

D-RAP 工法の数値解析の一手法

Numerical Analysis Modeling of Concrete Slab Repaired by D-RAP Method

モハマド・アティク・ラーマン^{*}、細江育男^{**}、松島秀夫^{***}

Md. Atiqur RAHMAN, Ikue HOSOE and Hideo MATSUSHIMA

^{*}工博 大日コンサルタント(株) 橋梁事業部橋梁4課主任 (〒500-8384 岐阜市藪田南3-1-21)

^{**}大日コンサルタント(株) 橋梁事業部橋梁5課課長 (〒500-8384 岐阜市藪田南3-1-21)

^{***}大日コンサルタント(株) 環境事業部次長 (〒500-8384 岐阜市藪田南3-1-21)

Reinforced concrete deck slab repaired at the top surface by bonding prefabricated plates is modeled to investigate its behavior and performance under load. A mathematical model is proposed to characterize the development of shearing stresses at the bonding interface and the effect of the stiffness of plate material on the subsequent life of repaired slab. The cyclic action and reversible direction of stress confirmed in the simulation are thought to be the potential reason of interface separation and ultimately the failure of the deck slab. The model and corresponding simulation results indicate that the repairing plate of moderate stiffness gives better life to the rehabilitated slab. The results are comparatively verified with the reference experimental results to check the applicability of the model and the simulation. It is found that the present method is capable of evaluating the behavior of concrete deck slab repaired by top surface strengthening method.

key words : prefabricated plate, stiffness of plate, shearing deformation, interface stress, interface separation, life of repaired slab.

1. まえがき

鋼橋損傷床版の補修方法は、2つのタイプに分類できる。1つは、いわゆる床版下面補強方法であり、例として鋼板接着工法や炭素繊維シート接着工法がある。もう1つは、床版上面補強工法である。例として現場打ち鋼繊維補強コンクリート工法やD-RAP工法がある。D-RAP工法とはアスファルト舗装を取り除いて、品質劣化したコンクリート床版の表面をはつり、プレキャスト板をエポキシ樹脂で接着する工法である。D-RAPは、Deck Restoration by Adhesive Panelsの頭文字を取ったものである。

現在でも床版破壊のメカニズムが完全に解明されたとはいえず、これらの工法は自動車輪荷重を想定した床版の疲労試験により、補強効果を確認めたうえで採用されてきた。著者らはD-RAP工法の補強効果を確認する目的で、実物大試験の2点交互載荷による疲労試験^{1,2}や輪荷重走行試験機による疲労試験³を実施してきた。

エポキシ樹脂による鋼板接着工法は1960年代にイギリス、フランス等⁴で実施された。このメカニズムと破壊モードの解明のために多くの人々が研究した。イギリスのレポートは耐力力の改善の効果⁵を報告した。Jones⁶らやSwamy⁷らは一体化した構造と同じような挙動をする事を実験で確認した。Roberts⁸らは鉄筋コンクリート梁に鋼板を接着した接着層のせん断と軸力の簡易解析法を提案し

た。Ziraba⁹らは非線形有限要素解析で接着板の剥離を考慮した接着層の検討をした。これらは引張り補強であった。しかし、床版上面という圧縮側にプレキャスト板をエポキシ樹脂で補強する工法は、初めての工法であり検討されていない。

本論では、輪荷重走行試験機による疲労試験で使用したプレキャスト板の違いと破壊モードが層間剥離であることについて着目し、これらをシミュレートできる弾性3次元有限要素法数値解析を行い、考察を行った。

計算結果から、①せん断応力が移動荷重の下では交番応力となり、移動荷重の近傍では交番応力とならないこと。②プレキャスト板の剛性が高いとせん断応力が大きいこと。③せん断ひずみについては一体構造は小さく、D-RAP工法は大きいこと。④プレキャスト板の剛性が高いとせん断ひずみも大きいこと。⑤プレキャスト板の剛性が高いと界面の応力が大きいこと。がわかった。これらの数値解析結果は輪荷重走行試験機による疲労試験の結果と良く合っている。

よって、D-RAP工法の床版破壊メカニズム解明の一手法として弾性3次元有限要素法数値解析が有効であると思う。

2. 解析解の提案

図-1は荷重下のRC床版挙動を積層梁とした力学モデルである。もし接着層が十分強ければ、この部材は一体化した梁となる。他方もし接着層が弱ければ、上下の部材は分離し、重ね梁ようになる。

