2 章　コンクリート系床版の疲労耐久性に関する既往の研究

2.1 概要

本章では、道路橋に用いられるコンクリート系の床版の疲労耐久性についての既往の研究と現状について整理する。

2.2 コンクリート系床版の概要

2.2.1 鉄筋コンクリート床版の設計基準とその変遷

道路橋に関する技術基準では、過去より疲労現象と思われる損傷への対応と自動車荷重の引き上げへの対応の２つの観点から規定の内容が繰り返し見直されてきた。

鉄筋コンクリート床版（以下、「RC 床版」という）については、大正 15 年の「道路構造に関する細則案（内務省土木局）」から設計荷重や鉄筋の許容応力度等に関する規定がなされているが、現在の道路橋示方書に近い内容となったのは、「鋼道路橋設計示方書（昭和 31 年　建設省道路局）」以降である。当時より設計に用いる外力として自動車輪荷重の主として軸重（輪荷重）の影響に着目して等方性を有する弾性版の理論解に近似させた床版設計用の断面力を規定化するとともに、最小床版厚の制限の規定化、配力鉄筋の量を主鉄筋の量に対する比率（当初は 25%以上）で配置させることなどが規定化された。

その後、疲労現象と考えられる損傷への対策から昭和 42 年の「建設省道路局長通達（「鋼道路橋一方向鉄筋コンクリート床版の配力鉄筋設計要領」）」で、配力鉄筋量が主鉄筋量の 70%以上と改められ、昭和 46 年の「建設省道路局局長通達（「鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版の設計について」）」以降は、配力鉄筋量を主鉄筋量に対する比率ではなく、別途新たに定められた設計用断面力に対して独立して設計することとされた[1)]。

この間、配力鉄筋量の増加以外にも、床版設計用の鉄筋の許容応力度が他の構造部材の設計に対する規定とは別に低めに設定されるなど疲労耐久性の向上に配慮した改訂がなされてきた。例えば、昭和 43 年の「鋼道路橋の床版設計に関する暫定基準（案）（日本道路協会）」では、床版設計用の鉄筋の許容応力度は 137N/mm^2（1400kgf/cm^2)と低く抑えられ、昭和 53 年以降はさらに 20N/mm^2 (200kgf/cm^2)程度の余裕をもたせることが推奨された。床版厚さも最小値が順次引き上げられ、昭和 43 年から現在と同水準の 160mm となった。

なお、鋼橋の設計においては、上述の「鋼道路橋設計示方書（昭和 31 年）」においてそれまでのたわみ規定が諸外国に比べて厳しすぎるなどの理由から大幅に緩和され、「鋼道路橋設計示方書（昭和 39 年　(社)日本道路協会）」においてさらに若干の緩和が行われた。その後、昭和 48 年に出された「道路橋示方書 I 鋼橋編」において制限が強化されるまでの間の鋼橋について支間長にもよるが鋼げたのたわみが設計上大きくなる傾向にあり、昭和 40 年代より本格的に採用され始めたポンプ車によるコンクリート打設の施工品質とあわせて床版の耐久性に影響を及ぼした可能性も疑われている[2)]。

これらの RC 床版に対する設計基準の改定の多くは、RC 床版で供用後比較的早期に発

生して問題となった損傷が繰り返し載荷される自動車荷重に起因する疲労現象であると考えられたことから、その対策として行われた部分が多いと考えられるが、一方でこの間に自動車の大型化に対応して設計活荷重そのものも引き上げられてきている。したがって、規定内容の変更には疲労耐久性の向上だけでなく耐荷力性能の向上の意味合いも含まれていると考えるのが適当であり、過去の様々な規定内容とその変更の経緯についてそれぞれが床版の疲労耐久性とどのような関係にあるのかを明確に対応づけることは困難である。表 2.2-1 に RC 床版の技術基準の変遷を示す。

表 2.2-1　RC 床版の基準の変遷

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">基準</th><th rowspan="2">後輪軸重(tf)</th><th colspan="2">活荷重曲げモーメント(tf･m)※1</th><th rowspan="2">配力鉄筋量</th><th colspan="2">許容応力度(kgf/cm^2)</th><th rowspan="2">最小版厚(cm)</th></tr>
<tr><th>主鉄筋</th><th>配力鉄筋</th><th>鉄筋</th><th>コンクリート</th></tr>
<tr><td>1926(大15)</td><td>道路構造に関する細則案
(内務省)</td><td>P=4.5(T−12)
～
P=2.25(T−6)</td><td>−</td><td>−</td><td>−</td><td>1200</td><td>45</td><td>−</td></tr>
<tr><td>1939(昭14)</td><td>鋼道路橋設計示方書
(案)
(内務省)</td><td>P=5.2(T−13),
P=3.6(T−9)</td><td>−</td><td>−</td><td>−</td><td>1300</td><td>$\sigma_{28}/3$
≦65</td><td>−</td></tr>
<tr><td>1956(昭31)</td><td>鋼道路橋設計示方書
(日本道路協会)</td><td rowspan="9">P=8.0(T−20),
P=5.6(T−14)</td><td rowspan="5">(1+i)×(0.4×P×(L−1)/(L+0.4)
ただし、2.0＜L≦4.0</td><td rowspan="2">−</td><td rowspan="2">主鉄筋の
25%以上</td><td>1300</td><td>$\sigma_{28}/3$
≦70</td><td rowspan="4">14
(有効版厚11)</td></tr>
<tr><td>1964(昭39)</td><td>鋼道路橋設計示方書
(日本道路協会)</td><td rowspan="6">1400</td><td rowspan="4">$\sigma_{28}/3$
≦80</td></tr>
<tr><td>1967(昭42)</td><td>鋼道路橋一方向鉄筋コンクリート床版の配力鉄筋設計要領
(建設省)</td><td rowspan="2">−</td><td rowspan="2">主鉄筋の
70%以上</td></tr>
<tr><td>1968(昭43)</td><td>鋼道路橋の床版設計に関する暫定基準
(案)(日本道路協会)</td><td rowspan="4">3L+11≧16</td></tr>
<tr><td>1971(昭46)</td><td>鉄筋コンクリート床版の設計について(建設省)</td><td rowspan="6">0.8×(0.12×L＋0.07)×P
大型車交通量1000台/(日・方向)以上で20%増し
2.5＜L≦4.0で、1.0＋(L−2.5)/12を割増し
付加曲げモーメントを生じる場合は別途
付加曲げモーメントを割増し</td><td rowspan="6">0.8×(0.10×L+0.04)×P
0.8×(0.10×L+0.04)×P
大型車交通量1000台/(日・方向)以上で20%増し</td><td rowspan="6">左記に対する照査により決定</td></tr>
<tr><td>1973(昭48)</td><td>道路橋示方書
(日本道路協会)</td></tr>
<tr><td>1978(昭53)</td><td>道路橋鉄筋コンクリート床版の設計，施工について(建設省)</td><td>1400
(余裕200)</td><td rowspan="4">$\sigma_{ck}/3$
≦100</td><td>3L+11≧16
(大型車交通量、不等沈下考慮)</td></tr>
<tr><td>1980(昭55)</td><td>道路橋示方書
(日本道路協会)</td><td>1400</td><td>3L+11≧16</td></tr>
<tr><td>1990(平2)</td><td>道路橋示方書
(日本道路協会)</td><td rowspan="3">1400
(余裕200)</td><td rowspan="3">3L+11≧16
(大型車交通量、不等沈下考慮)</td></tr>
<tr><td>1994(平6)</td><td>道路橋示方書
(日本道路協会)</td><td rowspan="2">P=10.0
(T荷重片側)</td></tr>
<tr><td>1996(平8)</td><td>道路橋示方書
(日本道路協会)</td></tr>
</table>

※1：連続版で主鉄筋が車両進行方向に直角の場合

2.2.2 プレストレストコンクリート床版の概要

コンクリート道路橋においては古くよりコンクリート床版にプレストレスを導入することが行われてきた。

設計基準としては、昭和 43 年以前は「鋼道路橋設計示方書」などを参考に設計されていたが、昭和 43 年に「プレストレストコンクリート道路橋示方書」が制定され、そこでコンクリート橋に用いることを念頭に設計用断面力などの具体的な設計内容がまとまって規定された。その後昭和 53 年に「道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編」がとりまとめられて以降は、同示方書によって設計が行われてきている。

コンクリート橋に用いる場合を前提とした床版の規定では、桁と床版が剛に結合されている条件から断面力式などの規定が定められていることと PC 床版では各種規定の前提となる適用床版支間が RC 床版の 4m に比べて 6m と拡大されていたこと、プレストレスの導入効果を見込み最小版厚が低減されてきたことが特徴である。なお、当時は鋼橋に用いる床版についてもコンクリート橋に用いる場合の規定を参考に設計すべきこととされてきたが、平成 14 年の「道路橋示方書」では、桁の剛性や桁と床版の結合条件の相違なども考慮した鋼橋に用いる場合の設計基準が「Ⅱ鋼橋編」にも正式に規定された。

なお近年、少数主げた橋などで床版支間が 6m を超えるような広幅員のものが鋼橋でも設計されることがあるが、設計断面力や鋼げたとの接合条件、最小版厚などの具体的な設計手法について道路橋示方書に規定されておらず、所要の性能を満足するために個々の条件に応じた設計が行われている。また PC 床版の場合、品質向上や現場工期の短縮などの目的からプレキャスト床版が用いられることがあるが、この場合には床版間に現場接合の継目部があること、桁との接合構造であるずれ止め構造が場所打ちの場合と異なるなどの特徴があり､それらの設計手法や構造細目等に関しても統一的な基準化はなされていない。

2.2.3 鋼コンクリート合成床版の概要

鋼コンクリート合成床版は、ＲＣ床版の下面に鋼板を一体化した構造の床版であり、底鋼板は床版コンクリートの打設時には型枠とその支保工を兼用することで施工の合理化を図ったものである。そのため底鋼板には通常様々な補強鋼材が一体化されているが、これらは完成後はＲＣ床版の鉄筋同様に床版の耐荷力機構を構成する構造部材として期待している。

