

増厚した鉄筋コンクリート床版の力学的挙動に関する研究

梅原秀哲*・石神孝之**・檜貝 勇***

高速道路の橋梁の床版の補修工法の1つとして、床版の上に新たにコンクリートを打込む増厚工法がある。しかし、問題点として車両の走行によって生じるせん断力により、新コンクリートが元の床版から剝離する可能性がある。本研究では、増厚床版の破壊実験および有限要素法を用いた解析を行い、解析手法の妥当性を検討するとともに、この解析手法を用いた実橋における増厚床版の挙動を推定した。その結果、新コンクリートが剝離する可能性はほとんどないことを確認した。

Keywords : reinforced concrete slab, concrete overlay, shear stress, non-linear finite element method

1. はじめに

20年程前から高速道路の橋梁の床版に過大なひびわれが生じたり、陥没したりする事故が起り、また一般道路においても同様の損傷が発生し、問題となってきた。これらの事故防止には床版の早期補修が必要であり、補修・補強工法の1つとして、既設床版の上に直接新しいコンクリートを打込んで床版の厚さを増す増厚工法が採用されている。ところが、この工法では車両の走行によって生じるせん断力により新しいコンクリートが元の床版から剝離する可能性がある。そのため、新・旧コンクリート境界部に作用するせん断応力を調べ、剝離の可能性を検討する必要性が生じた。

ところで、床版は梁と同様に曲げを受ける部材であるが、平面的な広がりをもったいわゆる無限の不静定構造である。荷重の増加につれて床版の一部に曲げひびわれが発生するが、ひびわれによる断面の剛性の不連続性のため応力の再分配が生じ、その後、ひびわれ部での主鉄筋の降伏に起因する曲げ破壊や、コンクリートの引張破壊に起因するせん断破壊等の破壊が生じる。ひびわれ発生前の床版の応力分布は全断面有効とした線形解析によってかなり正確に求めることができるが、ひびわれが生じた後は応力の再分配が生じ、全断面有効とした線形解析によって得られた応力分布と実際の床版の応力分布とはかなり差が生じる。したがって、床版の解析においては、ひびわれをも考慮した弾塑性解析が必要である。

そこで本研究では、高速道路の橋梁の床版部を対象として増厚床版の破壊試験を行うと共に、床版を平面的に四辺形要素に分割し、さらに各要素を層状に分割するこ

とにより床版の厚さ方向へのひびわれの追跡が可能な積層要素法^{1)~7)}を、増厚床版に対しても適用できるように拡張して解析を行った。そして、実験結果と比較することにより、増厚床版における解析手法を確立すると共に、その解析手法を用いて実橋における増厚床版の挙動を推定することによって、この工法の問題点である新・旧コンクリートの境界部に作用するせん断応力を解析的に求め、増厚工法の有効性を検討することとした。

なお、床版は直接輪荷重を支えるために疲労の影響を受けやすく、またひびわれ進展は自動車荷重特有の荷重の移動、繰返しに大きく起因すると言われている^{8),9)}。しかし、本研究では、疲労による損傷の進行を解析するのが目的ではなく、ひびわれが発生している床版の上面に増厚を施した場合に、輪荷重による新・旧コンクリートの境界部に作用するせん断応力を解析し、剝離の可能性を検討することが目的である。通常の鉄筋コンクリート床版では曲げひびわれの有無にかかわらず、コンクリートに発生するこのようなせん断応力は問題にならないのでほとんど研究されていない。しかし、増厚工法においては新・旧コンクリートの境界部における付着破壊は極めて重要な問題である。そこで、疲労によるひびわれの進展や付着強度の低下、温度変化や乾燥収縮等による付加的応力の影響については今後の課題とし、まず第1ステップとして静的荷重を対象として検討を行った。

2. 鉄筋コンクリート増厚床版の曲げ破壊試験

(1) 実験方法

実験を行った8枚の鉄筋コンクリート床版供試体の種類、および材料特性値を表-1に示す。また実験供試体形状の一例を図-1に示す。

本実験では主に、増厚条件、支持条件等の影響を考慮した実験を行い、曲げ破壊試験により、増厚床版の挙動、ひびわれ状況などを調べることを目的としている。そこ

* 正会員 Ph. D. 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科

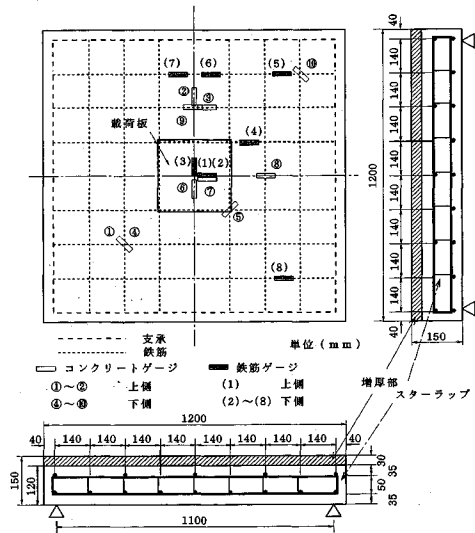
(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

** 学生会員 名古屋工業大学大学院 工学部社会開発工学科

*** 正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科

表一 鉄筋コンクリート床版供試体の種類

試験体番号	支持条件	スパン長 (cm)	版厚 (cm)	増厚 (cm)	鉄筋比 (%)	載荷板 (cm)	鉄筋径 - 間隔 (mm - cm)	鉄筋降伏応力度 (kgf/cm ²)	コンクリート圧縮強度 (kgf/cm ²)
No.1	四辺単純支持	110	12.0		上-0.377 下-0.754	30×30×6 集中	上 D13-28 下 D13-14	3503	375
No.2	四辺単純支持	110	12.0	3.0	上-0.377 下-0.754	30×30×6 集中	上 D13-28 下 D13-14	3503	上-426 下-334
No.3	四辺単純支持	110	15.0		上-0.302 下-0.603	30×30×6 集中	上 D13-28 下 D13-14	3503	233
No.4	二辺単純支持	110	12.0		上-0.377 下-0.754	30×30×6 集中	上 D13-28 下 D13-14	3503	277
No.5	二辺単純支持	110	12.0	3.0	上-0.377 下-0.754	30×30×6 集中	上 D13-28 下 D13-14	3503	上-410 下-300
No.6	二辺単純支持	110	15.0		上-0.302 下-0.603	30×30×6 集中	上 D13-28 下 D13-14	3503	245
No.7	四辺単純支持	108	15.0		上-0.176 下-0.176	30×30×6 集中	D10-22	3738	409
No.8	四辺単純支持	108	15.0		上-0.176 下-0.176	(15×15×6) ×16枚等分布	D10-22	3738	341



