、この工法を採用している。

鋼板接着工法によって補強された床版は、曲げ剛度が2.5~3倍ほど大きくなり、コンクリートの曲げによる引張りひずみが小さく新しいひずみが発生しない。その結果、コンクリートの疲労損傷の進行を抑制する効果があると考えられる。阪神高速道路は昭和39年に供用されて以来、その建設が進み32年が経過し、その結果、200 kmを自動車交通に供している。このうち約55%が鉄筋コンクリート床版である。公団の床版の設計基準の変遷は鋼道路橋示方書の変遷とともに床版厚が徐々に増厚されて、昭和40年代初期はおよそ18cmであったものが今では

24cm程度になっており、剛性の増加を満たしてきている。しかし、道路橋示方書が平成5年11月に改訂されてからは既設橋梁に25 t 荷重への対応として鋼板接着工法などを実施していかなければならなくなった。このように公団では床版の補強工法として、鋼板とエポキシ樹脂による接着工法が数多く実施されてきているため、この工法に使用されているエポキシ樹脂の長期的な効果を確認する必要がある。本報告は昭和55年から、15年間にわたりエポキシ樹脂の機械的性能について追跡調査してきたので、その結果を報告するものである。

2. 供試体

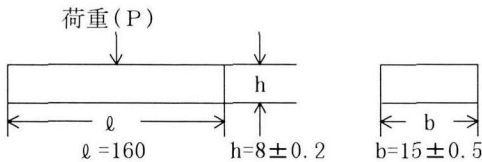
供試体の成形に当たっては、室内供試体(事前の材料試験用供試体)と現場供試体(施工時の現場管理用供試体)に分けられる。室内供試体の作製は、主剤と硬化剤の計量を0.1 g 単位で正確に計量し、その攪拌はゆっくりと行い、混合した試料はモールドの中央から気泡が入らないように静かに注ぎ込むなどの配慮をして行うものである。また、現場供試体の作製については施工中の現場で、ロット毎に攪拌の後に採取して成形を行うものであり、自然環境の影響を受け易くなる。本長期管理試験に使用する供試体は施工中に現場で採取し、以下に述べる試験項目ごとに5種類を5回分作製した。

2.1 比重試験

比重試験は、図－2に示す圧縮試験片を使用した。

2.2 曲げ試験片

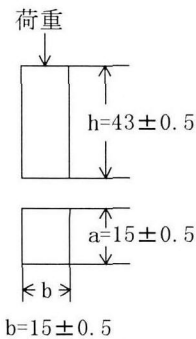
曲げ試験片は、図－1に示すように、長さ160mm、高さ8±0.2mm、幅15±0.5mmに形成した。



図－1 曲げ試験片 (単位：mm)

2.3 圧縮試験

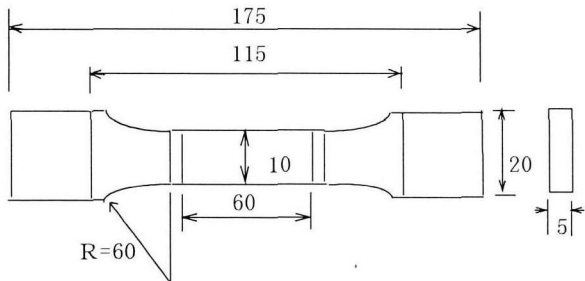
圧縮試験片は、図－2に示すように、高さ43±0.5mm、幅15±0.5mm、厚さ15±0.5mmに形成した。



図－2 圧縮試験片 (単位：mm)

2.4 引張試験

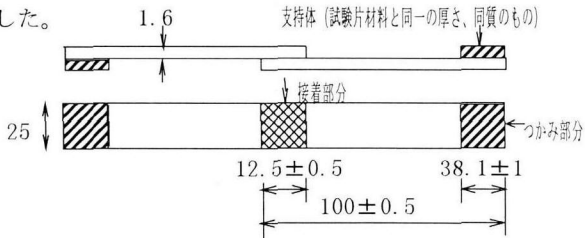
引張試験片は、図－3に示す形状・寸法に加工した。標点は供試体片の面に傷を付けないように注意した。



図－3 引張試験片 (単位：mm)

2.5 引張せん断試験

引張せん断試験片は、図－4に示す形状・寸法に作製した。樹脂の接着面は、サンドペーパー、サンドブラストなどで研磨処理し、接着剤は薄く塗布し、クリップ、テープなどを使用して十分な接着を行った。使用材料は、鋼板 (SS400またはSPCC1) とし、 部分に接着剤を塗布した。