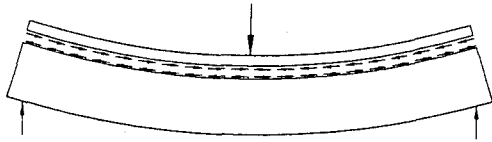


図-1 積層梁のメカニズム

D-RAP工法は板を2層に接着する構造であるが、数値解析モデルは、これを簡素化し、図-2に示すような板を1層接着する構造と考える。

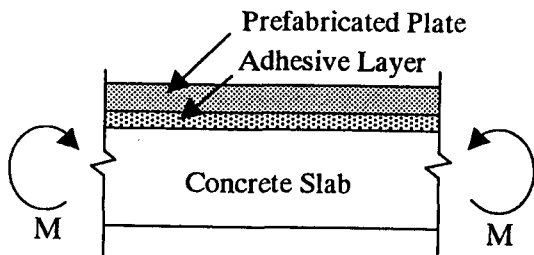


図-2 力学的解析モデル

Leung¹⁰は板の縦応力度を σ_p 、板の縦変位を u_p 、スラブの縦変位を u_c とし、以下の式を提案した。

$$\tau = t \frac{d\sigma_p}{dx} = G(u_p - u_c)/h \quad (1)$$

ここに t は板の厚さ、 h は接着層の厚さ、 G は接着材料のせん断弾性係数を表す。

接着板応力度とスラブ応力度の関係は以下の式で表される。

$$\sigma_p = \frac{1}{4R} \left\{ \frac{6M}{BD^2} - \sigma_c \right\} \quad (2)$$

ここに M は作用モーメント、 $R = A_p / BD$ 、 A_p は接着板の断面積、 B と D はスラブの幅と厚さである。せん断応力とせん断ひずみの関係式は以下のものである。

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (3)$$

ここに γ はせん断ひずみ、 τ はせん断応力、 G はせん断弾性係数である。図-3は補強材料の概念的な層材料とせん断ひずみを表す。

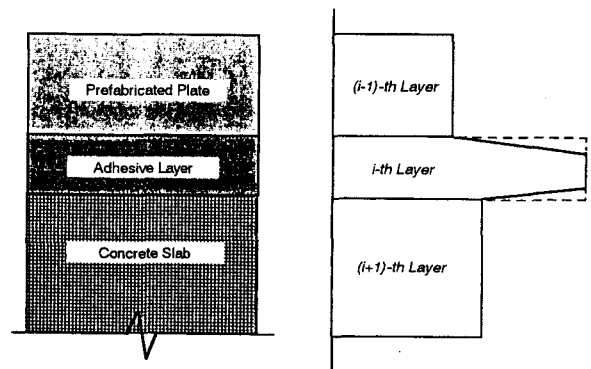


図-3 せん断ひずみ概念図

接着板が i 層ある場合のせん断ひずみは以下の式で与えられる。

$$\gamma_i = \frac{\tau_i}{G_i} \quad (4)$$

$i+1$ 層目のせん断ひずみは以下の式で与えられる。

$$\gamma_{i+1} = \frac{\tau_{i+1}}{G_{i+1}} \quad (5)$$

1層と $i+1$ 層の相対せん断ひずみの関係式は以下のようになる。

$$\Delta\gamma = \gamma_{i+1} - \gamma_i = \frac{\tau_{i+1}}{G_{i+1}} - \frac{\tau_i}{G_i} \quad (6)$$

もしも2つの接着板が同じ材料であれば、

$G_{i+1} = G_i = G$ となり式(6)は以下のようになる。

$$\Delta\gamma = \frac{\tau_{i+1}}{G} - \frac{\tau_i}{G} = \frac{1}{G} (\tau_{i+1} - \tau_i) \quad (7)$$

Case-aとして補強のない一体化した梁構造物を、Case-bとして補強した梁構造物を仮定する。一体化した梁構造物では相対せん断ひずみ $\Delta\gamma_a$ はせん断応力の変化に関する。補強した梁では相対せん断ひずみ $\Delta\gamma_b$ はせん断応力の変化と接着板の材料特性に関する。式(6)と(7)はそれぞれ以下のように表される。

$$\Delta\gamma_a = \frac{1}{G}(\tau_{i+1} - \tau_i) \quad (8)$$

$$\Delta\gamma_b = \frac{\tau_{i+1}}{G_{i+1}} - \frac{\tau_i}{G_i} \quad (9)$$

もし接着材が強くてコンクリートと接着材との界面ですれを起こさなければ、著者らは界面の応力が以下のような式になることを提案する。

$$\tau_o = \frac{\Delta\gamma_b - \Delta\gamma_a}{G^*} \quad (10)$$

ここに τ_o は界面の応力、 G^* は界面での拘束するせん断弾性係数であり、コンクリートと接着材の界面では $G^*=G_i$ となる。式(10)から界面応力は接着材のせん断に
関係し、式(1)からコンクリートと接着材との界面での応力は接着板の材料特性に
関係することがわかる。