なお、このような構造的特徴を有する床版の設計手法については RC 床版や PC 床版のように道路橋示方書では設計に用いるべき断面力や構造細目などの具体的な規定化がなされておらず適用しようとする橋梁の条件に合わせて個別に性能照査を行って所要の性能が得られるように設計が行われている。

鋼板パネルとコンクリートを組み合わせた床版の歴史は古く、明治 35 年(1902 年)に大分県臼杵市の旧国道 10 号線・津野川に架設された明治橋が、供用中の鋼Ｉ桁橋としては

わが国最古であり、床版支間 4.9m の鋼コンクリート合成床版を有する鋼２主桁橋である(写真 2.2-1)。ただしこれは強度部材としての波型トラフ鋼板(フランジ厚 9.5mm、ウェブ厚 4.8mm)に、形状保持材としてのコンクリートを介して輪荷重が伝達されるとしたもので合成効果を積極的に利用したものではない。底鋼板と床版コンクリートの合成効果を積極的に利用したのは、海外で 1950 年代に長大橋の床版重量を低減するために開発されたロビンソン型の合成床版からであり、わが国でも、昭和 54 年(1979 年)に首都高速道路公団(現首都高速道路株式会社)で初めて採用されて以降各地で採用された。写真 2.2-2 に昭和のその頃に採用されたリブプレートで補強されたロビンソン型床版の橋の例を示す。

写真 2.2-1　明治橋（1902 年）

写真 2.2-2　大阪城新橋（1983 年）

その後、現在まで鋼コンクリート合成床版として多くの形式が提案されてきている。主な相違点は底鋼板とコンクリートを一体化するためのずれ止め構造と、型枠としての剛性を確保するための補強構造である。ずれ止めはスタッドジベル、トラスジベル、孔あき鋼板ジベルまたは形鋼ジベル等が用いられ、補強材は帯鋼や形鋼を用いたリブならびにトラス鉄筋が用いられている。（図 2.2-1）

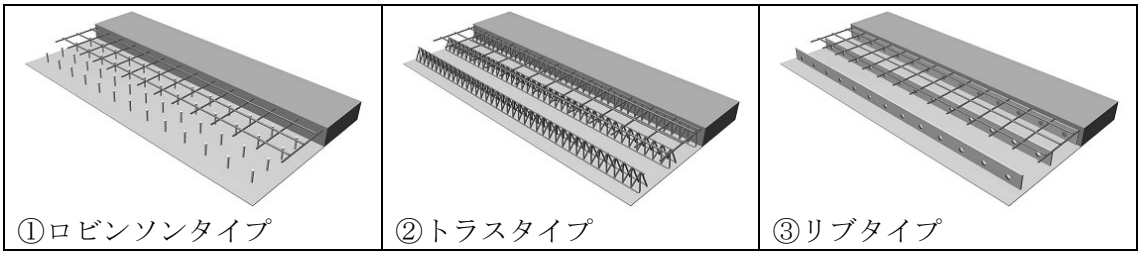


図 2.2-1　鋼コンクリート合成床版タイプの代表例

2.3 既往のコンクリート系床版の疲労耐久性評価法の研究

2.3.1 概要

道路橋示方書ではコンクリート系床版の自動車荷重の繰り返し載荷に対する疲労耐久性を要求水準に応じて定量的に自由に設計出来るような規定とはなっておらず、現在のところ過去に実績が多数ある一般的な床版形式について、適用範囲を限ったうえで設計供用期間において所要の耐久性が得られるだろうと考えられる経験的設計手法が規定されているのみである。このためプレストレスコンクリート床版や鋼コンクリート合成床版などの様々な構造や形式の床版についても、基準で要求される水準の疲労耐久性を満足することを合理的に評価・検証できる手法の確立が望まれ、各方面で検討が行われてきた。

これらの取り組みの一つとして、自動車荷重が移動することの影響が疲労耐久性と密接な関わりがあるとの考えから、自動車荷重の移動を模擬して床版供試体に繰り返し載荷を行う疲労試験法（輪荷重走行試験法）が開発された[3)4)]。

本節では、輪荷重走行試験法及びそれらを用いたコンクリート床版の疲労耐久性に関する研究について整理する。

2.3.2 輪荷重走行試験方法

(1)概要

移動する輪荷重が直接載荷される版構造である床版では、荷重の移動に伴う応力状態の変化が疲労耐久性に大きく影響しているものと考えられる。過去には床版の疲労耐久性に関する研究において定点で繰り返し載荷を行う疲労試験が多く行われたものの、ひびわれの状態などの損傷形態が実橋でみられるものとは大きく異なり現象の再現ができない状態が長く続いた。その後大阪大学の松井らによって輪荷重走行試験機が考案され[3)]、実橋で見られるものにより近い損傷形態が実験的に再現できることが示され、それ以後は多くの実験が様々な条件に対して行われ、供試体の設計手法や支持条件の設定手法、試験結果の評価方法などの知見が蓄積されてきている。

実橋の床版では、床版下面のひび割れは載荷位置が移動するため放射状には発達せず、床版全体に格子状で拡大していくことが多く、さらに損傷が進行すると鉄筋が破断するより前にブロック化したコンクリート塊が床版から抜け落ちることが多いのに対して、一点での載荷を繰り返した場合には、床版下面の載荷点を中心とした放射状のひび割れが発生した後、コンクリート部分の破壊に先立って主鉄筋の疲労による破断が生じる場合がほとんどであり破壊の様相は乖離している[5)6)]。

定点載荷実験については、一点のみで載荷を繰り返すのではなく、複数の載荷点を設けてそれらに順次載荷していくことを繰り返す方法が試みられた例もある。その場合には荷重点が１点でないため床版下面に発達するひび割れは単純な放射状にはならず実橋により近い格子状のひびわれパターンが得られているが、一点での定点載荷試験と同様にコンクリートの破壊に先行して鉄筋が疲労で破断する結果が得られており、ほとんどの場合床版

コンクリートが抜け落ちても鉄筋の破断がみられない実橋とは整合しない[7]。

このように離散的に載荷を行う疲労試験法では、一点載荷、複数点載荷のいずれの方法によっても実橋の床版の疲労損傷過程は破壊形態からも再現されているとは言い難く、それらを改善するために荷重の載荷条件を限りなく実橋床版に近づけた輪荷重走行試験法が考案された。

輪荷重走行試験方法は、実物大に近いスケールの床版供試体の上を、接地圧（載荷荷重）を制御しながら車輪を移動させる載荷試験機による疲労試験方法であり、定点載荷とは異なり、鉛直力が維持されたまま連続的に床版を移動していくために実交通下での輪荷重によって生じていると考えられるものと比較的近い応力状態が供試体に対して実現できると考えられる。特に、鉄筋コンクリート部材であるコンクリート床版では、疲労による劣化損傷の進行のメカニズムがひびわれの発達と密接に関係していると考えられ、床版のコンクリートの各部分における応力履歴を大きさのみならずその方向やその変化などもより忠実に再現することが実橋の疲労現象の再現には必要と考えられるため、輪荷重走行試験は定点載荷に比べて現象再現性の点ではより適当な方法と考えられる。