図－4 引張せん断試験片 (単位：mm)

2.6 養生期間および養生方法

以上のようにして作製した供試体の養生期間および養生方法を表－1に示す。

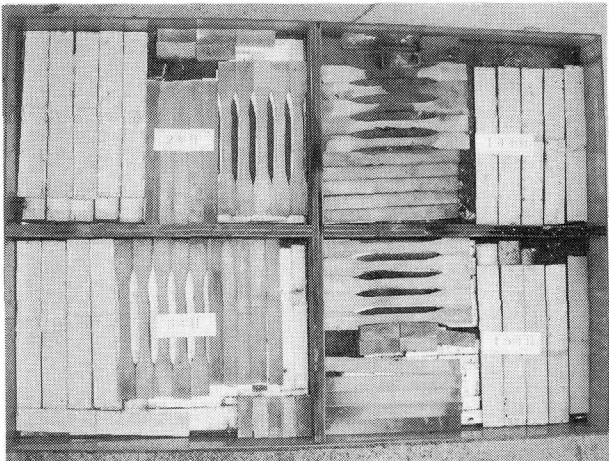
表－1 養生期間、および養生方法

養生期間	養生方法 (公団基準)
0年目	現場養生を1～2日間行った後、20℃で養生を行い通算養生期間は7日間とした。
2年目	0年目と同時に作製した試験片を大気温湿度条件となる屋外養生槽中に保管し、所
5年目	定期間ごとにとり出して試験を行う。
10年目	
15年目	

3. 試験項目ならびに試験方法

施工後1週間養生したものを測定値0年の結果とし、経年変化の状況をこれと比較して判断することとした。

残りの供試体は屋外槽中 (写真－1) に保管し、2年、5年、10年、15年目に取り出し試験を行った。



写真－1 供試体の屋外槽中

3.1 比重試験 (硬化物)

物質の重さとそれと同体積の水の重さとの比を測定して求める。(JIS K-7112-1980に準ずる)

蒸留水をビーカーに入れて20±2℃に保ち、試験片を金属線 (φ0.1mm以下) で水中に吊り下げ、重さを0.1mgまで正確に測定した。

比重 (S) は、

$$S = \frac{a}{a - b}$$

にて計算した。

a : 供試体の空中における重さ (g)

b : 供試体の蒸留水における重さ (g)

3.2 曲げ試験

試験片の両端部分を支点として、支えて単純支持ばりとし、支点間距離Lは15hとなるようにした。その中央部に上部から4mm/min速度で集中荷重を加え、破壊荷重に達した時の最大曲げ強さをいう (JIS K-7203-1995に準ずる)。5個の算術平均とした。

曲げ強さは、

$$\sigma_{fb} = 3PL / 2bh^2$$

にて計算した。

σ_{fb} : 曲げ強さ (N/mm²)

P : 供試体に加えた最大荷重 (N)

L : 支点間距離 (mm)

b, h : それぞれ試験片の幅ならびに高さ (mm)

3.3 圧縮試験

供試体を加圧面の間に置き、0.1±0.5mm/minの速度で荷重を加え、供試体が降伏した時の荷重を供試体の元の最小断面積で除した値を圧縮降伏強さとした (JIS K-7208-1995に準ずる)。5個の算術平均とした。

圧縮降伏強さは、

$$\sigma_c = P / A$$

にて計算した。

σ_c : 圧縮降伏強さ (N/mm²)

P : 供試体が降伏したときの荷重 (N)

A : 供試体の元の最小断面積 (mm²)

3.4 引張試験

供試体に 5±1mm/minの速度を加え、最大引張荷重を供試体の元の最小断面積で除した値を引張強さとした (JIS K-7113-1995に準ずる)。5個の算術平均とした。

引張強さは、

$$\sigma_t = P / A$$

にて計算した。

σ_t : 引張強さ (N/mm²)

P : 最大引張荷重 (N)

A : 供試体の元の最小断面積 (mm²)

3.5 引張せん断試験

金属片の両端を治具に固定し、荷重速度1~2mm/minで載荷し、接着箇所が破断したときの荷重を接着面積で除した値を引張せん断強さとした (JIS K-6850-1994に準ずる)。5個の算術平均とした。