3. 数値解析モデル

図-4に示すような輪荷重走行試験機による疲労試験³⁾と同じスラブ供試体を数値解析モデルとする。輪荷重走行
載荷位置は載荷実験では図-4のように2m移動したが、
数値解析ではLP-1とLP-2の2点の静的載荷で移動載荷を
シミュレートした。載荷の大きさは輪荷重の大きさを想定し移動方向12cmとした。

走行荷重載荷点と着目点はそれぞれ図-5、図-6に示す。静的載荷としてLP-1とLP-2に輪荷重を載荷したときの数値解析はスラブの4分割モデルで弾性3次元ソリッド要素有限要素法を使用した。計算上、接着板と接着材との界面およびコンクリートと接着材との界面は完全接着と仮定した。また、ひび割れの影響は無視した。材料は弾性体と仮定した。境界条件はモーメントに抵抗しながら対称軸が垂直に移動する対称断面とした。図-7は有限要素法解析モデルを示す。数値解析ケース1とケース2の材料特性値を表-1に示す。ケース1はノンアスベストスレート板、ケース2はPCI板(ケース1より硬い板)を想定した。2つのケースは接着板の剛性の影響を検討するために行った。

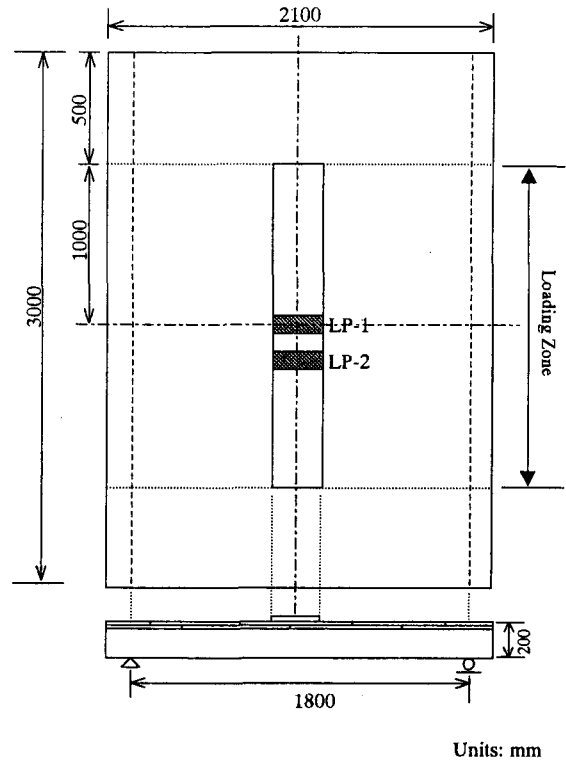


図-4 スラブ供試体

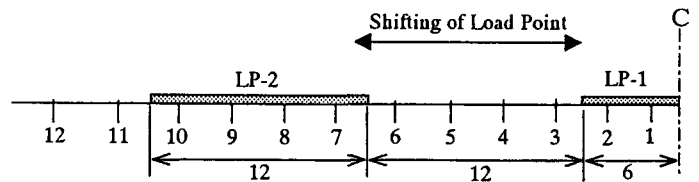


図-5 輪荷重載荷点

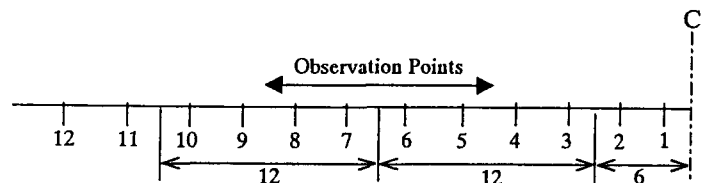


図-6 モデルの着目点

	CASE-I			CASE-II		
	Precast Plate-1	Epoxy Resin	Concrete	Precast Plate-2	Epoxy Resin	Concrete
Elastic Modulus (N/mm ²)	1.90E+04	4.35E+03	2.35E+04	4.74E+04	4.35E+03	2.35E+04
Poisson's Ratio	0.200	0.200	0.167	0.200	0.200	0.167