写真 2.3-1 輪荷重走行試験の概観（（独）土木研究所）

以下に、実橋におけるコンクリート床版の疲労による劣化過程の事例と輪荷重走行試験による供試体の劣化過程の事例を示す。

写真 2.3-2　実橋床版の劣化状況の例

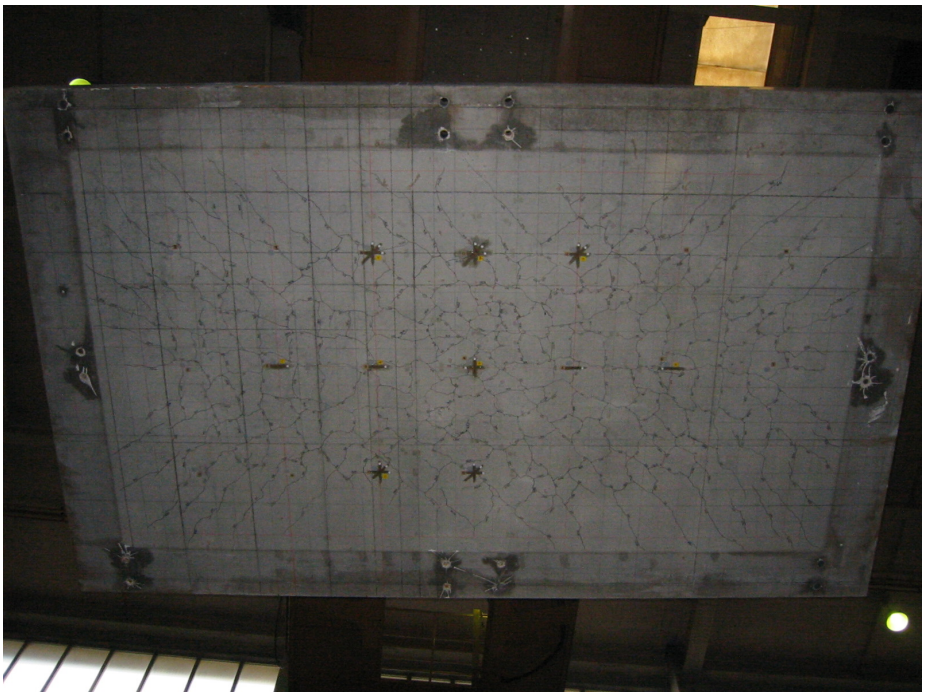


写真 2.3-3　輪荷重走行試験後の劣化状況の例（床版下面の状況）

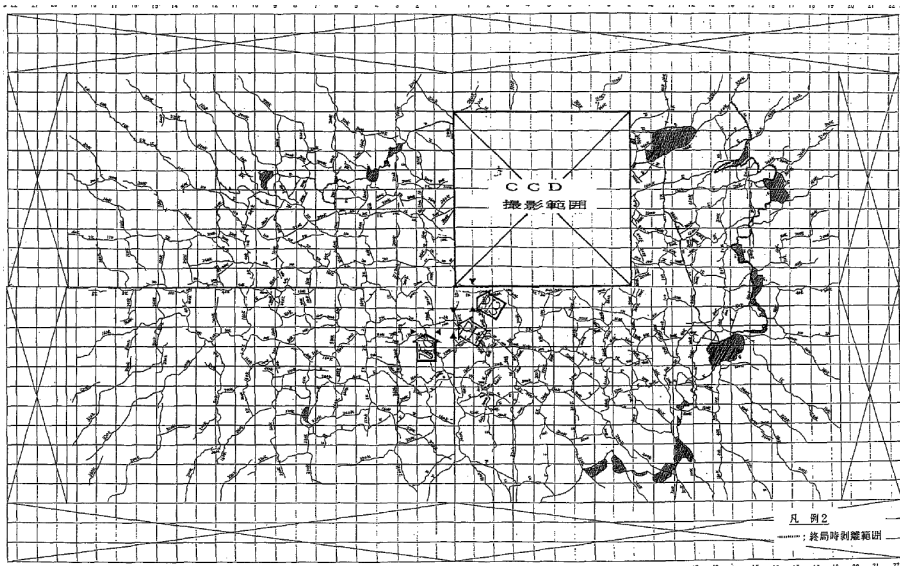


図 2.3-1　輪荷重走行試験後の劣化状況（下面ひびわれ）の例
（鉄筋コンクリート床版（H8 道路橋示方書準拠供試体））

輪荷重走行試験の結果は、載荷荷重の大きさと回数によって疲労環境が定義され、疲労損傷の進行の程度についてはコンクリート部材としての変状によって評価することが一般的である。疲労損傷の程度の評価で通常着目される主な項目は以下の通りである。

①床版のたわみ
②内部鋼材（鉄筋）のひずみ
③コンクリート表面のひずみ（上下面応力）
④ひびわれ性状（延長・幅・方向など）

通常の RC 床版の場合、一定の荷重で輪荷重走行試験を行うと、床版たわみや鉄筋ひずみなどが初期に急速に増加し、その後は非常にゆるやかに劣化が進展する期間がある。さらにある程度以上劣化が進行した段階から再度劣化進展速度が増加し、最終的には制御した載荷の継続が困難なほどにまでたわみが増加し、鉄筋のひずみ変化も安定しなくなるなど版としての一体性を喪失したような挙動が現れて破壊と判定される。

床版の性能の観点からは、所要の耐荷力に対する安全余裕を喪失した段階までが耐久性として期待できる期間と考えられるが、徐々に進行する劣化（ひび割れの増加や鉄筋ひずみやたわみの増加など）の過程のどの段階で設計上期待する耐荷力余裕が丁度喪失したいわゆる性能の限界の状態とみなせるのかは、耐荷力設計上の仮定と実構造の乖離もあり実験の挙動に対して特定することは困難である。

また、実橋の供用下で床版に載荷される輪荷重の数は膨大なものとなり、実験において床版の設計供用期間に繰り返される輪荷重の数だけの荷重載荷を行うことが困難な場合が多く、ある程度以上疲労耐久性のある床版の場合には載荷荷重を段階的に引き上げて繰り返し載荷を継続させる方法で実験されることが多い。この場合、段階的に荷重を増加させることで供試体の疲労損傷過程にどのような影響が生じるのかが不明であることや、多くの場合実験の途中段階から実際の自動車交通下では現実的でない大きな載荷重となり、輪荷重走行試験で得られた供試体の疲労耐久性が実交通下のどの程度の疲労耐久性に対応するのかについて明確でない。

このようなことから、輪荷重走行試験の結果については、床版のたわみやひび割れ性状などによって損傷度を定義し、実績があり、既に耐久性が明らかになっている床版と同条件の試験による結果と劣化損傷の過程を相対比較することで耐久性の評価を行うことが一般に行われている。

以下に道路橋示方書に規定のある代表的な床版に対する既往の輪荷重走行試験の結果の例を示す。

(2) ＲＣ床版の輪荷重走行試験結果

1) 概要

輪荷重走行試験を行ったＲＣ床版では、載荷重の固定、漸増にかかわらず初期よりひびわれが発生し、それが全体に発達して最終的には床版コンクリートの一部が台形（四角錐）状に踏み抜かれるように破壊するいわゆる押し抜きせん断破壊の状態を呈するという劣化過程をたどる。また内部の鉄筋は最終段階まで破断することはほとんどなく、この２つの破壊の特徴は､実際の床版で抜け落ちを生じた床版の多くに共通する特徴と一致している。

2) 一定荷重載荷の例

図 2.3-2～2.3-4 に、土木研究所（旧建設省土木研究所）で実施された RC 床版の輪荷重走行試験（一定荷重の繰り返し）の結果の例を示す。表 2.3-1～表 2.3-2 に供試体の諸元と破壊時荷重と破壊までの走行回数を示す[8)]。

床版中央の活荷重たわみは、初期段階で急速に増加しある値に達すると、以降はその増加速度は極めて緩やかになり徐々に増加しながら長く推移する。そして最後にたわみは急増して破壊に至っている。なお実験は、たわみが大きくなり所定の荷重が載荷できなくなった段階で終了している（図 2.3-2）。

鉄筋ひずみは、引張り側にある主鉄筋、配力鉄筋はともに、初期段階で床版たわみの増加と連動するようにひずみが急増するが、その後はほぼ一定の値で推移しており、そして最後のたわみが急増する段階でこれに連動するように挙動が不安定化している。

表 2.3-1　　RC39 供試体の主な諸元

	供試体寸法 (mm)	支間 (mm)	主鉄筋(mm)		配力鉄筋(mm)	
			呼び径	間隔	呼び径	間隔
RC39-1,3～9	2800×4500×190	2500	D16	150(300)	D13	300(300)
RC39-2					D10	150(300)

()内は圧縮鉄筋の値

表 2.3-2　RC39 供試体の破壊時荷重と載荷回数

	破壊時荷重(kN)	破壊時走行回数(回)
RC39-1	157	27,392
RC39-2	176	59,078
RC39-3	105	1,423,112
RC39-4	196	881
RC39-5	167	45,034
RC39-6	147	130,828
RC39-7	152	272,329
RC39-8	118	2,750,073
RC39-9	157	224,764

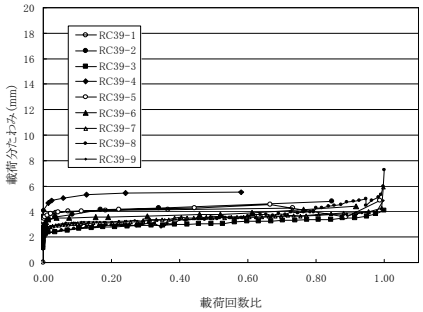


図 2.3-2　RC 床版の床版中央活荷重たわみ（載荷分）（RC39 供試体）

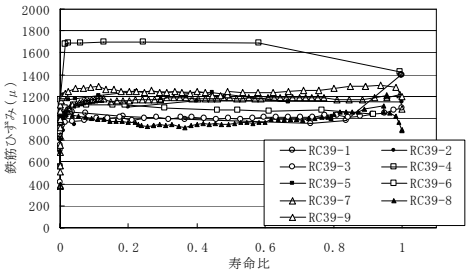


図 2.3-3　主鉄筋ひずみ（RC39 供試体）

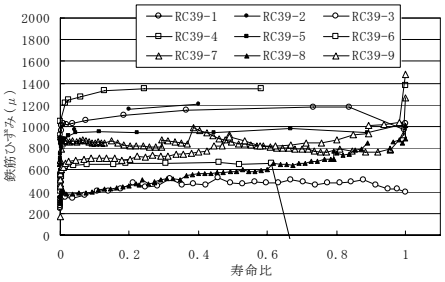


図 2.3-4　配力鉄筋ひずみ（RC39 供試体）

3) 荷重漸増載荷（階段載荷）の例

昭和 39 年の道路橋示方書で設計された床版（RC39）供試体では一定荷重載荷による輪荷重走行試験によって破壊に至るまでの試験が行われているが、例えば平成８年の道路橋示方書など近年の道路橋示方書に準拠した設計が行われた床版では疲労耐久性が向上しており、同様の荷重レベルでの一定荷重載荷で破壊に至るまでの試験を実施することは時間的にも困難なため、一定の荷重での載荷をある回数行った後に載荷荷重を引き上げることを繰り返す、荷重漸増載荷（以下「階段載荷」という。）による試験が一般的に行われてきた。図 2.3-5～図 2.3-7 に、階段載荷による輪荷重走行試験結果の例を示す。また表 2.3-3～表 2.3-4 に供試体の諸元と破壊時荷重と破壊までの走行回数を示す[8)]。

一定荷重載荷試験と同様に、床版中央の活荷重たわみが初期に急増し、その後たわみの増加速度が小さいまま長く推移する傾向にあることが読み取れる。しかし、一定荷重載荷と異なり順次荷重を増加させているため荷重増加時にはたわみが急増し、次の荷重増加を行うまでの間は緩やかにたわみが増加するというパターンが繰り返される。そして最終的には、ある荷重段階でたわみが急激に増加して実験終了に至っている。

鉄筋ひずみについても、たわみとの関係は一定荷重載荷の場合と同様の傾向を示していると考えられ、引張り側主鉄筋、配力鉄筋ともに初期段階でたわみの変化に連動して急増したのち停滞する傾向がみられる。そして荷重増加時には鉄筋ひずみも床版たわみ同様増加して、荷重が一定である状態ではひずみもほぼ一定の値で推移している。さらに最終段階では、これも一定荷重載荷と同様にたわみの急増に連動して値が不安定な挙動を示している。

表 2.3-3　　RC47 供試体の主な諸元

	供試体寸法	支間	主鉄筋(mm)		配力筋(mm)	
	(mm)	(mm)	呼び径	間隔	呼び径	間隔
RC47-2～4	2800×4500×200	2500	D19	125(250)	D16	100(200)

