

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 46 March 1968

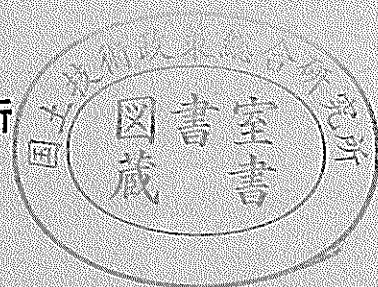
空港舗装に関する調査研究 (第3報)

鉄筋コンクリート舗装の設計法に関する調査研究

.....赤 塚 雄 三

昭和 43 年 3 月

運輸省港湾技術研究所



空港舗装に関する調査研究（第3報）

鉄筋コンクリート舗装の設計方法に関する調査研究

目 次

要 旨

1. ま え が き	3
2. 鉄筋コンクリート舗装の施工例と特長	4
2.1 代表的な施工例と長期間の供用実績	4
2.2 新しい施工例と構造設計の傾向	5
2.3 無筋コンクリート舗装およびプレストレストコンクリート舗装との比較	11
3. 鉄筋コンクリート舗装版のひびわれ	11
3.1 ひびわれの発生機構	11
3.2 温度変化とコンクリートの乾湿の影響	16
3.3 鉄筋量と鉄筋付着面積の影響	23
3.4 鉄筋の形状と埋込み深さの影響	24
3.5 舗装版厚および路盤厚の影響	29
4. 鉄筋コンクリート舗装の応力解析	30
4.1 舗装版の応力解析	30
4.2 規則的な間隔でひびわれの発達せる連続RC舗装版の W. Zuk の解析	31
4.3 版の摩擦抵抗を基にした鉄筋の応力計算	33
4.4 完全拘束舗装版の C. P. Vetter の解析	33
4.5 完全拘束舗装版の B. F. Friberg の解析	34
4.6 完全拘束舗装版の V. A. Yerlici の解析	35
5. 鉄筋コンクリート舗装の設計	36
5.1 路 盤	36
5.2 舗装版の厚さ	36
5.3 縦方向鉄筋	38
5.4 横方向鉄筋	39
5.5 版の長さの制限	41
5.6 施工目地と縦目地	41
5.7 版端目地	42
6. 空港の鉄筋コンクリート舗装設計施工基準例	46
6.1 米国陸軍工兵隊の基準抜萃	46
6.2 英国公共事業省の基準抜萃	49
6.3 参考資料：米国道路局の道路舗装基準の概要	50
6.4 参考資料：第13回国際道路会議報告書の概要	50
7. 結 論：鉄筋コンクリート舗装設計基準に関する提案	51
参 考 文 献	51

Studies on Airport Pavements (3rd Report)

**LITERATURE SURVEY ON CONTINUOUSLY REINFORCED
CONCRETE PAVEMENT DESIGN FOR AIRPORTS**

Yuzo AKATSUKA *

Synopsis

Results of the literature survey on continuously reinforced concrete pavements are given, which was made to find rational methods of airport pavement design. First presented are brief data on the design and performance of continuously reinforced concrete pavements which include descriptions of experimental special terminal joint provisions and end anchorages and of recent trends on the pavement design. Next theoretical developments for selection of slab thickness and reinforcement are introduced and then a summary of present practices and recommendations for the pavement design in the various countries. The report concludes with recommendations for design of continuously reinforced concrete pavement for airports.

* Dr. Eng., Chief, Materials Laboratory, Structures Division.

空港舗装に関する調査研究（第3報）

鉄筋コンクリート舗装の設計方法に関する調査研究

赤塚雄三*

要 旨

空港舗装の合理的な設計方法開発を目的として行なった連続鉄筋コンクリート舗装に関する文献調査の結果を取纏めたものである。最初に、連続鉄筋コンクリート舗装の内外の施工例を紹介し、長い供用実績によって既に実用段階に入っていることを述べ、また、版端目地や版端定着の実験的な方法や連続鉄筋コンクリート舗装の設計における最近の傾向について説明した。次いで、舗装版厚および鉄筋量の設計に関する理論的な発展および世界各国における設計方法ならびに設計指針を紹介し、最後に、空港における連続鉄筋コンクリート舗装の設計指針を提案して結論とした。

1. ま え が き

第2次世界大戦後の極めて短い期間にプロペラ機からターボプロップ機、そしてジェット機に発展し、更にジャンボジェット機からスーパーソニック機へと発展しつつある航空技術は離着陸施設の発展と高度化を要請している。すなわち、巨大で高速離着陸と熱風の噴射を伴う航空機荷重に対応する所の、舗装版強度の増大、滑走路の長大化、所要平坦度の向上、耐熱性、耐油性および安定性の高い舗装ならびに目地材料に対する需要増大、連続的で高強度の目地構造の必要性、等である。

一方、空港舗装はセメントコンクリートを主材料とする剛性舗装とアスファルトを主材料とする撓性舗装に大別されるが、在来の設計施工技術による場合はいずれも長短あり、上記の高度化せる需要に応ずるには何らかの改善が必要とされている。

セメントコンクリートを用いた在来の無筋コンクリート舗装（以下NC舗装と略記）に関しては、その最大の欠点は目地とひびわれにおける不連続性に集約される。これは単に目地やひびわれの存在が車両の交通性を害するのみでなく、これが舗装版の構造的欠陥であることも意味しており、この欠陥を除去ないし減少することはコンクリート舗装の重大な改善に連なるものと云える。¹⁾ 連続鉄筋コンクリート舗装（以下連続RC舗装と略記）において鉄筋を挿入する主要な目的は、目地を省き、ひびわれを分散させてその拡大を制限することによって上

述の欠陥を除去しようとするもので、これが満たされるならばコンクリート舗装に特有の耐熱性、耐油性、安定性、等と相俟って空港舗装に最適の特質を備えることは自明である。

NC舗装の欠陥の除去と云う連続RC舗装と同様な発想に立つものとしてPC舗装があり、これはプレストレスの導入によってコンクリート版に生ずる引張力の一部分ないし全部を相殺し、永久的なひびわれの発生を防止しようとするもので、最も効果的なコンクリート舗装と云い得る。換言すれば、連続RC舗装はNC舗装とプレレストコンクリート舗装（以下PC舗装と略記）の中間領域に位するもので、版厚の設計に関しては理論的な取扱いに難点があるが、既に20年余の施工経験と供用実績を経てそのNC舗装に対する優越性が実証され、また、難点と目される版厚の設計方法も経験的に定着化の傾向を示しており、現時点では最も信頼できるコンクリート舗装と云うことができよう。

連続RC舗装を空港舗装に本格的に採用した例としては、たとえば、オヘア国際空港（O'Hare International Airport, Chicago, Illinois, U. S. A.）が挙げられる²⁾。本空港において、NC舗装に比較して初期建設費の約20%増と推定されるにも拘わらず連続RC舗装を採用した主な理由は、

(1) 目地の数が著しく減少し、これに伴って目地付近

* 構造部 材料施工研究室長

の破壊が大巾に減少すること。

- (2) ひびわれが生じて、舗装版の破壊には到らないこと。
- (3) 長期の維持補修費が著しく軽減すること。
- (4) 維持補修のための空港閉鎖を最少限に止め得ること。

等である。これらの理由は一般の空港舗装にも適用し得ることであるが、特に(4)は機能的ないし地理的に代替空港をもたない空港の場合には最も大切な要件と思われる。

上述のように、連続RC舗装は今後の空港舗装に最適の特質を備えていると思われるが、我国においては連続RC舗装の施工例は空港関係では皆無であり、道路舗装で若干の試験舗装が行なわれた程度で、設計方法についても組織的な検討は未だ行なわれていなかったものようである。本報告はこのような観点から連続RC舗装に関する内外の文献資料を収集し、その調査研究の成果や施工実績を取纏め、連続RC舗装の設計方法として体系づけると共に、問題点を明らかにして今後の研究の指針としたものである。

なお、本調査研究は土木学会空港舗装研究委員会（委員長 東京大学国分正胤教授）が新東京国際空港公団の委託により昭和42年度に実施した「空港舗装に関する研究」の一環であって、報告の作成に当っては、上記委員会 コンクリート舗装部会 設計分科会 主査 伊東茂富博士（建設省土木研究所）より極めて有益な助言を賜

り、また同分科会委員各位に熱心に討議して頂いた。発表を快く許可された土木学会空港舗装研究委員会および新東京国際空港公団の関係各位ならびに報文の作成に当って御指導と御協力を賜った設計分科会の各位に心から御礼申上げる。

2. 鉄筋コンクリート舗装の施工例と特長

2.1 代表的な施工例と長期間の供用実績

鉄筋を連続的に挿入したコンクリート舗装としては米国連邦政府道路局がコロンビア有料道路(Columbia Pike)に1921年に建設した巾5.4~6.0m、長さ60mおよび105mの舗装版が最初のもので云われている。その後、1920年代から1930年代にかけて米国各州で各種のRC舗装が試験的に建設され、その後も更に引続いて建設されている。これらの舗装の観測結果より、長大な連続RC舗装ではその両端部の120~150mは路盤と相対的に変位し、これより内側の部分はほぼ完全に拘束されて変位せず、従って連続RC舗装としての特長を発揮するのはこの拘束された部分に他ならないことが明らかになった。これから、連続RC舗装とは、拘束された中央部分の長さが少なくとも端部の変位可能な部分の長さと同程度以上のもの、従って、全長が360mないし450m以上のもの、と云った見方も生ずる。表一は以上に述べたような観点から、米国における主要な連続RC舗装で、かつ10年以上の供用実績をもつものを摘出して主要諸元を纏めたも

表一 米国における連続RC道路舗装の主要な施工例 (1938~1957) 13)

Location	Year Constructed	Pavement Thickness	Percent Steel	Crack Interval
Indiana	1938	9—7—9	1.82	2.3 (1957)
Illinois	1947—1948	7" and 8"	0.3	13.0 (1957)
			0.5	7.6 (1957)
			0.7	6.0 (1957)
			1.0	4.9 (1957)
New Jersey	1947	10"	0.72	5.1 (1950)
		8"	0.90	3.7 (1950)
California	1949	8"	0.62	3.2 (1957)
		8"	0.50	5.2 (1953)
Texas	1951	8"	0.7	4.0 (1955)
	1955	8"	0.7	
	1957	No information available		
Pennsylvania	1956	9"	0.48	17.9 (1957)
	1957	7", 8" and 9"	0.50	14.3 (1957)

ので 13), それぞれの供用状況は以下の通りである。

(1) インディアナ

インディアナ州では鉄筋による補強方法について広範囲の試験を試みているが、上述の定義に合致する連続 R C 舗装としては延長 393m の一区间のみで、ポンピングを起し易い路床土の上に直接設けられたが、一般的に云って非常に良好な状態で供用されている。14~16)

(2) イリノイ

本試験舗装は版厚を 18cm と 20cm にし、それぞれに舗装版断面積の 0.3, 0.5, 0.7 および 1.0% の鉄筋を挿入するなど、他の試験舗装に比べて比較要素を多く有していること、延長の 90% 迄がポンピングを起し易い土質の自然の路床上に設置されたものであること、等が特長である。試験舗装版の長さは 1050m ないし 1260m に亘り、次に述べる部分的な不良箇所を除いては良好な状態で供用されている。部分的な不良箇所とは膨脹目地で局部的に破損した箇所と、鉄筋比が 0.3% および 0.5% の区間の若干の施工目地部分である。これらの不良箇所のうち、膨脹目地は元来連続 R C 舗装には不要のものであり、施工目地の欠点についてはその目地構造の改良によって容易に除去し得る性質のものである。従って、本試験舗装の評価に際してこのような不良箇所の現状を重く見ることは誤った結論を導く恐れがある。13, 17~19)

(3) ニュージャージー

ニュージャージー州の試験舗装は版厚が 25 cm および 20cm で、いずれも長さ 1610m の 2 区間より成っている。この舗装の特長は鉄筋を 2 層に挿入したことで、一方は表面より 5cm 下、他方は版底面より 7.5 cm 上に挿入されている。縦方向の鉄筋比は 25cm 版では 0.72%, 20cm では 0.90% である。本舗装はコンクリート量にして約 50m³ に相当する 3 箇所の局部的な破損部分（これには版端目地部の破損が含まれている）を除いては供用状態はほぼ良好である。20~23)

(4) カリフォルニア

この州の試験舗装は版厚 20 cm, 長さ 1610m のもので、その 1/2 は鉄筋比が 0.63% で、残りの 1/2 には 0.50% の鉄筋が挿入されている。交通開放 8 年後も供用状態は良好で、隣接した在来の無筋コンクリート舗装と比較するとかなり優れていると云い得る。24, 25)

(5) テキサス

本試験舗装は版厚 20cm, 鉄筋比 0.7% で、版の長さは 330m から 6,510m に亘り、いずれも粒状材料を用いた路盤上に建設された。これらの舗装は 1951 年に建設された最も古い 2 区間を含めていずれも良好な状態で交通に開放されている。26~28)

(6) ペンシルバニア

表一 1 に示した試験舗装のうち、一方は長さ約 3,200m, 厚さ 23cm, 鉄筋比 0.48% のものである。残りの一方は長さは約 3,200m であるが、版厚は 17, 20, 23cm と 3 通りに変え、鉄筋比はいずれも 0.5% と一定となっている。いずれの舗装も粒状材料の路盤上に建設されたもので、連続 R C 舗装の特長であるひびわれがかなり密に発達し、供用状況は良好である。29~33)

以上に紹介した連続 R C 舗装の設計施工例はその建設時点および設計荷重が一定でなく、また、路盤ないし路床の設計条件も不明のものが多い。従って、これらの連続 R C 舗装に相当する N C 舗装の版厚は必ずしも明白でないが、当時の米国における N C 舗装の標準的な版厚が 20~25cm (8"~10") であったことから、連続 R C 舗装の版厚はこれに相当する N C 舗装の 80~90% 程度と推定される。また、これらの試験舗装では、隣接した在来の N C 舗装との比較などにより、車両交通性の著しい改善、維持補修費の大巾な減額、耐用年数の増加、等を期待し得ることが実証され、連続 R C 舗装が既に試験の段階を経て実用段階に至っていることを示唆している。

2.2 新しい施工例と構造設計の傾向

2.1 では 1957 年までの米国における主要な施工例について述べたが、これらの試験舗装（長さが少なくとも 450m 以上のもの）の 2 車線相当の総延長は 55.6km に過ぎなかった。米国における連続 R C 舗装はその後急速な勢いで発展し続け、たとえば 1961 年現在の 2 車線相当の総延長は 4 年前の約 14 倍の 780km に達して、実験および理論的研究の成果の裏付けや路盤や嵩上げの技術的改善に大いに寄与しており、³⁴⁾ この傾向はその後も続いている。そこで、本節では 1958~1961 年の米国における主要な施工例および 1963 年の我が国における施工例（郡山連続 R C 舗装）とその特長について述べる。

表一 2 は 1961 年末までの米国における連続 R C 舗装の発展状況を示したもので、表一 3 は 1958 年以降の分について主要諸元を取り纏めたものである。表一 3 に示した施工例では版厚と鉄筋比および版端目地の形式がほぼ共通している点に注目される。

表—2 米国における連続 RC 道路舗装の発展状況 (1938~1961) 34

State	1938—1957 (inclusive)			1958—1961 (inclusive)								
	Built			Built			Under Contract			Total		
	Projects	Miles		Projects	Miles		Projects	Miles		Projects	Miles	
		Net length	Equivalent 2-lane		Net length	Equivalent 2-lane		Net length	Equivalent 2-lane		Net length	Equivalent 2-lane
Indiana	1	0.7	0.7									
Illinois	1	5.1	5.1				7	4.8	32.8	7	4.8	32.8
New Jersey	1	2.0	2.0									
California	1	1.0	1.0									
Texas	5	5.9	17.3	21	47.2	98.8	33	91.2	244.8	54	138.4	343.6
Pennsylvania	2	4.2	8.4									
Michigan				1	4.2	8.3	1	5.6	11.1	2	9.8	19.4
Maryland				2	9.6	11.5				2	9.6	11.5
Mississippi				1	5.2	10.3	6	23.3	46.8	7	28.5	57.1
Maine				1	0.6	0.6				1	0.6	0.6
Wisconsin				2	9.5	13.7				2	9.5	13.7
North Dakota				1	1.9	1.9				1	1.9	1.9
Connecticut							1	2.1	3.1	1	2.1	3.1
Rhode Island							1	1.0	1.0	1	1.0	1.0
Total	11	18.9	34.5	29	78.2	145.1	49	128.0	339.6	78	206.2	484.7

表—3 米国における連続 RC 道路舗装の代表的な施工例 (1958~1961)

Location	Year Constructed	Total Length (mile)	Pavement Thickness (in.)	Steel Ratio (%)	Terminal Joint Type
Michigan	1958	8.3	8	0.6	Std. Exp.
Maryland	1959	5.3	8	0.5, 0.6, 0.7	L-Anch. & B-Exp.
Maryland	1960	6.2	8	0.6	L-Anch. & B-Exp.
Texas	1958—1960	98.8	6, 8	0.5 0.55	L-Anch.
Mississippi	1960	10.3	7, 8	0.6, 0.7	Piled Anch.
Wisconsin	1961	13.7	8	0.65	L-Anch.
Maine	1961	0.6	8	0.64	L-Anch.
North Dakota	1961	1.9	8	0.5, 0.6, 0.7	Br. Joint & B-Exp.

Note : Std. Exp. = standard type expansion joint. L-Anch. = lug type end anchorage, B-Exp. = bellows type expansion joint, Piled Anch. = piled end anchorage, Br. Joint = bridge joint

(1) 版厚

版厚はテキサス州の15cm (6 in) とミシッピ州の18cm (7 in) を除いてはいずれも20cm (8 in) である。テキサス州の場合は料金徴収所前後や立体交差点の取付道路に用いられたものであり、ミシッピ州の場合は全長16.6kmのうち1.6kmに試験的に用いられたに過ぎず、従って20cmが標準厚さと考えてよい。これらの舗装の大部分は国道 (Interstate Highway) に用いられたもので、これに相当するNC舗装としては23.5cm (9 1/4 in) が標準であり、³⁵⁾ 従って、RC舗装では鉄筋の挿入がNC舗装の版厚10~20%の減少とほぼ同等の効果を有することが分かる。

(2) 鉄筋比

縦方向鉄筋の使用量は舗装版断面積の0.5~0.7%、平均0.6%がいずれの舗装にも共通した値である。連続RC舗装における鉄筋応力の解析方法ないし鉄筋比の設計方法については4.~5.で述べるように各種の理論的方法が提案されているが、いずれも定説化するには至っていない。しかし、満足すべき結果を得るための最少鉄筋比は経験的に確かめられ、ACI 325 委員会はこれを0.6%としている。³⁴⁾ なお、表一3には鉄筋の材質については全く触れていないが、施工例ではかなり高張力のものが用いられた例も多く、上記委員会はこれについて、最小降伏点が4,200kg/cm² (60,000psi) 以上のものを推奨している。

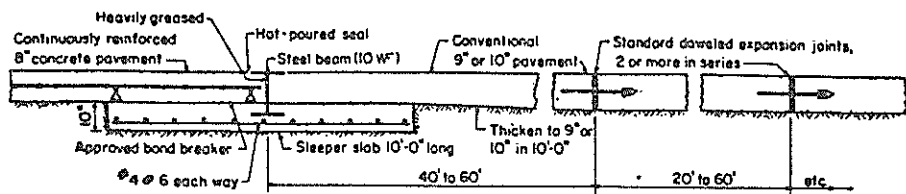
(3) 版端目地

第1節で述べた初期の試験舗装の経験から連続RC舗

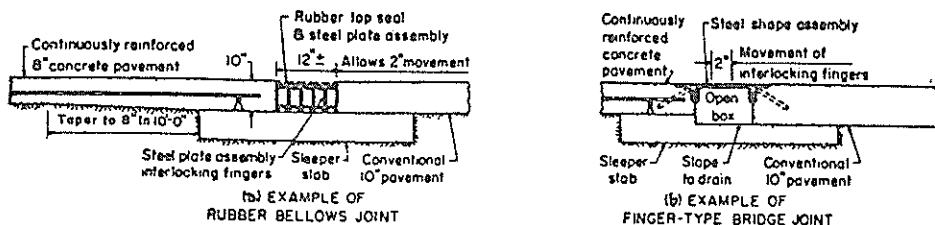
装の最大の弱点が版端目地にあることが明らかとなり、その後の連続RC舗装では特にこの部分についての改良が加えられている。その一つは版端の膨張目地として、在来の標準型の膨張目地を数段重ねて緩衝を計る、いわゆる、緩衝膨張目地とするもので、図一1はその一例である。次は図一2に示したようなベローズ型や橋型の特殊な構造の膨張目地とする方法である。第3の方法は端部の舗装版下面に突起を設けて、版の水平変位を制限する突起式版端定着 (Lug-Type End Anchorage) で図一3~6はその施工例である。第4の方法は版下面の下側に突起を設ける代わりに、版厚を厚くして路盤に打込んだ杭の頭部を埋込んで、舗装版の水平変位を拘束する杭式版端定着である。図一7はこれを緩衝膨張目地と併用したミシッピ州での例である。これらの方法のうち、突起式ないし杭式の版端定着は長大な連続RC舗装の両端に近い可動部分120~150mの水平移動を固定し、この部分を中央の拘束された部分と同様に作用せしめようとする考え方に由来するもので、いずれも有効に作用し、満足すべき結果が得られている。³⁴⁾