引張せん断接着強さは

$$\sigma_{ts} = P / A$$

にて計算した。

σ_{ts} : 引張せん断接着強さ (N/mm²)

P : 破断時の荷重 (N)

A : 接着面積 (mm²)

以上をまとめると表-2のとおりとなる。

表-2 試験項目・試験方法・規格値

試験項目	試験規格	規格値	備考
比重	JIS K-7112	1.0~1.3	昭和57年度分までは、JIS K-6911
圧縮降伏強さ	JIS K-7208	600kgf/cm ²	
曲げ強さ	JIS K-7203	500N以上	
引張強さ	JIS K-7113	300N以上	
引張せん断接着強さ	JIS K-6850	100N以上	JIS K-6850

4. 解析方法ならびに解析結果²⁾

4.1 解析方法

それぞれの製品のロットが異なっているが、昭和55年度の各工事ごとに作製した現場供試体の試験結果データを集積し、一群のデータと見なして統計的手法を用いて処理した。また、解析精度の向上のため次の基準を適用して、試験片自体の欠陥が原因と考えられる測定値は削除した。圧縮降伏強さ、曲げ強さについては、500kgf/cm²以下、引張強さは250kgf/cm²以下、引張せん断接着強さは90kgf/cm²以下をデータから削除した。なお、比重については削除する異常データはなかった。

以上の考えに基づき、解析から削除したデータの各試験項目に占める割合を年度ごとにまとめたものが表-3である。

表-3 昭和55年度供試体の各試験年度毎の削除数一覧表

試験項目	2年目	5年目	10年目	15年目
比重	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
圧縮降伏強さ	4(4.0)	0(0)	0(0)	0(0)
曲げ強さ	6(6.0)	6(6.0)	4(4.2)	2(2.0)
引張強さ	6(6.0)	11(11.0)	10(10.0)	10(10.0)
引張せん断接着強さ	1(1.0)	1(1.0)	2(2.0)	2(2.0)

注) 0年目の試験値には削除データなし。()内は%を示す。

曲げ強さ、および引張強さに異常データ(削除データ)が多いのは、現場で作製した供試体の形状不良、気泡混入などの供試体作製上の不備が試験結果に対して顕著に表れたためと考えられる。

4.2 解析結果

昭和55年度施工分の鋼板接着工法における長期品質管理用試験片0年、2年、5年、10年、15年を経過したものについて、表-2に示す5項目に対して約2,500データをえた。

解析結果を各強度の平均値±2σの推移図でもって以下に示す。図-5~8の○印は、10年目時点で回帰分析により予測した15年目の平均強度である。また、図-6, 7の▲印は大規模補修工事(全面通行止めなど)時に、定期点検で損傷の報告がなされている鋼板補強床版の鋼板を撤去して、そのエポキシ樹脂を採取し、曲げ強さ、引張り強さの試験をして得た値である。以下に各試験項目ごとの結果を示す。

(1) 比重

比重に関する試験結果を表-4に示すように、バラツキは少なく規格値の下限値は満足している。

表-4 比重の結果一覧表

経過年数	データ数(N)	最大値	最小値	範囲=R	平均値χ	標準偏差σ	変動係数V
0年	60	1.14	1.12	.02	1.135	.006	.005
2年	100	1.15	1.13	.02	1.138	.005	.005
5年	100	1.15	1.13	.02	1.136	.005	.005
10年	99	1.15	1.14	.01	1.143	.005	.004
15年	100	1.16	1.14	.02	1.158	.004	.003

※規格値1.1~1.3

(2) 圧縮降伏強さ

圧縮降伏強さは、表-5、図-5に見られるように強度のバラツキは小さい。強度のピークは5年目付近にあると考えられ、それ以降はほぼ1,000kgf/cm²と一定である。なお、10年時の回帰予測強度よりは高い値となっている。

表-5 圧縮降伏強さの結果一覧表

経過年数	データ数 (N)	最大値 kgf/cm ²	最小値 kgf/cm ²	範囲 =R	平均値 χ	標準偏差 σ	変動係数 V
0年	100	1197	675	522	891.6	109.2	.123
2年	96	1095	901	194	985.9	41.3	.042
5年	100	1140	807	333	1021.1	65.8	.065
10年	99	1092	913	179	998.9	38.0	.038
15年	100	1141	680	461	967.6	75.3	.078

