

44年が経過したランガー桁部のRC床版押抜きせん断耐荷力試験

Punching Shear Capacity Test of RC Slabs on Langer Type Bridge Used for 44 Years

西原 伸*¹, 古市 亨*², 福永昭彦*³, 福田浩之*⁴, 東山浩士*⁵, 松井繁之*⁶
Shin Nishihara, Toru Furuichi, Akihiko Fukunaga, Hiroyuki Fukuda, Hiroshi Higashiyama, Shigeyuki Matsui

- *¹内外エンジニアリング(株)(〒541-0043, 大阪市中央区高麗橋1-6-10)
- *²第一技研コンサルタント(株)(〒556-0005, 大阪市浪速区日本橋4-5-21)
- *³(株)長大(〒550-0013, 大阪市西区新町2-20-6)
- *⁴(株)東京測器研究所(〒542-0062, 大阪市中央区上本町西5-3-19)
- *⁵近畿大学 理工学部(〒577-8502, 東大阪市小若江3-4-1)
- *⁶大阪工業大学 八幡工学実験場構造実験センター(〒614-8289, 八幡市美濃山一之谷4番地)

Punching shear capacity tests and material properties tests of RC slabs of Langer type existing bridge were conducted. The aim of these experiment and survey is to collect the basic data for the bridge maintenance. This bridge removed for the grade separation of railway had already passed about 44 years. Some panels of RC slab in this bridge were strengthened by the steel plate bonding method or the bottom thickness increasing method about 20 years ago. From the results of loading tests for three RC slabs including normal RC slab, punching shear capacities were compared in the viewpoint of strengthening effect by those two strengthening methods. Furthermore, the punching shear capacity of normal RC slab was evaluated by the estimating equation.

Key words: Punching shear capacity, Steel plate bonding method, Bottom thickness increasing method, RC slab

1. 試験概要および目的

RC床版の押抜きせん断耐荷力試験を行った橋梁(橋長L=234m)は奈良市内に位置し、JR奈良駅付近立体交差事業に伴い全面撤去が計画された橋梁である。側径間部はPCT桁、跨線部はランガー桁(支間長L=49.2m)であり、架設年次は1962年、橋格は一等橋であることが既往の資料から判明している。供用から44年が経過し、試験対象であるRC床版の一部は1985年に鋼板接着工法、下面増厚工法により補強施工が試験的に実施されている。

このことから、無補強床版の押抜きせん断耐荷力の確認のほか、補強床版に対する試験結果から各補強工法による床版補強効果の違いを確認することを目的とした。また、床版コンクリートの物性値や品質、劣化状態を把握する目的からコンクリートコアを採取し、室内試験を行った。さらに、これらの試験値ならびに無補強床版の押抜きせん断破壊形状から押抜きせん断耐荷力算定式との比較検証も行った。

2. 押抜きせん断耐荷力試験

(1) 試験対象

試験を行った床版位置を図-1に示す。荷重試験前に床版損傷調査を行った結果、無補強床版において床版下面にひびわれが観察されたものの、顕著な劣化損傷状態には至っていないことを確認した。

(2) 試験装置

床版への荷重は、図-2および写真-1に示す試験装置(荷重フレーム)を設置し、油圧ジャッキにより荷重板

(200×500mm)を介して行った。すなわち、油圧ジャッキの反力は、反力桁→上部支持材→PC鋼棒→下部支持材→主桁に伝達される荷重フレームシステムとした。また、主桁ウェブの座屈を防止するため、補剛材(L形鋼)を主桁上下フランジ間に挟み込む形で設置した。