(4) 特殊な施工例

図一8、9はいずれもテキサス州の連続RC舗装の一部として試験的に行なわれたもので、前者はかなりひどく傷んだNC舗装の嵩上げに連続RC舗装を用いた例であり、後者はアスファルト表層の基層として連続RC舗装を用いた例である。いずれも



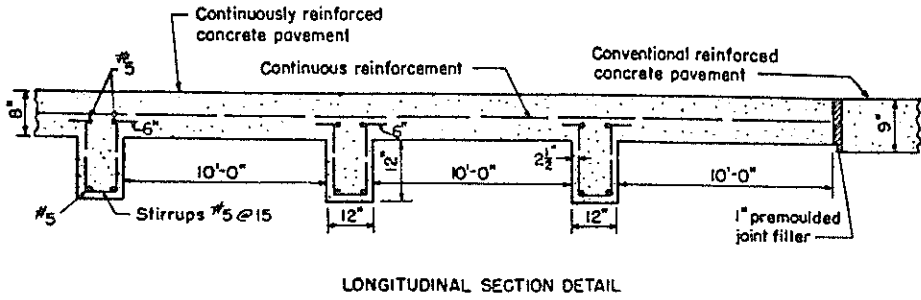
図一1 緩衝膨張目地の例: Maryland, 1959 ³⁷⁾



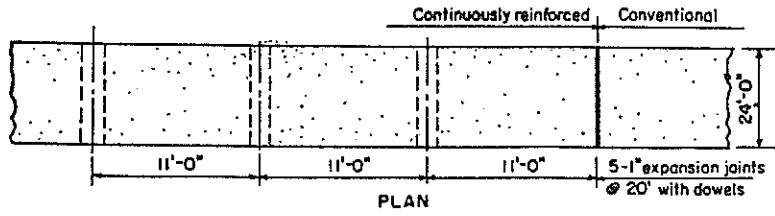
図一2 特殊な膨張目地の例 ³⁴⁾

(a) ゴム製ベローズ型膨張目地; North Dakota, 1961

(b) 橋型膨張目地; Pennsylvania, 1957

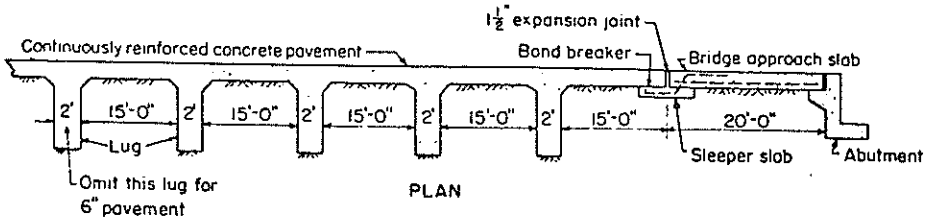


LONGITUDINAL SECTION DETAIL



PLAN

図-3 突起式版端定着の例: Maryland, 1960 37)



PLAN

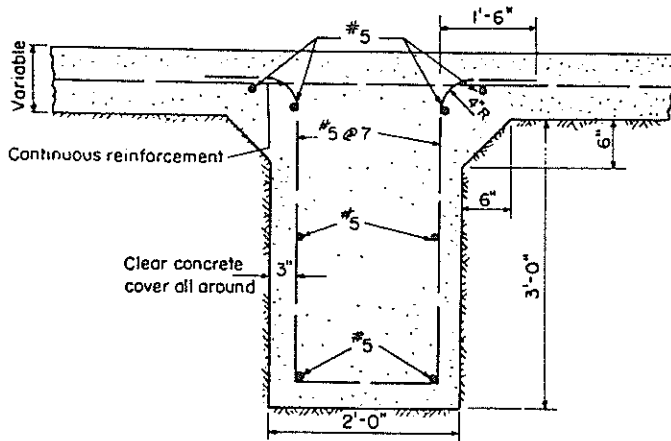
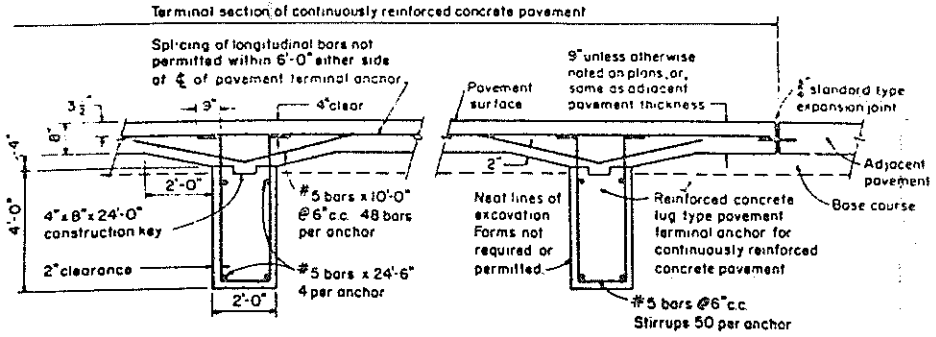
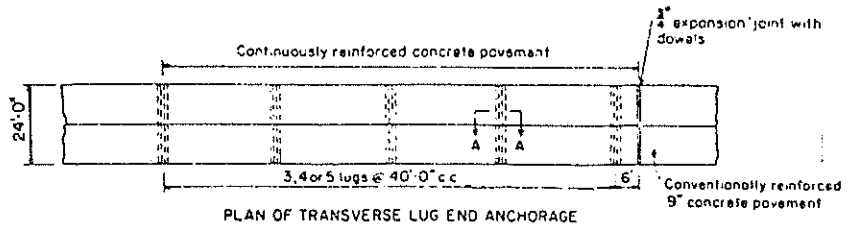
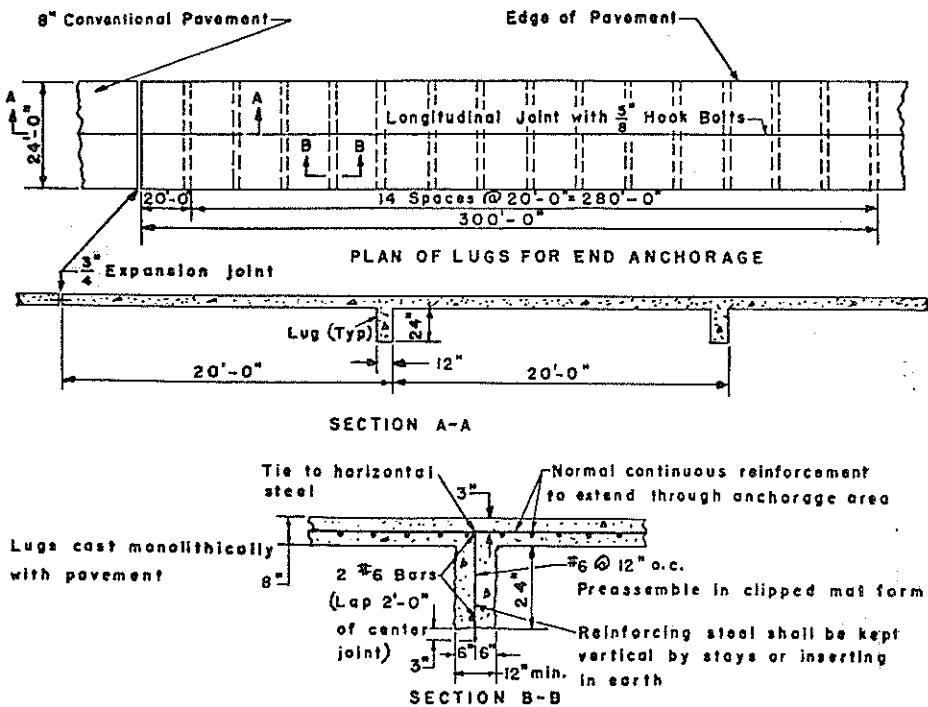


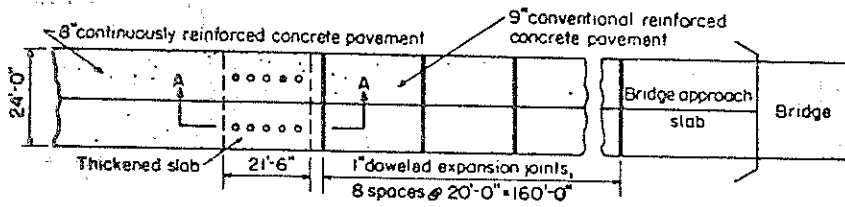
図-4 突起式版端定着の例: Texas, 1958~60 39)



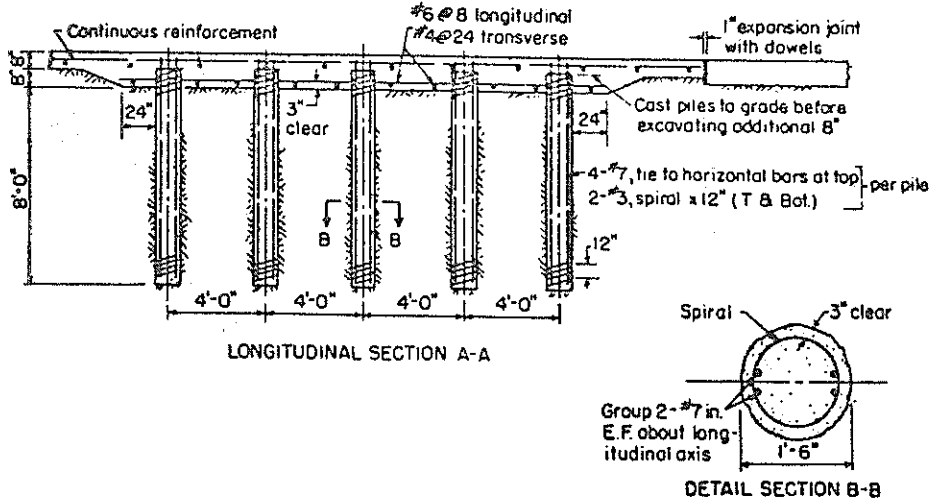
図—5 突起式版端定着の例：Wisconsin, 1961 34)



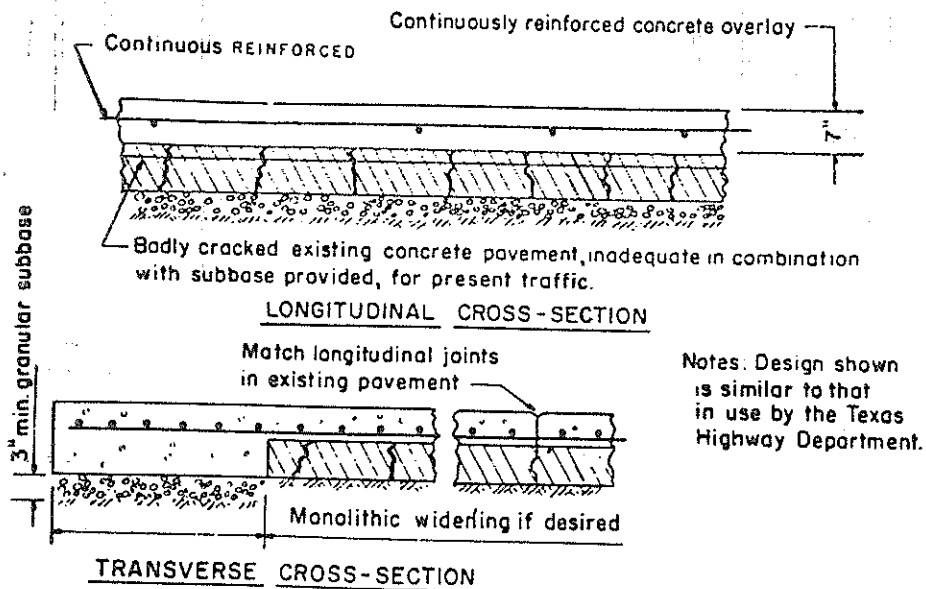
図—6 突起式版端定着の例：Maine, 1961 34)



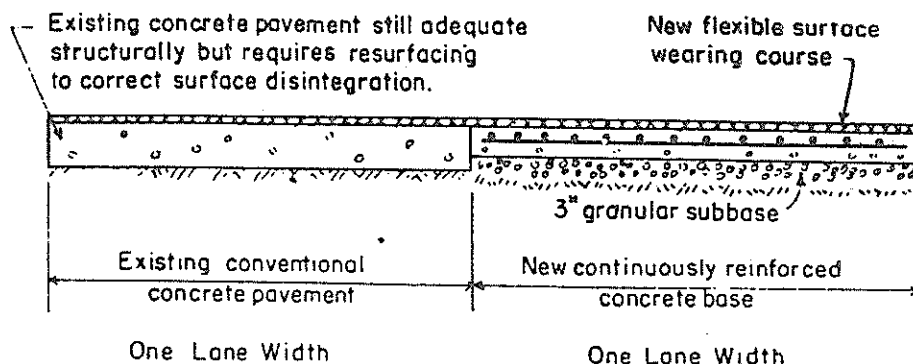
PLAN OF 10-PILE END ANCHORAGE - MISSISSIPPI



図一 7 杭式版端定着の例 : Mississippi, 1960 33)



図一 8 著しく損傷した NC 舗装の嵩上げに連続 RC 舗装を用いた例 : Texas, 1957 34)



TRANSVERSE CROSS-SECTION

図一 9 アスファルト表層の基層として連続 RC 舗装を用いた例 : Texas, 1957 34)

1957年に建設され、その結果は良好と報告されている。

(5) 郡山連続 RC 舗装

本舗装は国道 4 号線郡山国道管内の鏡石道路舗装工事(延長 4.2km)の際に、試験的に設けられた延長 500m、版厚 23cm、鉄筋比 0.6% (縦方向; $\phi 13$ mm 異形鉄筋、横方向; $\phi 9$ mm 丸鋼)のもので、1963年 6 月施工以来 4 年余り経過しており、その構造詳細は図一 10 に示した通りである。本試験舗装の構造や観測結果等についてはその詳細が土木技術資料に報告されており、^{4~6)} 更に、1967年 8 月にはコンクリート舗装部会設計分科会の調査団が現地視察を行っている。⁷⁾ これらの結果を要約すると、舗装版の両端に近い部分ではひびわれの発生はやや不規則であるが、拘束状態の中央部では非常に細いひびわれが密な間隔で規則的に発達して連続鉄筋挿入の効果を裏付け、供用状態も極めて良好で、特に隣接した在来の NC 舗装と比較すると格段の相違が認められる。ただし、本試験舗装ではその版厚を在来の NC 舗装と同一としており、その経済性について問題があると指摘されている。

以上は、比較的新しい連続 RC 舗装の主要な施工例について述べたものであるが、いずれも連続 RC 舗装が NC 舗装に比較してその供用性において格段に優れ、十分な実用性をもつことを実証したものと云える。舗装版の厚さや鉄筋比の設計については先にも述べたように未だ定説となっていない面もあるが、道路舗装に関する限りではその経験的手法はほぼ確立されているとしてよいであろう。問題はこれを空港舗装に拡張する場合に生ず

る。たとえば、鉄筋比を例にとると、仮に版厚 20cm の道路舗装の場合とこれを一定とすれば、空港舗装の版厚は 30~40cm となることが予想され、鉄筋の絶対量はこれに応じて 50~100% 増加し、鉄筋挿入の効果を単純に版断面積に対する鉄筋断面の割合のみで表示することの適否について疑問が生ずる。たとえば、オヘア空港の連続 RC 舗装では版厚 30cm に対して、鉄筋比を 0.4% に下げ、鉄筋の絶対量を道路舗装の場合と同一にしている。この点については理論的検討が不十分で、使用実績も乏しく今後の研究課題となっている。

2.3 無筋コンクリート舗装およびプレストレストコンクリート舗装との比較

まえがきおよび 2.1~2.2 で述べた諸点を考慮し、主としてひびわれに関連した事項について連続 RC 舗装を NC 舗装(ただし不連続な鉄網を挿入して補強せるもの)と PC 舗装を比較すると表一 4 の通りである。

3. 鉄筋コンクリート舗装版のひびわれ

3.1 ひびわれの発生機構

(1) ひびわれの原因

連続的に鉄筋を挿入した長大なコンクリート舗装版には数多くのひびわれが密な間隔で発生するが、その発生の機構に関してはたとえば表一 1、3 に示したような既存の試験舗装の観察結果からかなりの程度解明され、ひびわれの間隔と幾何学的な配置が縦方向の鉄筋量と応力、ひびわれの巾、舗装版の撓み等のような重要な設計要素と関係することが明らかにされている。

すなわち、連続 RC 舗装におけるひびわれは主として

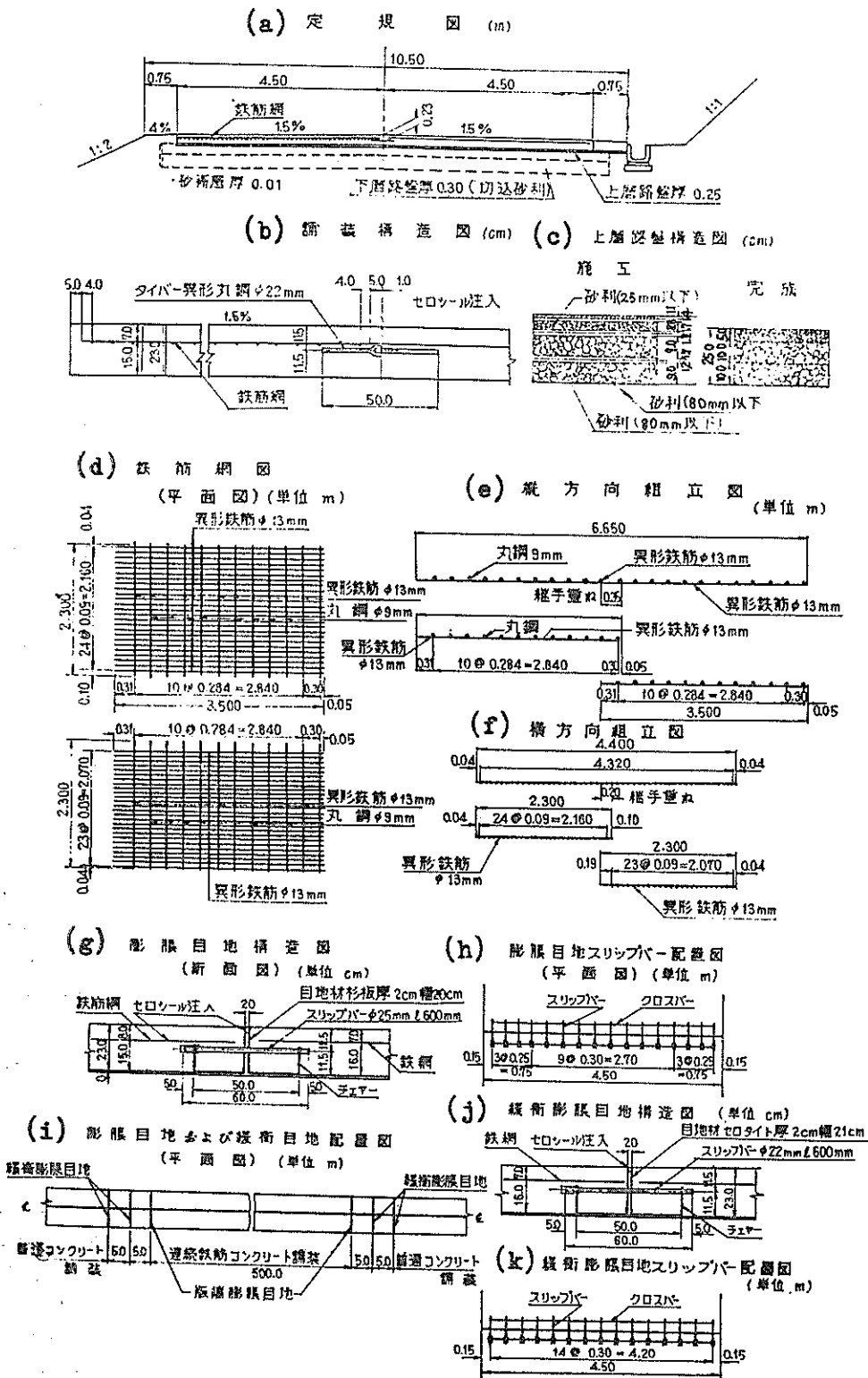


図-10 郡山連続 RC 舗装の構造詳細 (4~6)