(　)内は圧縮鉄筋の値

表 2.3-4　RC47 供試体の破壊時荷重と載荷回数

	破壊時荷重(kN)	破壊時走行回数(回)
RC47-2	314	327,725
RC47-3	314	352,667
RC47-4	314	321,127

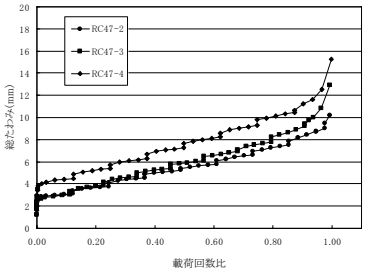


図 2.3-5　RC 床版の床版中央活荷重たわみ（載荷分）（RC39 供試体）

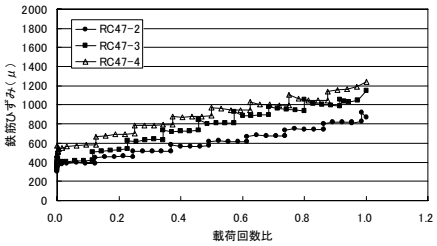


図 2.3-6　主鉄筋ひずみ（RC47 供試体）

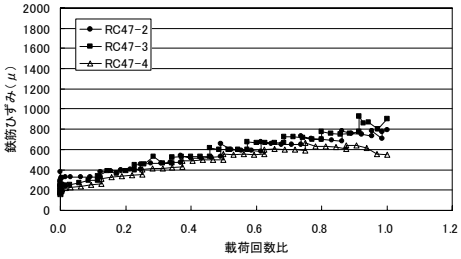


図 2.3-7　配力鉄筋ひずみ（RC47 供試体）

このように、階段載荷では、荷重レベルを引き上げた時に床版たわみや鉄筋のひずみが急増するが、その間の載荷荷重が一定の区間においては活荷重たわみも鉄筋ひずみも一定荷重載荷同様の傾向で安定した推移を示しており、外観で確認できる破壊に至るまでのひびわれの発達状況からも一定荷重載荷による疲労試験の促進試験としてとらえることが出来ると考えられる。ただし、載荷重の引き上げ前後でたわみ等の値が急変しており荷重の引き上げによって床版コンクリートに静的な破壊が生じるなど疲労による以外の破壊を生じさせている可能性も高い。以上のことから、この方法では純粋な疲労破壊のみによる破壊以外の要素による床版劣化が含まれる可能性があること、試験の最終段階では現実の床版では想定されないような荷重レベルとなっており床版内部の応力状態も現実の供用条件

下とは乖離が大きいことから疲労試験としての定量的な評価方法については明確でないといえる。

図 2.3-8 は、適用基準の異なるＲＣ床版の階段載荷試験の結果の例である[8)]。昭和 39 年より新しい道路橋示方書では疲労耐久性向上の観点から、2.2 節に示したとおり鉄筋量や床版厚の増など基準毎に床版の規定に相違があるが、適用基準毎に同じ載荷条件において破壊に至るまでの載荷回数には相違がみられており、新しい基準によるものほど相対的には疲労耐久性が優れていることを示す結果といえる。表 2.3-5 及び 2.3-6 に、図 2.3-8 中に示した H8 年の道路橋示方書に準拠した供試体の諸元と破壊時荷重と破壊までの走行回数を示す。

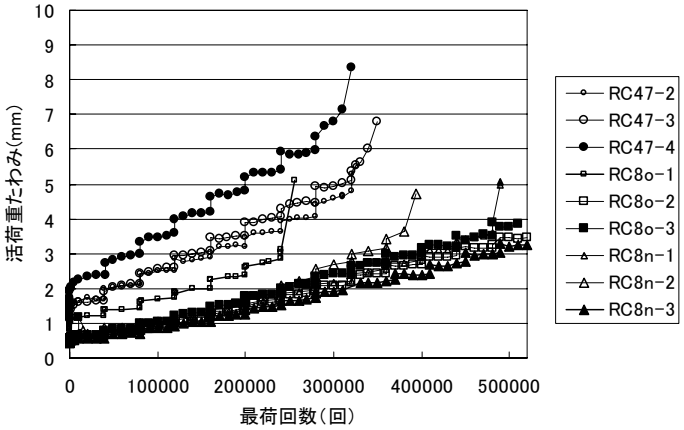


図 2.3-8　RC 床版の床版中央活荷重たわみ（階段載荷試験結果）

表 2.3-5　RC8 供試体の主な諸元

	供試体寸法 (mm)	支間 (mm)	主鉄筋(mm)		配力鉄筋(mm)	
			呼び径	間隔	呼び径	間隔
RC8o-1～3	2800×4500×250	2500	D19	150(150)	D16	125(125)
RC8n-1～3				150(150)		125(250)

()内は圧縮鉄筋の値

表 2.3-6　RC8 供試体の破壊時荷重と載荷回数

	破壊時荷重(kN)	破壊時走行回数(回)
RC8o-1	275	255,649
RC8o-2	392	520,000(未破壊)
RC8o-3	392	520,000(未破壊)
RC8n-1	392	489,555
RC8n-2	334	394,122
RC8n-3	392	520,000(未破壊)

図 2.3-2 及び図 2.3-4 に示した一定荷重における旧基準（S 39 床版）の結果と比較すると、荷重を増加しているにもかかわらず破壊までの載荷回数が増加しており疲労耐久性は大きく向上しているものと考えられる。これらの疲労耐久性の相対関係は、基準の規定内容からしても妥当な結果と考えられ、階段載荷による輪荷重走行試験が少なくとも定性的には疲労耐久性を適切に評価できる手法であることを示す結果となっている。

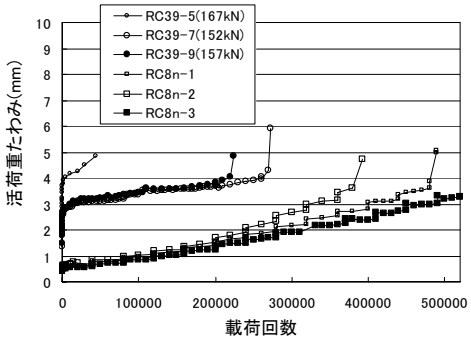


図 2.3-9　RC 床版の床版中央活荷重たわみ（RC39 は一定荷重、Rc8 は階段載荷）

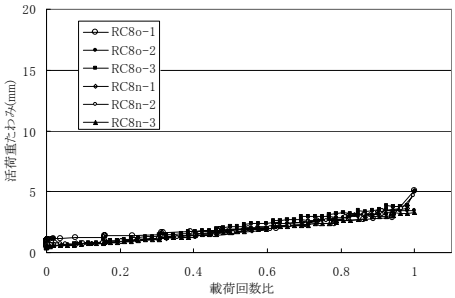


図 2.3-10　RC 床版の床版中央活荷重たわみ（載荷分）（H8 供試体）

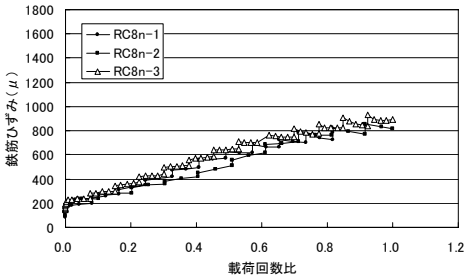


図 2.3-11　主鉄筋ひずみ（H8 供試体）

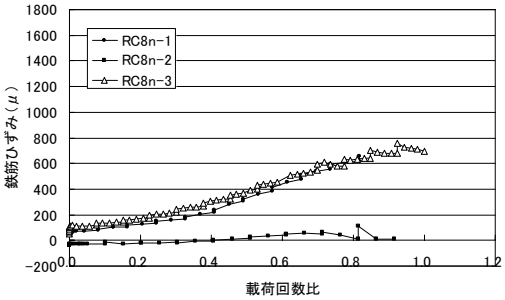


図 2.2-12　配力鉄筋ひずみ（H8 供試体）

(3) プレストレスを導入した床版の輪荷重走行試験結果

プレストレスを導入した床版（以下「ＰＣ床版」という。）についても荷重漸増載荷（階段載荷）による輪荷重走行試験が行われている。図 2.3-13～2.3-15 に、プレストレスを導入した床版の試験結果の例を示す。また、表 2.3-7 及び表 2.3-8 に供試体の諸元と破壊時荷重と破壊までの走行回数を示す[8)]。

床版へのプレストレスの導入は、たわみやひびわれが抑制されることなどによって疲労耐久性向上に寄与すると考えられているが、試験結果においても同じ載荷パターンのＲＣ床版の結果（図 2.3-13～2.3-15）と比べて活荷重たわみが小さく破壊に至るまでの載荷回数も多く疲労耐久性に優れる結果となっている。

床版支間直角方向のひび割れはＲＣ床版と比較して少なくなっており、プレストレスの効果によって床版支間方向にはひび割れの発生が抑制されたためと考えられる。また、床版厚が 180mm と薄いにも関わらず、床版厚 190mm の RC39 床版と比較してたわみが小さいことから、プレストレスの効果は多数のひびわれが生じている試験の最終段階まで維持されていると考えられる。

なお、実験条件ではＰＣ床版は、100kN の輪荷重に対してフルプレストレスとなるように設計されているが、載荷荷重を最終的には PC8-1 で最大 353kN、PC8-2 で 392kN まで増加させており、実験の途中段階からは実橋の床版では通常載荷されることのない大きな荷重によるひび割れが発生する状態での試験となっている。

実験ではこのような過大な応力状態での繰り返し載荷の段階を経て床版が最終的には破壊しているが、ＲＣ床版の試験結果と同様に内部の鉄筋に破断は生じず、床版コンクリートの破壊によるたわみの増大で実験は終了している。これらの結果から実橋でもＰＣ床版の疲労ではＲＣ床版同様に床版コンクリートの破壊が支配的になる可能性が高いものと考えられる。

表 2.3-7　PC8 供試体の主な諸元

	供試体寸法 (mm)	支間 (mm)	主鉄筋(mm)		配力鉄筋(mm)	
			呼び径	間隔	呼び径	間隔
PC8−1,2	2800×4500×180	2500	D13	250(250)	D19	125(250)