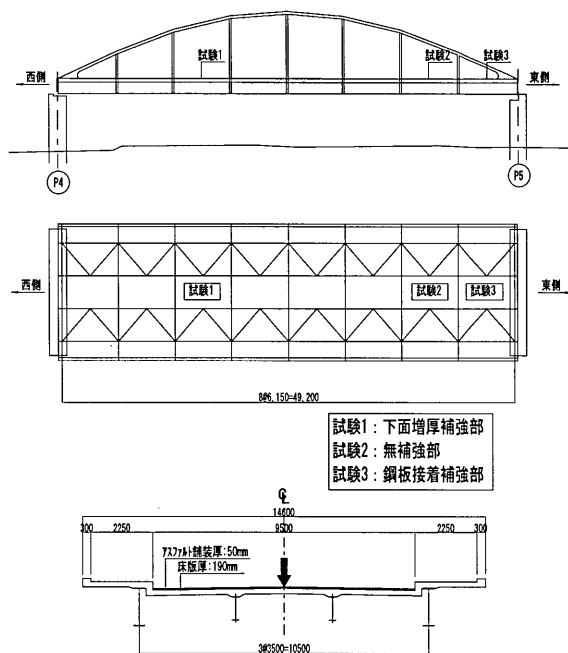


図-1 試験実施床版(着目床版)位置図

(3) 測定項目

測定項目は、荷重荷重のほか、床版たわみ、コンクリート、鉄筋、鋼板の各ひずみとした。図-3に計測機器設置位置を示す。

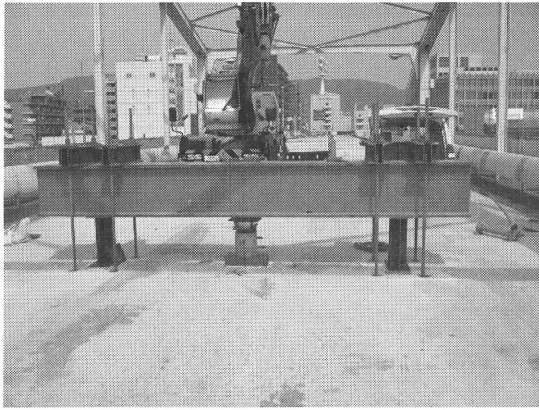


写真-1 試験装置

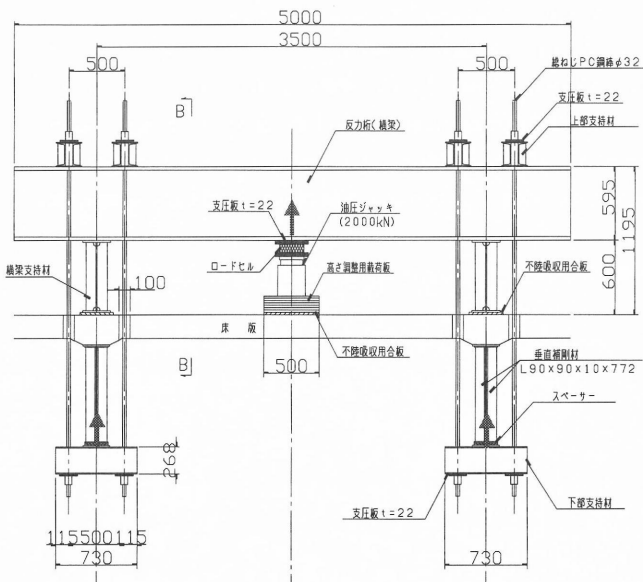


図-2 試験装置概要図

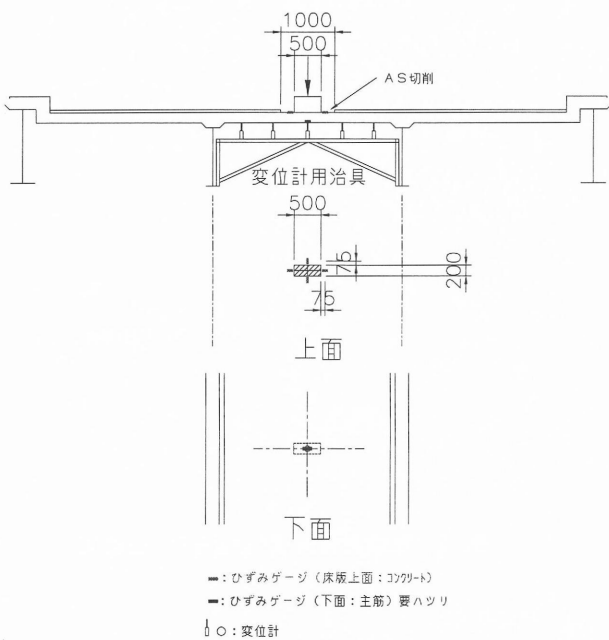


図-3 計測機器設置位置図

表-1 圧縮強度試験結果

コア No.	密度 (g/mm ³)	補正前 圧縮強度 (N/mm ²)	補正 [*] 係数	補正後 圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
2-10	2.43	39.6	0.984	38.9	20.3
2-11	2.49	32.7	0.988	32.3	20.9
3-6	2.52	35.8	0.986	35.3	22.0
3-9	2.50	49.7	0.984	48.9	31.0
3-11	2.48	51.0	0.975	49.7	26.2

^{*}コア高さと同径の比に関する補正係数

3. 室内試験結果

床版コンクリートの物性値や品質、劣化状態を把握する目的からコンクリートコアを採取し、次の室内試験を行った。すなわち、①圧縮強度・ヤング係数試験、②二面せん断強度試験、③割裂引張強度試験、④割裂中性化試験、⑤配合推定試験である。

3.1 圧縮強度試験および配合推定試験