表4 無筋コンクリート舗装、鉄筋コンクリート舗装およびプレストレストコンクリート舗装の比較

	無筋コンクリート舗装 (鉄網入)	連続鉄筋コンクリート舗装	プレストレストコンクリート舗装
ひびわれの考え	巾の狭いひびわれは、構造上の欠陥となること が少ない。 巾の狭いひびわれでは、雨水の滲透も少ない。	巾の非常に狭いひびわれは、構造上の欠陥とならない。 巾の非常に狭いひびわれでは、雨水はほとんど滲透しない。	内部応力によるひびわれは生じない。 荷重応力によってひびわれは生じても、荷重を除去すると閉じる。また、版の下面に荷重応力によって生ずるひびわれは有害ではない。
鉄筋等の挿入の目的	収縮目地以外の所で、止むを得ずひびわれが生じた場合に、そのひびわれが拡大するのを防ぐための用心鉄網として挿入する。	鉄筋とコンクリートの付着によってひびわれをできるだけ数多く発生させて、ひびわれの巾を狭くする。	コンクリート版に予めプレストレスを与えて、版に生ずる引張応力の一部または全部を打消すことにより、ひびわれの発生を防ぐ。
鉄筋等の設計	縦目地と収縮目地で囲まれた1区画の版にひびわれが生じた時、1方の側の版(元の1/2)に働く摩擦抵抗を負担する。	水平変位を完全に拘束されたコンクリート版の温度変化や乾燥収縮等による内部応力を負担し、ひびわれ巾を制限する。	荷重応力と内部応力の組合せ応力がコンクリートの引張強度以下となるようなプレストレスを与えるように設計する。
最少鉄筋量	経験的には3 kg/m ² 程度、φ6 mmの鉄筋を用い、版厚20cmの場合 $p \approx 0.1\%$	経験的には $p \geq 0.6\%$	
コンクリート版厚	鉄筋は荷重応力や内部応力を分担しないから鉄網を用いないコンクリート版と同一である。鉄網の挿入で版の寿命が延びる点を考慮して、版厚を薄くする考え方もある(英国、米国工兵隊)。	鉄筋は内部応力を分担し、荷重応力によるコンクリート版のひびわれに対する安全率を下げるもよいとする考え方(経験的)から、無筋版厚の80~90%とする例が多い。	プレストレスの導入によって引張応力の一部または全部を打消すので、無筋版厚に較べてかなり薄くなる。結果として、そり拘束応力等も減少する。
目地の必要性	収縮目地、膨張目地、共に必要。従って、目地部分の構造的弱点や不陸等は無筋版と同じ。	収縮目地、膨張目地、共に不要。	収縮目地は不要だが、膨張目地は必要。
鉄筋等の挿入効果	ひびわれ部の骨材の噛み合せにより荷重の伝達を計る。ひびわれ部の不陸の増大を防ぐ。破壊的ひびわれは無筋版より少ない。(実績報告33)	ひびわれ部の骨材の噛み合せにより荷重の伝達を計る。ひびわれ部の不陸の発生を防ぐ。ひびわれ部が主因で破壊した例は稀である。	コンクリート版の耐力が著しく増大する。ひびわれが生じても全断面に亘らず、モーメントとせん断力の伝達は可能で、完全な連続性を保つ。
陥	$K_{90} \geq 15 \text{ kg/cm}^3$ (セメントコンクリート舗装要項)	$K_{75} \geq 5.5 \text{ kg/cm}^3$ (ACI 325 委員会)	版厚が薄く噛み曇も大きいので、路盤支持力の不均一性の影響が少なく、軟弱地盤の施工例が多い。
	米国シカゴ空港 米国各地軍用空港	米ロツバ諸島の民間空港、軍用空港、米国各地軍用空港。	

コンクリートの乾燥収縮と温度降下による収縮の組合わせによって生ずるものと考えられている。

コンクリート版に挿入せる縦方向鉄筋はコンクリートの収縮に対して拘束力を与え、コンクリートの収縮しようとする傾向はコンクリートに引張力を、鉄筋に圧縮力を惹起する。もし、この引張応力がコンクリートの引張強度に達するとひびわれが生じ、ひびわれ部分とその近傍におけるコンクリートの縦方向応力を緩和する。この作用は収縮しようとするコンクリートによって鉄筋に惹起された圧縮力に抵抗するだけの十分な量の鉄筋が存在することを前提としており、無限に長くかつ十分な量の鉄筋を挿入した連続RC舗装版ではこのようなコンクリートの収縮によってかなり規則的な間隔でひびわれが生ずる。

鉄筋とコンクリートの熱膨張係数はほぼ同等である所から、気温変化による鉄筋とコンクリートの容積変化はほぼ同等である。舗装版の温度がコンクリートの打込み温度以上に上昇する場合は両者共にほぼ同量膨張するが、長大な連続RC舗装版では、版端から適当な距離だけ離れた領域では縦方向変位に対して効果的に拘束されており、版には縦方向圧縮応力が生じ、横方向のひびわれは閉合する傾向を示す。しかし、両材料共に圧縮に対してかなりの強度を有しており、通常の場合には、このような膨張からは実質的な被害は生じ得ない。

一方、温度降下は両材料の収縮をもたらし、舗装版はこの収縮に対しても効果的に拘束されているため、既存のひびわれは増巾してその個所の鉄筋に引張応力を発生すると共に、ひびわれに挟まれた間ではコンクリートと鉄筋に引張応力を、そしてひびわれの近傍ではコンクリートと鉄筋との間に付着応力を発生せしめる。ひびわれ間のコンクリートの引張応力がその引張強度に達すると新たなひびわれが発生する。温度降下による新しいひびわれの発生はひびわれ部分とその近傍においてのみコンクリートの引張応力緩和の作用をもつ。

以上の他に、鉄筋による版の縦方向そりの拘束の影響および車両荷重による曲げ応力もひびわれの一因をなすと考えられる。すなわち、鉄筋は通常の温度勾配に起因する版のそりを拘束し曲げ応力を発生する。また、車両荷重の下ではひびわれ間の版の上下部分にはそれぞれ縦方向の曲げ圧縮応力と曲げ引張応力が作用する。このようなそり拘束と上載荷重による曲げ応力が温度降下および乾燥収縮による引張応力と結びついて大きな引張応力を生じ、これがコンクリートの引張強度を上廻って新たなひびわれを生ずることは十分に起り得ることである。

長大な連続RC舗装版の中央部では版の水平縦方向の

変位がほとんど完全に拘束され、このため上述の原因による横方向のひびわれが無数に発生し、舗装版の端に近い部分では版の拘束力は次第に減少し、これに応じて隣接したひびわれ間の距離、すなわち、ひびわれ間隔も舗装版の端に向うに従って次第に増加する。図-11は一例として郡山連続RC舗装のひびわれの状態を示したもので、ひびわれが版中央部分でかなり密に発生し、両端に近い部分ではひびわれ間隔が疎となっている状況が極めて明瞭である。

(2) ひびわれの発達過程

(1)で述べたように、コンクリート舗装版に生ずるひびわれのうち、最も早い時期に生ずるのは初期乾燥収縮と温度降下によるひびわれで、この最初のひびわれはコンクリートの打込み後1~3日の早朝に発生することが多く、大部分1週間以内に発生する。^{2, 3)} 交通に開放された後のコンクリート版には更に荷重応力、そり拘束応力、摩擦応力、乾燥収縮応力等が作用し、その組合わせによってひびわれが生ずる。図-12はひびわれ発達の一例を示したもので、平均ひびわれ間隔はコンクリート打込後の時間の経過に応じて減少する。図-13はこのようひびわれの生じた舗装版の鉄筋応力の時間的変化を示したもので、ひびわれ部分の鉄筋応力は鉄筋が全引張力を負担する所から当然高く、ひびわれから離れた所の鉄筋応力はひびわれ部分に比べてかなり低いことが分かる。

ひびわれは最初に収縮応力やそり拘束応力の大きい版の中央部に生じ、版端からある距離までの半拘束を受ける部分ではひびわれはその発生の仕方が不規則である。しかし、コンクリート版の路盤に対する変位は概して不

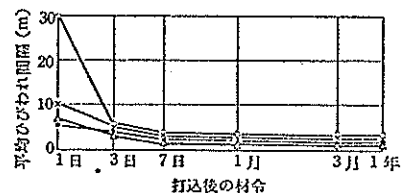


図-12 連続RC舗装のひびわれ発達の一例²⁴⁾

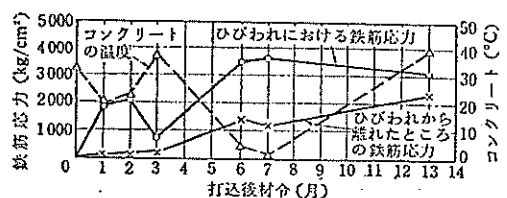


図-13 連続RC舗装の鉄筋応力の変化の一例²⁴⁾

可逆的であり、このため収縮に際しては膨張量だけ収縮せず、残留引張力が発生する。この残留引張力は変位の少ない中央部ではほとんど0であるが、変位の大きい版端部ではかなり大きく、従って、膨張収縮のサイクルを繰り返す間に版端部のひびわれも次第に発達する。この過程は図-11(B)に示した郡山連続RC舗装のひびわれの発達状況記録からも明らかであろう。図-14は同舗装のひびわれの数と総延長および平均間隔の経年変化を示したもので、特にひびわれ間隔が時間の経過と共に減少する状況が明瞭である。図-15は米国インディアナ州の道路における連続RC舗装の15年余の観測結果に基づくひびわれの経年変化を示したもので、郡山の場合とはほぼ同様な傾向を示している。表-5~7は同様に米国ペンシルバニア州の試験舗装におけるひびわれの頻度と平均間隔および巾の、コンクリート打込み後1週間から2年までの間の時間的な変化の測定記録である。ひびわれ巾の測定値はその測定方法（インパル尺と顕微鏡）によっても多少異なるが、時間的な変化の傾向はほとんど同一である。

以上に述べたように、連続RC舗装におけるひびわれの発達の度合は舗装版厚や鉄筋比等の構造要素によっても相違するが、傾向はほとんど共通しており、コンクリート打込み後1年以内は急激に発達するが、その発達の割合は時間の経過と共に漸減し、打込み後、数年ではほぼ飽和状態に近づくものと考えてよいであろう。

3.2 温度変化とコンクリートの乾湿の影響

(1) 概要

コンクリート舗装版の表面温度は太陽光線、輻射熱、風による湿分蒸発の影響、周囲の気温変化の影響、等を受けて絶えず変化し、また、舗装表面の湿度も同様の影響を受けて、降雨期の100%から乾季の非常に低い値まで大巾に変化する。このため、コンクリート版は一次元的な長さ変化と共に、版の上下面における長さ変化の差が生じ、これが拘束されて、いわゆる（温度応力、端部拘束応力およびそり拘束応力）を生ずる。

(2) 温度応力

大きさが無限大で変形が拘束されている版で、版の上下面間の温度差が一定で、かつ、温度勾配が版厚間で直線的に変化するものと仮定した場合の版中央部の温度応力は次式で表わされる。

$$\sigma_t = \frac{E_c \alpha \theta}{2(1-\mu)} \quad (3.1)$$

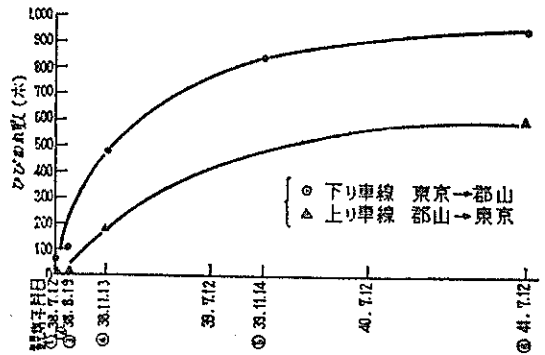
ここで、 σ_t ；舗装版の上面もしくは下面における引張応力 (kg/cm²)

E_c ；コンクリートの弾性係数 (kg/cm²)

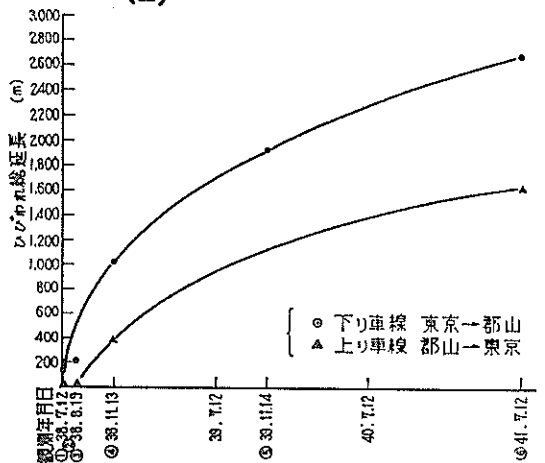
α ；コンクリートの熱膨張係数 (1.0×10^{-5} /deg)

θ ；版上下面間の温度差 (deg)

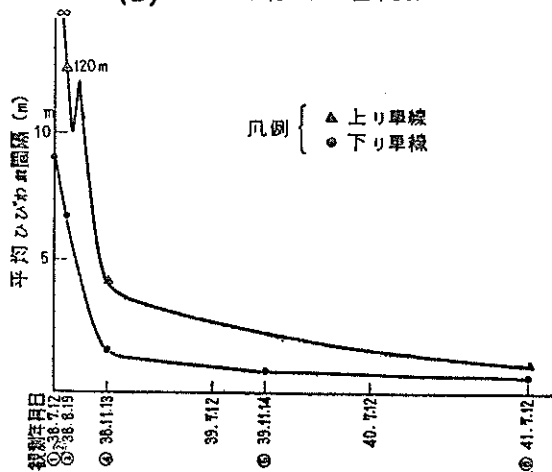
μ ；コンクリートのポアソン比



(A) ひびわれ数の経年変化

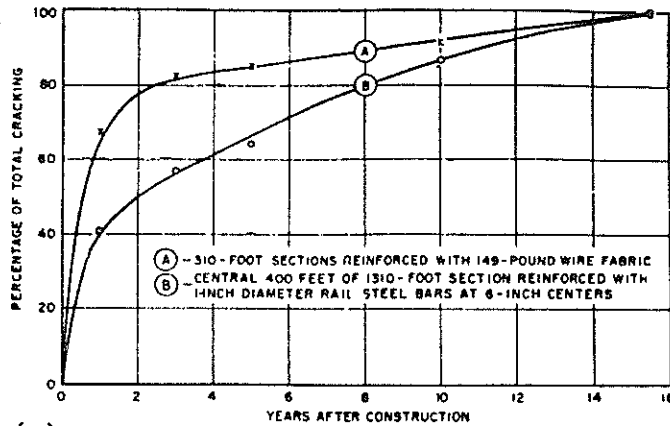


(B) ひびわれ総延長の経年変化

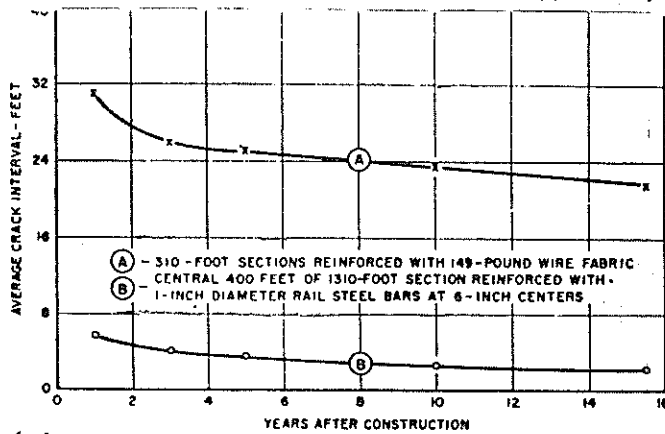


(C) 平均ひびわれ間隔の経年変化

図-14 郡山連続RC舗装におけるひびわれの経年変化 (6)



(A) —Rate of crack development during the first 15 1/2 years of pavement life.



(B) —Relation between average transverse crack interval and age of pavement.

図—15 インディアナ州連続 RC 舗装におけるひびわれの経年変化 16)

表—5 ペンシルバニア州連続 RC 舗装におけるひびわれの頻度と平均間隔の経時変化 32)

(A) CRACK FREQUENCY AVERAGES; YORK PROJECT

Lane	Pavement Thickness (in.)	Cracks (no./100ft.)					Crack Spacing (ft)					Placing Temp. (°F)
		21 Days	1 Mo	6 Mo	1 1/2 Yr	2 Yr	21 Days	1 Mo	6 Mo	1 1/2 Yr	2 Yr	
North outside	9	0.70	1.93	5.15	7.08	7.16	142.9	51.8	19.4	14.1	14.0	51
North inside	9	2.01	3.60	5.27	6.17	6.32	49.8	27.8	19.0	16.2	15.8	51
South outside	9	1.21	3.14	5.14	6.16	6.32	82.6	31.8	19.5	16.2	15.8	60
South inside	9	1.81	4.03	5.51	6.83	6.98	55.2	24.8	18.1	14.6	14.3	56

(B) CRACK FREQUENCY AVERAGES; HAMBURG PROJECT

Lane	Pavement Thickness (in.)	Cracks (no./100ft.)				Crack Spacing (ft)				Placing Temp. (°F)
		7 Days	1 Mo	6 Mo	1 Yr	7 Days	1 Mo	6 Mo	1 Yr	
East outside	7	5.6	9.4	12.3	16.3	17.9	10.6	8.1	6.1	72
	8	5.9	8.5	11.4	13.3	15.9	11.8	8.8	7.5	74
	9	3.1	3.7	6.4	7.6	32.3	27.1	15.6	13.2	64
East inside	7	6.4	8.0	11.1	11.7	15.6	12.5	9.0	8.5	70
	8	3.3	6.6	10.4	11.5	30.3	15.2	9.6	8.6	73
	9	2.9	4.1	7.8	7.8	34.5	24.4	12.8	12.8	64
West outside	7	2.8	7.0	12.4	13.6	35.7	14.3	8.1	7.4	76
	8	4.9	8.4	12.7	14.2	20.4	11.9	7.9	7.0	72
	9	9.3	10.8	12.7	13.1	10.8	9.3	7.9	7.6	80
West inside	7	4.5	8.1	11.4	11.6	22.2	12.3	8.8	8.6	84
	8	5.2	8.3	11.5	11.6	19.2	12.0	8.7	8.6	81
	9	5.3	7.6	12.2	12.3	18.9	13.2	8.2	8.1	78

表一 6 ペンシルバニア州連続 RC 舗装におけるひびわれの経時変化 32)

MICROSCOPE WIDTH READING : HAMBURG PROJECT

Pav't. Age	7-in. Pavement						8-in. Pavement						9-in. Pavement					
	Beg.		Middle		End		Beg.		Middle		End		Beg.		Middle		End	
	Air Temp. (°F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (°F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (°F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (°F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (°F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (°F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (°F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (°F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (°F)	Crack Width (in.)
(a) Eastbound Outside Lane																		
2 mo.	74	0.008	67	0.014	67	0.009	70	0.009	70	0.011	70	0.008	—	—	80	0.005	80	0.007
3 mo.	86	0.007	86	0.009	86	0.007	86	0.009	88	0.007	88	0.008	—	—	86	0.006	86	0.010
6 mo.	58	0.009	58	0.009	54	0.007	64	0.006	64	0.010	64	0.010	—	—	47	0.009	42	0.015
1 yr.	65	0.010	65	0.008	65	0.007	64	0.008	64	0.007	64	0.006	—	—	72	0.006	72	0.007
1½ yr.	58	0.010	58	0.008	56	0.009	56	0.009	66	0.009	66	0.010	—	—	66	0.011	58	0.014
(b) Eastbound Inside Lane																		
2 mo.	88	0.007	88	0.007	88	0.012	88	0.008	90	0.007	90	0.008	—	—	84	0.007	84	0.009
3 mo.	74	0.017	74	0.012	74	0.009	78	0.008	78	0.011	78	0.008	—	—	88	0.009	—	—
6 mo.	36	0.017	36	0.015	36	0.016	40	0.015	40	0.016	40	0.015	—	—	35	0.017	39	0.022
1 yr.	70	0.006	78	0.006	78	0.008	78	0.009	78	0.009	81	0.008	—	—	79	0.012	80	0.011
1½ yr.	50	0.008	50	0.012	50	0.012	60	0.008	60	0.011	60	0.009	—	—	54	0.010	55	0.016
(c) Westbound Outside Lane																		
2 mo.	82	0.008	85	0.009	88	0.007	87	0.006	—	—	86	0.008	86	0.009	87	0.008	80	0.007
3 mo.	80	0.007	78	0.007	78	0.007	78	0.008	78	0.008	72	0.008	78	0.011	80	0.009	80	0.008
6 mo.	42	0.011	56	0.008	70	0.009	70	0.009	71	0.013	64	0.014	63	0.013	63	0.010	58	0.009
1 yr.	88	0.009	88	0.007	81	0.008	80	0.007	80	0.009	80	0.013	80	0.013	82	0.010	82	0.008
1½ yr.	76	0.008	76	0.014	60	0.011	65	0.010	65	0.010	73	0.011	73	0.013	73	0.011	76	0.008
(d) Westbound Inside Lane																		
2 mo.	88	0.007	88	0.009	74	0.008	84	0.007	—	—	74	0.012	78	0.008	72	0.008	80	0.007
3 mo.	78	0.007	78	0.008	78	0.007	82	0.008	82	0.008	86	0.013	78	0.010	68	0.012	74	0.008
6 mo.	58	0.008	58	0.008	58	0.012	61	0.009	64	0.009	70	0.008	70	0.009	68	0.012	68	0.009
1 yr.	87	0.006	87	0.008	87	0.011	87	0.011	87	0.007	87	0.007	91	0.008	91	0.011	91	0.008
1½ yr.	68	0.012	82	0.010	82	0.011	82	0.010	80	0.010	80	0.009	72	0.011	72	0.011	72	0.013