図一 実験供試体

で、増厚条件による影響を比較するために増厚しないものとひびわれ発生後に増厚するものを、支持条件による影響を比較するために四辺単純支持と二辺単純支持を比べることとした。以上の条件を組み合わせる実験を行うにあたり、載荷条件は、道路橋における輪荷重を想定して、すべて集中荷重とした。したがって、四辺単純支持では、増厚前の版厚で増厚しないもの (No.1)、ひびわれ発生後増厚するもの (No.2)、増厚後の版厚で増厚しないもの (No.3) を、また二辺単純支持でも同様に、増厚前の版厚で増厚しないもの (No.4)、ひびわれ発生後増厚するもの (No.5)、増厚後の版厚で増厚しないもの (No.6) の集中載荷試験を行った。

以上の6枚の床版は、断面形状はすべて同一のものとしたが、解析プログラムの妥当性を検討することも目的として、上記とは異なった断面形状の床版も作成した。この場合は、載荷条件による影響を比較するために、四辺単純支持で集中荷重 (No.7)、等分布荷重 (No.8) の2種類の実験を行った。なお、これら8枚の床版供試体の形状はすべて120 cm×120 cmの正方形で、厚さは

12 cm または 15 cm である。

使用したセメントは早強ボルトランドセメントで、増厚しない供試体はコンクリート打込み後2週間 ($f_{ck} = 300 \text{ kgf/cm}^2$) で実験を行った。一方、増厚する供試体はコンクリート打込み後2週間で載荷し、ひびわれを発生させた後増厚コンクリートを打込み、その後1週間 ($f_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$) で実験を行った。なお、増厚コンクリートの付着強度を上げるため、 f_{ck} を床版より大きくした。

増厚は、目視によりひびわれが厚さ方向に側面で層厚のほぼ1/2に達したときに行い、その時の載荷荷重は、No.2床版では20 tf、No.5床版では13 tfとなった。増厚厚さは、実際の床版では増厚前の厚さの28%程度とすることが多いので、増厚前の厚さの25%の3 cm (粗骨材の最大寸法15 mm) とした。増厚時には、増厚コンクリートと床版との付着を良好にするため、旧コンクリート表面をワイヤブラシで処理し、新コンクリート打込みまで表面を濡れた布でおおい、湿潤状態を保持した。床版の配筋は直交配置とし、曲げ破壊以前に押し抜きせん断が生じないように相当量のスターラップ (D10) を配置した。

荷重は、100 tfの構造物試験機を用いて厚さ6 cmの硬質ゴムを介在させて、床版供試体にかげられた。載荷板は15 cm×15 cmの大きさで、スパンに比して少し大きいですが、このように大きくすることにより押し抜きせん断破壊を防止することを意図した。また、支承は直径5 cmの鋼丸棒を介しており、隅角部の浮き上がりは自由としている。

載荷実験における測定項目は、図一に示すように床版中央の変位、鉄筋のひずみ、コンクリートの表面ひずみ、およびひびわれ状況である。ただし、ひびわれに関しては、支承の設置の関係上、載荷中に観測するのは不可能なので、破壊後に観察したものである。

(2) 実験結果

今回の実験では、最大荷重、荷重と床版中央の変位および下側の鉄筋のひずみとの関係、増厚や支持条件が変位や鉄筋のひずみに与える影響およびひびわれ状態を調べた。

a) 最大荷重

供試体の最大荷重を表一2に示す。No.1からNo.6の床版で比較を行うと、四辺単純支持で増厚後の版厚で増厚しない床版 (No.3) が最も強く、41.1 tfで破壊した。最も弱いのは、二辺単純支持で増厚前の版厚で増厚しない床版 (No.4) で、23.5 tfで破壊した。なお、ひびわれ発生後増厚した床版以外の供試体はコンクリートの圧縮破壊に起因する曲げ破壊を生じたが、ひびわれ発生後増厚した床版は、鉄筋が降伏後増厚部分のコンクリートが剥離し荷重が低下したため、その時の荷重を最大荷重とした。

表-2 最大荷重

試験体 番号	実験値 P test (tf)	増厚前の版厚 の増厚しない 床版に対する 割合 (%)
No. 1	29.8	100
No. 2	35.2	118
No. 3	41.1	138
No. 4	23.5	100
No. 5	27.5	117
No. 6	32.5	138
No. 7	20.7	100
No. 8	84.2	406

増厚前の版厚で増厚しない床版に対して、ひびわれ発生後増厚した床版では、四辺単純支持 (No. 2) で 5.4 tf, 二辺単純支持 (No. 5) で 4.0 tf の強度増加があり, 増厚後の版厚で増厚しない床版では, 四辺単純支持 (No. 3) で 11.3 tf, 二辺単純支持 (No. 6) で 9.0 tf の強度増加があった. これを増厚前の版厚で増厚しない床版に対する割合で表すと, 四辺単純支持, 二辺単純支持ともに, ひびわれ発生後増厚した床版は, ほぼ 17% の強度増加であり, 増厚後の版厚で増厚しない床版は, 38% の強度増加である.

集中荷重 (No. 7) と等分布荷重 (No. 8) の場合を比較すると, 集中荷重の破壊強度は 20.7 tf, 等分布荷重は 84.2 tf となり, 等分布荷重の方が約 4 倍の荷重に耐えることができる.

b) 変位

四辺単純支持床版 (No. 1, No. 2, No. 3) における床版中央の荷重-変位曲線を図-2 に, 二辺単純支持床版 (No. 4, No. 5, No. 6) における床版中央の荷重-変位曲線を図-3 に示す. 増厚しない床版 (No. 1, No. 3, No. 4, No. 6) は, 支持条件, 荷重条件によって多少の違いはあるものの, 破壊荷重の 20~30% において曲げひびわれが発生し, 変位増加量が大きくなった. そして, 破壊荷重の 50~60% で中央部下側の鉄筋が降伏し, さらに変位増加量が大きくなって, 最終的に曲げ破壊を生じた.