()内は圧縮鉄筋の値

表 2.3-8　PC8 供試体の破壊時荷重と載荷回数

	破壊時荷重(kN)	破壊時走行回数(回)
PC8−1	353	403,748
PC8−2	392	486,253

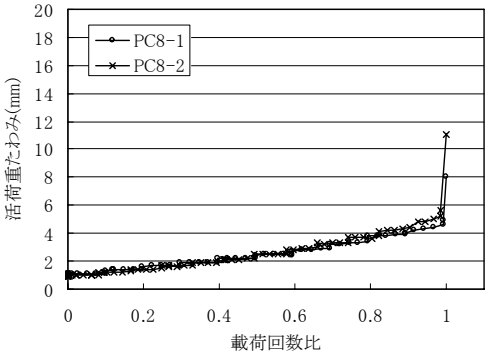
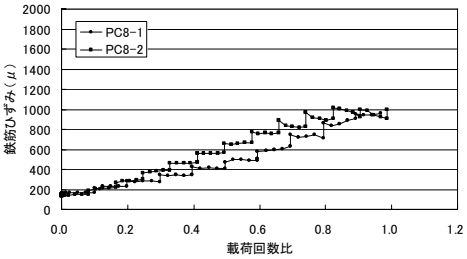


図 2.3-13　PC 床版の床版中央活荷重たわみ（載荷分）



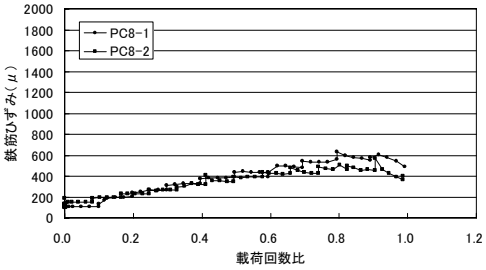


図 2.3-14　主鉄筋ひずみ（PC 供試体）　図 2.3-15　配力鉄筋ひずみ（PC 供試体）

以上のように、輪荷重走行試験は、プレストレスを導入した床版についても疲労耐久性の明らかなＲＣ床版などと同条件の試験結果を比較することでその疲労耐久性を相対的に把握できる手法として有効であると考えられる。

(4) 鋼コンクリート合成床版の輪荷重走行試験結果

鋼コンクリート合成床版の疲労耐久性については、昭和５０年代から大阪大学で輪荷重走行試験機を用いた床版の耐久性に関する研究の一環としてロビンソン型床版に対して輪荷重走行試験が行われたのをはじめ、これまでに多くの研究が行われてきている。

これらの成果として、平成 9 年(1997 年)には土木学会の「鋼構造設計指針 PART B」において最小床版厚やずれ止めの設計方法などが示された。

また、開発段階を含め、輪荷重走行試験が行われたものも多くあり、ここでは各種の鋼コンクリート合成床版を対象に行われた輪荷重走行試験の主な結果(図 2.3-16)について示す。

これらの試験はほとんどすべて階段載荷で行われており、また底鋼板の存在から輪荷重走行試験中の床版コンクリートの変状状態については、いつどの段階でどのような現象が生じていたのかを正確に把握できている例はない。

しかし、図 2.3-17 に示すようにひび割れ量と 100kN 換算弾性たわみの勾配(または残留たわみ量)との関係では、最終段階で床版上面に現れたひび割れが比較的少ない床版では勾配の変化が小さく、ひび割れが比較的多い床版では勾配の変化が大きくなる傾向となっている。また、一部の鋼コンクリート合成床版では、たわみの勾配の変化とひび割れ発生時の走行回数との間に関連性が見受けられる結果となっている（図 2.3-18）。これらからは走行回数の履歴にしたがって鋼コンクリート合成床版においても床版内部の破壊が徐々に進行していく過程を経ていることが伺われる。

図 2.2-16(a)(b)(c)は、それぞれたわみ変化について「載荷時と除荷時の比較」「弾性たわみと換算弾性たわみの比較」「換算弾性たわみとひびわれの関係」を示したものである。