表-1に圧縮強度試験結果を示す。コンクリートコア全6体の平均値は41.0 N/mm²であった。しかし、No. 3-9およびNo. 3-11は、他の圧縮強度よりも高い値となっている。この理由として、これら2つのコアが鋼板接着部から採取されており、床版コンクリートと鋼板との接着部に圧入された樹脂がひび割れ内部へも注入された影響と考えられる。そこで、これらを除いた平均圧縮強度を無補正部の圧縮強度(35.6 N/mm²)とすることにした。この強度は当時の床版設計基準強度である18 N/mm²を上回っている。

採取コアを用いたコンクリートの配合推定試験は、(社)セメント協会¹⁾の「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」に準じて行った。その結果、水セメント比は、差引法で47%、600℃ ig. loss法で42%と推定される。この結果から、差引法で得られた結果は、圧縮強度と水セメント比の関係を示した資料(近畿地区の生コン工業組合資料)から求めた水セメント比47%とよく整合する結果であった。

3.2 二面せん断強度試験

床版コンクリートから採取した試験片を用いて、写真-2に示す二面せん断強度試験を実施した。試験結果を表

表-2 二面せん断強度試験結果

供試体番号	1	2	3	4
平均幅 (mm)	87.2	83.4	79.8	87.2
平均高さ (mm)	149.2	149.4	152.2	152.2
断面積 (mm ²)	13010	12460	12146	13272
最大荷重 (N)	93822	84622	96122	106722
せん断強度 (N/mm ²)	3.61	3.40	3.96	4.02
供試体番号	5	6	7	8
平均幅 (mm)	87.9	84.9	85.8	
平均高さ (mm)	152.4	149.5	153.3	
断面積 (mm ²)	13396	12693	13153	
最大荷重 (N)	131122	105722	109522	
せん断強度 (N/mm ²)	4.89	4.16	4.16	
平均せん断強度 (N/mm ²)	4.03			