表一七 ペンシルバニア州連続 RC 舗装におけるひびわれの経時変化 32)
 INVAR WIDTH READINGS ; HAMBURG PROJECT

Pav't. Age	7-in. Pavement						8-in. Pavement						9-in. Pavement					
	Beg.		Middle		End		Beg.		Middle		End		Beg.		Middle		End	
	Air Temp. (° F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (° F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (° F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (° F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (° F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (° F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (° F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (° F)	Crack Width (in.)	Air Temp. (° F)	Crack Width (in.)
	(a) Eastbound Outside Lane																	
6 mo.	50	0.013	50	0.014	50	0.018	50	0.014	50	0.017	54	0.020	—	—	52	0.013	52	0.018
1 yr.	65	0.009	65	0.012	65	0.016	64	0.012	64	0.016	64	0.018	—	—	72	0.011	72	0.012
1 1/2 yr.	58	0.013	58	0.015	58	0.020	56	0.016	56	0.017	56	0.021	—	—	66	0.014	58	0.023
	(b) Eastbound Inside Lane																	
6 mo.	36	0.018	36	0.018	36	0.016	40	0.018	40	0.016	40	0.015	—	—	35	0.018	42	0.022
1 yr.	84	0.014	84	0.015	84	0.014	84	0.016	84	0.012	84	0.011	—	—	91	0.010	91	0.018
1 1/2 yr.	50	0.015	50	0.021	50	0.017	60	0.018	60	0.014	60	0.015	—	—	54	0.020	54	0.026
	(c) Westbound Inside Lane																	
6 mo.	42	0.013	70	0.008	70	0.011	72	0.009	73	0.012	64	0.011	63	0.011	63	0.012	54	0.008
1 yr.	92	0.012	92	0.008	92	0.014	92	0.012	92	0.013	92	0.012	92	0.012	92	0.013	92	0.011
1 1/2 yr.	76	0.012	76	0.009	76	0.015	65	0.013	65	0.014	65	0.013	73	0.013	73	0.013	76	0.012
	(d) Westbound Outside Lane																	
6 mo.	58	0.007	58	0.012	58	0.011	64	0.010	64	0.008	64	0.008	70	0.010	68	0.012	68	0.008
1 yr.	92	0.009	92	0.013	92	0.011	92	0.011	87	0.006	87	0.009	91	0.009	91	0.013	91	0.012
1 1/2 yr.	68	0.012	68	0.014	68	0.012	68	0.012	58	0.010	68	0.010	72	0.008	72	0.014	72	0.015

実際には、コンクリート舗装表面の温度は時間的に変化する、かつコンクリートの熱伝導率は比較的小さいため版内の温度変化は表面温度の変化と位相差を生じ、更に版の拘束条件は版内の場所によってかなり変化し、温度応力は上式で表わされるように単純ではない。このコンクリート舗装版の温度応力については Thomlinson, 40) Timoshenko, 41) Westergaard, 42, 43) Kelly, 44) 岩間^{9~11)}等によって究明されている。すなわち、Thomlinson はコンクリート舗装版表面における温度が正弦曲線に変化するものとして版内の温度分布を求め、これを Timoshenko の版内の温度変化による内部公式と組合わせて、いわゆる、Thomlinson の応力公式（内部応力、端部拘束応力およびそり拘束応力）を求めている。これに対して Westergaard はコンクリート版の温度は深さ方向に直線的に変化すると云う仮定を用いて、そり拘束応力を前述の σ_t の式として求めたもので、Kelly はこれに拘束条件を加味して Westergaard の修正式を得ている。岩間はこれらの研究成果を詳細に検討すると共に、東京付近における試験舗装による実測結果を基にして、収縮目地をもつコンクリート版の摩擦応力が極めて小さいこと、狭義端部拘束応力は比較的大きい圧縮応力となること、広義端部拘束応力は設計上無視しても一般に安全であること、温度変化によるそり拘束応力については Westergaard の方法を用いるのが実用的であること、等を明らかにし、実用的な計算式として次式を提案し、

$$\sigma_t = 0.35 C_w \alpha E_c \theta' \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 σ_t ; コンクリート版縦縁部底面に生ずる温度応力の設計用数値 (kg/cm²)

C_w ; そり拘束係数

更に、コンクリート版の各部分に対して適切と考えられるそり拘束係数と東京付近におけるコンクリート舗装の設計に必要な温度差を与えている。{「日本道路協会セメントコンクリート舗装要綱」(1967年版)付録-4 参照}。

(2) コンクリートの乾湿による応力

コンクリート版の含水量の変化による応力は初期収縮による応力と含水量の変化による応力とに分けられる。

コンクリート版を施工する場合には初期養生期間中は水分を供給するのが原則であるから、コンクリートの初期収縮は全く拘束せずに乾燥せしめた場合より遙かに小さいが、これが往々にして問題となるのはコンクリートが十分な強度を有する以前に、通常コンクリートの打込後 2~3 日程度で収縮が大きくなり、コンクリート版にひびわれが発生することが多いからである。一般には、初期におけるコンクリート版のひびわれは初期の乾燥収

縮と共に温度降下による収縮もその原因となっていることが多い。

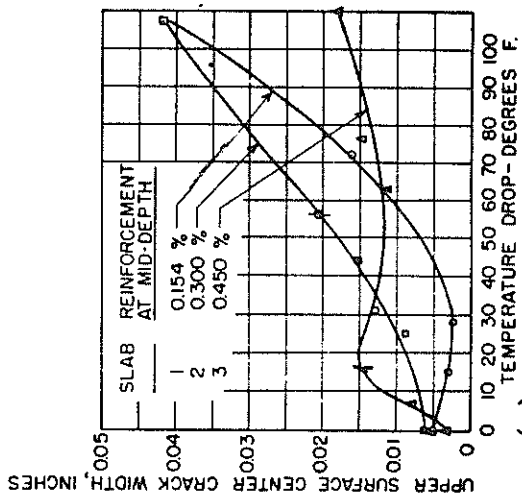
コンクリート版の含水量は天候によって増減し、これに応じて体積変化を生じて温度応力に類似した応力が生ずる。しかし、含水量の変化による応力は温度応力よりかなり小さいこと、温度上昇は一般に乾燥を伴い、その応力は温度応力と相反する方向に生ずることが多いため一般には無視されている。

以上に述べたように、温度変化による応力と、湿度変化による応力は相互に別のものであるが、現象としては同時に発生し、これを分離して考えるのは適当でないこと、後者は前者に比較してかなり小さく、かつ、乾燥収縮による応力は温度降下による応力と同様に取扱得るため、一般には湿度変化による応力をも含めて温度応力として取扱っている場合も少なくない。

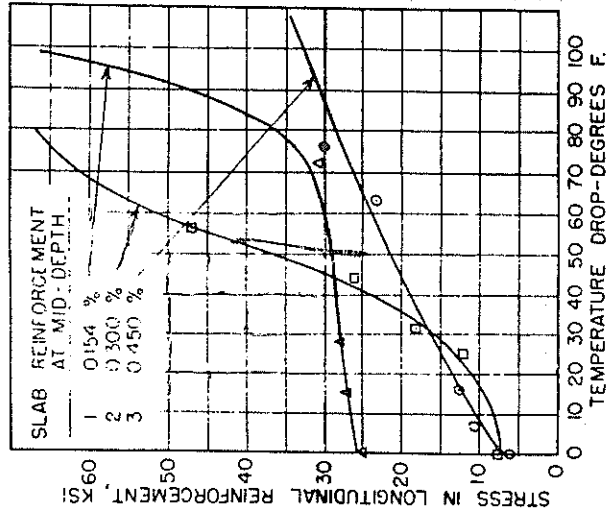
(3) 連続 RC 舗装における温度応力の問題

NC 舗装ではその構造設計において荷重応力と同時に上述のような温度応力ならびに乾燥収縮による応力をも考慮し、その組合わせ応力に対して適当な安全率をもつように版厚の設計を行なうのが原則である。一方連続 RC 舗装では収縮目地の除去および鉄筋の挿入と版の長大化に伴うほぼ完全な拘束条件に起因する引張応力によってひびわれが当然発生するものとし、ひびわれにおける鉄筋応力が適正な範囲内にあって、かつ、ひびわれ巾が過大とならないように鉄筋量を定めるのが原則である。換言すれば、ひびわれを意識的に発生せしめてコンクリートの引張応力を鉄筋に伝達し、これによってコンクリートの応力を緩和するものとも云える。従って、(1), (2) で述べたような NC 舗装における温度応力の考え方を連続 RC 舗装に適用することは困難で、鉄筋量は試験舗装等における経験と上述のようなひびわれにおける鉄筋応力およびひびわれ巾を考慮して定めることになり、連続 RC 舗装における温度変化ならびに乾燥収縮に関する問題はこれらの要因が鉄筋応力およびひびわれ巾にいかなる影響をおよぼすかという問題に帰着する。

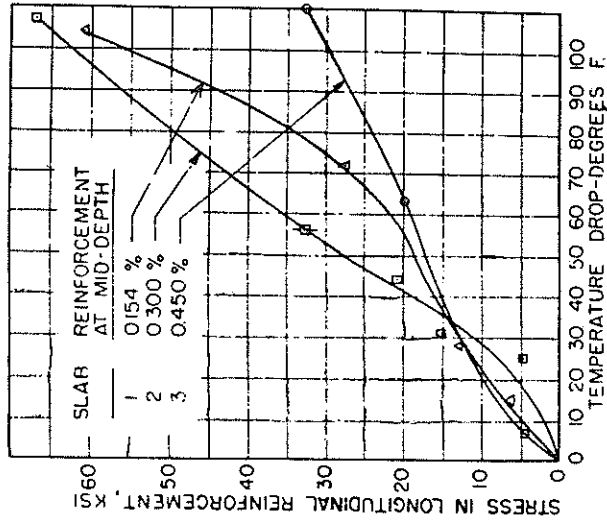
図-16はこのような考え方から、RC 模型舗装版を用いて温度降下がひびわれ巾、鉄筋応力および荷重時の鉄筋応力におよぼす影響を調査した結果で、図-17は温度降下が荷重下の版の鉛直変位と撓みにおよぼす影響の調査結果である。いずれの実験でも鉄筋比 (0.154~0.450%) をパラメーターとしている。なお、この実験では単に温度変化のみでなく乾燥収縮の影響も含まれている。この実験結果によれば温度降下の影響の仕方は鉄筋比によっても相当に異なるが、温度降下の増大に応じてひびわれ巾や鉄筋応力ないし版の撓みも増加する傾向が認め



(A) Influence of temperature drop and percentage of reinforcement on upper surface crack widths.

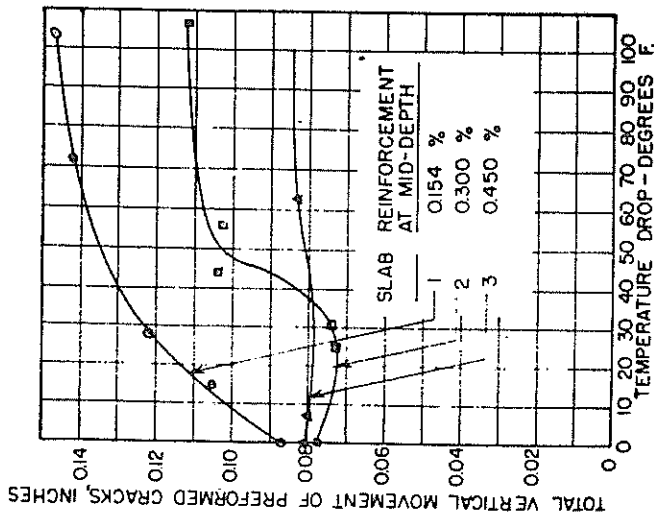


(B) Influence of temperature drop and percentage of reinforcement on stress in steel at center crack due to 15-kip wheel loads.

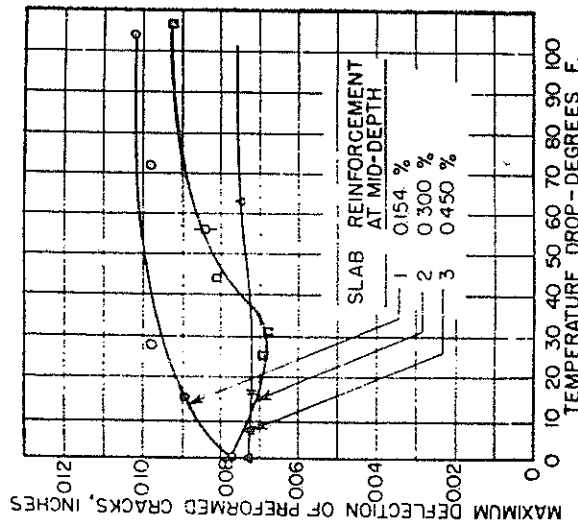


(C) Influence of temperature drop and percentage of reinforcement on stress in steel at center crack.

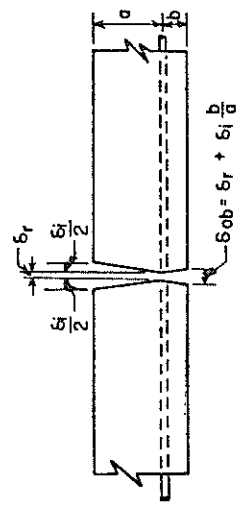
图一16 温度降下がひびわれ巾と鉄筋応力におよぼす影響 45)



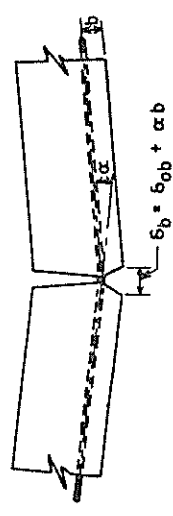
(A) Influence of temperature drop and percentage of reinforcement on total vertical movement due to 15-kip wheel loads.



(B) Influence of temperature drop and percentage of reinforcement on deflections due to 15-kip wheel loads.



(a) CRACK DUE TO TEMPERATURE DROP



(b) CRACK DUE TO TEMPERATURE DROP AND VERTICAL LOAD

(C) Deformations at a crack.

図—17 温度降下が荷重下の版の変位とたわみにおよぼす影響 45)

られる。しかし、鉄筋比がある程度以上あれば、たとえば10~30deg 程度の温度降下のある場合でも、ひびわれ巾や版の撓みを実用上温度降下がない場合と同程度に考え得ること、換言すれば、温度降下がかなり大きい場合でも適当量の鉄筋挿入によって舗装版におよぼす悪影響を無視し得る程度に限定できることも自ら明かであろう。図-18はイリノイ州の試験舗装の観測資料¹⁷⁾ を整理したものでひびわれの巾と平均間隔が舗装版の温度変化によって変化し、ひびわれが新たに発生しないものとすれば(ひびわれ間隔が一定とすれば)30 deg 余りの温度降下によってひびわれ巾が約50%増加することを示している。また、図-19はテキサス州の連続RC舗装の新設工事で、養生温度が高い程ひびわれも密に発生することを示している。

3.3 鉄筋量と鉄筋付着面積の影響

(1) 鉄筋量の影響

ひびわれ断面では全引張力が鉄筋によって支持されており、ひびわれの近傍ではコンクリートと鉄筋との付着は破壊されているが、ひびわれから少し離れるとコンクリートと鉄筋の間には正常な付着力が作用する。²³⁾ 従って、鉄筋の応力は付着力によって次第にコンクリートに伝えられ、コンクリートに働く引張応力は隣接するひびわれ間の中央で最大となり、これがコンクリートの引張強度に達すると新たなひびわれが発生し、鉄筋とコンクリートの付着力が大きい程ひびわれの間隔が狭くなり、数が増大し、それに応じてひびわれ巾も減少する。⁴⁶⁾

たとえば、鉄筋の断面積を増せば周長も増し付着力も

増加するからひびわれの平均間隔と巾も小さくなる。

以上に述べた関係は図-16、17の実験結果からも容易

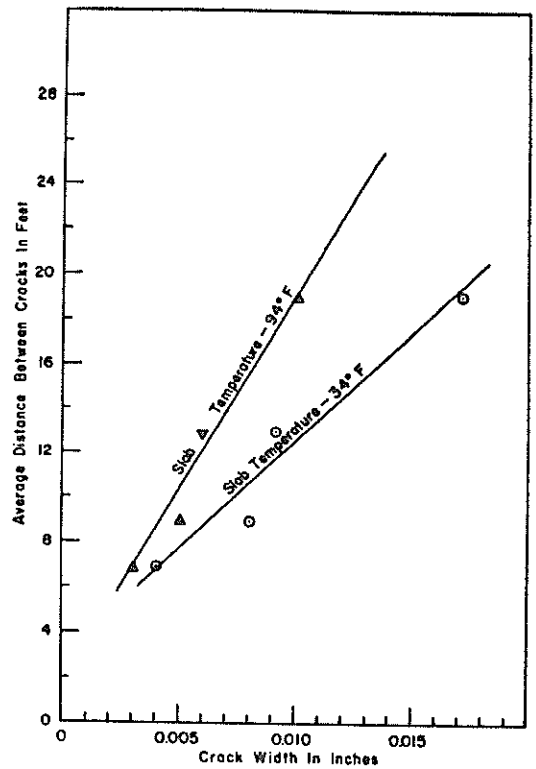


図-18 舗装版の温度が変化した時のひびわれの巾と平均間隔の関係 (資料は参考文献-17より収録) ²⁷⁾

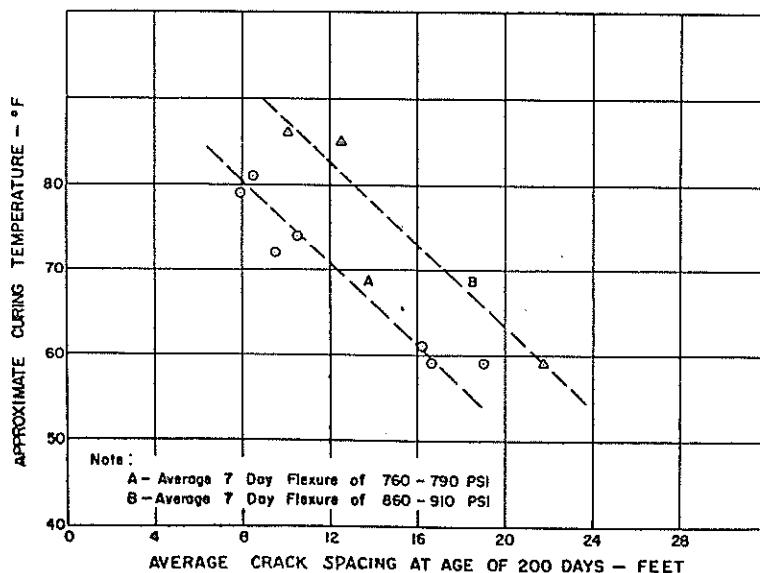


図-19 連続RC舗装の養生温度とひびわれ平均間隔との関係 ²⁶⁾

に推定できる。図-20はインディアナ州の試験舗装の観測結果¹⁶⁾で、ひびわれ巾が鉄筋比の増加に応じてほぼ直線的に減少することを示している。図-21はインディアナ、イリノイ、カリフォルニア、ニュージャージー等の各州における観測結果を取り纏めたもので²⁷⁾ ひびわれ間隔が鉄筋比の増加に応じて狭くなる状況を示している。しかし、鉄筋比の増加によるひびわれ間隔が狭くなる割合は鉄筋比の増加に応じて減少し、鉄筋比が1%程度を越えると鉄筋比増加の効果は急激に減少することが明らかである。このことは、ひびわれの分散に有効な鉄筋量には限界があり、これが1%付近にあることを示すものと云える。

(2) 鉄筋付着面積の影響

R C舗装版の鉄筋比とコンクリート容積比との関係を求めると、次式が導かれる。

$$p = \frac{A_s}{A_c} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{1}{hy} \dots\dots\dots (3.3)$$

ここでDは鉄筋直径、hは版厚、yは縦方向鉄筋の配置間隔である。鉄筋の全付着面積を A_b 、コンクリート

量を V_c 両者の比を q とすると、

$$q = \frac{A_b}{V_c} = \frac{\pi D}{hy} = \frac{4p}{D} \dots\dots\dots (3.4)$$

図-22は(1)に述べた各州の試験舗装の観測資料について(3.4)式で得られた q をひびわれの平均間隔と対比したもので、ひびわれ間隔が q の増加に応じて直線的に減少する状態を示している。この関係は純曲げを受けるR C部材のひびわれについて認められる所⁴⁶⁾とほぼ一致し、ひびわれ間隔が鉄筋比の増加に応じ、また、鉄筋直径の減少に応じて直線的に減少することを示し、たとえば鉄筋比を一定にしても細径の鉄筋の使用によりひびわれの分散を計れることを意味している。

3.4 鉄筋の形状と埋込み深さの影響

(1) 鉄筋の形状

従来の連続R C舗装に用いられた連続鉄筋としては鉄網 (Welded Wire Fabric)、異形鉄筋網 (Deformed Bar Mat) ないし異形鉄筋 (Deformed Bar) が大部分で、それぞれの施工経験については数多く報告されているが、これらの効果について比較検討した例はほとんどない。