ひびわれ発生後増厚した床版 (No. 2, No. 5) は, 増厚前は増厚前の版厚で増厚しない床版 (No. 1, No. 4) の荷重-変位曲線にほぼ一致し, 増厚後は増厚後の版厚で増厚しない床版 (No. 3, No. 6) の荷重-変位曲線にほぼ一致した. これは, 増厚前のひびわれが増厚後の変位にほとんど影響を与えないこと, また増厚部分のコンクリートが床版と十分に付着し, 一体化していることを示している. そして, No. 2, No. 5 ともに同じ荷重に対して床版中央の変位は, 増厚前に比べて増厚後は約 1/2 になった. しかし, 中央部下側の鉄筋が降伏したところで, 増厚部分のコンクリートが剝離したため, 荷重-変位曲線はその時点までしか得られなかった. なお, 剝離は突然生じ, それまでは増厚部分のコンクリートと床版

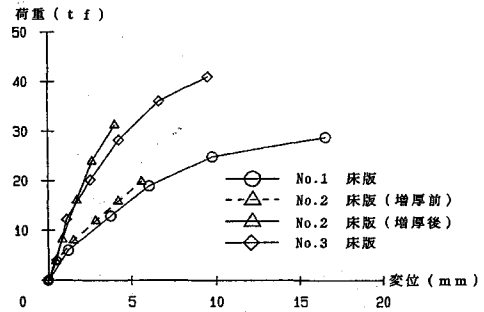


図-2 荷重-変位曲線 (四辺単純支持)

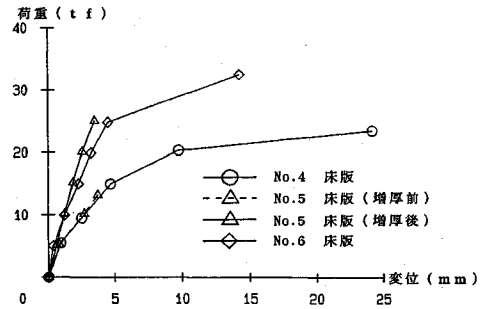


図-3 荷重-変位曲線 (二辺単純支持)

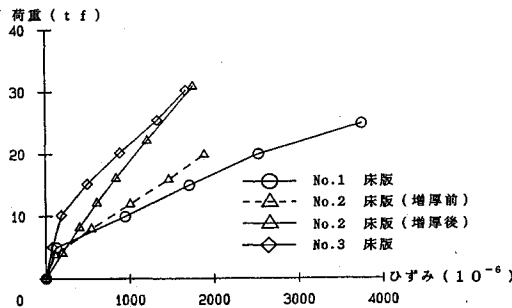
とのずれは全く見られなかった.

c) 鉄筋ひずみ

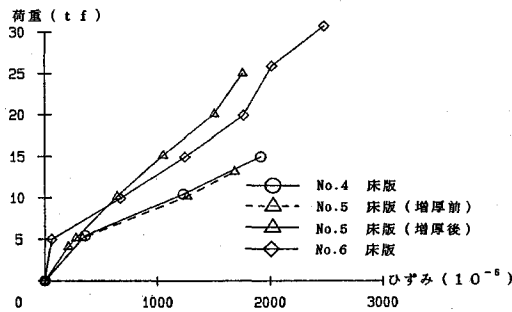
四辺単純支持床版 (No. 1, No. 2, No. 3) における床版中央部下側の鉄筋の荷重-ひずみ曲線を図-4 に, 二辺単純支持床版 (No. 4, No. 5, No. 6) における床版中央部下側の鉄筋の荷重-ひずみ曲線を図-5 に示す. 増厚前の版厚で増厚しない床版 (No. 1, No. 4) に比べ, ひびわれ発生後増厚した床版 (No. 2, No. 5) および増厚後の版厚で増厚しない床版 (No. 3, No. 6) は, 支持条件によって多少の違いはあるものの, 同じ荷重に対して鉄筋ひずみは小さくなっている. 特に四辺単純支持床版においては約 1/2 以下となっている.

ひびわれ発生後増厚した床版 (No. 2, No. 5) では, 荷重-変位曲線同様, 増厚前は増厚前の版厚で増厚しない床版 (No. 1, No. 4) の荷重-ひずみ曲線にほとんど一致した. しかし, 増厚後はすでに床版にひびわれが生じているため, 増厚後の版厚で増厚しない床版 (No. 3, No. 6) の荷重-ひずみ曲線のように, ひびわれが生じる時に曲線の傾きが変わるような傾向を示さず, ひずみは荷重に対してほぼ線形に増加する傾向を示した. それに対して, 最大荷重に近い時のひずみは, ほとんど同じ値を示した. ひびわれ発生荷重はこのように荷重-ひずみ曲線の傾きが変わる点の荷重と見なすことができ, 図-4, 図-5 よりいずれの床版も, 荷重が 5 tf 程度の時と判断される.

b) ひびわれ状態



図—4 荷重-鉄筋ひずみ曲線 (四辺単純支持)



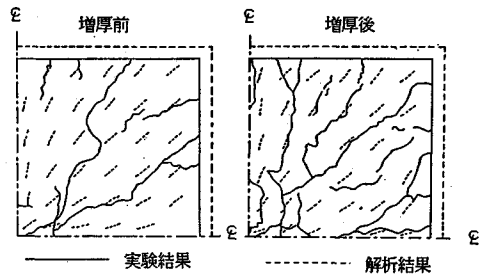
図—5 荷重-鉄筋ひずみ曲線 (二辺単純支持)

No.2およびNo.5の床版の増厚を行う直前のひびわれ状態と、増厚後の最大荷重時のひびわれ状態を図—6、図—7に示す。四辺単純支持床版において、増厚しない床版のひびわれ状態も図—6と同様であり、放射状にひびわれが発生した。二辺単純支持床版においても図—7と同様に、支間中央部では支承に平行に、支承付近では放射状にひびわれが発生した。したがって、最大荷重時のひびわれ状態については、増厚条件による差はほとんど生じなかった。

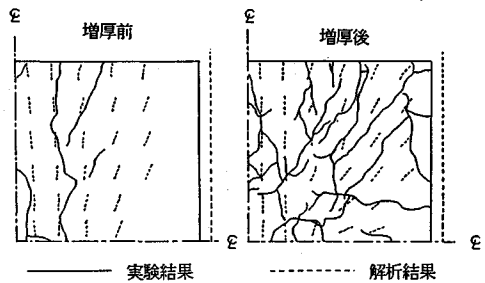
集中荷重 (No.7) と等分布荷重 (No.8) も、他の四辺単純支持床版とほぼ同じ放射状を示したが、No.1~No.6の床版に比べ細かいひびわれが少なかった。