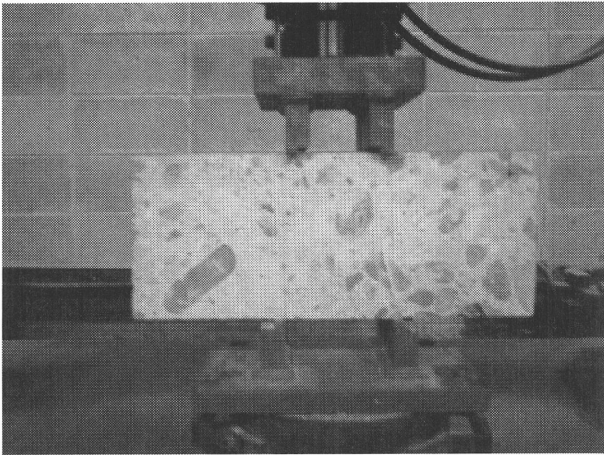


写真-2 二面せん断強度試験状況

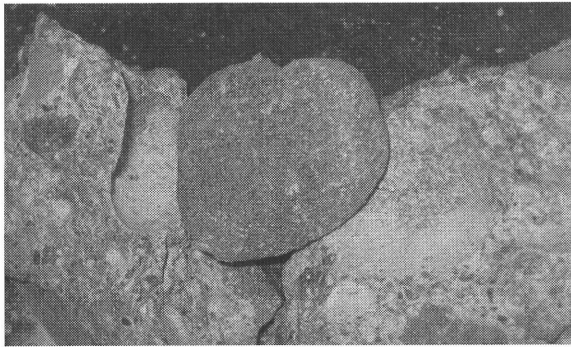


写真-3 骨材分離状況

-2 に示す。試験片全 7 体の平均値は 4.03 N/mm^2 であった。文献 2) によると、一般に、コンクリートのせん断強度は圧縮強度の $1/4 \sim 1/6$ 程度であるが、前述の圧縮強度試験から得られた平均圧縮強度 35.6 N/mm^2 に対するせん断強度の概略値を計算すると $5.9 \sim 8.9 \text{ N/mm}^2$ となることから、想定される値よりも低い試験結果となった。

3.3 割裂引張強度試験

コンクリートコア 3 体から得られた割裂引張強度の平均値は、 1.7 N/mm^2 であった。文献 2) によると、一般に、コンクリートの割裂引張強度は圧縮強度の $1/10 \sim 1/14$ 程度であるのに対して、今回の試験結果は約 $1/21$ と極めて小さい値であった。次に、引張強度とせん断強度との関係性を見ると、一般に、せん断強度は引張強度の 2.5 倍程度であることから、両者に相関性があることが分かる。

ここで、圧縮強度から想定されるせん断強度や引張強度の値に対して、実際の試験結果が低くなった要因として、粗骨材とペースト界面の脆弱さが挙げられる。実際に、試験後の破断面を観察した結果、写真-3 に示すように粗骨材がペーストから簡単に分離し、さらに分離した粗骨材にペーストが付着していない状態が確認された。なお、粗骨材自体については、脆弱さ等において特に問題となる点は見当たらないことから、本橋梁の床版に使用されたコンクリートは、粗骨材に付着していた砂など

表-3 押抜きせん断耐荷力

床版種別	最終載荷荷重 (kN)	増加率
無補強床版	1200	1.00
下面増厚補強床版	1290	1.08
鋼板接着補強床版	1410	1.18

の微粒分が洗浄・除去されずに打設された可能性が考えられ、それにより粗骨材とペースト界面が脆弱となり引張強度やせん断強度の低下に繋がったものと推察される。

3.4 割裂中性化試験

「コンクリートの中性化深さの測定方法 (JIS A 1152)」に準じて中性化深さ試験を行った。中性化深さの測定は、割裂させた破断面にフェノールフタレイン 1% 溶液を噴霧して赤色に呈色しない部分を中性化層と判断し、コンクリート表面から赤色部分までの深さを直尺で 4 点測定し、その平均値を中性化深さとした。

平均中性化深さは、無補強床版の上面で $1 \sim 2 \text{ mm}$ 、下面で $11 \sim 15 \text{ mm}$ であった。また、下面増厚補強部は補強部分を含まず、 11 mm であった。コンクリート標準示方書 [維持管理編]³⁾ によると、中性化深さは、中性化期間の平方根に比例する次式が用いられている。

$$y = b\sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、 y は中性化深さ、 t は中性化期間、 b は中性化速度係数である。