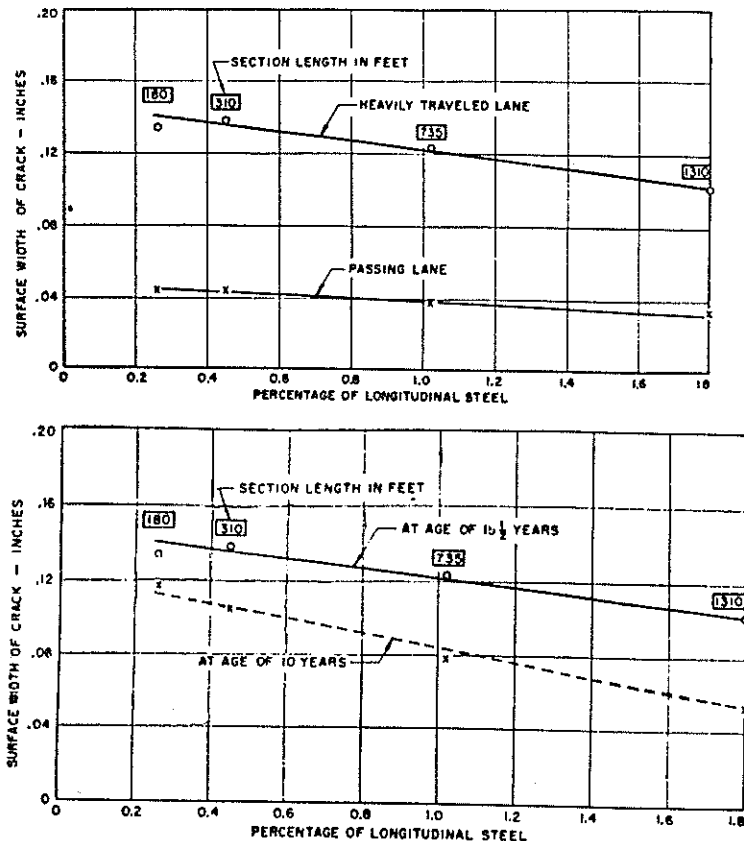


図-20 鉄筋比とひびわれ巾の関係¹⁶⁾

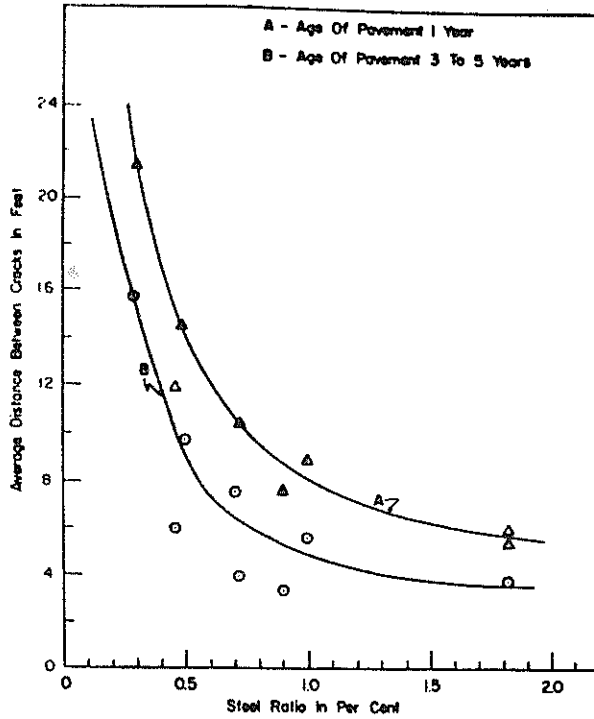


図-21 鉄筋比とひびわれ平均間隔の関係
 (資料は参考文献-17, 21, 24, 47, 48より収録)

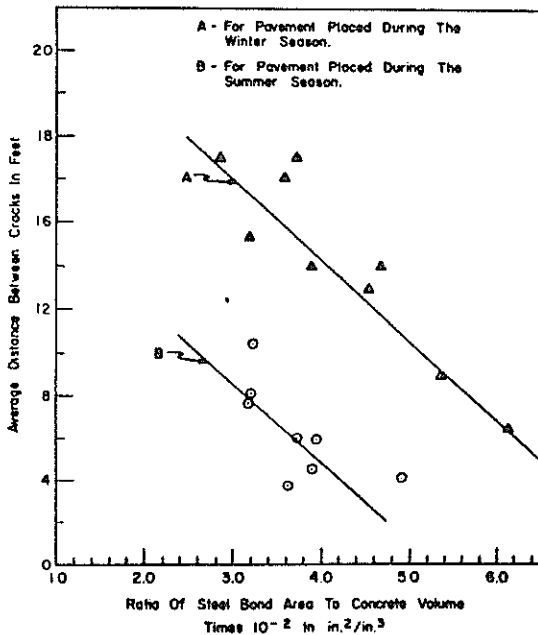


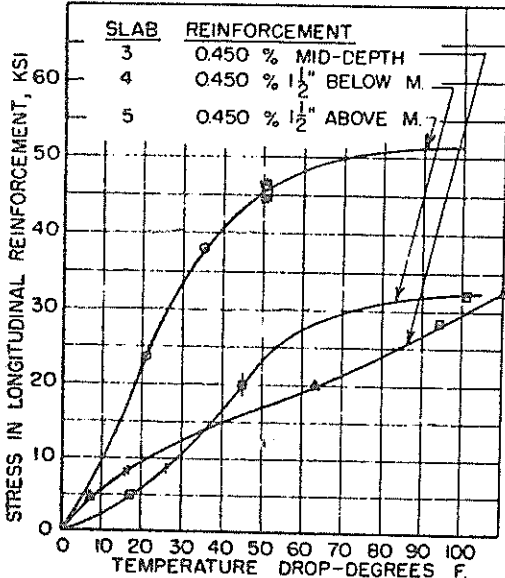
図-22 鉄筋の付着面積比とひびわれ間隔の関係
 (資料は参考文献-17, 21, 24, 47, 48より収録)

ひびわれ断面における鉄筋の働きとしてはその性質上全く同一と考え得るから、実際的な相違点はその付着性状に限定して考えることができる。William Zuk はコンクリート舗装用鉄筋としての鉄網の作用について検討し、縦方向に引張力を受ける鉄網の付着力は縦方向に配置された丸鋼とコンクリート間の粘着力と摩擦抵抗にもよるが、主として、横方向に配置された丸鋼がコンクリートに支圧された状態で受ける曲げ抵抗によることを理論的、実験的に証明している。⁴⁹⁾ 異形鉄筋網の場合にはこれとは異なって、横方向の配筋は縦方向の鉄筋に亘る結束されたに過ぎないから、縦方向筋の引抜きに対してその曲げ抵抗によって引抜き抵抗を付加することは期待し難い。この意味では異形鉄筋網は単独の異形鉄筋を縦方向に配置したものと同等と考えてよい。引抜き力を受ける異形鉄筋の付着力についてはこれが、平滑面におけるコンクリートとの粘着力および摩擦抵抗、フシ部におけるコンクリートの支圧抵抗およびフシ間のコンクリートのせん断抵抗より成り、これが鉄筋の引抜の段階に応じて変化する機構はかなり明らかにされている。⁵⁰⁾

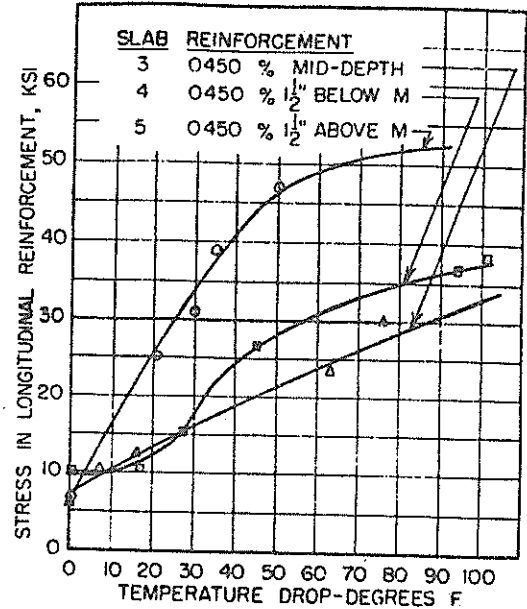
従って、鉄網と異形鉄筋網とはその機能上かなりの差があるが、従来の試験舗装等においては実用上の効果

について試験した例が乏しいことは前述の通りである。この点に関連し、Zuk 59) は鉄網を用いた場合のひびわれについて鉄網とコンクリート間の付着力は横筋との交点に集中的に作用するとの考え方から関係式を誘導し、これを Vetter の式と比較して鉄筋比 p を求める式は相互に完全に一致すること、ひびわれ間隔やひびわれ巾に

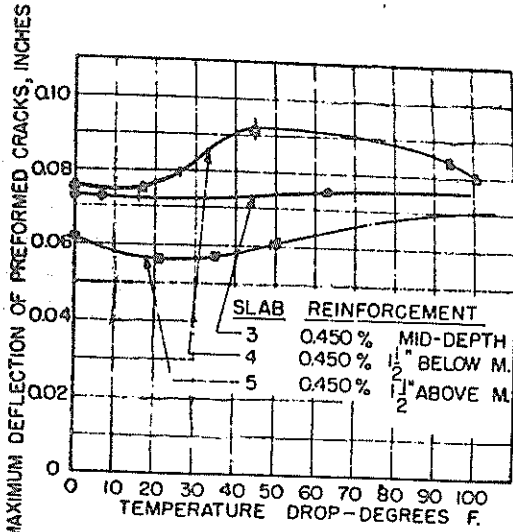
関する式には多少の差は認められるが、実質的な差がないことを数値計算で例証している。これは実際の舗装では鉄筋に作用する引抜力がその鉄筋のもつ付着能力に比較してかなり小さいため、両者の機能上の差が实际的な差としては生じないためと推定される。RCの模型舗装版を用いて行なった鉄網と異形鉄筋網の比較試験によれ



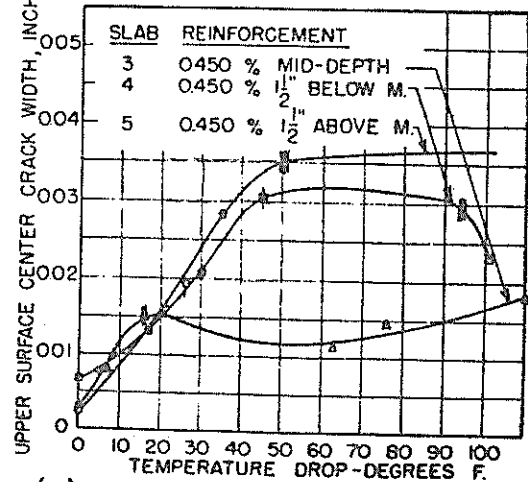
(A) Influence of temperature drop and position of reinforcement on stress in steel at center crack.



(B) Influence of temperature drop and position of reinforcement on stress in steel at center crack due to 15-kip wheel loads.

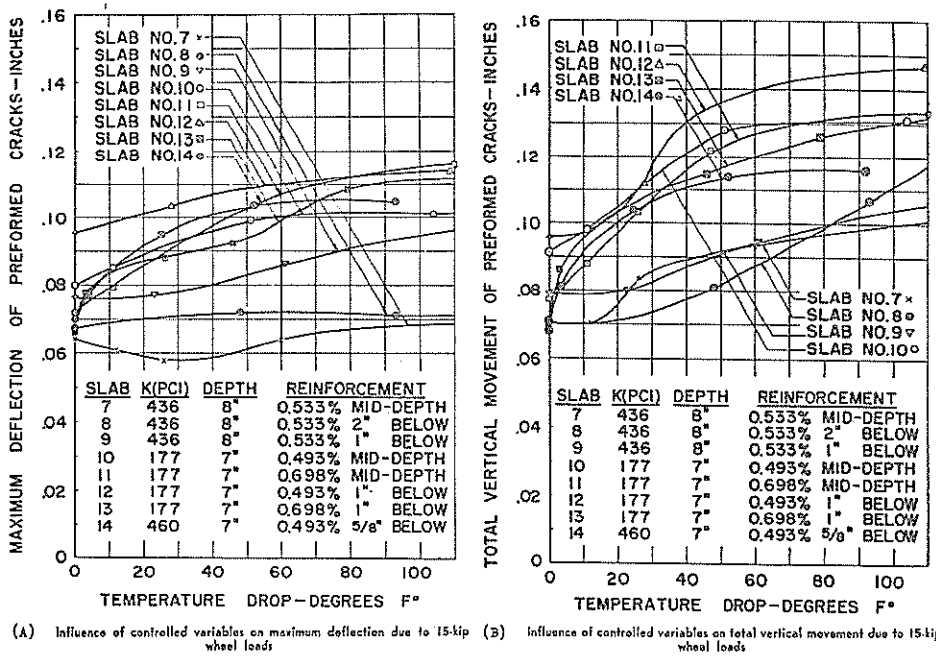


(C) Influence of temperature drop and position of reinforcement on deflections due to 15-kip wheel loads.

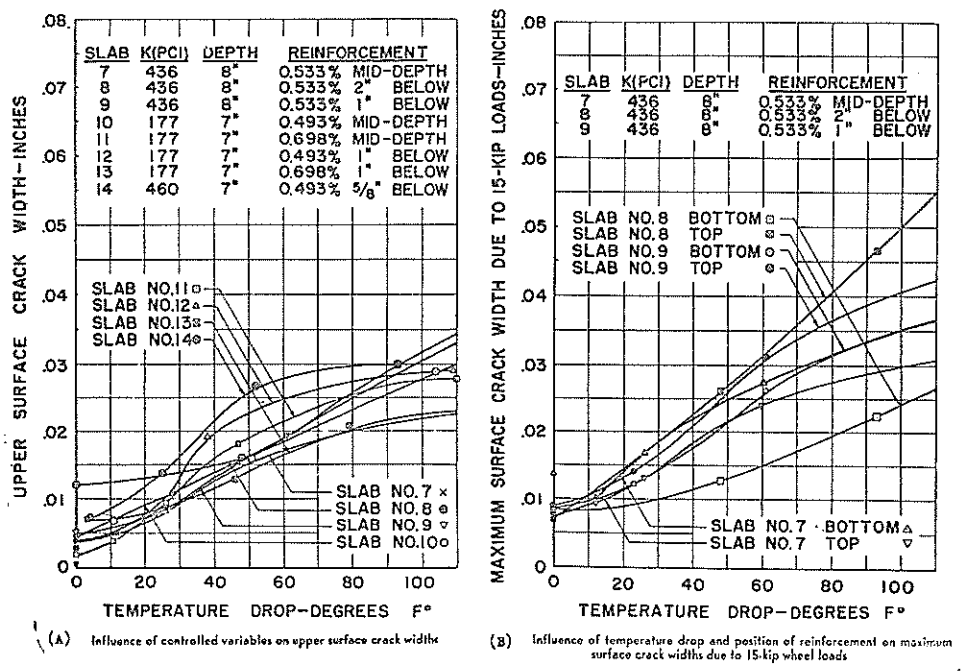


(D) Influence of temperature drop and position of reinforcement on upper surface crack widths.

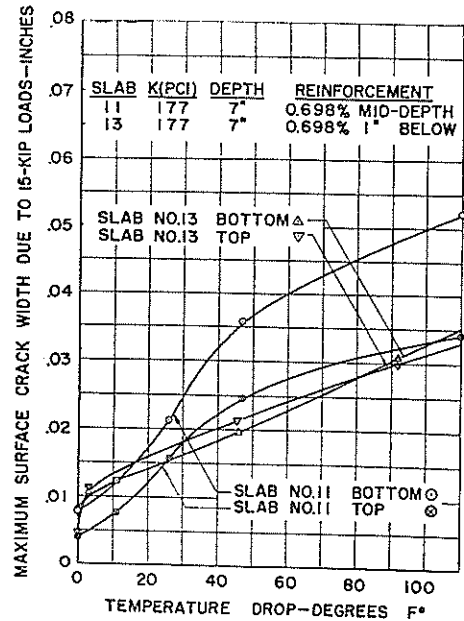
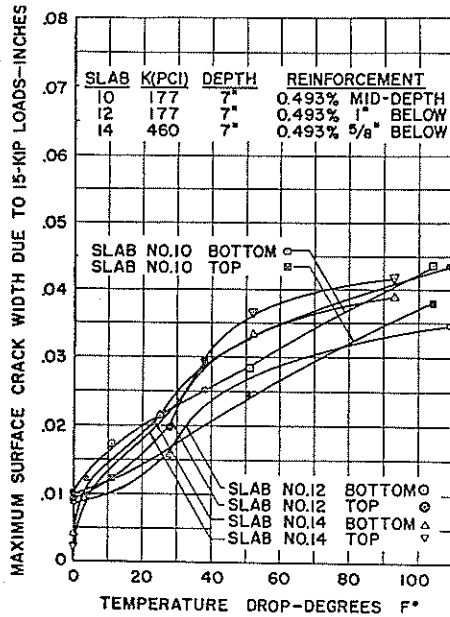
図-23 鉄筋の埋込深さ等が鉄筋応力、版の撓みおよびひびわれ巾におよぼす影響 45)



図—24 鉄筋の埋込み深さ等が版のひびわれにおける最大撓みと鉛直変位におよぼす影響 51)



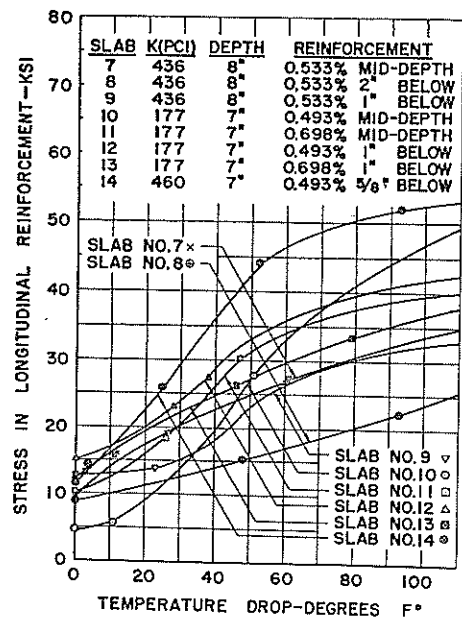
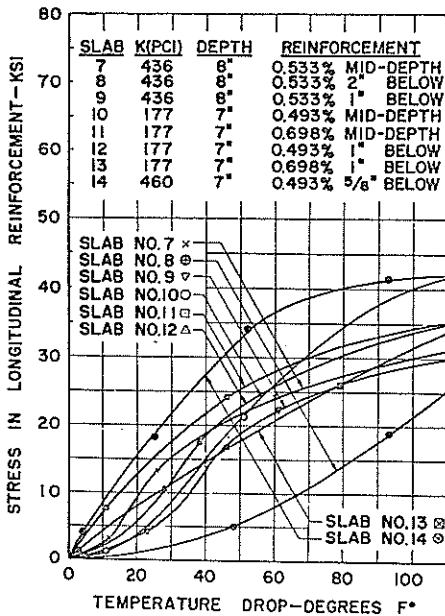
図—25 鉄筋の埋込み深さ等が版の上下面における最大ひびわれ巾におよぼす影響 51)



(A) Influence of controlled variables on maximum surface crack widths due to 15-kip wheel loads

(B) Influence of temperature drop and position of reinforcement on maximum surface crack widths due to 15-kip wheel loads

図一26 鉄筋の埋込み深さ等が版の上下面における最大ひびわれ巾におよぼす影響 51)



(A) Influence of controlled variables on stress in steel at cracks

(B) Influence of controlled variables on stress in steel at cracks due to 15-kip wheel loads

図一27 鉄筋の埋込み深さ等が縦方向鉄筋の応力におよぼす影響 51)

ばいずれによっても満足すべき結果が得られると云われており、⁴⁹⁾ 両者の間には実用上の相違はないと判断してよいであろう。

(2) 鉄筋の埋込み深さ

図-23は Gutzwiller と Walling が巾 90cm, 長さ 840 cm, 厚さ 20cm の模型床版を用いて行なった試験結果で、⁴⁵⁾ 鉄筋比を一定とし、その埋込み深さを変えた時の温度降下が鉄筋応力、版のたわみ、ひびわれ巾等におよぼす影響を調べたものである。地盤支持力係数は $K_{75} = 6.1 \sim 6.3 \text{ kg/cm}^3$ と一定である。図-24~27は図-23の試験と関連して行なわれたものであるが、版厚、鉄筋比、鉄筋の品質、地盤支持力係数等を表-8のように変えて、これらの要素と温度降下の影響を調べたものである。⁵¹⁾ これらの結果によれば、ひびわれ巾、版の撓み、鉄筋応力等は鉄筋の挿入位置によってもなかり変化し、ひびわれ巾や版の撓みに関しては鉄筋を版厚の中央付近ないしやや下方に挿入した場合が最も有利であり、鉄筋応力に関しては版中央ないし表面近くに挿入したものがほど大きく鉄筋がより有効に作用することが明瞭である。

一方、版の撓みは常に鉛直下方に生ずるとは限らず、荷重からある程度離れた所では上向きの撓みが生ずることも考えられ、版中央に配置した鉄筋は上下両方向の撓みに対して同等の抵抗力を有し、これはまた土の隆起による上向きの土圧に対して有利に作用すると考えられている。従って、鉄筋の挿入位置としては版厚の中央が最も適当と判断してよいであろう。

3.5 舗装版厚および路盤厚の影響

版厚および路盤厚を変えて、これがひびわれにおよぼす影響を検討した例としてはペンシルバニア州の試験舗装の場合が報告されている程度である。Witkoski と Shaffer によれば、³²⁾ 舗装版厚とひびわれ分布の間には明瞭な関係が認められ、表-9に示したように、版厚が厚くなるに依じてひびわれの平均間隔も増加する傾向を示している。また、路盤厚さの影響に関しては表-10のような結果が報告され、路盤厚さが 13~23cm の試験した範囲ではひびわれ頻度に実質的な相違は認め難い。このことは、路盤の支持力係数がある程度以上の場合にはコンクリート舗装版の載荷能力が路盤の支持力によって

表-8 Gutzwiller と Walling の RC 試験舗装版の特長 ⁵¹⁾

Slab No.	Thick-ness, in.	Deformed Bar Reinforcement	Percent Reinforce-ment	Depth of Reinforce-ment Below Top of slab, in.	Reinforce-ment Yield Point Stress, psi	Reinforce-ment Ultimate Strength, psi	Concrete Compressive Strength, psi	Subgrade Modulus "K" value, pci	Number of Cracks*
1	8	#4 at 9 in. o.c.**	0.278	4	57,300	94,600	4,800	155	4
2	8	#5 at 9 in. o.c.	0.430	4	56,300	97,500	5,200	155	3
3	8	#5 at 7 in. o.c.	0.533	4	56,300	97,500	4,270	155	6
4	8	#6 at 7 in. o.c.	0.768	4	55,800	97,600	4,730	155	6
5	8	#5 at 7 in. o.c.	0.533	6	69,500	104,400	5,960	155	3
6	8	#5 at 7 in. o.c.	0.533	5	69,500	104,400	3,500	155	4
7	8	#5 at 8 in. o.c.	0.533	4	75,800	126,000	5,285	436	5
8	8	#5 at 8 in. o.c.	0.533	6	75,800	126,000	5,650	436	3
9	8	#5 at 8 in. o.c.	0.533	5	75,800	126,000	4,050	436	3
10	7	#5 at 9 in. o.c.	0.493	3.5	73,000	120,200	5,440	177	6
11	7	#6 at 9 in. o.c.	0.698	3.5	75,200	115,300	5,280	177	6
12	7	#5 at 9 in. o.c.	0.493	4.5	73,000	120,200	4,000	177	8
13	7	#6 at 9 in. o.c.	0.698	4.5	75,200	115,300	4,540	177	7
14	7	#5 at 9 in. o.c.	0.493	4.12	73,000	120,200	4,750	460	6

* Number of full cracks in middle 15 ft of slab after testing to a simulated temperature drop of 90 F.