3. 積層要素法による増厚床版の弾塑性解析

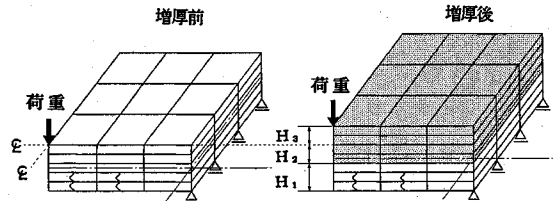
本解析では、有限要素法を拡張して要素を層状に分割することにより、厚さ方向へのひびわれの追跡が可能な積層要素法を用いた。積層要素法に関しては多くの研究がなされているが^{21)~27)}、ここでは佐藤ら²¹⁾によって開発されたプログラムを用いた。このプログラムは、岡村ら²⁰⁾、前川²³⁾によって提案されたひびわれ後のコンクリートの構成則を用いて、テンションスティフネスだけでなく、圧縮剛性、せん断剛性をも考慮しており、実験結果との比較によりその妥当性がすでに検証されている。増厚を行わない床版に対してこのプログラムをそのまま適用したが、ひびわれ発生後増厚を行った床版に対しても適用できるように積層要素法を拡張して用いた。



図—6 ひびわれ状態 (No.2床版)



図—7 ひびわれ状態 (No.5床版)



図—8 増厚床版解析モデル

(1) 増厚床版の解析方法

解析では、図—8に示すようにまず増厚前の床版を対象として、ひびわれが下面から指定した分割層に達する場合までの解析を行う。そしてこのひびわれ状態で増厚による補修を行ったとして、その状態の鉄筋およびコンクリートの剛性を保存し、これに増厚部分のコンクリートの剛性を加えて、増厚後の床版の剛性とする。実験においては、ひびわれ発生後除荷し増厚を行っているが、除荷する直前の状態では鉄筋は降伏していないので、鉄筋はまだ弾性状態を保っていると考えられる。さらにコンクリートにおいても、引張側はひびわれを生じると剛性がほぼゼロへと変化するが、圧縮側は除荷する直前の状態でもそれほど大きな応力を生じておらず、除荷して再載荷しても剛性は最初の載荷時とそれほど変わらないと考えられる。そこで、除荷による剛性の変化を無視して増厚後の床版の剛性を求め、残留ひずみをゼロと仮定して変位、荷重をゼロに戻し、増厚後の床版の挙動を解析する。この解析において、コンクリート増厚による床版厚の変化は、増厚前は $H_1 + H_2$ とし、増厚後では H_2 部分を削り $H_2 + H_3$ の厚さのコンクリートを打ち増すと

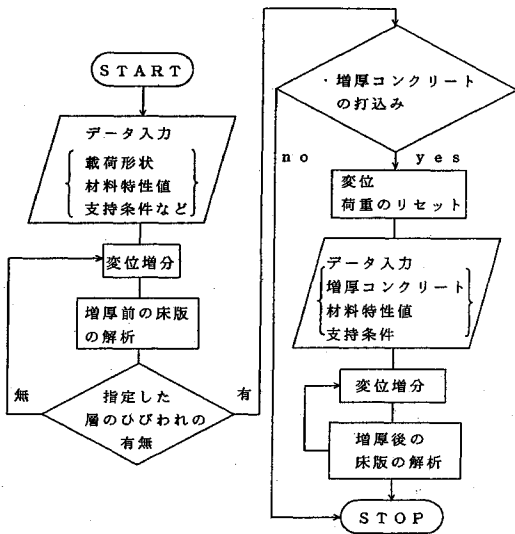


図-9 増厚床版解析フローチャート

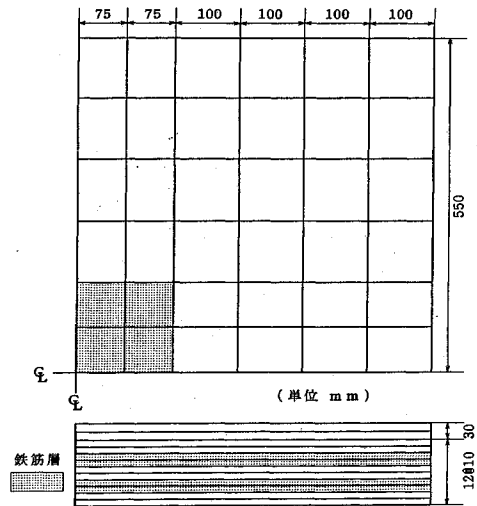


図-10 床版解析モデル

考えている。実験において、破壊まで増厚部分のコンクリートは完全に付着していると判断されたので、解析では完全付着と仮定している。なお、図-9に解析のフローチャートを示す。

(2) 解析モデル

実験で用いた床版の解析モデルの一例を、図-10に示す。これは実験に用いた床版の1/4をモデル化したものである。図の左下の節点に変位増分を与えることにより、それぞれの形状、材料特性、支持条件、荷重方法に応じた作用荷重増分(図の斜線部の要素の節点に作用)を求め、ひずみやひびわれの進展等について解析を行った。

4. 実験結果と解析結果との比較

本研究で開発した増厚床版に対する解析プログラムの妥当性を検討するため、実験を行った8枚の床版について、最大荷重、変位、鉄筋のひずみ、ひびわれ状態に関して、実験値と解析値との比較を行った。

(1) 最大荷重

床版の最大荷重について、実験値、解析値および、解析値を実験値で除した値を表-3に示す。なお、解析において変位増分に対して荷重が低下し始める時を、曲げ破壊が生じ最大荷重に達したものとみなした。表-3に示すように、最大荷重の解析値は、全体的に見て実験値とほぼ同じ値を示している。しかし、No.2の四辺単純支持のひびわれ発生後増厚した床版は、他の床版に比べ解析値が実験値より大きな値となった。これはすでに述べたように、実験において増厚コンクリートが剝離したため、曲げ破壊に至らなかったことを示している。定性的に同様のことが二辺単純支持のNo.5の床版に対して

表-3 実験値と解析値の比較

試験体 番号	実験値 P _{test} (tf)	解析値	
		P _{cal} (tf)	P _{cal} / P _{test}
No.1	29.8	30.0	1.00
No.2	35.2	40.0	1.14
No.3	41.1	44.5	1.08
No.4	23.5	24.0	1.02
No.5	27.5	28.9	1.05
No.6	32.5	32.0	0.98
No.7	20.7	20.0	0.97
No.8	84.2	81.0	0.96

も言えるが、解析値が実験値の1.05倍であることから判断して、増厚コンクリートの剝離がほとんど曲げ破壊に近い状態で発生したものとも考えられる。

(2) 変位

ひびわれ発生後増厚したNo.2およびNo.5の床版における床版中央の荷重-変位曲線の実験と解析の比較を、それぞれ図-11、図-12に示す。いずれの場合も、増厚前の状態では荷重初期において、変位の解析値は実験値より小さな値となっている。このような傾向は他の床版についても同様であった。これは床版を支承上に設置した状態で、必ずしも床版と支承が十分に接触していないため、荷重時に床版が支承に密着する間の変位が生じているものと考えられる。しかし、増厚後の床版は、ひびわれを発生させるために一度荷重しているので、他の床版に比べ荷重初期においても、実験値と解析値はよく一致している。