この関係から、無補強床版の中性化深さ (15 mm) から中性化速度係数を求めると、 $2.26 \text{ (mm}/\sqrt{\text{年}})$ となる。ここで、下面増厚補強により床版コンクリートの中性化の進行が完全に抑止されたと仮定し、下面増厚補強部の中性化深さ 11 mm から中性化期間を求めると 24 年となった。この値は、補強施工年度とよく一致する結果である。

4. 押抜きせん断試験結果

4.1 押抜きせん断耐荷力

押抜きせん断破壊時に記録した各床版の最大荷重を表-3 に示す。写真-4 に破壊状況の一例を示すように、床版上面が載荷板形状に押し抜かれるせん断破壊であることが確認された。無補強床版の押抜きせん断耐荷力は 1200 kN であった。無補強床版を基準とした場合、各補強床版の押抜きせん断耐荷力はそれぞれ僅かながら向上している結果となった。下面増厚補強は、補強鉄筋の断面積、ポリマーセメントモルタルと床版コンクリートとの付着強度による耐荷力増加⁴⁾と考えられる。

また、鋼板接着補強も同様に、鋼板断面積と樹脂の付着強度による耐荷力増加と考えられる。ここで、鋼板接着補強による静的押抜きせん断耐荷力の増加はほとんど見られないとする既往の研究結果⁵⁾が参考になる。

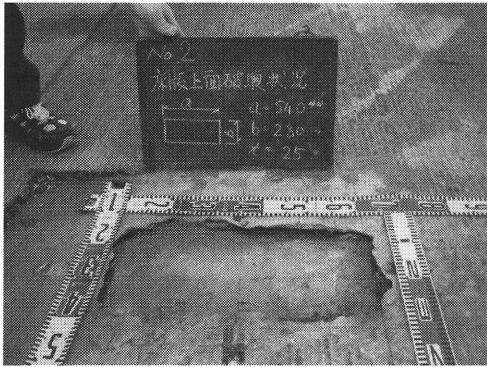


写真-4 破壊状況(床版上面)