それぞれ A～K の異なる構造の鋼コンクリート合成床版の結果に加えて比較のために、平成 8 年道示準拠の RC 床版供試体の結果をあわせて示している。

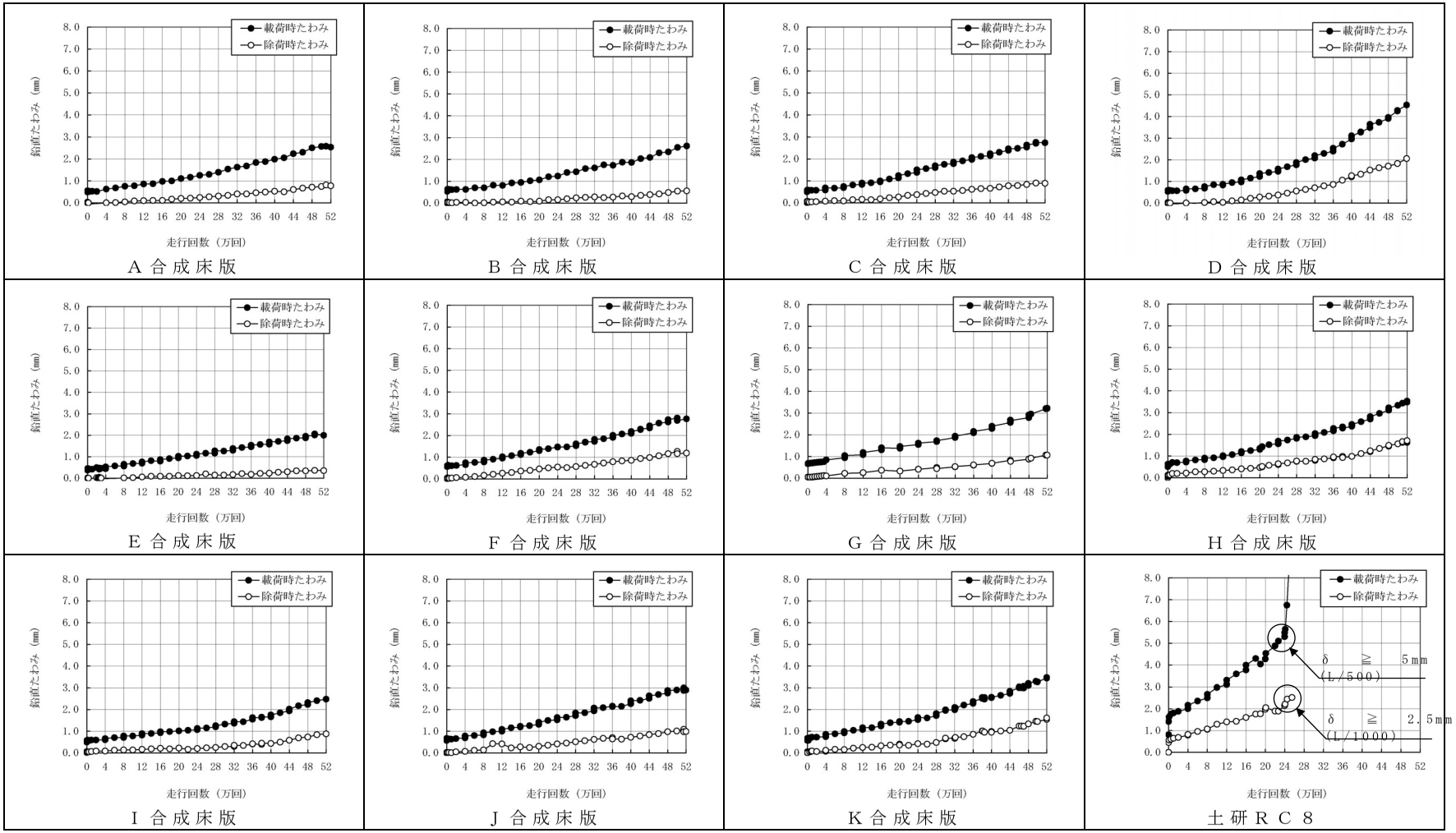


図 2.3-16(a)　輪荷重走行試験による合成床版のたわみ変化（その１）：載荷・除荷たわみ

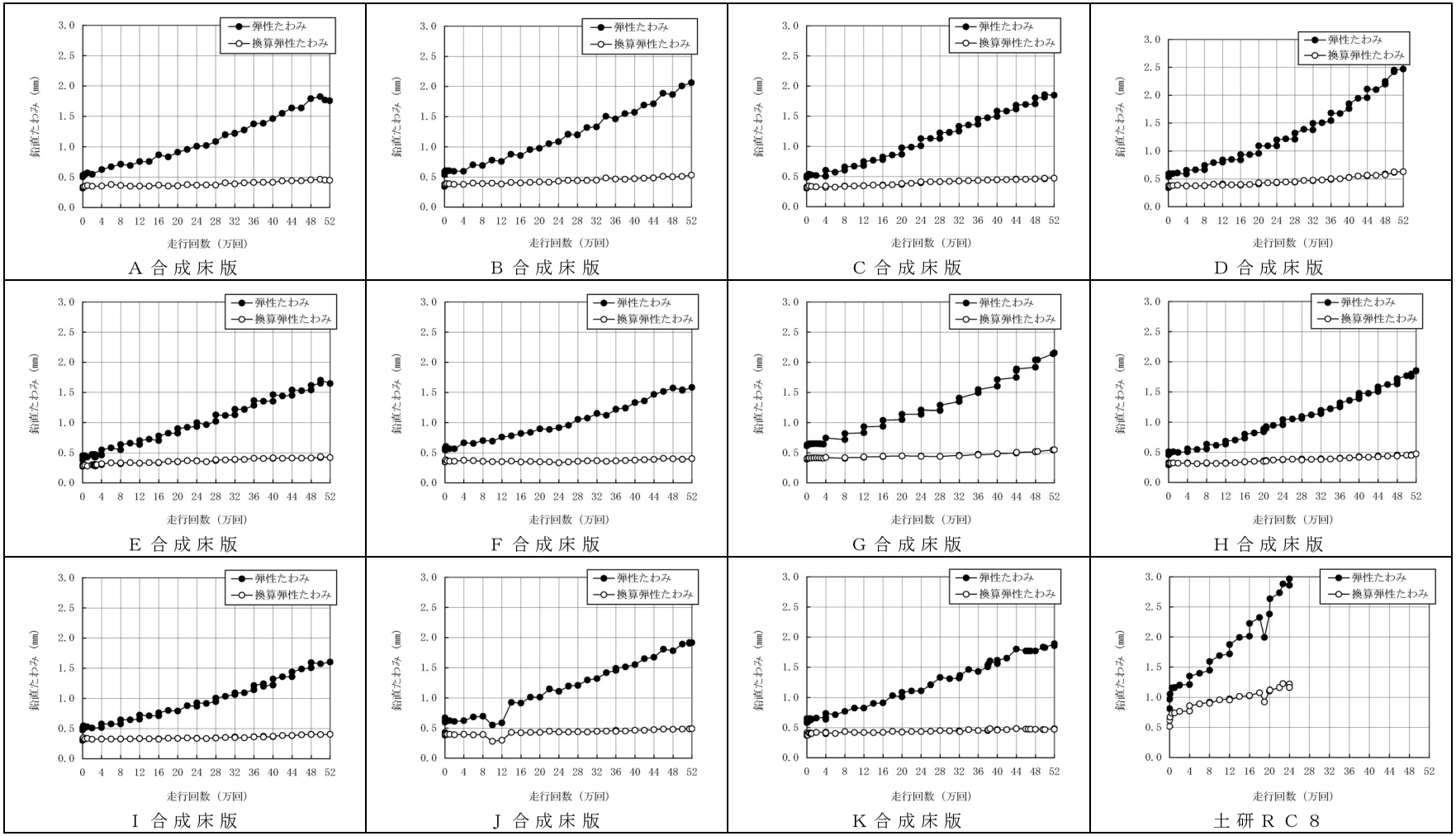


図 2.3-16(b)　輪荷重走行試験による合成床版のたわみ変化（その２）：弾性・換算弾性たわみ

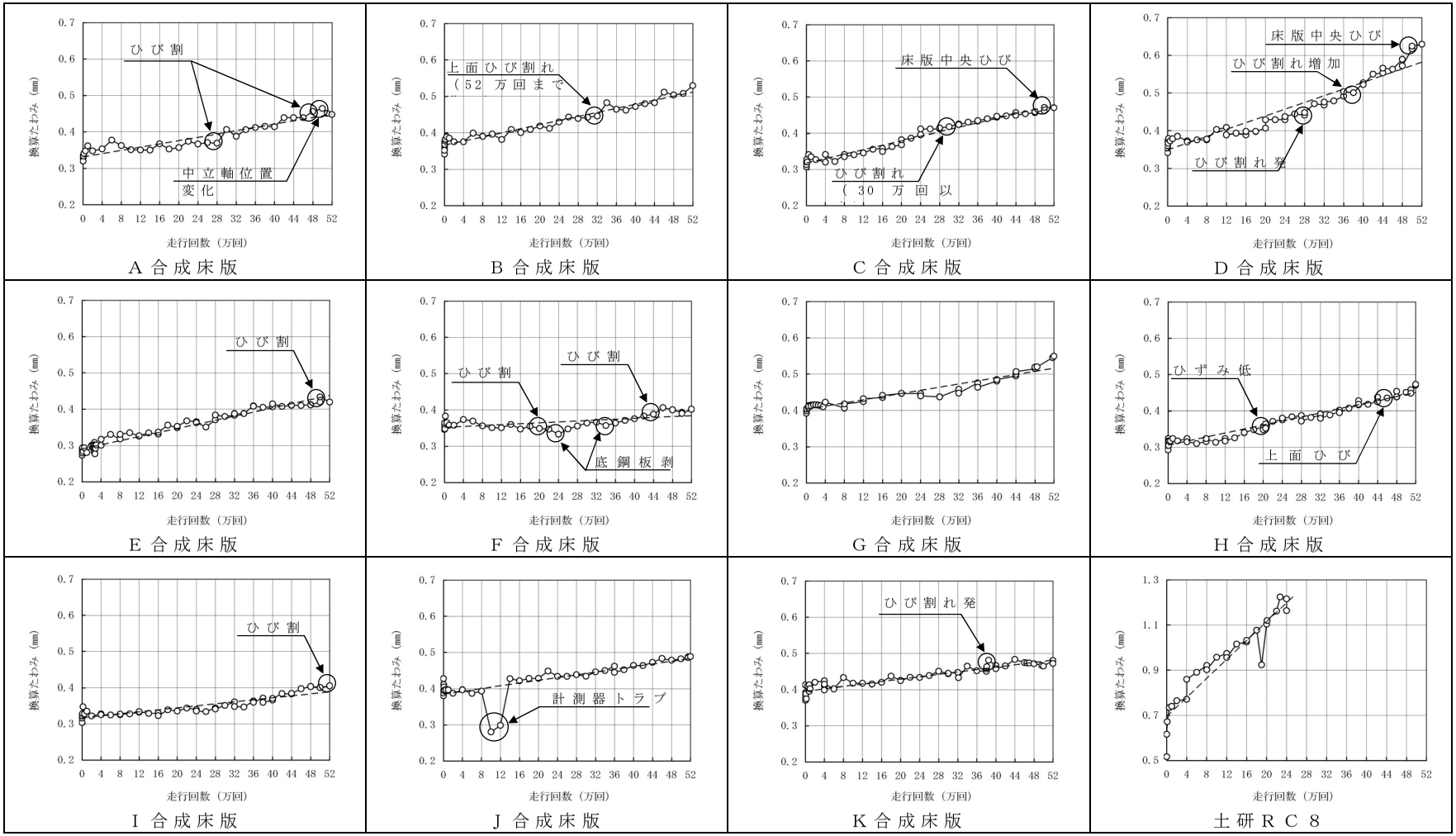


図 2.3-16(c) 輪荷重走行試験による合成床版のたわみ変化（その３）：換算弾性たわみ

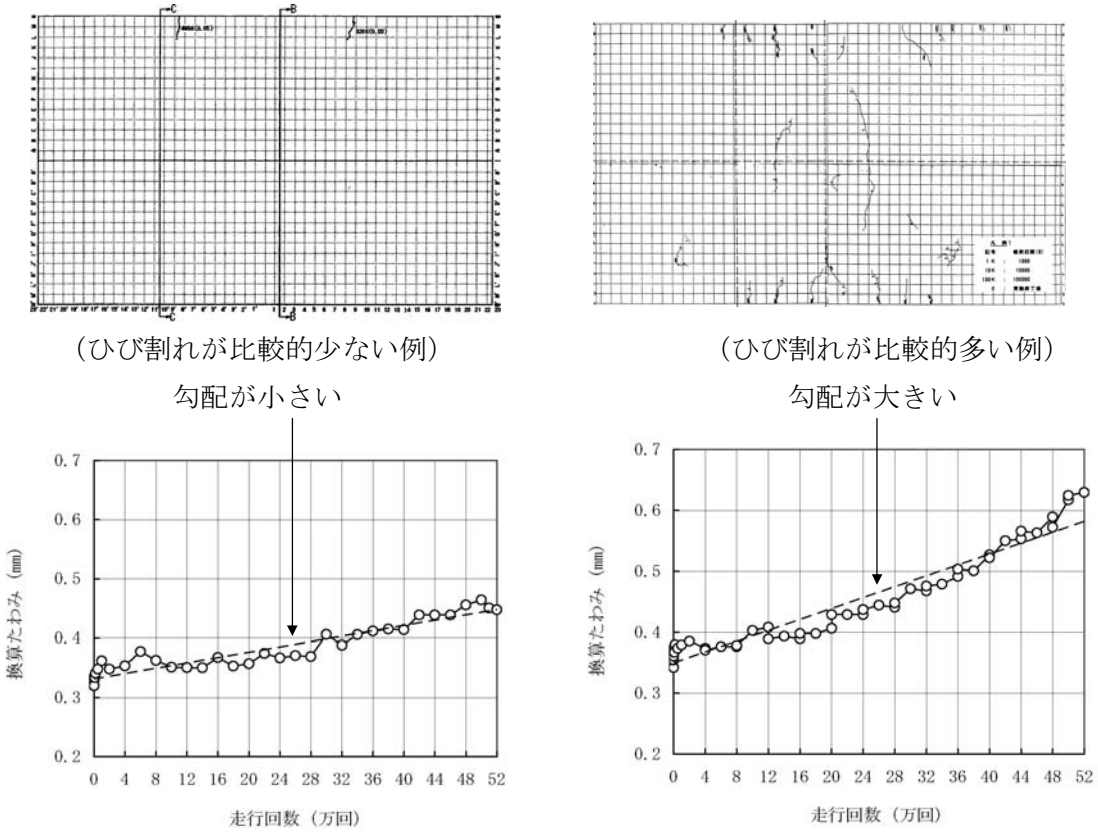


図 2.3-17　供試体上面ひび割れ状況および換算弾性たわみ－走行回数関係

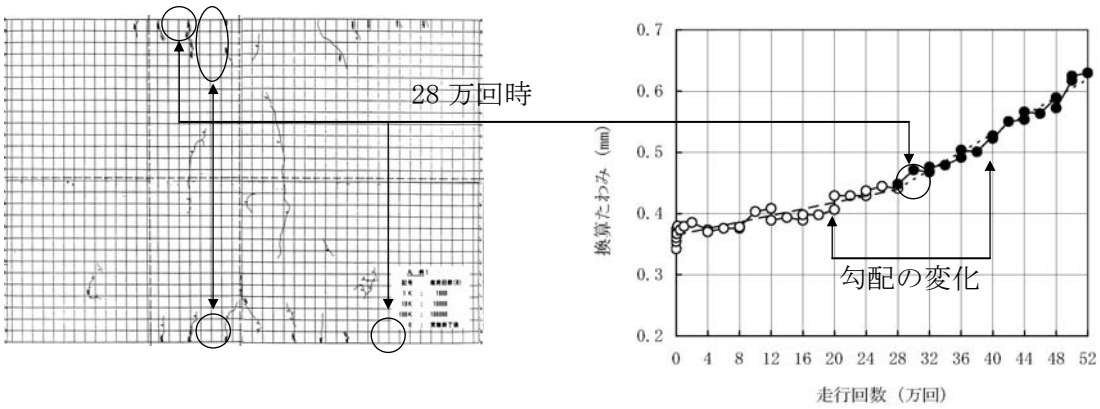


図 2.3-18　ひび割れ発生回数と床版剛性の変化（D合成床版）

鋼コンクリート合成床版の場合、底鋼板の存在から最終破壊段階についても確認が困難であるが、旧土木研究所において鋼コンクリート合成床版の開発過程で実施された輪荷重走行試験では、床版のコンクリートが押し抜きせん断破壊した例が報告されている[9]。この床版では、コンクリート上面に床版内部に設けた補強リブ位置から橋軸直角方向(主鉄筋