(3) 鉄筋ひずみ

No.2およびNo.5の床版における床版中央部下側の鉄筋のひずみ(図-1に示す鉄筋ゲージ(2))の実験と解析の比較を、それぞれ図-13、図-14に示す。図に示すNo.2およびNo.5の増厚後を除いたほとんどの

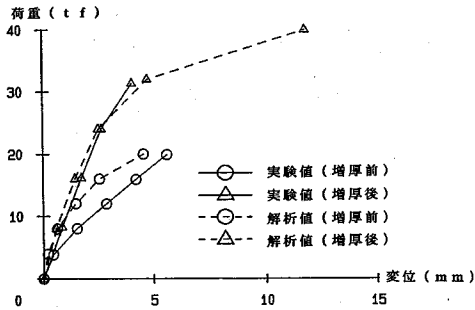


図-11 荷重-変位比較図 (No.2床版)

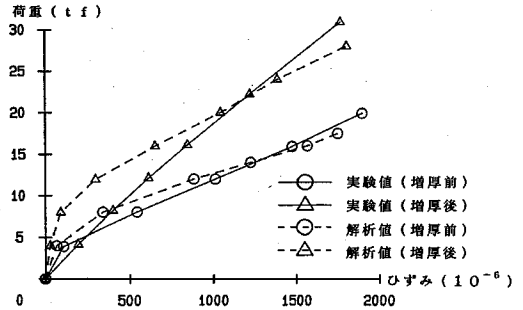


図-13 荷重-鉄筋ひずみ比較図 (No.2床版)

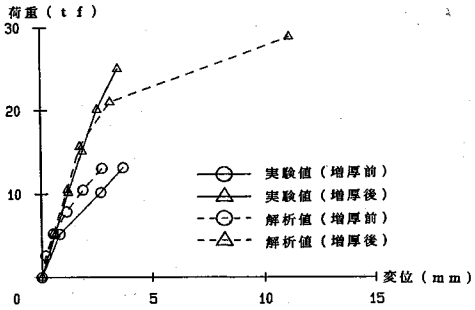


図-12 荷重-変位比較図 (No.5床版)

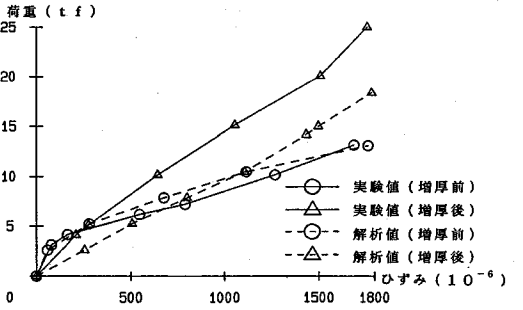


図-14 荷重-鉄筋ひずみ比較図 (No.5床版)

床版で、実験値と解析値は良く一致している。しかし、No.2とNo.5の増厚後の鉄筋ひずみは、実験値と解析値に差が生じている。これは、増厚床版の解析方法で述べたように、解析では除荷する直前の剛性を保持し、その剛性に増厚部分のコンクリートの剛性を加えて増厚後の再載荷時の床版の剛性としていることが原因と考えられる。すなわち、図-14に示すNo.5は二辺単純支持床版で、除荷する直前でひびわれのため、すでに鉄筋に沿ったコンクリートの引張剛性はゼロとなり、再載荷時は除荷によるコンクリートの引張剛性の回復を全く考慮していないため、同一荷重における鉄筋のひずみが実験値より大きく生じたものと考えられる。一方、図-13に示すNo.2は四辺単純支持床版で、ひびわれが鉄筋と約45°の傾きで生じているため、鉄筋に沿ったコンクリートの引張剛性がゼロにならず、再載荷時その剛性が保持されているため、同一荷重における鉄筋のひずみが実験値より小さく生じたものと考えられる。しかし、いずれも実験値と解析値に差は生じているが、解析値は実験値の傾向を十分に表していると思われる。

(4) ひびわれ状態

No.2およびNo.5の床版底面の最大荷重時のひびわれ状態の実験と解析の比較を、それぞれ図-6、図-7に示す。解析においては、各要素の主応力が引張強度を越えると、主応力方向に直角にひびわれが生じるものと仮定しているため、得られたひびわれ方向を図に示した。No.1およびNo.3の四辺単純支持床版の最大荷重時の

ひびわれ状態は、図-6の増厚後と同様な結果が得られ、解析結果は放射状のひびわれを的確に表し、ひびわれた要素の分布、ひびわれ方向共に、実験結果の傾向をよくとらえている。増厚前のNo.2の床版では、ひびわれ方向は一致しているが、ひびわれの分布状況は解析結果の方が広範囲に分布している。これは、実際には実験において確認できなかったひびわれが、発生している可能性があると考えられる。

No.4およびNo.6の二辺単純支持床版の最大荷重時のひびわれ状態は、図-7の増厚後と同様な結果が得られ、解析結果はスパン中央付近では支承に平行な、支承付近では放射状のひびわれを的確に表し、ひびわれた要素の分布、ひびわれ方向共に、実験結果の傾向をよくとらえている。増厚前のNo.5もNo.2と同様に、ひびわれ方向は一致しているが、ひびわれの分布状況は解析結果の方が広範囲に分布している。また、No.7(集中荷重)、No.8(等分布荷重)の床版でも、図-6と同様な結果が得られた。

(5) せん断応力

実験ではNo.2およびNo.5の床版は、増厚コンクリートが剝離したため、曲げ破壊に至らなかった。そこで解析において、剝離が生じた時の増厚コンクリートと床版の境界部の最大せん断応力を求めると、No.2の四辺単純支持床版では載荷板の端部で生じ、その値は33 kgf/cm²であり、No.5の二辺単純支持床版でも同様に載荷板の端部で生じ、その値は29 kgf/cm²である。こ