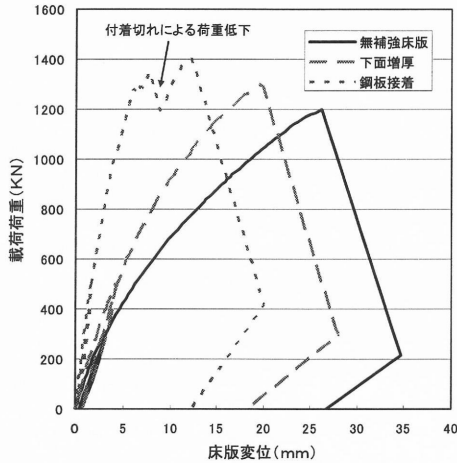


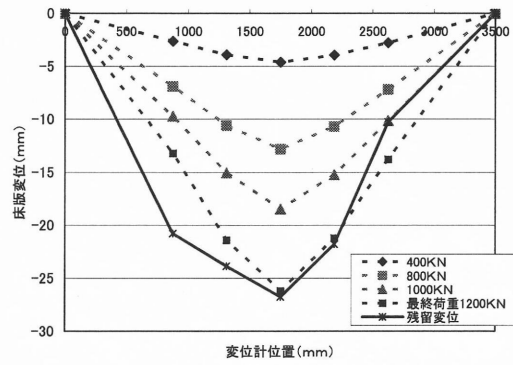
図-4 荷重-中央変位関係

4.2 床版変位の比較

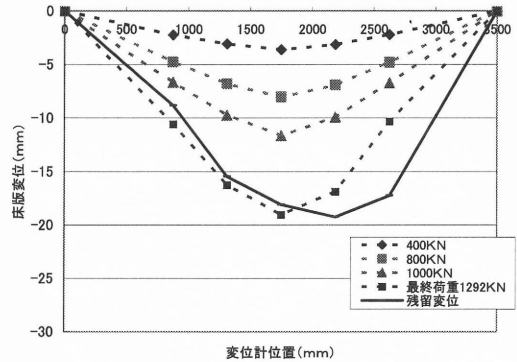
荷重-中央変位関係を図-4に、また、各荷重レベルでの橋軸直角方向のたわみ分布を図-5に示す。図-4から、同一荷重レベルにおける中央変位は、鋼板接着床版<下面増厚床版<無補強床版の順に低減されていることが分かる。また、図-5から、無補強床版は、荷重の増加に伴い、載荷板周辺の床版下面にひび割れが進展し、中央変位の増加が顕著となり、押抜きせん断破壊時のたわみは-25mmに達した。鋼板接着補強床版は、破壊直前までの変位が小さく、1300kN付近から床版コンクリートと鋼板との付着切れによる一時的な荷重低下が見られるものの、最大荷重は他の床版と比べて最も高い値を示した。一方、下面増厚補強床版は両床版の中間的な性状を示した。

4.3 中央変位と床版断面2次モーメント

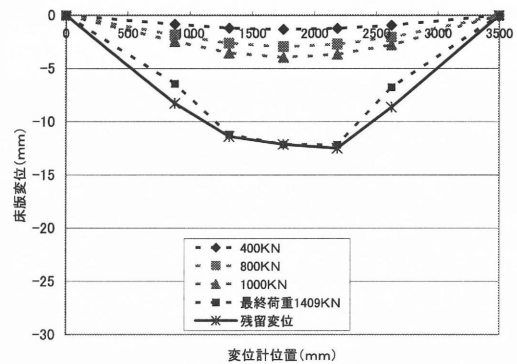
弾性範囲と考えられる荷重初期段階(200kN)における各試験体の床版中央における変位を比較した(図-6)。また、変位の比率と各床版の断面2次モーメント(引張側無視)の比率に着目したものを表-4に示す。200kNにおける各床版のたわみは、無補強床版の変位に対して、下面増厚補強床版で0.78、鋼板接着補強床版は0.31倍に抑制されており、引張側コンクリートを無視した時の断面2次モーメントの比率とよく整合していることが分かる。



(a) 無補強床版



(b) 下面増厚補強床版



(c) 鋼板接着補強床版

図-5 橋軸直角方向のたわみ分布

表-4 変位と床版断面2次モーメントの比較

床版種別	200kNでの変位 (mm)	比率	断面2次モーメント	比率
無補強	1.76	1.00	39948	1.00
下面増厚	1.38	0.78	48572	1.22
鋼板接着	0.54	0.31	123496	3.09

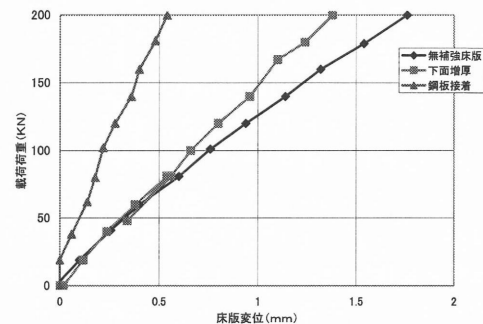


図-6 各床版中央変位の比較

5. 押抜きせん断耐荷力

文献6)に提案されているRC床版の押抜きせん断耐荷力算定式(図-7 および式(2))を用いた計算値と実験値との比較を行った。計算に用いた材料強度は、室内試験の結果から得られた値のほか、圧縮強度からの推定値(せん断強度, 引張強度)の2種類を適用して検討を行った。また、せん断破壊面の角度は、計算値の結果に影響を与えると考えられるため、算定式で仮定されている45°のほか、試験後に切り出した床版より破壊面角度を計測した値を使用した。すなわち、写真-5に示すように、主鉄筋方向の圧縮縁と破壊面のなす角度は33.0°、配力鉄筋方向の角度は21.5°であった。このように計測した破壊面角度は45°よりも浅い角度となっている。これについては、主桁による床版の回転拘束や水平変位拘束による膜応力(圧縮)の作用による影響と考えられる⁷⁾。算定値に使用した数値を表-5にまとめている。