** o. c. denotes on center.

余り影響されないことと符合するものように思われる。

表一 9 舗装版厚がひびわれ分布におよぼす影響³²⁾

Pavement Thickness (in.)	Length of Section (ft)	Total No. Cracks	Avg. No. Cracks/100ft	Avg. Spacing Between Cracks (ft)
7	1,999	1,062	13.3	7.7
8	4,366	2,209	12.7	8.0
9	4,441	1,772	10.0	10.6

表一 10 路盤厚さがひびわれ分布におよぼす影響³²⁾

Pavement Thickness (in.)	Lane	Subbase Thickness (in.)	Number of Cracks	Cracks per 100ft
7	Eastbound outside	8.5	69	13.80
		8.0	73	18.25
		6.5	82	16.40
7	Eastbound inside	7.5	51	10.20
		8.0	57	14.25
		7.5	55	11.00
7	Westbound outside	7.5	55	11.00
		8.9	99	13.75
		7.9	76	15.20
7	Westbound inside	5.0	47	9.40
		6.0	50	12.50
		7.5	60	12.00
8	Eastbound outside	6.5	66	13.20
		8.5	49	12.25
		4.0	56	11.20
8	Eastbound inside	6.5	55	11.00
		8.0	48	12.00
		3.0	58	11.60
8	Westbound outside	9.0	64	12.80
		4.0	62	15.50
		7.5	66	13.20
8	Westbound inside	7.5	51	10.20
		4.0	47	11.75
		7.0	54	10.80
9	Eastbound outside	4.5	39	9.75
		8.0	23	4.60
9	Eastbound inside	3.5	44	11.00
		9.0	28	5.60
9	Westbound outside	8.0	59	11.80
		8.0	59	14.75
		4.0	56	11.20
9	Westbound inside	7.0	68	13.60
		7.5	41	10.25
		4.5	45	9.00

4. 鉄筋コンクリート舗装の応力解析

4.1 舗装版の応力解析

連続RC舗装に関する解析方法としては Vetter,⁵³⁾ Friberg,⁵⁴⁾ Yerlici⁵⁵⁾ 等によって代表される鉄筋応力に関する方法と、McCullough と Ledbetter^{27,28)} あるいは、Pickett^{57,58)} 等の提案する考え方、すなわち、版の応力解析には鉄筋の存在を無視して Westergaard の中央載荷公式を適用しようとする方法、および、ひびわれ部分では鉄筋がヒンジとして働くものと仮定し、RC舗装版をこのようなヒンジで結ばれた長さの短い版として解析する方法がある。⁵⁹⁾

第一の方法は後述するように、連続RC舗装における鉄筋はコンクリート舗装とは独立して作用し、内部応力のみを分担するとして鉄筋の応力を求める考え方であり、輪荷重に関しては何等言及していないがコンクリート版でこれを負担することを前提としているものと思われる。第二の方法は Zuk によって発展させられた方法で、舗装版はひびわれの間でのみ連続性を保ち、ひびわれにおいては部分的な連続性のみをもつとの仮定に立ち、その限りでは Westergaard の公式を適用するよりも理論的である。しかし、この解析方法に導入される多くの係数の効果を評価することは実際上極めて困難であって、現段階では実験研究における応力解析等の手法としては最も適当で、ひびわれ巾と間隔、鉄筋の深さと付着面積、輪荷重、そり、温度降下、乾燥収縮、クリープ、その他の各種の要因の研究には最大の適用性を発揮するが、実用性に欠けるといわれている。³⁴⁾

従って、連続RC舗装における版の解析に実用性をもつものは実際上 Westergaard の載荷公式が唯一のものといつてよい。

純理論的見地からすれば Westergaard の中央載荷公式はコンクリート版が隅角部をもたない無限の連続体であり、均一でかつ等方性の場合にのみ有効であって、実際の連続RC舗装版は少なくとも無数のひびわれを有し上記の条件を満足しないことは明らかである。しかし、実際の観点から見れば、ひびわれが十分に密閉され、ひびわれ部分においてもひびわれのない部分とほぼ同等の荷重伝達能力を有する限りでは連続性の目的は達せられ、事実、一般には連続舗装として容認されている。これは在来の連続RC舗装が一般に満足すべき状態にあることやひびわれ部分のコアの観察結果等によっても実証される。McCullough と Ledbetter はこのような考え方から、いわゆるLTS設計法として、鉄筋応力の解析に Vetter の方法を用い、版の解析に Westergaard の中

中央荷公式を用いる方法を提案している。

McCullough と Ledbetter 等の上述の考え方に対する批判論の主要な点は、密に発生したひびわれの存在と比較的高率の鉄筋の存在は、連続RC舗装をしてNC舗装とは全く異質のものとして挙動せしめるという、原則論に立つものである。⁵⁶⁾ また、Friberg は既往の連続RC舗装の破壊例について検討し、破壊例の多くが施工目地や巾の広いひびわれ等における隅角部ないし端部に集中している事実を指摘して、これらの個所では荷重伝達が不十分であり隅角部応力が支配的になるが故に版厚の決定には Westergaard の隅角部載荷公式を用いることを主張している。⁵⁶⁾ これらの批判はいずれも一応の根拠を有しているが、前者は余りにも原則論に拘泥し、後者は適切に設計施工された施工目地や大部分のひびわれはほぼ完全で満足すべき状態にある点を無視しており、いずれも十分な説得力をもつものとはいえない。

Pickett は Westergaard の理論が在来のNC舗装の設計に関して満足すべき結果を収めているとの考え方に基づいてその中央載荷公式を用いることを主張している。⁵⁷⁾ すなわち、連続RC舗装では連続鉄筋がコンクリートの連続性と、路盤、路床のより優れた保護機能を付与する故、NC舗装と比較して更に満足すべき結果が期待できると指摘し、更に、密にひびわれの発達せる連続RC舗装では隅角載荷の条件は存在しない故に隅角載荷公式を適用するのは全く不相当であり、中央載荷と縁部載荷の繰返しに関して適当と考えられる相対疲労係数の取方によっては、縁部公式が支配的な結果を与えることもであると注意している。⁵⁸⁾

たとえば、疲労を考慮して安全率を2として中央載荷公式を適用した場合と安全率を1.4として縁部載荷公式を適用した場合とではほぼ同じ版厚となる。空港舗装では自由縁部載荷はほとんんど起こり得ないが、縦目地に接する縁部載荷はかなりの頻度で起こり得る。しかしこの場合には縦目地はかなりの荷重伝達能力を有しており、たとえば、これを30%とすれば、安全率を1.4として縁部載荷公式を適用する場合の版厚は安全率を2として中央載荷公式を用いる場合のそれと全く同一となる。換言すれば、十分な荷重伝達能力を有する縦目地を設ける場合には公式適用上の実質的な相違は解消すると考えてよい。

以上を要約すれば、現時点における連続RC舗装における舗装版の応力解析の方法としては、これを均一で等方性の連続体と考えて Westergaard の中央載荷公式を適用する方法が最も実用的と思われる。

4.2 規則的な間隔でひびわれの発生せる RC 舗装版の W. Zuk による解析

(1) 基本的な考え方

4.1 で述べたように、連続RC舗装の解析においては鉄筋とコンクリート版はそれぞれ内部応力と荷重応力に対して独立して作用するとの考え方が支配的である。このような観点に関する限りでは同一の考え方に立っているが、Westergaard の中央載荷公式を適用する方法ではRC舗装版をひびわれにおける版の不連続性を無視して等方で均一な連続体と仮定するのに対し、本節で述べる W. Zuk の解析方法はひびわれの存在を認め、RC舗装版は隣接するひびわれの間では完全な連続性を保つが、ひびわれにおいては部分的な連続性のみを保つとする考え方に立脚している。

(2) 曲げモーメント

図-28(A)に示したように巾 l に比べてかなり狭い間隔 b でひびわれが密に発生した厚さ t 、巾 l の長大な版を想定し、ひびわれ間のコンクリートは等方性のものと考える。解析のためにこの区画を取出し、図-28(B)のような機構と力の釣合いを考え、次のような係数を導入すると、

K_1 ; 巾 b についての弾性地盤支持力係数

K_2 ; 縦方向鉄筋によって伝達される隣接区画による弾性拘束係数

K_3 ; 骨材の噛合係数 (一次的と仮定)

この区画版の微分方程式は次式の通りである。すなわち、

$$D \frac{d^4 y}{dx^4} + Ky = 0 \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、 $D = \frac{E_c b t^3}{12} \dots\dots\dots (4.2)$

$$K = K_1 + K_2 + K_3 \dots\dots\dots (4.3)$$

E_c ; コンクリートの弾性係数

y ; 撓み

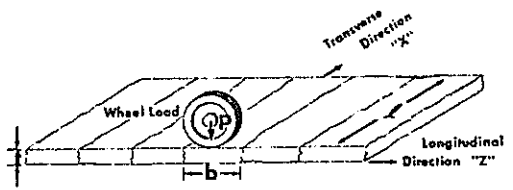
輪荷重は端部に載荷されて最大曲げモーメントを生ずる。版の重量を無視すると、(4.1) 式は

$$y = \frac{2P\beta}{K (\sinh^2 \beta l - \sin^2 \beta l)} [\sinh \beta l \cos \beta \cosh \beta (l-x) \times \sin \beta l \cosh \beta \cos \beta (l-x)] \dots\dots\dots (4.4)$$

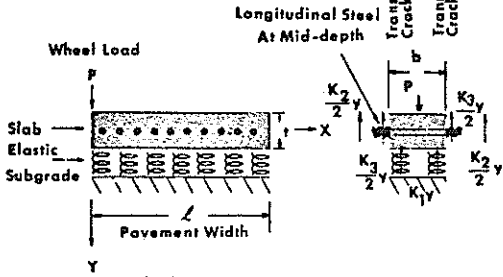
ここで、 $\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4D}} \dots\dots\dots (4.5)$

最大曲げモーメント $D \left[\frac{d^2 y}{dx^2} \right]_{\max}$ は端部付近で生じ、次式で与えられる。

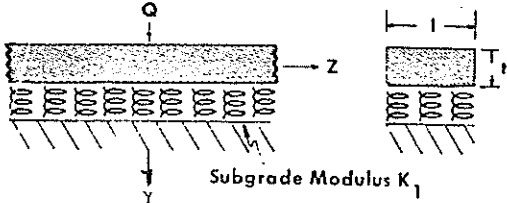
$$M_{\max} = 0.32 \frac{P}{\beta} \dots\dots\dots (4.6)$$



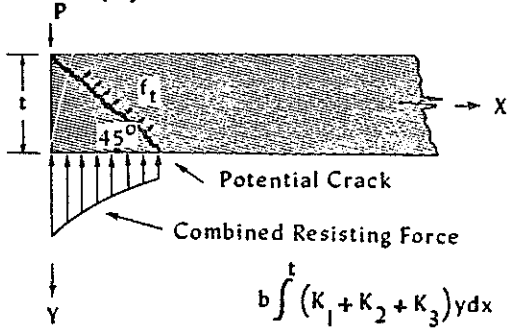
(A) Cracked continuously-reinforced pavement.



(B) Slab segment.



(C) Longitudinal strip.



(D) Diagonal tension.

図-28 William Zuk の連続 RC 舗装版の解析方法 59)

もし、曲げによってコンクリートにひびわれが生じないものと仮定すれば、単純な等方性ばりの理論から、

$$M_{\max} = \sigma_t \left[\frac{bt^2}{6} \right] \dots\dots\dots (4.7)$$

ここで、 σ_t はコンクリートの許容引張応力度である。(4.2) (4.3) (4.5) (4.7) 式から、

$$t = \left[\frac{4.526E_c P^4}{\sigma_t^4 b^3 (K_1 + K_2 + K_3)} \right]^{1/5} \dots\dots\dots (4.8)$$

地盤反力係数 K_1 は実験により求めることができる。骨材嚙み合わせ係数 K_3 は同様に実験により求め得る。現在ではこの値についての資料が乏しいが、ひびわれ巾に関する値と仮定してよい。また、安全側の値としての t を求めるには K_3 を無視してもよい。弾性拘束係数 K_2 の値は次の方法により半ば理論的に求め得る。すなわち、厚さ t で単位巾を有する縦方向に長い区画版を想定する。この版はひびわれがあるため等方性ではなく、これを図-28(C)のようなフリーボディと考えると、係数 K_2 は次式で与えられる。

$$K_2 = \frac{Q}{\delta q} \dots\dots\dots (4.9)$$

ここで、 Q は輪荷重であり、 δq は荷重 Q のときの撓みであって、 δq は次の微分方程式において

$$D_r \frac{d^4 y}{dz^4} + K_1' y = 0 \dots\dots\dots (4.10)$$

$z = 0$ のときの y として与えられる。すなわち、

$$\delta q = \frac{Q \beta l}{2 K_1'} \dots\dots\dots (4.11)$$

$$\text{ここで、} \beta = \sqrt[4]{\frac{K_1'}{4D_c}} \dots\dots\dots (4.12)$$

$$K_1' = \frac{K_1}{b} \dots\dots\dots (4.13)$$

$$D_r = \frac{E_r t^3}{12(1-\mu^2)} \dots\dots\dots (4.14)$$

(4.14) 式で μ はコンクリートのポアソン比で、 E_r はひびわれ断面の見かけ上の弾性係数である。舗装版の曲げ剛性は $D = E_c I$ であるが、ひびわれ断面においては、 $D_r = E_r I'$ となる。 I' はひびわれ断面における断面 2 次モーメントである。ここで I' を考える代わりに $I'I = \text{一定}$ と仮定してひびわれ断面の曲げ剛性はその弾性係数 E_c が変化したためと考えるものとし、これを E_r とおけば $D_r = E_r I$ となり、 D_r を D に対する比率で実験的に評価することにより見かけ上の E も決めることができる。(4.9)式に (4.11) ~ (4.14) 式を代入して

$$K_2 = \frac{2K_1'}{4\sqrt{\frac{K_1'}{4D_r}}} = \frac{2K_1}{b\sqrt{4bD_r}} \dots\dots\dots (4.15)$$

(9) せん断力

設計のためには、曲げモーメントに基づいて導かれた (4.8) 式を用いて版厚 t を得ることができ、これをせん断力もしくは斜引張力に対して検討する必要がある。図-28(A) と同じ版を考えると、端部に荷重 P を載荷するときせん断力は最大となる。ここで曲げ応力を無視すると、主要な力の作用は図-28(D) に示したようになり、 Y 方向の力の釣り合いから

$$P - b(K_1 + K_2 + K_3) \int_0^t y dx - b_t \sigma_t = 0 \quad \dots\dots(4.16)$$

従って、許容応力度 σ_t は次式によって与えられる。

$$\sigma_t = \frac{P}{b_t} - \frac{(K_1 + K_2 + K_3)}{t} \int_0^t y dx \quad \dots\dots(4.17)$$

ここで、 y の値は (4.4) 式から求め得るが、Timoshenko の "Strength of Materials II" や Seely と Smith の "Advanced Mechanics of Materials" 等の弾性床上の梁に関する曲線や数表等からも容易に得られる。

(5) 計算例

$E_c = 3,000,000$ psi (210,000kg/cm²), $\sigma_t = 90$ psi (6.3kg/cm²), $b = 6$ in (15cm), $P = 12,000$ lb (5.45ton), $K_1 = 10,000$ psi (700kg/cm²), $K_2 = 1,000$ psi (70kg/cm²), $E_r = 4,000$ psi (280kg/cm²), $\mu = 0.255$ と仮定する。

第1回の試的計算として $t = 6$ in (15cm) とすると、(4.15) 式から $K_2 = 12,200$ psi (854kg/cm²)、従って、曲げモーメントに基づいた t の値は (3.8) 式を用いて、 $t = 6.07$ in (≈ 15 cm) となる。(4.17) 式を用いて、この t について許容引張応力度 σ_t を検討すると、 $\sigma_t = 121$ psi (8.5kg/cm²) となり、 $\sigma_t = 90$ psi (6.3kg/cm²) を超過するので t が過少なことが分かる。(4.17) 式を用いて t の値を修正すると、許容引張応力度を満足する値として $t = 6.7$ in (17cm) が得られる。実際の設計では 6.7in を切上げて 7 in (18cm) に丸めるのが普通である。

4.3 版の摩擦抵抗を基にした鉄筋の応力計算

コンクリート舗装版のひびわれに対する用心鉄筋として鉄筋の挿入を計る考え方は現在においても NC 舗装における鉄網量の算定に用いられている。これは舗装版の容積変化によって水平変位を生ずる際、舗装版と路盤の間に摩擦力が働き、舗装版に引張力が作用するが、この引張力を鉄網で負担し、ひびわれの拡大を防止しようとする考え方である。すなわち、コンクリート舗装版は路盤に対し、相対的に変位することが前提となっている。

版の中心から自由端までの摩擦力の合計は、版の長さを L 、巾を B 、厚さを h 、単位重量を w 、摩擦係数を f とすると

$$F_1 = f \cdot w \cdot h \cdot \frac{L}{2} \cdot B \quad \dots\dots(4.18)$$

版に作用する引張力は、引張応力度を σ_t とすると、

$$F_2 = \sigma_t \cdot B \cdot h \quad \dots\dots(4.19)$$

$F_1 = F_2$ とおいて

$$\sigma_t = \frac{f w L}{2} \quad \dots\dots(4.20)$$

版が水平移動する場合、移動に対する抵抗力は版と路盤の摩擦力と共に、路盤のせん断力も加わるが、これを

含めて一般に摩擦抵抗としており、その係数を f で表わすと通常の場合 $f < 1$ である。ACI 325 委員会はこの f について多くの実験結果に基づいて次式を与えている。

$$f = \bar{u} \sqrt{\frac{a}{2.5}} \quad \dots\dots(4.21)$$

ここで、 a は版の移動量 (cm) で \bar{u} は路盤と版厚に関する係数で、2.5 ~ 7.0 の間の値となるが、実用上は $f = 1.5$ として安全側で満足すべき値とされている。⁶⁰⁾

そこで、 $f = 1.5$, $w = 2.4$ ton/m³ とすると、

$$\sigma_t = 0.18 L \text{ (kg/cm}^2\text{)} \text{ (ただし } L: \text{m)} \quad \dots\dots(4.22)$$

ひびわれ断面においては全引張力 F_1 を鉄筋のみで分担するので、鉄筋比を p 、鉄筋の引張応力度を σ_s とすれば、

$$\sigma_s \cdot p \cdot B \cdot h = f \cdot w \cdot h \cdot \frac{L}{2} \cdot B \quad \dots\dots(4.23)$$

$$\sigma_s = \frac{f w L}{2p} \text{ もしくは } p = \frac{f w L}{2\sigma_s} \quad \dots\dots(4.24)$$

σ_s として許容引張応力度を与えれば、所要の鉄筋比が求められる。

以上の考え方は、長さ L の舗装版にその水平変位に対する摩擦抵抗によって単一のひびわれが生ずることを前提としたものである。連続 RC 舗装においては長大な版の中央部が完全に拘束されること、あるいは最近の施工例では版端定着を施して中央部のみでなく長大な版全体の完全拘束を計ることは既述の通りであり、版の変位が完全に拘束される場合には摩擦抵抗も生じ得ず、従って、以上の考え方が連続 RC 舗装の縦方向鉄筋の計算に適用し得ないことは自明である。

しかし、連続 RC 舗装においても、横方向における変位は實際上拘束されず、また、實際上、この横方向変位に対する摩擦抵抗によって縦方向のひびわれの発生、ないし、縦目地の拡大が生ずる。従って、縦ひびわれの用心鉄筋および縦目地のタイバーの挿入は必要であり、その計算は縦目地におけるせん断力の伝達の点を除くと以上の考え方による。

4.4 完全拘束舗装版の C. P. Vetter の解析

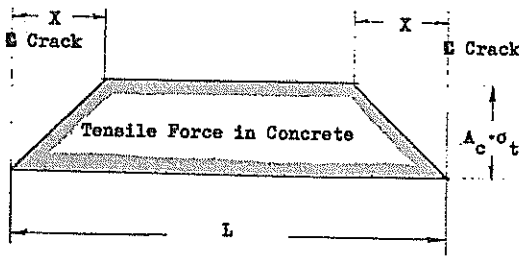
4.1 で述べたように Vetter の解析では鉄筋は内部応力のみを負担するとの前提に立っている。すなわち、Vetter は鉄筋コンクリートに収縮によるひびわれが発生する際、コンクリートと鉄筋の間に付着力が作用して鉄筋がコンクリートの収縮を拘束するため、コンクリートには引張力が作用することを示した。⁵³⁾ この結果、鉄筋はひびわれの近傍では引張力を、ひびわれ間の中央付近では圧縮力を受ける。ここで、付着力がひびわれの近傍では等分布し、ひびわれ間の中央付近では零であると仮