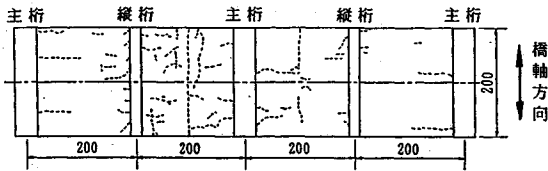


図-15 ひびわれ発生状況

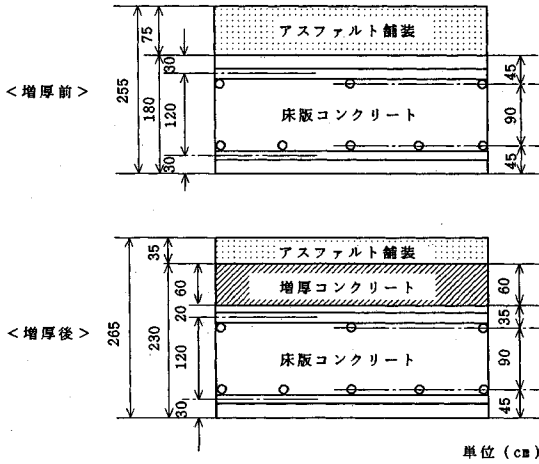


図-16 床版断面図

のことは、床版の表面をワイヤーブラシで処理することによって、増厚コンクリートの圧縮強度が 400 kgf/cm^2 の場合で 30 kgf/cm^2 程度のせん断強度が得られ、増厚コンクリートと床版が十分に付着し、一体化していることを意味している。

以上のように、解析結果と実験結果を比較することにより、本解析プログラムで、増厚床版の最大耐力、変位、鉄筋のひずみ、ひびわれを妥当な精度で推定できることが明らかとなった。

5. 実構造物における増厚床版の解析

(1) 概要

3径間連続桁1連からなる鉄筋コンクリート床版3主桁橋(昭和47年以前の道路橋示方書による設計)において、図-15のような底面のひびわれ発生状況が報告されていることから、この床版を増厚工法により補修を行うこととして、増厚後の挙動の推定を試みた。特に増厚工法では、車両の走行によって生じるせん断力により、新しいコンクリートが元の床版から剝離する可能性があるため、解析によって新・旧コンクリートの境界部のせん断応力を求めることにした。対象とする床版は、図-16に示すように、増厚前はコンクリート部の厚さが18 cm、アスファルト舗装部の厚さが7.5 cmの計25.5 cmの厚さであるが、増厚の際にコンクリート部の上部を1 cm削り取り、新たに6 cmの厚さのコンクリートを打込み、さらに3.5 cmの厚さのアスファルト舗装を行って

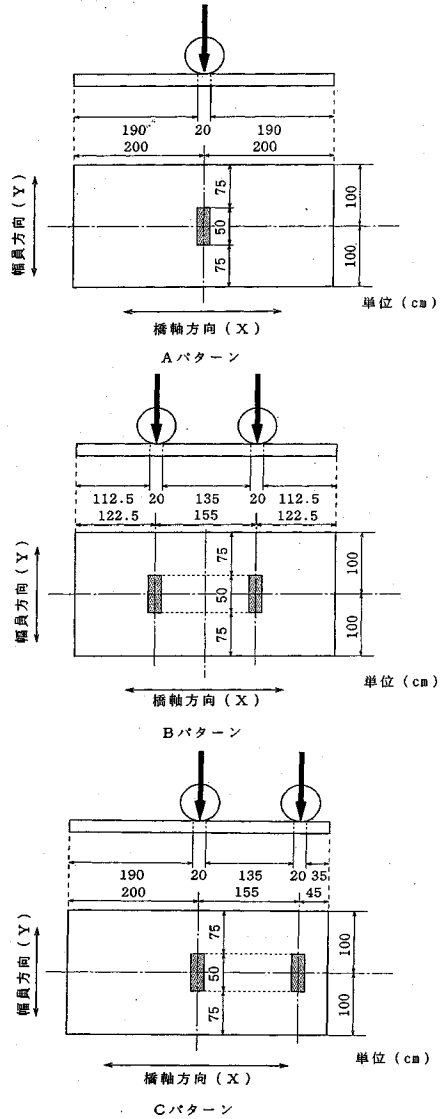


図-17 輪荷重載荷位置

計26.5 cmの厚さとなる床版である。そして増厚前のコンクリートのひびわれ状態、および床版の載荷条件や支持条件をパラメータとして、本解析プログラムを用いて解析を行った。

(2) 解析モデル

図-15に示すひびわれ発生状況から判断して、縦桁も支承の動きをしていると考えられること、さらに対傾構が約4 mの間隔で配置されていることを考慮して、400 cm(橋軸方向)×200 cm(幅員方向)を床版の解析モデルとした。

載荷条件として図-17に示すように、(A)トラック荷重を想定し、床版中央に後輪荷重を載荷した場合、(B)トレーラー荷重を想定し、後輪の2つの車輪の中央が床

版中央にある場合、(C) トレーラー荷重を想定し、後輪の2つの車輪の一方が床版中央にある場合の3つのパターンに分けた。載荷荷重については、高速道路において、T-20の規格総重量20tf、規格軸重16tfに対して総重量60tf以上、軸重30tf以上という値が観測されていることから、(A)、(B)、(C)のいずれの場合においても規格値の3倍まで載荷した。したがって、(A)においては輪荷重が8tfであるので24tfまで、また(B)と(C)においては、1つの輪荷重が6tfであるのでそれぞれ18tfまで載荷した。

支持条件については、対傾構の影響を無視する場合と、支承とする場合の2通りを考えた。なお、本解析プログラムはこれまでに述べたように、単純支持の床版に対して適用性が検証されているので、いずれも単純支持を仮定した。したがって支持条件は、橋軸方向をX、幅員方向をYとすると、X方向のみ支持された二辺単純支持の場合と、X方向およびY方向で支持された四辺単純支持の場合となる。

ひびわれについては、版厚の1/2までひびわれが進展した時に増厚する場合と、版厚の3/4までひびわれが進展した時に増厚する場合の2通りを考えた。

以上のように、載荷条件、支持条件および増厚前のコンクリートのひびわれ状態をパラメータとして、表一4に示す12のモデルの解析を行った。解析において、載荷条件のAパターンおよびBパターンは1/4を、Cパターンは1/2をモデル化し、要素分割を行った。その要素分割図の一例(Bパターン)を図一18に示す。厚さ方向の層分割については、増厚前は11層に、増厚後は14層に分割した。また解析に用いたコンクリートと鉄筋の材料特性値および鉄筋の配置を、それぞれ表一5、表一6に示す。特に増厚される新コンクリートは、できるだけ早く供用を開始する必要があるため、超速硬セメントコンクリートを想定して交通解放時の圧縮強度を240 kgf/cm²、ヤング係数を2.5×10⁵ kgf/cm²と仮定した。