表-1 各ケースの材料特性値

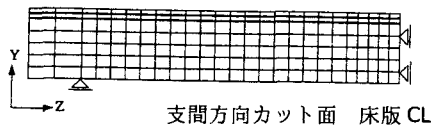
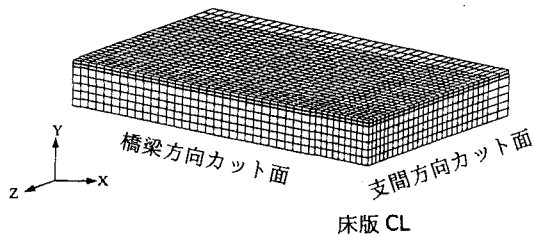


図-7 有限要素法解析モデル

4. 数値解析結果

数値解析ケース1とケース2の接着材でのせん断応力を図-8、図-9に示す。ケース1のせん断応力はLP-2で0.96と-1.15、LP-1で-1.15となり、ケース2のせん断応力はLP-2で1.04と-1.15、LP-1で-1.33となった。単位はN/mm²である。

ケース1とケース2ではせん断応力は波のような分布を示す。輪荷重はLP-1からLP-2までの間を移動する。載荷重の移動は交番応力を発生させる。図-10に交番応力の概要図を示す。図-9のようにプレキャスト板の剛性が大きいと図-8の剛性の低い場合と比べてせん断応力がLP-1で1.16倍に、LP-2で1.08と1.16倍に大きくなるのがわかった。

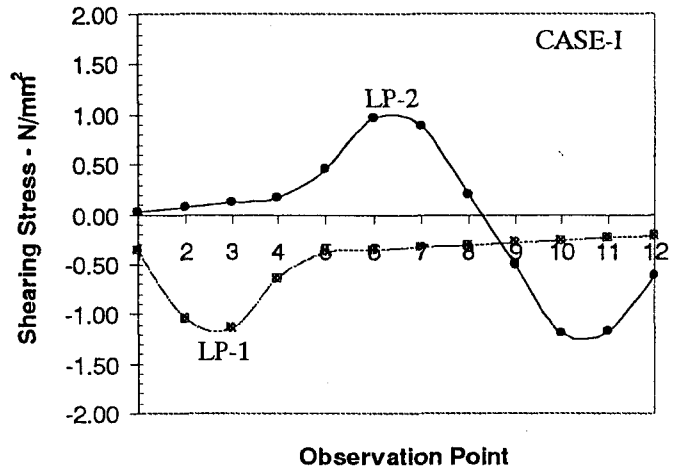


図-8 ケース1のせん断応力

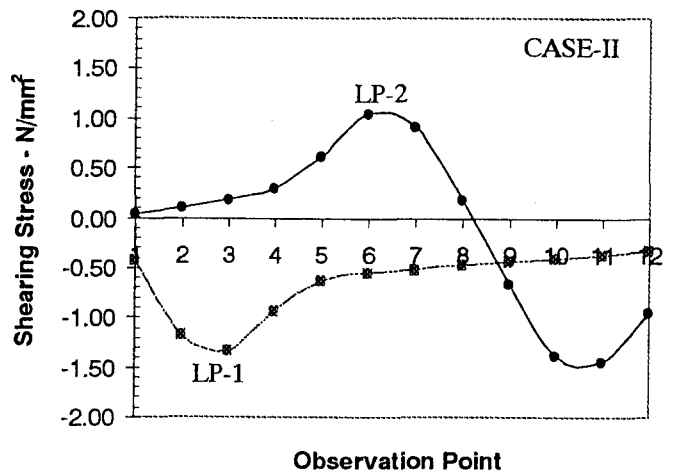


図-9 ケース2のせん断応力

コンクリートと接着材の相対せん断ひずみを図-11に示す。CONCに示すように一体化した構造物では相対せん断ひずみは応力の変化のみに対応し、着目点の違いによる差はほとんど見られない。CASE II、CASE Iに示すようにプレキャスト板で補強すると接着材のせん断弾性係数にも対応する。剛性の大きい接着板を使用すると剛性の小さい接着板と比べて相対せん断ひずみが大きくなるのがわかった。せん断応力が移動荷重の下では交番応力とな

り、移動荷重の近傍では交番応力とならないことがわかった。載荷点によりせん断力の符号が反転することから、荷重の移動による載荷点の下では交番せん断応力が発生していることを確認した。