※規格値600kgf/cm²以上

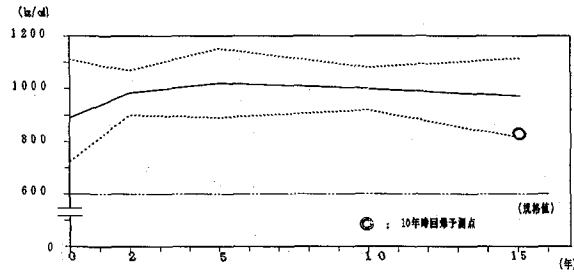


図-5 圧縮降伏強さの推移 (平均値±2σ)

(3) 曲げ強さ

曲げ強さは、表-6、図-6に見られるように経年によるバラツキが増加する傾向にあるが、規格値は満足していた。最小値は規格値の下限に近づいている。

10年時の回帰予測強度よりは高い値を示していた。一方供用中の実橋から採取して試験した結果と予測強度とはほぼ近似していた。実橋での強度は平均値的な値を示していた。

表-6 曲げ強さの結果一覧表

経過年数	データ数 (N)	最大値 kgf/cm ²	最小値 kgf/cm ²	範囲 =R	平均値 χ	標準偏差 σ	変動係数 V
0年	100	1048	615	433	802.3	112.2	.140
2年	94	1263	504	759	1022.2	166.5	.163
5年	94	1220	512	708	914.2	207.3	.252
10年	91	1195	517	678	911.1	177.1	.223
15年	98	1243	511	732	844.9	193.3	.229

※規格値500kgf/cm²以上

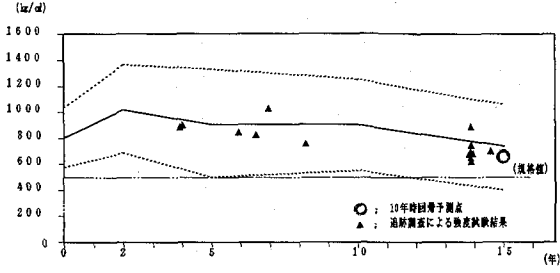


図-6 曲げ強さの推移 (平均値±2σ)

(4) 引張強度

引張強さの値は、表-7、図-7に示すようにバラツキがやや大きく経年とともに拡大する傾向にある。

この要因としては、2.および4.1でも述べたように供試体の作製上の問題が影響しているものと考えられる。10年目時の回帰予測強度とは、ほぼ同じ値となっている。一方、供用中の実橋から採取して試験した結果は大きく2つの傾向になる。施工後6~7年目は強度が高くなっているが14年目は下回るものも生じている。

表-7 引張強さの結果一覧表

経過年数	データ数 (N)	最大値 kgf/cm ²	最小値 kgf/cm ²	範囲 =R	平均値 χ	標準偏差 σ	変動係数 V
0年	100	634	339	295	493.8	81.5	.165
2年	94	729	256	473	541.7	114.6	.212
5年	89	714	260	454	452.5	114.2	.252
10年	90	738	271	467	472.3	121.2	.257
15年	90	768	253	515	446.8	113.5	.254

※規格値300kgf/cm²以上

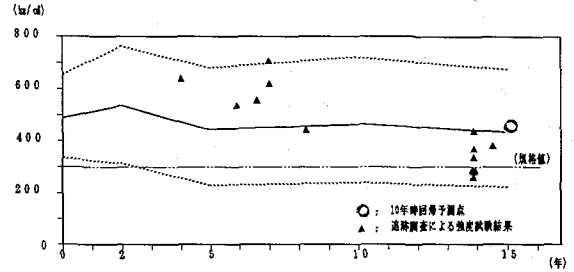


図-7 引張強さの推移 (平均値±2σ)

(5) 引張せん断接着強さ

引張せん断接着強さは鋼材 (SS400) との接着強さを意味しており、10年目の値が低い、全体としてはバラツキが小さく、付着力の安全性は確保されていると考えられる (表-8、図-8)。

10年目の回帰予測強度よりは高い値を示している。

表-8 引張せん断接着強さの結果一覧表

経過年数	データ数 (N)	最大値 kgf/cm ²	最小値 kgf/cm ²	範囲 =R	平均値 χ	標準偏差 σ	変動係数 V
0年	100	220	127	93	156.0	18.67	.120
2年	99	205	99	106	149.1	20.92	.140
5年	99	194	101	93	146.6	19.74	.135
10年	98	170	91	79	126.4	15.29	.121
15年	98	190	94	96	143.0	19.01	.133