このような条件で解析を行い、新・旧コンクリートの境界部のせん断応力や床版中央の変位を求めた。

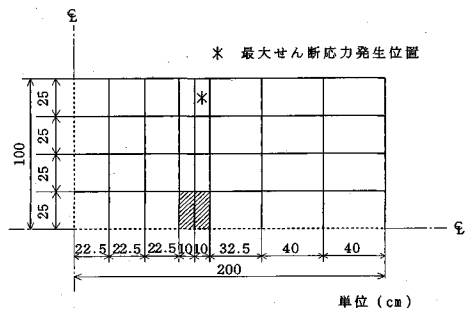
(3) 解析結果および考察

a) せん断応力

各モデルに対する解析結果より、新・旧コンクリートの境界部のせん断応力が大きくなる位置は、支承および載荷点付近であることが判明した。そこで、層厚の3/4までひびわれが進展した時に増厚する場合で、各モデルで輪荷重の規格値が載荷された時に最大せん断応力を示した位置、すなわちいずれも図一18に示すような端部が支承の要素であるが、その輪荷重一せん断応力の関係を図一19に示す。いずれも輪荷重の規格値の3倍まで載荷した時のせん断応力を求めたが、いずれの荷重パ

表一4 モデルの種類

モデル番号	載荷条件	支持条件	ひびわれ状態
1	A	X方向	1 / 2
2		二辺単純支持	3 / 4
3		四辺単純支持	1 / 2
4			3 / 4
5	B	X方向	1 / 2
6		二辺単純支持	3 / 4
7		四辺単純支持	1 / 2
8			3 / 4
9	C	X方向	1 / 2
10		二辺単純支持	3 / 4
11		四辺単純支持	1 / 2
12			3 / 4



図一18 要素分割図 (Bパターン)

表一5 解析モデルの材料特性値

コンクリートのヤング係数 E _c	旧	2.8×10 ⁵ (kgf/cm ²)
	新	2.5×10 ⁵ (kgf/cm ²)
ポアソン比		0.2
コンクリートの圧縮強度 σ _{ck}	旧	400 (kgf/cm ²)
	新	240 (kgf/cm ²)
鉄筋のヤング係数 E _s		2.1×10 ⁵ (kgf/cm ²)
鉄筋の降伏応力度 σ _{sy}		3000 (kgf/cm ²)

表一6 鉄筋の配置

	上 側	下 側
主鉄筋	D16(SD30), 10cm間隔	D16(SD30), 20cm間隔
配力鉄筋	D13(SD30), 20cm間隔	D13(SD30), 40cm間隔

ターンも荷重が増加するとともにせん断応力が増加する傾向を示している。

次に各モデルにおいて、輪荷重の規格値およびその3倍の荷重を載荷した時の最大せん断応力を表一7に示す。輪荷重の規格値では最大せん断応力は、モデル9の場合が4.0 kgf/cm²と最も大きく、モデル3の場合が0.9 kgf/cm²と最も小さくなっている。載荷荷重のパターンでは、トラック荷重(Aパターン)の場合は約1 kgf/cm²と小さく、トレーラー荷重のBパターンの場合は1.4~3.2 kgf/cm²、Cパターンの場合は1.8~4.0 kgf/cm²とトラック荷重の約3倍の大きな値が得ら

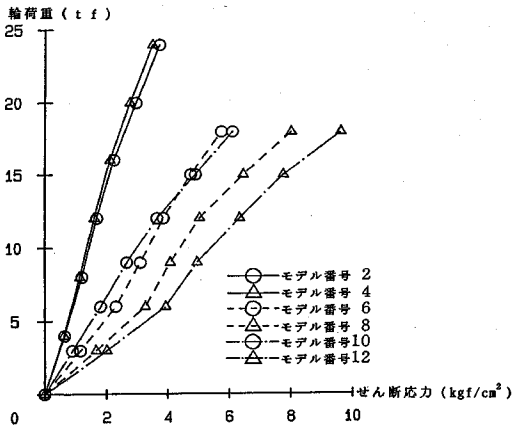


図-19 荷重-せん断応力曲線

表-7 最大せん断応力

モデル番号	荷重 (tf)	3倍の 輪荷重	モデル番号	荷重 (tf)	3倍の 輪荷重
1	1.0	3.4	7	2.3	6.9
2	1.2	3.7	8	3.2	8.0
3	0.9	3.1	9	4.0	7.7
4	1.1	3.5	10	1.8	6.0
5	1.4	4.6	11	3.1	8.4
6	2.2	5.7	12	3.9	9.6

度は 240 kgf/cm² を越えており、また増厚を行う場合コンクリート上部を削り取り、プラスト処理を行っている。この解析では、実橋における増厚コンクリートの乾燥収縮や温度変化等の影響を考慮していないため、増厚施工の際に新・旧コンクリートの境界部分に作用するせん断応力を正確には算定できないが、予想される最大せん断応力はプラスト処理を行う場合のせん断強度の 1/3 程度であることから、輪荷重の作用により新コンクリートが剝離を生じる可能性はほとんどないと言えよう。また、疲労によるせん断強度の低下が 50% であるとしても、作用するせん断応力がせん断強度を上回ることはまずないと考えられる。しかし、これまでに述べたように、疲労等の影響については今後の検討が必要である。

b) 変位

各モデルにおいて、増厚前と増厚後の床版中央の変位の比較を行った。モデル 7 およびモデル 8 の場合を、一例として図-20 に示す。図より、増厚前の変位に比べ増厚後の変位は、ひびわれが版厚の 1/2 に達した時に増厚した場合 (モデル 7) も、3/4 で増厚した場合 (モデル 8) も、共に約半分となっていることがわかる。また、ひびわれが 1/2 で増厚した場合と、3/4 で増厚した場合とを比較すると、その差はほとんどないが、ひびわれが 1/2 で増厚した場合の方が若干小さくなる。この傾向は他のモデルにおいても同様であり、床版中央の変位は、増厚時のひびわれ状態や支承条件に関係なく、増厚前の変位の約半分になった。この解析モデルは増厚前のコンクリート厚さの約 28% 増厚した床版であるが、25% 増厚して行った実験結果もたわみが約半分になったことより、増厚の効果は十分にあると言えよう。

6. 結 論

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) 増厚床版の曲げ破壊試験により、層厚を 12 cm から 15 cm に 25% の増厚を行うことにより破壊耐力が上昇すること、さらに、変位および鉄筋ひずみが増厚を行わない場合に比べ、半分以下となることが明らかとなった。