定し、鉄筋コンクリートに収縮ひびわれが発達しないという条件、すなわち、 $\epsilon_{sh}E_c \leq \sigma_t'$ 、から最小鉄筋比とひびわれ間隔を次のように導いている。

$$p = \frac{\sigma_t'}{\sigma_y + \epsilon_{sh}E_s - n\sigma_t'} \quad (4.25)$$

$$L = \frac{\sigma_t'^2}{np^2qu(\epsilon_{sh}E_c - \sigma_t')} \quad (4.26)$$

- ここで、 p ; 鉄筋比 = A_s/A_c
 ϵ_{sh} ; コンクリートの収縮ひずみ
 E_c ; コンクリートの弾性係数
 σ_t' ; コンクリートの引張強度
 σ_y ; 鉄筋の降伏点
 E_s ; 鉄筋の弾性係数
 n ; 鉄筋とコンクリートの弾性係数比 = E_s/E_c
 u ; コンクリートの付着応力度
 q ; 鉄筋の周長と断面積比 Σ_0/A_s



図—29 C. P. Vetter の解析方法⁵³⁾

このひびわれ間隔においてコンクリートに作用する力の分布を図—29のように考えると、付着の分布長 x とひびわれ巾 W_1 は、

$$x = \frac{A_c \sigma_t'}{u \Sigma_0} \quad (4.27)$$

$$W_1 = \epsilon_{sh} L - \frac{1}{E_c} \int_0^L \sigma_t dL \quad (4.28)$$

で与えられる。ここで、 σ_t はコンクリートの引張応力度である。(4.28) 式を積分すると、最小鉄筋比に対するひびわれ巾は次の通りである。

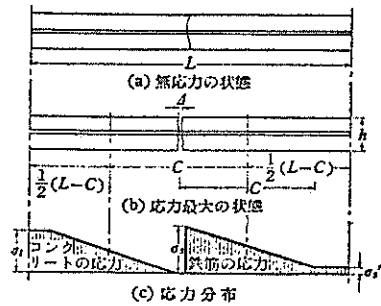
$$W_1 = \epsilon_{sh} L - \frac{\sigma_t'}{E_c} \left(L - \frac{A_c \sigma_t'}{u \Sigma_0} \right) \quad (4.29)$$

上式ではコンクリートの収縮のみを考慮したが、温度降下影響も同時に考慮する場合は (4.25)(4.26)(4.28)

(4.29) 式において ϵ_{sh} を $(\epsilon_{sh} - \alpha\theta)$ で置き換えればよい。ここで、 α 、 θ はそれぞれコンクリートの熱伝導係数と温度降下の範囲である。

4.5 完全拘束舗装版の B. F. Friberg の解析

Friberg は完全に拘束された舗装版の温度降下と乾燥



図—30 B. F. Friberg の解析方法 54)

収縮によるひびわれについて図—30に示した機構を想定し、以下に述べるような関係式を導いている。^{54,61)}

乾燥収縮に対しては

$$\sigma_s = (1 + np) \sigma_t \quad (4.30)$$

$$\frac{\sigma_s}{E_s} + \frac{n\sigma_t}{E_s} (L - C) = \epsilon_{sh} \frac{L - C}{1 + np} \quad (4.31)$$

ここで、 σ_t はひびわれから十分に離れた点におけるコンクリート引張応力度で、その他の記号は 4.4 で用いたものと同様である。ただし、 C は図—30に示したように、ひびわれ中心から付着応力が一定となるまでの区間の長さである。また、(4.30) 式はひびわれにおける全引張力がひびわれから十分に離れた所の全鉄筋引張力と全コンクリート引張力の和に等しいこと、(4.31) 式は鉄筋コンクリート版は全体として収縮しないこと、⁶²⁾ より求めたものである。

(4.30)、(4.31) 式から

$$\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_{sh} \cdot \frac{L - C}{C + npL} \quad (4.32)$$

$$\sigma_t = E_s \cdot \epsilon_{sh} \cdot p \cdot \frac{L - C}{(1 + np)(C + npL)} \quad (4.33)$$

同様に、温度降下に対しては (4.30)、(4.31) 式に相当する式として

$$\sigma_s = (1 + np) \sigma_t \quad (4.34)$$

$$\frac{\sigma_s}{E_s} - C + \frac{n\sigma_t}{E_s} (L - C) = \alpha\theta L \quad (4.35)$$

(4.34)、(4.35) 式より

$$\sigma_s = E_s \alpha \theta L \frac{1 + np}{C + npL} \quad (4.36)$$

$$\sigma_t = E_s p \alpha \theta L \frac{1}{C + npL} \quad (4.37)$$

(4.32) と (4.36) 式、(4.33) と (4.37) 式をそれぞれ重ね合わせると

$$\begin{aligned} \sigma_s &= E_s \epsilon_{sh} \frac{L - C}{C + npL} E_s + \alpha \theta L \frac{1 + np}{C + npL} \\ &= \frac{E_s}{C + npL} \left\{ \epsilon_{sh} (L - C) + \alpha \theta L (1 + np) \right\} \dots (4.38) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_t &= E_s \epsilon_{sh} p \frac{L-C}{(1+np)(C+npL)} + E_s p \alpha \theta L \frac{1}{C+npL} \\ &+ E_s \epsilon_{sh} \frac{p}{1+np} \dots\dots\dots(4.39') \\ &= \frac{E_s p L}{C+npL} (\epsilon_{sh} + \alpha \theta) \dots\dots\dots(4.39) \end{aligned}$$

(4.39') 式の右辺第3項は付着有効区間における収縮 $\epsilon_{sh}(L-C)/(1+np)$ によってコンクリートに生じた引張力である。

ひびわれ巾 W は見掛上の有効付着長さ C における鉄筋の伸びに等しいとおくと

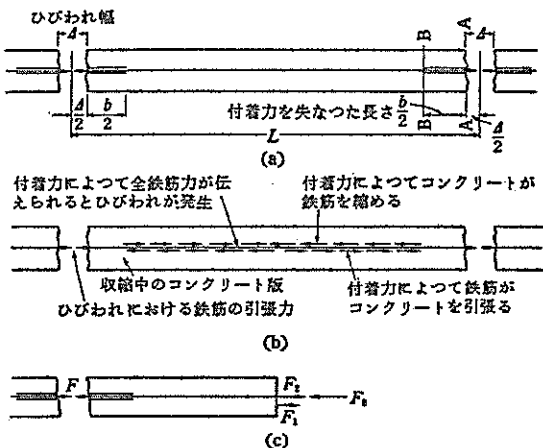
$$\begin{aligned} W &= \frac{\sigma_s}{E_s} C \\ &= \frac{C}{C+npL} \left\{ \epsilon_{sh}(L-C) + \alpha \theta L (1+np) \right\} \dots\dots\dots(4.40) \end{aligned}$$

以上に述べた Friberg の解析によれば σ_s, σ_t のいずれも C と L の関数となつて一義的には決まらない。実際には p が適当に大きければ σ_s が降伏点に達する以前に新たなひびわれが生じて L が短くなるが、一方、 L の最小限界が存在することも経験上知られており、実際の連続 RC 舗装版の挙動と一致する $C \sim L$ の関係が見出されることが望ましい。たとえば $C = 1/2 L$ とおくと (4.39),

(4.40) 式より

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_t}{E_s(\epsilon_{sh} + \alpha \theta) - n \sigma_t} \\ W &= \frac{L}{2(1+2np)} \left\{ \epsilon_{sh} + 2\alpha \theta (1+np) \right\} \end{aligned}$$

これを前節の Vetter の式と比較すると著しい相違が認められる。



図—31 V. A. Yerlici の解析方法 55)

4.6 完全拘束舗装版の V. A. Yerlici の解析

Vedat A. Yerlici は図—31のようなひびわれ機構と力

の釣合いを考え、版長は変化しないという幾何学的条件⁶²⁾ からひびわれ間隔と鉄筋断面積および周長を求める式を導いた。⁵⁵⁾ すなわち、

$$\epsilon_{sh} L + \alpha \theta L = W + \frac{\sigma_t' b}{2E_c} (L - b) \dots\dots\dots(4.41)$$

ここで、 b は鉄筋とコンクリート間で付着力がなくなった長さであり、 W はコンクリートの最大許容ひびわれ巾、 L は舗装版における最大可能ひびわれ間隔である。これから、ひびわれ間隔 L は次式で与えられる。

$$L = \frac{W - \frac{\sigma_t' b}{2E_c}}{\epsilon_{sh} + \alpha \theta - \frac{\sigma_t'}{2E_c}} \dots\dots\dots(4.42)$$

ここで、長さ b が一般に小さく無視し得る程度であることは、たとえば単純な引張力を受ける RC 部材の実験等によって明らかにされている。¹²⁾ そこで b を無視すると (4.42) は次のように書き換えられる。

$$L = \frac{E_c W}{E_c (\epsilon_{sh} + \alpha \theta) - \sigma_t'} \dots\dots\dots(4.42')$$

F をひびわれにおいて鉄筋が受持つ全引張力、 F_1 をコンクリートの全引張力、 F_2 を鉄筋自身の収縮によって鉄筋に生じた全引張力、 F_3 をコンクリートの収縮によって生ずる鉄筋の全圧縮力とすれば、

$$F = p A_c \sigma_s \dots\dots\dots(4.43)$$

$$F_1 = A_c \sigma_t \dots\dots\dots(4.44)$$

$$F_2 = \alpha \theta p A_c E_s \dots\dots\dots(4.45)$$

$$F_3 = \sigma_s' p A_c \dots\dots\dots(4.46)$$

ひびわれから離れた所の鉄筋とコンクリートのひずみは等しいから、

$$\frac{\sigma_s'}{E_s} = \epsilon_{sh} \frac{\sigma_t'}{E_c} \dots\dots\dots(4.47)$$

(4.46), (4.47) 式から

$$F_3 = (\epsilon_{sh} E_s - n \sigma_t') p A_c \dots\dots\dots(4.48)$$

これらの条件を釣合いの条件式 (4.49) に代入して p を求めると、

$$F = F_1 + F_2 - F_3 \dots\dots\dots(4.49)$$

$$p = \frac{\sigma_t'}{\sigma_s + E_s (\epsilon_{sh} - \alpha \theta) - n \sigma_t'} \dots\dots\dots(4.50)$$

また、鉄筋の全周長の必要量 Σ_0 は付着強さから求められる。

$$\Sigma_0 = \frac{A_c \sigma_t'}{uL} \dots\dots\dots(4.51)$$

結局 (4.50) 式は Vetter の解析における (4.25) 式と全く同一である。上述の Yerlici の解析における難点の一つは付着応力が等分布すると仮定していることである。^{61,63)} コンクリートに埋込まれた鉄筋が引張力を受ける場合の付着応力の分布は実験的に解明され、ひびわ

れ端付近で最大で、ひびわれ間の中央で零となることが確かめられている。¹²⁾しかし、応力解析や設計等の実用上の目的のためにはこれを正確な分布状態で示す必要はなく、たとえば、ひびわれ端で最大、ひびわれ間の中央で最小になるように直線的に変化するものと仮定しても差支えない。⁴⁶⁾

Yerlici に限らず、Vetter, Friberg 等もひびわれについて、その巾と分布間隔が相互に相関性を有することを示している。舗装版の設計々算ないし応力解析においてはその一方ないし両方が他の設計要素との関連で、極限状態の値(ひびわれの最大巾と最小分布間隔)が得られることが望ましい。3. で述べたように、試験舗装等における観測結果は、 W_{max} と L_{min} が鉄筋比、鉄筋直径、コンクリートの付着強度と付着応力の分布状態、コンクリートの引張強度、版の温度変化と乾燥収縮の程度、等の設計条件によってほぼ一定の値に近づくことを示している。たとえば Yerlici はその数値計算例において $W_{max}=0.02\text{ in (}0.5\text{ mm)}$ とすることを提案しているが、このような値についてもかなりの異論があるのが実状で、^{61,63)} W_{max} ないし L_{min} の式は実用化以前の段階にあると云えよう。

5. 鉄筋コンクリート舗装の設計

5.1 路盤

初期の連続RC舗装は、特に1930年代から1940年代に設けられた試験舗装の場合には、当時のコンクリート舗装一般がそうであったように、路床土の上に直接建設されたものが多かった。しかし、一般のコンクリート舗装に対するポンピングの悪影響が認識され、粒状材料の路盤が設けられるようになってからは、連続RC舗装にもほぼ同様に厚さ7.5~15cmの路盤がポンピング防止のために設けられるようになり、路盤材料として、たとえばNo. 200ふるいを通す量を10%以下のように規定した例が多い。³⁵⁾

軟弱な路盤が推奨し難いのは当然ではあるが、連続RC舗装は地盤の軟弱さに関連した悪影響を受ける度合は比較的少ない。これは密に発生せるひびわれが舗装版の延長方向の撓性を増加し、更に、連続鉄筋の存在がひびわれを十分に密閉して、個々のひびわれ区間における鉛直方向の有害な沈下を防止するからである。

このような観点から、路盤支持力係数 $K_{75}=100\text{ pci (}2.8\text{ kg/cm}^3\text{)}$ 程度の軟弱な路盤上に舗装された施工例や、 $K_{75}=150\text{ pci (}4.2\text{ kg/cm}^3\text{)}$ 程度で満足すべき結果の得られた試験舗装もあるが、一般にはNC舗装の場合と同程

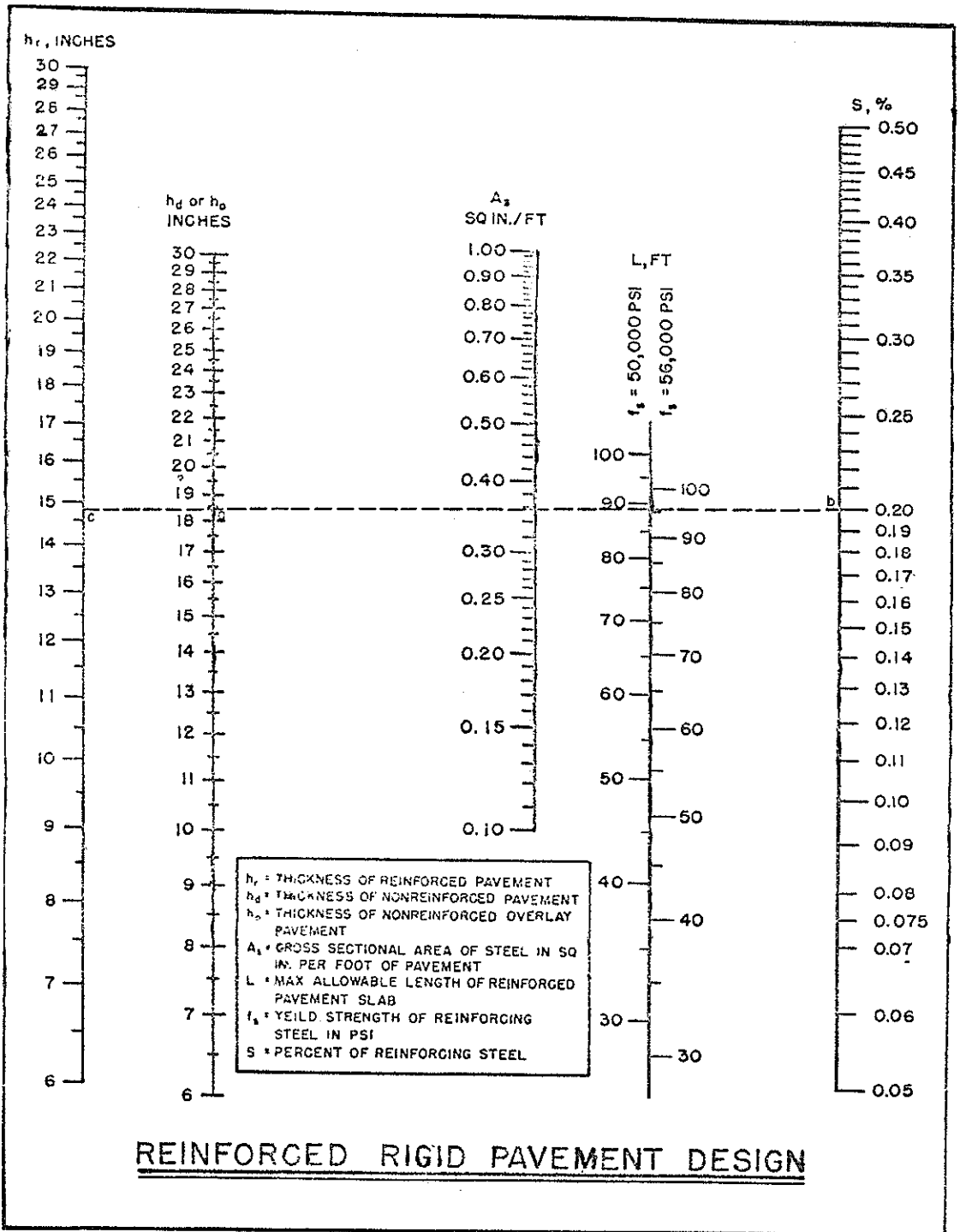
度の路盤を設けている例が多い。路盤条件が不良なことが主因となってRC舗装が著しく損傷し全面的な再舗装を必要とした例⁶⁴⁾もあるので、連続RC舗装の連続性を強調する余り、路盤の支持力を過少評価することは避けるべきであろう。従って、路盤の支持力係数は、たとえばACI 325委員会のコンクリート舗装設計指針⁶⁵⁾などの推奨するように $K_{75}=200\text{ pci (}5.6\text{ kg/cm}^3\text{)}$ 程度以上とするのが実際的と思われる。

5.2 舗装版の厚さ

4.1 で詳述せるように、現時点では舗装版の応力解析には Westergaard の中央載荷公式を適用するのが支配的であり、かつ実際的と思われる。しかし、道路舗装における実際の設計では、適当な値の安全率を念頭に置いて Westergaard の中央載荷公式を用いて求めた版厚より1~2in(2.5~5cm)減じたものをRC舗装の設計厚さとしたものが多く、竹下、岩岡等もこのような経験的な面を考慮してNC舗装としての厚さより10~20%減ずることを提案している。³⁾以上の半経験的方法の根拠は必ずしも明確ではないが、“RC舗装では内部応力は鉄筋が分担するためコンクリート版の設計では荷重応力のみを考慮し、内部応力と荷重応力の組合わせを考慮する必要がなく、従って安全率を実際的な範囲で低下してもよい”とする考え方によるものであろう。

上述の版厚の経験的減少を鉄筋比と関連づけて明確に規定した方法としては、米国防軍工兵隊の空港剛性舗装設計施工規準⁶⁶⁾が挙げられる。この方法は米国防軍基地における試験舗装による広汎な現場実験と施工実績^{67~73)}に基づいた全く経験的方法であって、NC舗装と関連づけた点が唯一の理論的な点と云われている。⁷⁴⁾この方法によれば、図-32に示した計算図表を用い、NC舗装として理論的にないし他の計算図表(“無筋コンクリート舗装に関する調査研究”参照)を用いて求めた版厚を鉄筋比0.05~0.5%の間で鉄筋比に応じて減少することが許容され、減少率は、たとえば鉄筋比0.05と0.5%に対してはそれぞれ0%と30%である。

米国防軍工兵隊の設計方法の難点は、この方法におけるRC舗装は緻密な意味での連続RC舗装ではないことである。すなわち、この方法では膨脹目地と収縮目地を適当な間隔で設け、鉄筋は目地部分で一応不連続となり、これを相当量のタイバーないしスリッパーで接続する方式を採用している。換言すれば、鉄筋は内部応力に対して設計されたものではなく、3.3に述べたようなひびわれに対する用心鉄筋としての役割をもつものとして挿入されており、⁷⁴⁾その結果として、版は荷重応力だけでなく内部応力をも負担することになる。ただし、実



図—32 米陸軍工兵隊の方法における RC 舗装版厚の計算図表 (66)

際的设计々算では内部応力は無視されている。従って、本方法における版厚減少と連続RC舗装における版厚減少とは同列に論ずることはできないが、版の応力度としては前者の方がより大きく、かつ、版厚減少率も大きいにも拘わらず、経験的に実用化されている点は空港舗装としての連続RC舗装における版厚減少の考え方を支持するものと云えよう。

McCullough と Ledbetter はそのLTS設計法⁷⁾で版厚減少の根拠として鉄筋の換算断面に相当する厚さの減少を提案している。すなわち、NC舗装としての厚さを d とすると、単位巾当りの鉄筋の換算断面は、 $d' = pnd$ で与えられ、設計版厚としては

$$h = d - d' = (n - 1)pd \dots\dots\dots (5.1)$$

とする。仮に $n = 10$, $p = 0.5\%$ とすると、 $d'/d = 5\%$ となって、NC舗装厚の5%だけ減少することになる。この方法では、RC舗装の鉄筋が一般のRC部材の鉄筋に相当する作用を果すものと想定しているが、實際上、荷重応力に対してそのように作用し得ないことは明白である。また、この方法による版厚の減少率も経験的に確かめられている減少率に比べて過少である。従って、LTS設計法における版厚設計法は十分な説得力を持つ方法とは云い難い。