※規格値100kgf/cm²以上

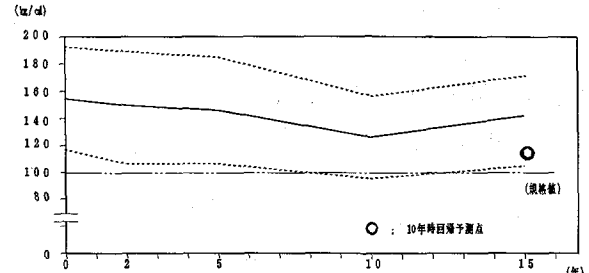


図-8 引張せん断接着強さの推移 (平均値±2σ)

5. 回帰分析結果

5.1 分析方法

15年間の試験結果から長期強度を予測するために、

0年、2年、5年、10年、15年の試験結果の平均値を用いて回帰分析を行った。0年目の平均値を100とした場合の比率(%)を用いて分析を行い、その回帰分析結果を以下に示す。

5.2 比重について

比重は、図-9に示すとおり一次回帰となり ($y=0.1226x+99.911$)、年数がたつにつれて大きくなる傾向を示しており、0年目の最小値と経年後の最大値を比較すると0.02~0.04の差が見られる。この原因としては、収縮や膨潤を伴わない吸水が考えられる。

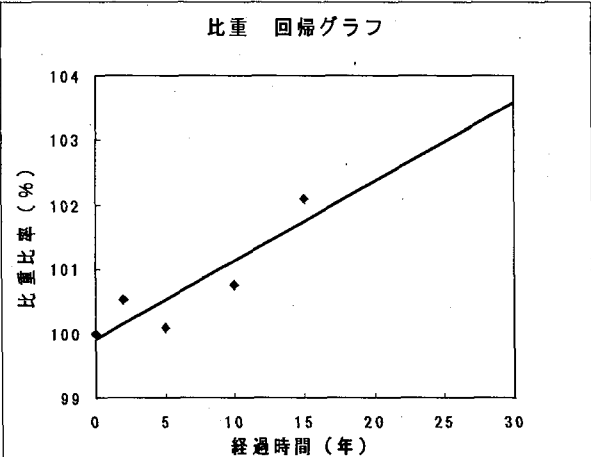


図-9 比重回帰グラフ

5.3 圧縮降伏強さについて

圧縮降伏強さは図-10に示すように、一次回帰の右下りとなる ($y=-0.2371x+113.82$)。15年経年後も全く問題はない。強度のピークは5年目前後と思われる。

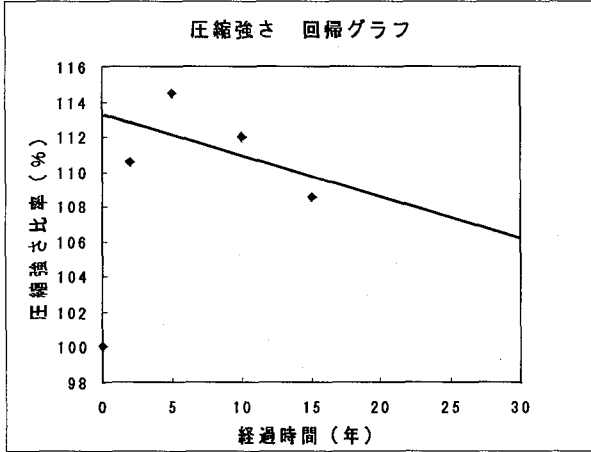


図-10 圧縮降伏強さ回帰グラフ

5.4 曲げ強さについて

強度的には高いレベルを維持しているが、経年的にバラツキが生じているが規格値を十分満足しているので性能上は問題ない。強度のピークは2年目付近に生じており図-11に示すように、一次回帰で右下りとなっている ($y=-0.3052x+113.99$)。