鉄筋方向)にひび割れが発生し、ひび割れ貫通に伴いコンクリートが鋼部材と剥離し、リブ間のコンクリートが梁のように独立して挙動するようになり、最終的に押し抜きせん断破壊に至ったものと考えられている。この床版の例では最終的にコンクリートのせん断ひび割れと、リブ上部を結ぶような水平ひび割れの発生が確認されている（図 2.3-20）。

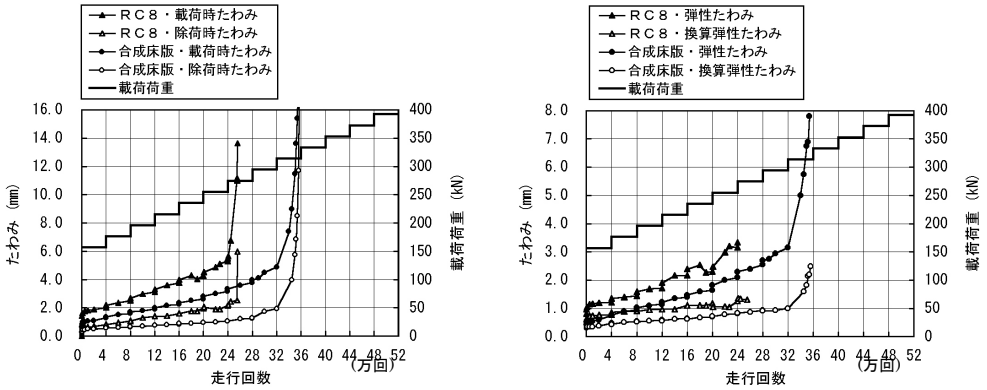


図 2.3-19　乾燥状態で破壊した合成床版のたわみ変化

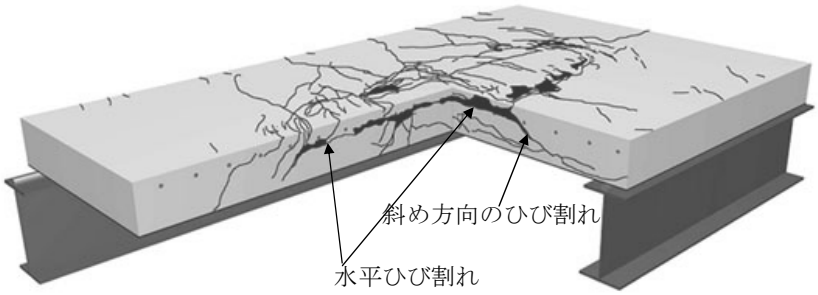


図 2.3-20　乾燥状態で破壊した合成床版ひび割れ分布の例

鋼コンクリート合成床版に対しては、大阪大学において水張り状態で輪荷重を走行させる試験も行われている [10)11)]。この試験では通常の乾燥状態で 30 万往復回の走行を行った後、床版上に水を滞水させた状態で輪荷重走行を行い、約 2 万往復で床版たわみが急増したため試験を終了している(図 2.3-21)。この試験は連続合成桁の中間支点部に着目した試験であるため、主げた作用に相当する負曲げモーメントを静的に与えており、その引張応力によって床版コンクリートには載荷初期段階からひび割れが発生している。試験ではひび割れからの水の浸入～ひび割れからのセメント成分の遊離と床版上面への堆積～床版下面からの漏水～コンクリートの骨材化～押し抜きせん断状のひび割れ発生という経過が観察されている（写真 2.3-4）。さらに試験終了後の切断面の観察では、リブ上部での水平方向ひび割れも確認されている(図 2.3-22)。

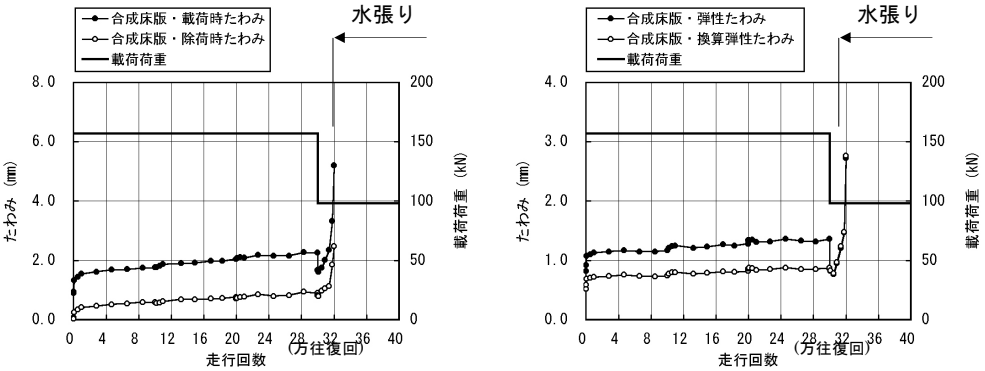


図 2.3-21　水張り状態で破壊した床版のたわみ変化

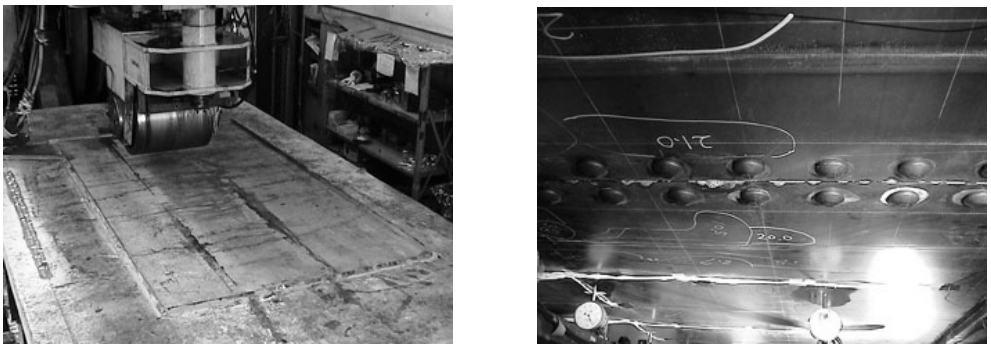


写真 2.3-4　水張り走行試験状況

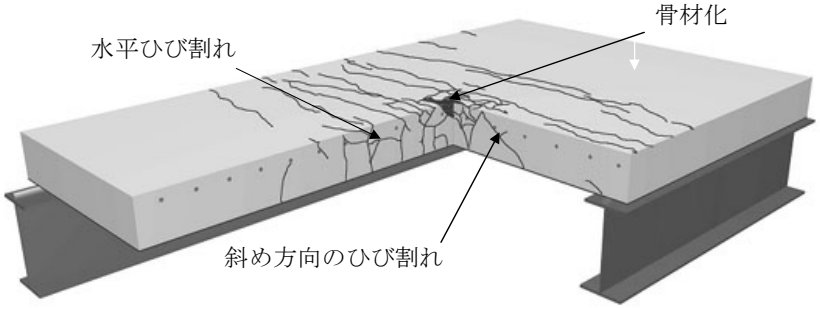


図 2.3-22　水張り状態で破壊した床版のひび割れ分布の例

(5) その他の床版（補修・補強床版）

図 2.3-23～2.3-24 に、初期損傷を与えた RC39 床版に、鋼板接着補強または上面増厚補強を施した床版の試験結果の例を示す。表 2.3-9 に補強供試体の主な諸元を示す。

ここで床版に与えた初期損傷は、157kN の一定荷重下で床版の状態が損傷度Ⅱ（「損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうかの判定を行う必要がある」（建設省土木研究所　橋梁点検要領（案）昭和 63 年））に該当するとみなせる状態となるように与えられている。

所定の初期損傷状態に達するまでの載荷回数にはばらつきがあるが、各床版の活荷重た

わみは概ね 4mm 程度であり、すでに示した RC39 床版であればほぼ疲労寿命の最終段階に近い状態となっていると思われる。

補強後の疲労試験は階段載荷により実施されている。活荷重たわみ変化の図より、補強直後には補強前と比較して活荷重たわみがほぼ半減しており補強によるたわみ抑制効果が現れている。

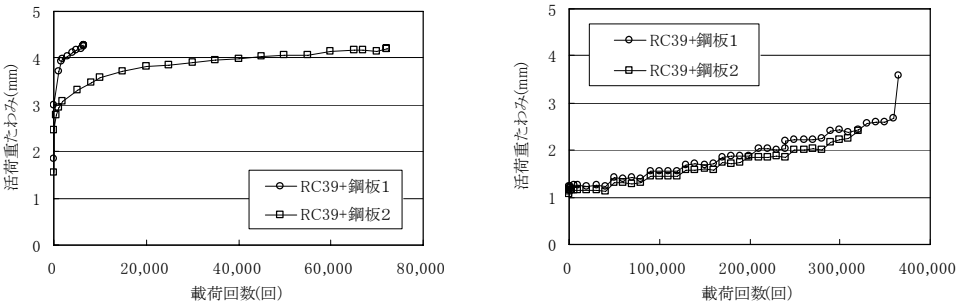
たわみが低減された結果、床版コンクリートや鉄筋に発生する応力も低減しているものと考えられ、補強による断面性能の回復効果もあり、その後、階段載荷による試験においても、無補強かつ一定荷重で実施された RC39 床版と比較しても、同等以上の疲労耐久性が得られたものと考えられる。