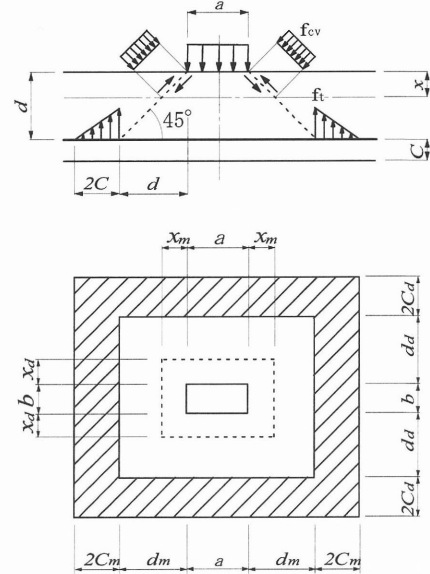


図-7 押抜きせん断破壊モデル

$$P = f_{cv} \{ 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m \} + f_t \{ 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m \} \quad (2)$$

ここに、 a, b : 載荷板の主鉄筋, 配力鉄筋方向の辺長, x_m, x_d : 主鉄筋, 配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した時の中立軸深さ, d_m, d_d : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋の有効高さ, C_m, C_d : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋のかぶり深さ, f_{cv} : コンクリートのせん断強度, f_t : コンクリートの引張強度である。

なお、コンクリートのせん断強度⁸⁾および引張強度⁹⁾の推定値は次式により求めた。

$$f_{cv} = 0.656 f_c^{0.606} \quad (3)$$

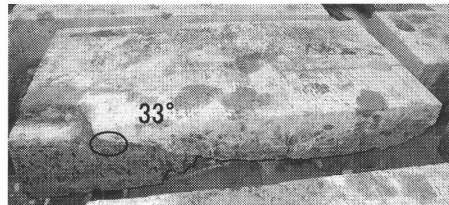
$$f_t = 0.27 f_c^{0.667} \quad (4)$$

表-5 算定に用いた数値

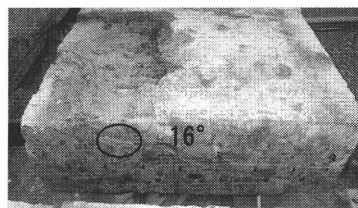
項目	単位	推定値	試験値
圧縮強度	N/mm ²		35.6
せん断強度	N/mm ²	5.72	4.03
引張強度	N/mm ²	2.89	1.69
破壊面角度(主鉄筋)	度	45.0	33.0
破壊面角度(配力鉄筋)	度	45.0	21.5
x_m	mm	58.2	89.6
x_d	mm	35.5	90.1
d_m	mm	152.5	234.8
d_d	mm	140.0	355.4
C_m	mm	55.0	55.0
C_d	mm	67.5	67.5

表-6 押抜きせん断耐力算定値

検討ケース	材料強度	破壊面角度	計算値(kN)	実験値(kN)	計算値/実験値
①	試験値	45°	636	1200	0.53
②	推定値	45°	1001		0.83
③	試験値	試験値	1233		1.03
④	推定値	試験値	1884		1.57



(主鉄筋方向, 33°)



(配力筋方向, 21.5°)

写真-5 床版破壊面角度計測

表-6にRC床版の押抜きせん断耐荷力算定値を示す。ここで、検討ケース①は材料強度を試験値、破壊面角度を45°とした場合、検討ケース②は材料強度を推定値、破壊面角度を45°とした場合、検討ケース③は材料強度を試験値、破壊面角度を測定値とした場合、検討ケース④は材料強度を推定値、破壊面角度を測定値とした場合である。これらの結果から、材料強度、破壊面角度ともに測定値を用いた検討ケース③が実験値と整合する結果となった。