コンクリートと接着材との界面でせん断力を拘束する界面のせん断応力を図-12に示す。このときの荷重載荷位置はLP-2である。界面応力は着目点11で、CASE IIの場合1.09となり、CASE Iの場合0.84となった。単位はN/mm²である。剛性の違いによる増加率は1.30である。

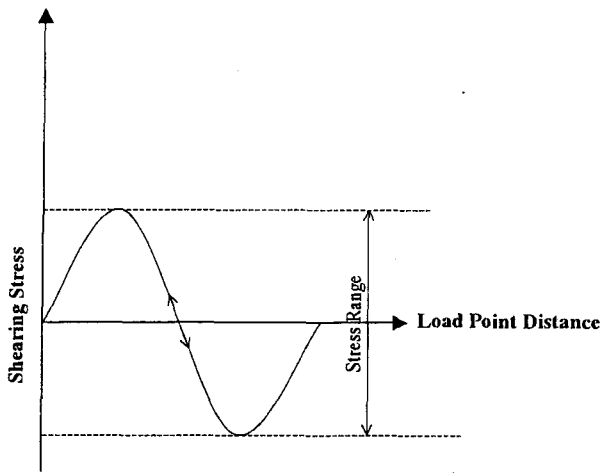


図-10 交番応力概要図

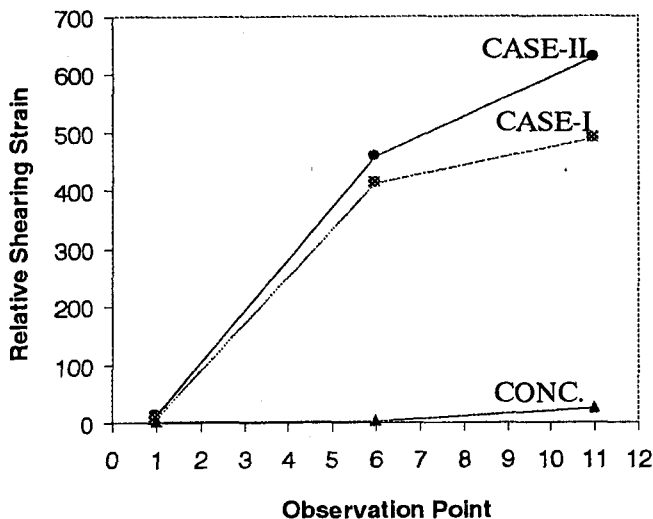


図-11 相対せん断ひずみ

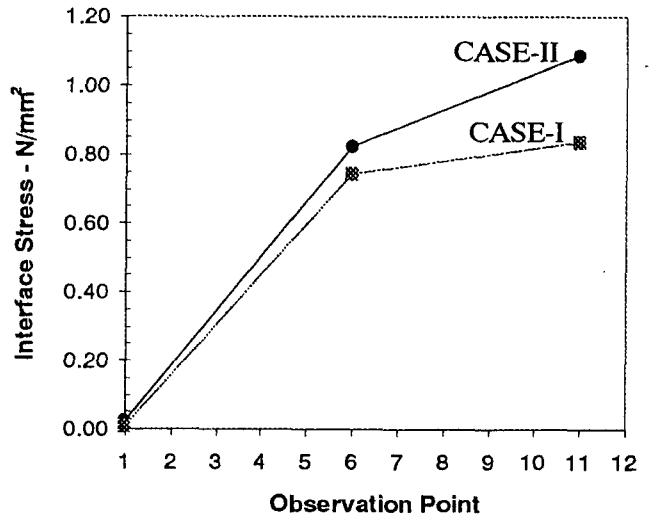


図-12 界面応力と接着板の剛性の関係

式(8)からわかるように、界面応力は相対ひずみだけでなく、接着材のせん断弾性係数に関する。剛性の大きい接着板を使用すると剛性の小さい接着板と比べて界面応力が大きくなることがわかった。

数値解析結果から、接着板の剛性が大きいと界面のせん断応力を大きくし、コンクリートと剥離しやすくすることがわかった。補強スラブの耐久性向上のためには最適な剛性の接着板を選択することが設計上重要である。