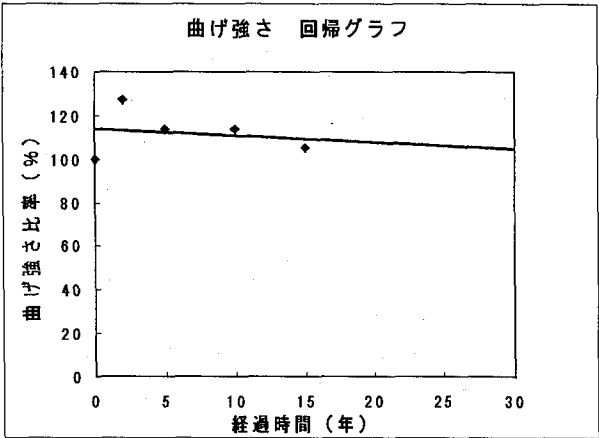


図-11 曲げ強さ回帰グラフ

5.5 引張強さについて

引張強さには、規格値を満足しているので問題はなく、図-12に示すように回帰式が一次式で右下がりになっている ($y=-0.8619x+103.01$)。強度のピークは2年目付近に存在している。

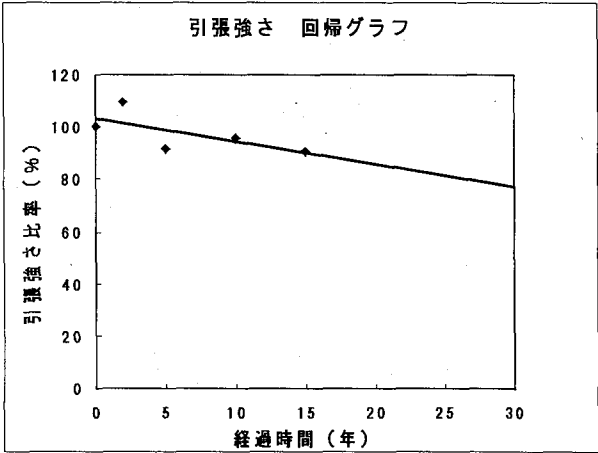


図-12 引張強さ回帰グラフ

5.6 引張せん断接着強さについて

引張せん断接着強さは図-13に見られるように減少傾向にある ($y=-0.7505x+97.27$)。平均強度は規格値を満足しており問題はないものとする。強度のピー

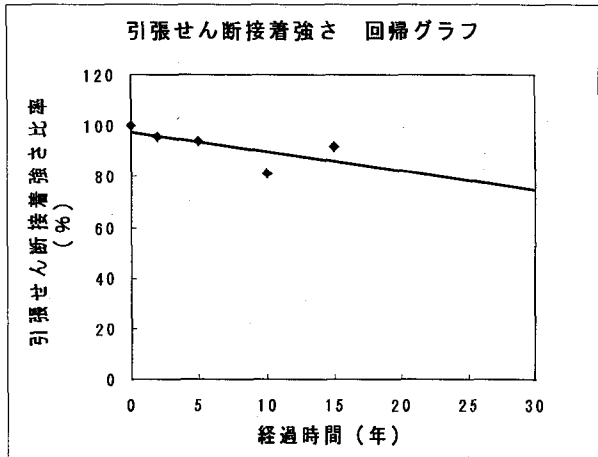


図-13 引張せん断接着強さ回帰グラフ

クは2年目付近に存在している。

6. まとめ

15年目の各種試験結果から、以下のことが結論づけられる。

①15年経過後のエポキシ樹脂の品質は、全て規格値を満足していた。

②引張せん断接着強さが高いレベルで維持されており、鋼板接着工法で重要である接着強さは保証されていた。

③15年経過した実橋から採取した試料での曲げ強さと引張強さの試験結果と長期管理試験との性能特性が比較的近似していた。

④回帰分析結果から、エポキシ樹脂の性能は約50年間規格値を保持すると予測される。

これらの値は、暴露状態で保管され、エポキシ樹脂の劣化原因となる紫外線、オゾンなどの影響を受けており、

実際には床版補修用であることから強度の劣化に対しては安全側にあると考えられる。

規格値保持年数の予測値の精度を上げるためにはさらなる長期的な強度管理試験を行うことが必要と思われる。

最後に、この「施工15年経過した鋼板接着工法使用エポキシ樹脂の性能に関する調査研究」を取りまとめるに当たり、助言、御指導を賜りました、京都大学宮川豊章先生には厚く感謝の意を表します。

【参考文献】

[1] 阪神高速道路公団，阪神高速道路管理技術センター：道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性，1991.12

[2] 山口良弘，杉江 功：鋼板接着用エポキシ樹脂の長期耐久性、橋梁と基礎，1994.8. PP113, 114

(1997年 9月26日受付)