れた。一方、3 倍の規格値では最大せん断応力は、モデル 12 の場合が 9.6 kgf/cm² と最も大きく、モデル 3 の場合が 3.1 kgf/cm² と最も小さくなっている。載荷荷重のパターンでは、トラック荷重 (A パターン) の場合は 4 kgf/cm² 以下と比較的小さく、トレーラー荷重 (B, C パターン) では、約 5~10 kgf/cm² と大きくなっている。増厚前のひびわれ状態および支持条件の違いによって、最大せん断応力にあまり大きな差は生じなかった。

新・旧コンクリートの境界部分におけるせん断強度については、峰松ら¹²⁾が超速硬セメントコンクリートと既設コンクリートとの打継目を対象として、直接二面せん断試験法を用いた場合の報告を行っている。これによると、超速硬セメントコンクリートの打継目のせん断強度に対する打継目なしのせん断強度の比は、打継目の処理をしない場合で 30~40%、プラスト処理を行うと 60% 程度である。一方、コンクリートの直接せん断強度 τ_s については、圧縮強度の 1/6~1/4 と言われているが、コンクリートの圧縮強度 f_c' に関係づけると次式が提案されている¹³⁾。

$$\tau_s = 0.252f_c' - 0.000246f_c'^2 \dots\dots\dots (1)$$

例えば交通解放時で $f_c' = 240 \text{ kgf/cm}^2$ と仮定すると、 $\tau_s = 46.3 \text{ kgf/cm}^2$ となり、せん断強度は増厚時に既設コンクリートの表面を処理しない場合で約 14 kgf/cm²、プラスト処理を行うと約 28 kgf/cm² となる。また、今回の床版の実験および解析より、床版の表面をワイヤーブラシで処理することによって、増厚コンクリートの圧縮強度が 400 kgf/cm² の場合で 30 kgf/cm² 程度のせん断強度が得られた。一方、実橋における解析結果では、最大せん断応力は荷重が輪荷重の規格値で 4.0 kgf/cm²、3 倍の規格値で 9.6 kgf/cm² で、コンクリート表面を処理しない場合の 14 kgf/cm² を十分に下回っている。

一般に実橋では交通解放時でのコンクリートの圧縮強

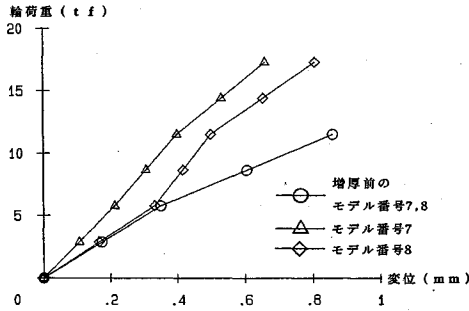


図-20 荷重-変位曲線

(2) 解析結果を実験結果と比較することにより、本研究で増厚コンクリートに適用できるように拡張した解析プログラムで、鉄筋コンクリート増厚床版の破壊荷重、変位挙動、鉄筋のひずみ、ひびわれを精度よく推定できることが明らかとなった。

(3) 実橋における増厚床版の解析によって、増厚施工した床版の新・旧コンクリートの境界に輪荷重によって生じる最大せん断応力は、輪荷重の規格値の3倍でも 10 kgf/cm^2 程度であり、従来の打継ぎ処理で新コンクリートが剥離する可能性はほとんどないことが明らかとなった。

(4) 実橋における増厚床版の解析において、増厚前のコンクリートのひびわれ状態や支承条件にかかわらず、28%の増厚を行った場合は増厚を行わない場合より、床版中央の変位が約半分になることが明らかとなった。

参考文献

- 1) F.R. Hand, D.A. Pecknold, W.C. Schnobrich : Nonlinear Analysis of RC Plates and Shells, ASCE, pp.1492~1505, 1973.
- 2) C.S. Lin, A.C. Scordelis : Finite Element Study of a

Reinforced Concrete Cylindrical Shell through Elastic Cracking and Ultimate Ranges, Journal of ACI, Vol.72, No.11, 1975.

- 3) M.K. Wanchoo, G.W. May : Cracking Analysis of Reinforced Concrete Plate, ASCE, ST 1, pp.201~215, 1975.
- 4) 土橋由造・内山武司・上田正生：積層要素による床版の弾塑性解析—その1, 日本建築学会論文報告集, 第266号, pp.41~49, 1978年.
- 5) 土橋由造・内山武司・杉野目章：積層要素による床版の弾塑性解析—その2, 日本建築学会論文報告集, 第294号, pp.61~73, 1980年.
- 6) 上田正生・土橋由造：鉄筋コンクリート床版の非線形解析, 日本建築学会論文報告集, 第283号, pp.26~36, 1979年.
- 7) 佐藤正俊・上原匠・梅原秀哲・吉田弥智：RCスラブの曲げひびわれ挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 12-2, pp.603~608, 1990年.
- 8) 岡田清・岡村宏一・園田恵一郎・島田功：道路橋鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷と疲労性状, 土木学会論文報告集, 第321号, pp.49~61, 1982年.
- 9) 園田恵一郎・堀川都志雄：輪荷重の反復作用下での道路橋RC床版の低サイクル疲労特性, 土木学会論文集, 第390号/v-8, pp.97~106, 1988年.
- 10) 岡村甫・前川宏一：鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析, 土木学会論文集, 第360号/v-3, pp.1~10, 1985年.
- 11) 前川宏一：弾塑性破壊理論に基づくコンクリートの構成則, RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム, 日本コンクリート工学協会, pp.1~8, 1983年.
- 12) 峰松敏和・野村和宏・内田美生：超速硬セメントコンクリートと既設コンクリートとの打継目付着特性, セメント技術年報, 第40巻, pp.245~248, 1986年.
- 13) 伊東茂富：組合せ応力状態におけるコンクリートの強度について, 建設省土木研究所報告100号の7, 1958年. (1991.6.17受付)

STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE SLABS WITH CONCRETE OVERLAY

Hidetaka UMEHARA, Takayuki ISHIGAMI and Takeshi HIGAI

Concrete overlaying is one of the repairing methods of the slabs in the steel girder bridges. However, overlaid concrete may separate from the old slab because of the shear stresses caused by the heavy load such as trucks or trailers. Therefore, experimental research has been conducted to clear the mechanical behavior of the slabs with concrete overlay. Analytical way using non-linear finite element method is also developed and compared with the experimental data. Furthermore, this analysis is applied to the models of real bridge slabs to estimate the shear stresses at the boundary of overlay and slab, and it is shown that overlaid concrete will not be separated from the slab by the traffic loads.