これらの結果から、輪荷重走行試験では上面増厚や鋼板接着などの補強工法の効果についても構造によっては定性的に適切な評価が可能であると考えられる。

表 2.3-9　補強供試体の主な諸元

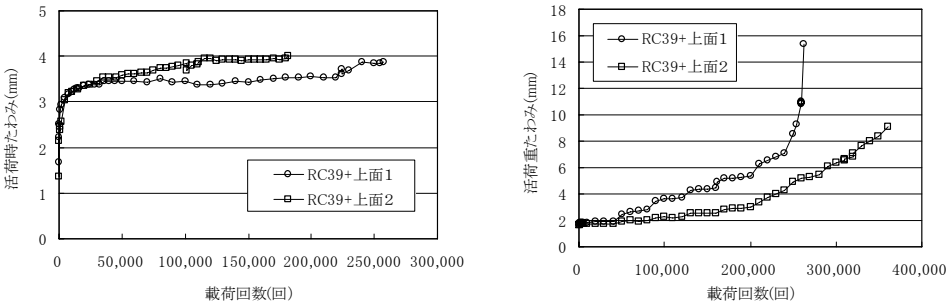
	供試体寸法 (mm)	支間 (mm)	主鉄筋(mm)		配力鉄筋(mm)		備考
			呼び径	間隔	呼び径	間隔	
RC39+鋼板1,2	2800×4500×190	2500	D16	300(300)	D19	300(300)	
RC38+上面1							せん断補強筋あり
RC39+上面2							せん断補強筋なし

( )内は圧縮鉄筋の値



a) 補強前　　b) 補強後

図 2.3-23　鋼板接着補強床版の床版中央活荷重たわみ（載荷分）



a) 補強前　　b) 補強後

図 2.3-24　上面増厚補強床版の床版中央活荷重たわみ（載荷分）

2.3.3 疲労耐久性の定量的評価法

(1) 概要

以上のように、コンクリート床版の疲労耐久性評価法としての輪荷重走行試験では、実験的な相対評価としては有効であるものの、疲労現象のメカニズムに対する理解に基づいた定量的な評価手法とはなっておらず、供試体実験の結果からの実橋条件下での床版の疲労耐久性の定量的な推定は困難である。そのため対照できる既往の実験結果がない床版形式や構造条件に対しては、都度実験を行って疲労耐久性を評価することも現状では避けられない場合が多いと考えられる。

それらの課題に対して、設計において必ずしも実験によることなく、また実橋の条件に対してより直接的、定量的に疲労耐久性を評価できる手法の検討が行われ、例えばＲＣ床版に対して松井が静的押し抜きせん断耐荷力と移動荷重との比に対して、Ｓ－Ｎ曲線を提案するなど、いくつかの提案がなされてきている。

以下に床版の疲労耐久性に関する既往の定量的評価法の検討例について示す。

(2) P_{sx}との関連づけによる評価

松井[11)]は、ＲＣ床版に関して、移動荷重の繰り返しによる破壊形態が、押し抜きせん断破壊であることに着目し、床版の押し抜きせん断耐荷力（P_{sx}）を求め、荷重（S）と破壊の関係の S-N 曲線を得ている。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{s\max} X_m + \sigma_{t\max} C_m) \qquad \cdots(式\ 2.3\text{-}1)$$

X_m, C_mはそれぞれ主鉄筋断面　の中立軸深さ (cm)および被り (cm)

$\tau_{s\max}$はコンクリートの最大　せん断応力度 (kgf/cm^2)

$\sigma_{tma\,x}$はコンクリートの最大　引張り応力度 (kgf/cm^2)

$\tau_{s\max} = 0.252\sigma_{ck} - 0.000246\,\sigma_{ck}^{\ 2}$

$\sigma_{t\max} = 0.583(\sigma_{ck})^{2/3}$

$Log\,(P/P_{sx}) = -0.07835\,LogN + Log\,1.52$

P：載荷荷重

N；走行回数

P_{sx}は有効幅 Bの梁の押し抜きせん断　耐荷力

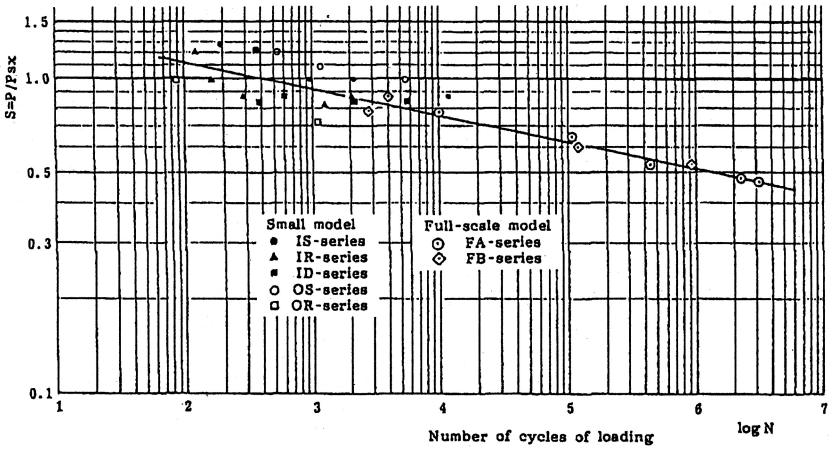


図 2.3-25　押し抜きせん断耐荷力比と載荷回数の関係（松井）[11)]

一般にコンクリート部材において、疲労の評価は静的耐荷力と繰り返し回数で整理されることが多く、式 2.3-1 のような整理はＲＣ床版において可能である。ただし、平成８年度以降の道路橋示方書で設計される床版のように高い耐久性を有した床版においては、近年では一定荷重ではなく、荷重漸増の階段載荷を行っており、一定荷重を載荷した実験結果との整合性や相関関係の明確化が課題である。

また、同様な試験による結果であっても供試体規模の違いや載荷装置の条件によっても以下の S-N の違いのように、載荷方法の違いにより、試験結果の整理に違いが生じている。

松井による S-N 線 [3)]

$$Log_{10}\frac{P}{P_{sx}} = -0.0784 \cdot \log_{10} N + \log_{10} 1.52 \qquad \cdots (式\ 2.3\text{-}2)$$

土木研究所による S-N 線 [8)]

$$Log_{10}\frac{P}{P_{sx}} = -0.0545 \cdot \log_{10} N + \log_{10} 0.957 \qquad \cdots (式\ 2.3\text{-}3)$$

自走式ゴムタイヤの試験機の S-N 線 [4)]

$$Log_{10}\frac{P}{P_{sx}} = -0.101 \cdot \log_{10} N + \log_{10} 1.38 \qquad \cdots (式\ 2.3\text{-}4)$$

床版の疲労耐久性を静的な耐荷力に関連づけて整理する試みは、いずれもある単位の大きさの床版の部材全体としての疲労耐久性を評価しようとするものであり、床版コンクリートにひびわれが発達し、鉄筋には鋼材の疲労劣化過程に従う損傷度が累積していくことなど疲労による部材に生じる変化を直接的に評価したものではない。

そのため、この方法では、実験等の結果に基づいて一定の適用範囲の制限の中で床版部材全体の疲労耐久性を評価することは可能であるが、多様な補剛部材などとの複合構造物である鋼コンクリート合成床版など新しい構造や形式の床版に対する適用性には限界がある。

コンクリート系の床版の疲労による損傷過程では床版形式にかかわらず、床版コンクリートに徐々にひびわれが進展し、ミクロ的にはコンクリートが鋼材とは関係なく破壊していくように見える。一方、鉄筋などの鋼材の疲労については、マイナー則で整理される定量的な疲労耐久性評価法がある程度確立しており[12)]、これはコンクリート床版に用いられていることとは関係なく、鋼材に生じる変動応力に支配されているものと考えられる。

これらを踏まえて、本研究ではコンクリート系の床版の疲労耐久性について、床版コンクリートはコンクリートの材料的な疲労現象によって損傷し、鉄筋などの鋼材はその応力状態に依存して鋼材としての疲労現象によって耐久性は支配されるものと仮定し、それぞれの材料の疲労耐久性を定量的に評価することで多様な形式の床版に対しても普遍性のある疲労耐久性評価法の構築を試みた。

【2 章　参考文献】

1)国広哲男、藤原稔、武藤富雄、井刈治久：コンテナ積載トレーラー荷重の検討資料、土木研究所資料第 420 号、1969.1
2)国広哲男、朝倉肇：設計活荷重と橋梁の耐荷力に関する研究、土木研究所資料第 785 号、1972.11
3)松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究、大阪大学提出学位請求論文、1984.11
4)松井繁之：床版研究の変遷と輪荷重走行試験機の役割、第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集、(社)土木学会 2006 年
5)前田幸雄、松井繁之：実物大鋼格子床版の RC 床版との比較における板特性と耐荷力に関する実験的研究、土木学会論文集第 181 号,1970.9
6)角田与史雄、藤田嘉夫：RC スラブの疲労押抜きせん断強度に関する基礎的研究、土木学会論文集第 317 号,1982.1
7)玉越隆史、大橋章、中谷昌一：道路橋の定期点検に関する参考資料、国土技術政策総合研究所資料第 196 号、2004.12
8)中谷昌一、内田賢一、西川和寛他：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験、国土技術政策総合研究所資料第 28 号、2002.3
9)建設省土木研究所、他：道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書（その２）－標準試験方法および第２回試験報告－、平成 11 年 10 月
10)林、他：T 形リブを用いた鋼・コンクリート合成床版の中間支点部輪荷重走行試験、第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集、(社)土木学会、2004 年
11)松井：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集、9-2、1987.9
12)二羽淳一郎、前田詔一、岡村甫：異形鉄筋の疲労強度算定式、土木学会論文集第 354 号/V-2、1985.2