6. まとめ

建設から約44年が経過したランガー桁部RC床版の現場載荷試験を行った。本橋では、RC床版の補強として、下面増厚工法と鋼板接着工法が採用されていた。現橋RC床版の押抜きせん断耐荷力とこれら工法の補強効果を確かめることを目的に行った現場載荷試験の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 現橋RC床版は、昭和31年の鋼道路橋示方書により設計された床版である。現場載荷試験前に確認した無補強部RC床版の状況は、床版下面側にひび割れ発生が見られるものの、格子状ひび割れや上面側での床版貫通ひび割れは見られず、顕著な劣化損傷状態にまでは至っていなかった。これより、床版に対する損傷度は比較的少ない状態であると考えられる。
- (2) 補強部RC床版と無補強部RC床版の押抜きせん断耐荷力を比較すると、下面増厚補強床版は8%、鋼板接着補強床版は18%の耐荷力増加が確認された。既往の実験室レベルでの研究成果から、下面増厚補強床版および鋼板接着補強床版の押抜きせん断耐荷力に有意な増加はないことが分かっている。本現場載荷試験においてもこの傾向が見られたことは実験室レベルでの研究成果と整合する。
- (3) 荷重-中央変位関係から、設計荷重レベルにおける床版変位を比較すると、無補強部RC床版に比して、下面増厚補強床版で0.78、鋼板接着補強床版は0.31倍であった。補強床版の剛性は母床版と補強材料との付着強度はもちろんのこと、下面増厚補強の場合は補強鉄筋断面積に、鋼板接着補強の場合は鋼板断面積に大きく依存する。床版剛性の増加はたわみ量を低減でき、疲労耐久性に大きく寄与する。また、本現場載荷試験から、母床版と補強鉄筋、あるいは鋼板との付着は最大荷重付近まで良好であったことが確認できた。
- (4) 無補強RC床版の押抜きせん断耐荷力について、算定結果との比較を行ったが、材料強度と破壊面角度に測定値を適用した結果が最も実験値と整合する結果となった。しかしながら、主桁による床版の回転拘束、水平変位拘束による膜応力の発生が要因と推察される押抜きせん断破壊面角度の

減少を定量的に取り扱うにはデータ数が少なく、明確でない点も多い。これに関しては、RC床版の境界条件を考慮したFEM解析などの実施による評価が必要であるといえる。

- (5) 既設RC床版の維持管理では、ひび割れ発生状況、ひび割れ密度、たわみなどを定期的に測定し、劣化損傷状態を把握していく必要がある。また、下面増厚補強床版や鋼板接着補強床版に関しては、叩き点検やたわみ測定などを実施し、剥離状況などの劣化損傷状態を把握していく必要がある。現状では、補強床版の余寿命予測を行うまでには至っていないため、実験室レベルでの研究が進められており、橋梁の時系列的な交通量調査、劣化損傷調査に関するデータの蓄積とともに、橋梁の維持管理手法の確立に向けた取り組みが強く望まれる。

謝辞: 本実橋載荷試験にあたり、西日本旅客鉄道(株)、(株)大林組、ならびに(社)建設コンサルタンツ協会近畿支部 橋梁維持管理研究委員会の関係各位に多大な御協力を頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 社団法人セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-18 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告，1967.9.
- 2) 西村 昭，藤井 学，湊 俊：最新土木材料第2版，森北出版，1991.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，2002.
- 4) 東山浩士，小田健司：下面増厚補強したRC床版の押抜きせん断挙動に関する3次元非線形有限要素解析，第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.85-90，2004.
- 5) 松井繁之，栗田章光，中井 博，黒山泰宏：鋼板接着工法により補強したRC床版の疲労性状，合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，Vol.1，pp.247-254，1986.
- 6) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文報告集，第348号，pp133-141，1984.
- 7) S.G.Youn and S.P.Chang Behavior of Composite Bridge Decks Subjected to Static and Fatigue Loading, ACI Structural Journal, Vol.95, No.3, pp.249-258, 1998.
- 8) 東山浩士，松井繁之，水越睦視：PC床版の押抜きせん断耐荷力算定式に関する検討，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1347-1354，2001.
- 9) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法，コンクリートセミナー4，共立出版，1979.