5. 輪荷重載荷実験結果との比較

工法輪荷重走行試験機による疲労試験⁴から176KN載荷の無補強床版とD-RAP工法による補強床版の比較で載荷回数的大幅な増加とたわみ剛性の改善が確認できた。床版に損傷を与えないケースでは約40倍(50.2万往復)、床版に損傷を与えたケースでは約30倍の載荷回数の増加と載荷履歴が50倍でもたわみ量が約6%に低減できた。大阪大学の輪荷重走行試験機で行う疲労試験の場合、おおよそ1日2万台(大型車混入率考慮)で50年分の疲労が147KN載荷荷重で80万往復の試験に相当すると考えられており、このことからD-RAP補強は橋梁の耐用年数を満足するに十分な使用期限の延長を図れるものである。これまでD-RAP工法に使用するプレキャスト板はノンアスベストスレート板が一般的であった。この理由は主に①コスト②加工性③重量などの経済性および施工性の条件と、なるべくコンクリートに近い弾性係数をもっているのがよいという判断からであった。1体ではあったがスレート板以外のPIC板(PP繊維で補強したポリマー含浸コンクリート板)による疲労試験の結果から、損傷を与えない場合に176KNの荷重で載荷を行って、20.4万往復で破壊に至っている。これはスレート板によるものと比較すると約2/5の疲労寿命となる。疲労試験の結果からD-RAP工法は疲労耐力の向上に効果があることがわかった。また、

適当な剛性のある補強接着板を使用すると疲労寿命が延びることがわかった。そして破壊モードは輪荷重移動荷重区間の接着材とコンクリートとの剥離破壊であった。

輪荷重走行試験機による疲労試験⁴と数値解析結果を比較した。数値解析結果のせん断応力と内部剥離の関係について、「内部剥離現象は一方向せん断応力より交番応力の方が進行が早い。また、内部剥離現象は交番応力の大きさが剥離進行速度と関係がある。」と仮定すると、提案した数値解析は界面応力の増加や界面剥離現象を十分に説明できる。

載荷点数を LP-1、LP-2 の 2 点から増やせば滑らかなせん断応力が得られて、移動荷重が再現できると考える。

今後は交番せん断応力により、接着剤とコンクリートの界面が完全接着から接着率を低下させて、剥離する現象を解析できるようにしたい。

6. 結論

有限要素法による数値解析はコンクリートと接着材との界面における現象を組み込んで、D-RAP 工法のようなプレキャスト板と接着材による補強工法の破壊挙動を説明することができた。この解析により、耐久性の高い補強プレキャスト板の選択ができると考える。

参考文献

1. Matsushima, H.; Watanabe, T.; Yasui, M.; Koyanagi, W.; and Aoki, T., "Fracture and Fatigue Strength of Slabs Repaired with D-RAP Method," *Proceeding, FRAMCOS-3*, V. 3, Oct. 1998, pp. 1873-1882.
2. 松島、安井、渡辺、渡辺、小柳、青木: D-RAP 工法による補修と 2 点交互移動荷重試験、第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集、pp305-310, 1998
3. 細江、安井、渡辺、渡辺、北村、松井: 移動荷重試験による D-RAP 工法の補強効果の確認、第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集、pp311-316, 1998
4. Jones, R.; Swamy, R. N.; Bloxham, J.; and Bouderbah, A., "Composite Behavior of Concrete Beams with Epoxy Bonded External Reinforcement," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, V. 2, No. 2, May 1980, pp. 91-107.
5. Raithby, K. D., "External Strengthening of Concrete Bridges with Bonded Steel Plates," *TRRL Supplementary Report 612*, Department of Environment, Department of Transport (Transport and Research Laboratory), Crowthorne, Berkshire, England, 1980.
6. Jones, R.; Swamy, R. N.; and Charif, A., "Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by

Epoxy-Bonded Steel Plates," *Structural Engineer*, V. 66, No. 5, Mar. 1988, pp. 85-94.

7. Swamy, R. N.; Jones, R.; and Bloxham, J. W., "Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-bonded Steel Plates," *The Structural Engineer*, V. 65A, No. 2, February 1987.

8. Roberts, T. M., and Haji-Kajemi, H. A., "Theoretical Study of the Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates," *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, V. 87, No. 2, Mar. 1989, pp. 39-55.

9. Ziraba, Y. N.; Baluch, M. H.; Basunbul, I. A.; Sharif, A. M.; Azad A. K.; and Al-Sulaimani, G. J., "Computational Model for Damaged RC Beams Repaired by Externally Bonded Plates," *Fourth International Conference on Structural Failure, Durability and Retrofitting*, Singapore, July 1993.

10. Leung, C. K. Y., "Delamination Failure in Concrete Beams Retrofitted with a Bonded Plate," *Proceeding, FRAMCOS-3*, V. 3, Oct. 1998, pp. 1783-1792.