以上を要約すれば、連続RC舗装における版厚的设计々算法としては、NC舗装と仮定して適当な安全率をもつように Westergaard の中央載荷公式を用いて版厚 h_n を求め、この h_n の90~80%を以て連続RC舗装の設計版厚 h とするのが最も実際のなように思われる。また、この計算に用いる Westergaard の中央載荷公式としては目地を有する在来のNC舗装を用いた実験結果に基づく修正式⁷⁵⁾よりも理論式⁴²⁾から導いた値が実験値とよく適合すると云われている。^{76~78)}

〔理論式〕

$$\sigma_i = \frac{3(1+\mu)p}{2\pi h^2} \left(\log_0 \frac{l}{b} + 0.6159 \right) \dots\dots (5.2)$$

$$\sigma_i = 1.1(1+\mu) \frac{p}{h^2} \left(\log_{10} \frac{l}{b} + 0.2676 \right) \dots\dots (5.2')$$

$$a > 1.724h \text{ のとき } b = a \dots\dots\dots (5.3)$$

$$a < 1.724h \text{ のとき } b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h \dots\dots\dots (5.4)$$

仮に $E = 3,000,000$ psi, $\mu = 0.15$ とし、(5.5)式で与えられる l を代入すると、

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}} \dots\dots\dots (5.5)$$

$$\sigma_i = 0.3162 \frac{p}{h^2} (\log_{10}(h^3) - 4\log_{10}b - \log_{10}k + 6.478) \dots\dots\dots (5.6)$$

〔修正式〕

$$\sigma_i = 1.1(1+\mu) \frac{p}{h^2} \left[\log_{10} \left(\frac{h}{b} \right) + \frac{1}{3} \log_{10} \left(\frac{E}{K} \right) - 0.302 \right] \dots\dots\dots (5.7)$$

ここで、 p ; 荷重

a ; p が等分布すると円形載荷面積の半径

σ_i ; p の直下の版の下側における最大引張応力度

h ; 版厚

b ; (5.3) もしくは (5.4) 式で与えられる仮想円半径

E ; コンクリートの弾性係数

μ ; コンクリートのポアソン比

l ; (5.5) 式で与えられる剛比半径

$$k ; \text{地盤剛性係数} = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)l^3} = kl$$

5.3 縦方向鉄筋

連続RC舗装ではひびわれの発生原因として内部応力の外に荷重応力が加わることも考えられるが、経験上、内部応力が主要原因であって、荷重応力は二次的な影響しかもたないことが確かめられている。⁷⁶⁾ しかしながら、ひびわれ部においては輪荷重はより大きいせん断力を生ぜしめ、たとえば、イリノイ州のある連続RC舗装では交通開放後約9年経て、輪荷重によるせん断力が主因となって、ひびわれ部で破壊した例が報告されており、十分な鉄筋を挿入してひびわれの拡大を防ぎ、粗骨材の噛み合わせを保つことが重要である。

従って、連続RC舗装の縦方向鉄筋の設計基準となるものは、ひびわれ巾が拡大し、あるいはひびわれ部の鉄筋が降伏する以前に新しいひびわれが発生するような鉄筋量を求めることで、次のような条件を前提とする。

- (1) 鉄筋とコンクリートは独立して作用し、コンクリートは荷重応力を負担し、鉄筋は版の容積変化を拘束することから生ずる内部応力を負担する。
- (2) 版は完全に拘束され、ひびわれが生じても版の縦方向における容積変化は生じない。
- (3) ひびわれ間には十分な距離があって、コンクリートと鉄筋の間の付着応力は十分に発達する。
- (4) 鉄筋とコンクリートの熱膨張係数は同等である。
- (5) 容積変化の拘束によって生じた力は全部鉄筋とコンクリートによって伝えられる。
- (6) 付着応力は一定ないし、有効付着長さに亘って直線的に変化するものと仮定する。

3. で述べたように、鉄筋の解析方法として Vetter, Friberg, Yerlici 等がそれぞれの方法を提案し、また McCullough と Ledbetter は設計法を提案しており、これ

らは、上述の(1)~(4)の条件を前提とする点では共通しているが、これらに基づいた鉄筋比の算定式は必ずしも一致せず、またこれらの算定式の理論的評価は未だ定説化していない。³⁴⁾ これらの算定式を列挙すると次の通りである。

〔Vetter の式〕

$$p_1 = \frac{\sigma_t'}{\sigma_y + E_s (\epsilon_{sh} - \alpha\theta) - n\sigma_t'} \dots\dots\dots (5.8)$$

〔Friberg の式, ただし, $C=1/2L$ とした場合〕

$$p_2 = \frac{0.5\sigma_t}{E_s (\epsilon_{sh} + \alpha\theta) - n\sigma_t} \dots\dots\dots (5.9)$$

$$p_3 = \frac{0.5 (E_s \epsilon_{sh} - \sigma_s)}{n (\sigma_s - E_s \alpha\theta)} \dots\dots\dots (5.10)$$

〔Yerlici の式〕

$$p_4 = \frac{\sigma_t'}{\sigma_s + E_s (\epsilon_{sh} - \alpha\theta) - n\sigma_t'} \dots\dots\dots (5.11)$$

〔McCullough と Ledbetter の式〕

$$p_5 = \frac{\sigma_t'}{\sigma_y + E_s \epsilon_{sh} - n\sigma_t'} \dots\dots\dots (5.12)$$

$$p_6 = \frac{0.5\sigma_t'}{(\sigma_y - E_s \alpha\theta)} \dots\dots\dots (5.13)$$

$$p_7 = \frac{\sigma_t'}{\sigma_y - n\sigma_t'} \dots\dots\dots (5.14)$$

$$p_8 = \frac{\sigma_t'}{\sigma_y} \dots\dots\dots (5.15)$$

(5.9)~(5.11) 式において、鉄筋の降伏と新しいひびわれの発生とが同時に起るとは限らないが、限界値を与える条件として $\sigma_s = \sigma_y$, $\sigma_t = \sigma_t'$ を代入すると、他の式とほぼ同一の条件で比較できる。また、McCullough 等は (5.12)~(5.15) 式のうち、最も大きい値の p を以て設計鉄筋比とすることを提案している。これは図-33に示したようなひびわれ機構と応力分布を考へて、乾燥収縮、温度変化、鉄筋降伏前の新しいひびわれの発生、等を調整するに必要な最少鉄筋比をそれぞれ別途に求めたもので、Vetter の解析を基にしたものである。

〔数値計算による比較〕

(5.8)~(5.15) 式を比較するために数値計算を行なうと表-11が得られる。ただし、コンクリートおよび鉄筋に関する諸定数は次のように仮定した。

- $E_c = 280,000 \text{ kg/cm}^2$
- $E_s = 2,100,000 \text{ kg/cm}^2$
- $n = E_s/E_c = 7.5$
- $\epsilon_{sh} = 15 \times 10^{-5}$
- $\alpha = 1 \times 10^{-5} \text{ deg}^{-1}$
- $\theta = 30 \text{ deg}$
- $\sigma_t' = 30 \text{ kg/cm}^2$
- $\sigma_y = 3,000, 4,000 \text{ kg/cm}^2$

表-11の計算例は上記のような特定の諸定数を用いた場合ではあるが、Friberg の (5.9) 式による値は実用的な範囲を越えて過大であり、(5.10) 式は負の値を与えていずれも実用性を欠くことが明らかである。また、Vetter の (5.8) 式ないし Yerlici の (5.11) 式は経験的に確かめられている値 $p_{min} \geq 0.6\%$ を約15%上廻った鉄筋比を与える。結局、数値計算の結果による限りでは McCullough 等の提案する方法が最も実用的な鉄筋比を与えるもののようである。

表-11の第4欄は $\sigma_y = 3,000 \text{ kg/cm}^2$ の場合と $\sigma_y = 4,000 \text{ kg/cm}^2$ の場合の鉄筋比の比を示したもので、後者は前者の71~75%の鉄筋量で十分であり、降伏点の高い鉄筋程有利なことを示している。

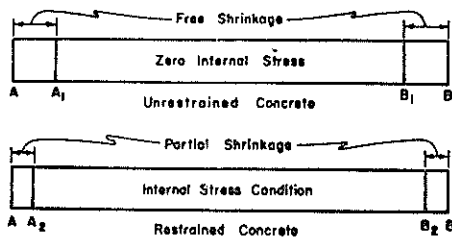
以上の数値計算例から明らかなように計算式による値は試験舗装や施工実績における経験から判断する限りでは概して過大である。この点に関して ACI 325 委員会報告³⁴⁾ は次のように述べている。『鉄筋としては鉄網 (Welded Wire Fabric)、異形鉄筋網 (Deformed Bar Mat) もしくは場所組立ての異形鉄筋 (Deformed Bar) のいずれでもよい。これら3種の鉄筋は各種の舗装工事に用いられており、適切な方法によって容易に設置することができる。この形式の如何によらず、鉄筋はその降伏点か少なくとも、 $4,200 \text{ kg/cm}^2$ 以上のものであることが望ましい。縦方向の最小鉄筋比に関しては、現時点では版断面積の0.6%とすることに意見が一致した。

所要の連続鉄筋の全引張力の上記の最小基準は一般の供用条件に関して明らかに満足すべきものではあるが、この所要量に影響する各種の要因に関する合理的設計理論が発展して経済性を増加することが期待されている。連続鉄筋の所要量に影響する一つの要因としてひびわれ発生時の版の引張強度が挙げられ、他の主要な要因として鉄筋の付着抵抗が考えられる。多くの施工例で、鉄網と異形鉄筋を用いその鉄筋量を変えて付着の影響を比較することが実施されており、カリフォルニア州の工事では、降伏時の全引張力を同等として鉄筋比と降伏点を変えて付着の効果を試験し、メリーランド州の工事では全引張力を同等として、縦方向鉄筋の直径を変えてその効果を比較している。

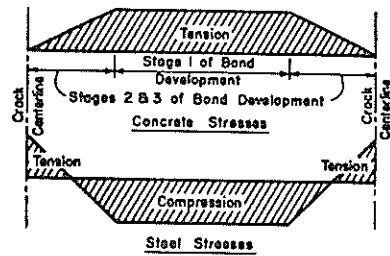
もし、コンクリート版を瀝青表層の基層として用いるならば、コンクリートの強度を下げられる可能性がある。テキサス州の工事では早くからこの条件を連続鉄筋とコンクリートの引張強度の減少に利用しており、現在の所その結果は所期の成果を挙げている。』

5.4 横方向鉄筋

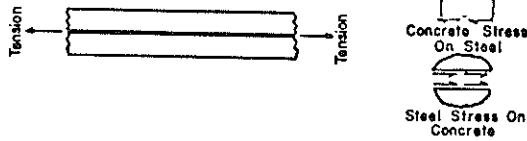
従来提案されている解析法ないし設計法で横方向鉄筋



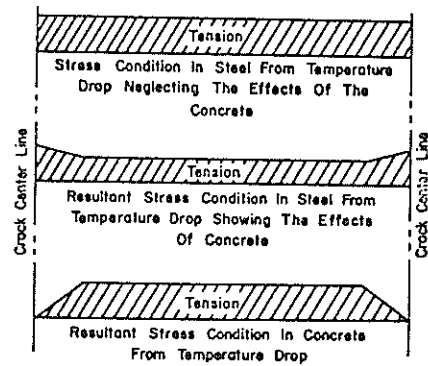
(A) —EFFECT OF SHRINKAGE ON A PORTION OF CONCRETE PAVEMENT BETWEEN CRACKS



(B) —STRESS DISTRIBUTION BETWEEN CRACKS IN A CONCRETE PAVEMENT FOR AN INTERNAL STRESS CONDITION RESULTING FROM RESTRAINED SHRINKAGE



(C) —STRESS VARIATIONS BETWEEN CONCRETE AND STEEL IN A PAVEMENT RESULTING FROM TEMPERATURE STRESSES



(D) —STRESS CONDITION IN THE STEEL AND THE CONCRETE RESULTING FROM TEMPERATURE STRESSES

図—33 McCullough と Ledbetter の LTS 設計法におけるひびわれ機構の考え方 27)

表—11 各種の計算式による所要縦方向鉄筋比の比較

Formula	$\sigma_y = 3,000 \text{ kg/cm}^2$		$\sigma_y = 4,000 \text{ kg/cm}^2$	(II)/(I) (%)
	(I)	(II)	(II)	
Vetter (1)	1.22	0.87	0.87	71
Friberg (2)	2.08	2.08	2.08	100
Friberg (3)	—	—	—	—
Yerlici (4)	1.22	0.87	0.87	71
LTS Design (5)	0.97	0.73	0.73	75
LTS Design (6)	0.63	0.45	0.45	71
LTS Design (7)	1.08	0.79	0.79	73
LTS Design (8)	1.00	0.75	0.75	75

の量に言及した例は見当らない。長大な連続RC舗装でも横方向にも容積変化が一般に拘束されていない点を考慮すると、横方向鉄筋の算定根拠としては4.3に述べたような、ひびわれに対する用心鉄筋と考え、次式を用いるのが適当であろう。すなわち、

$$p = \frac{fwL}{2\sigma_s} \dots\dots\dots(5.16)$$

たとえば、 $f=1.5$ 、 $w=2.4\text{ton/m}^3$ 、 $L=500\text{cm}$ 、とし、鉄筋としてはSD30を用い、 $\sigma_{sa}=1,800\text{kg/cm}^2$ とすれば、

$$p = \frac{1.5 \times 2.4 \times 10^{-3} \times 500}{2 \times 1,800} \times 100 = 0.05\%$$

これを縦方向筋の最小鉄筋比と比較すると $1/12$ である。実際の施工例では $1/5 \sim 1/10$ の場合が多い。我が国のNC道路舗装の場合、経験的に 3kg/m^2 の鉄網の挿入が必要とされているが、これは $\phi 6\text{mm}$ の丸鋼を用いたとして、版厚 25cm の場合で 0.079% 、版厚 23cm の場合で 0.086% に相当する鉄筋量である。従って、空港舗装においても横方向鉄筋として少なくとも縦方向鉄筋比の $1/10$ 以上ないし 0.08% 程度以上とすることが必要であろう。

5.5 版の長さの制約

連続RC舗装においては版の長さに関する制限は基本的に存在せず、施工目地の挿入によって版長を無限に延長できるのが本舗装の特長である。しかし、実際の施工条件の下では舗装長は有限であって、この点から版長にある種の制約が加わる。すなわち、4.で述べたように、連続RC舗装の理論的根拠は舗装版が路盤に対して相対的に変位を生じないことにある。路盤上に単純に舗設せる場合には版端の $120 \sim 150\text{m}$ が変位することが確かめられており、上述の連続RC舗装の前提条件を厳密に満足する部分はこの両端部を除く中央部分である。従って、連続RC舗装の最小長さとしてはこの中央部分の長さが両端部の変位可能な部分の長さに匹敵するようなものであることが必要で、これより最小長さは $360 \sim 450\text{m}$ と云われている。

以上は舗装版を路盤上に単純に舗設した場合の条件であるが、仮に端部の路盤に対する相対的な変位を何等かの方法で拘束する場合には舗装版の全長が拘束版として作用することになる。2.で述べたように、1930~1940年代の連続RC舗装から版端目地付近が最大の弱点であることが経験的に確かめられ、以来これを除去するため連続版の端部を路盤に固定する版端定着が行なわれている。もちろん、滑走路や誘導路の全長を連続RC舗装とする場合のように、版端部において既設舗装や他の構造物と接せず、かつ航空機の走行も行なわれない部分では、このような版端定着を必要としないことは明白である。

なお、米国陸軍工兵隊の設計法では後述のように、版長についてその最大長を制限し、適当な間隔で膨脹目地を挿入することを規定している。これは5.2で言及したように、本設計法で規定するRC舗装が連続RC舗装とは多少異なる所から由来するものであり、上述の規定は連続RC舗装については意味がないことを付記する。

5.6 施工目地と縦目地

(1) 施工目地

施工目地は突合わせ目地とし、連続鉄筋を十分に延長して重ね合わせるか、もしくは連続鉄筋は目地で縁を切り、タイバーを挿入する。タイバーの断面積は縦方向鉄筋と同量とし、重ね合わせの長さは付着に必要な長さで決まり次式で計算する。

$$\frac{l}{2} = \frac{D\sigma_{sa}}{4\tau_{on}} \dots\dots\dots(5.17)$$

ここで、 l ; タイバーの長さ (cm)

D ; タイバーの直径 (cm)

σ_{sa} ; 鉄筋の許容応力度 (kg/cm^2)

τ_{on} ; コンクリートの許容付着応力度 (kg/cm^2)

施工目地に噛合わせ目地を用いるのは後述の理由により好ましくない。施工目地にタイバーを挿入し、あるいは連続鉄筋を延長するのは目地の拡大を防ぐため、荷重伝達の機能は考慮されていないのが普通である。一方、目地部では骨材の噛合いを欠くため、輪荷重の走行時には相当の荷重がタイバーないし連続鉄筋に作用し過負荷となる可能性がある。初期の連続RC舗装で施工目地が弱点となったのはこのような理由にもよるものと推定され、十分な鉄筋を挿入して補強することが望ましい。竹下、岩間等も同様の見解を述べ、荷重伝達可能なタイバー、すなわち、スリップバーとして計算した鉄筋をタイバーとして使用する方法を提案しており、³⁾ 極めて実際的な考え方として推奨し度い。

(2) 縦目地

縦目地は突合わせ目地とし、タイバーを挿入する。従来の空港舗装では縦目地に噛合わせ目地が用いられた例が多いが、その機能に疑問があり、弱点となることが多いのでその適用は避けるのがよい。道路舗装においては縦目地に用いるタイバーの設計では、荷重の伝達は考慮せず、目地中の拡大を防ぐに必要な鉄筋として(5.18)式で算定したものが一般に用いられている。

$$A_s = \frac{fwLh}{\sigma_{sa}} \dots\dots\dots(5.18)$$

ここで、 f ; 摩擦係数1.5

w ; コンクリートの単位容積重量
 $2.4 \times 10^{-3} (\text{kg/cm}^3)$

L ; 版巾 (cm)

h ; 版厚 (cm)

A_s ; 縦目地の長さ 1 m 当りのタイバーの断面積 (cm²)

しかし、空港舗装では車線区分がないため縦目地縁部載荷の頻度は割合大きく、かつ、縦目地は相当の荷重伝達能力をもつものとして版厚の設計に中央載荷公式を用いている。従って、空港舗装では縦目地に用いるタイバーは (5.18) 式の条件を満足すると共に、荷重伝達に必要な条件すなわち、スリッパーとしての所要断面をも満足するものでなければならない。スリッパーの断面の設計については、次節(2)を参照。また長さについては (5.17) 式で計算する。

(3) 嚙合わせ目地について

従来より縦目地や膨張目地に嚙合わせ目地が用いられているが、空港の試験舗装を用いた載荷試験結果によれば、嚙合わせ目地は他の目地構造に比較して弱いことが明らかにされている。⁷⁹⁾ すなわち、嚙合わせ目地部分のコンクリートが崩落し、嚙合わせの嵌合部が欠け落ちる例が多かった (例えば、千歳空港誘導路防衛庁 供用部分、1967年調査)。

これは温度変化ないし乾燥収縮によって版がその場合に突出部 (Key) と嵌合部 (Key-way) との間に楔作用が生ずると共に有効断面が減少するため、輪荷重の伝達能力が減少することに因るものと推定される。

以上のような試験結果に基づいて、たとえば、米国防軍工兵隊の方法では最近では嚙合わせ目地を用いない方針がとられている。⁷⁹⁾

5.7 版端目地

(1) 一般

版端目地には舗装版端部に膨張目地を設け、更に幾つかの緩衝膨張目地を狭い間隔に配置する行き方と、版端部の版下面に単独ないし複数の突起を設けて路盤内に埋込んで版端部の移動を拘束した上で、端部に膨張目地を挿入する行き方とがあり、近年では後者の行き方を採用する例が多い。³⁴⁾ 図-10は郡山連続RC舗装における前者の例であり、図-34は ACI 325 委員会の示唆せる端部定着の構造である。³⁴⁾ ここで、緩衝膨張目地とは、その構造は膨張目地と全く同じであるが、端部の変位を一個の膨張目地のみで吸収し得ない場合の予備として挿入された目地を指している。

膨張目地ないし緩衝膨張目地の中は 15~25mmとしその構造は注入目地材と目地版を併用し、キャップ付きのスリッパーで補強するのが標準である。

スリッパーは目地の閉閉を許容すると同時に、目地

の両側の版を同一水準に保つ荷重伝達機構で、その設計には各種の理論解析に基づく方法が提案され、^{80~87)} また、特殊な市場製品も用いられている。これらの大部分は実際の供用面で満足すべき成果を挙げており、優劣のつけ難いのが実情であって既存の空港に用いられた例の機能調査や実物大床版を用いた広汎な試験結果によれば、版自体が十分に設計されている場合にはスリッパーの破壊が生じた例は皆無である。一方、経済的な観点からすれば、荷重伝達機構は舗装の設計に用いられる荷重に比例すべきであり、更に又、舗装版厚が荷重と路盤の支持力と密接な関係を有する点を考慮すると、スリッパーの設計は版厚と路盤支持力係数とに関係すべきものと思われる。既存の空港コンクリート舗装設計方法におけるスリッパーの設計は大体において以上のような考え方に基づき、これに経験的な要素を加味したものが大部分である。

(2) スリッパーの設計

膨張目地におけるスリッパーの荷重伝達機構は輪荷重が目地に隣接し、かつ、版の縁部より十分に離れている場合には輪荷重の40~45%を隣接版に伝達し得るものでなければならない。このように設計され、目地の全長に亘って挿入されたスリッパー群は隅角部においても設計輪荷重の20%以上の荷重伝達能力を有することになる。

Bradbury⁸⁸⁾によれば、1本のスリッパーの荷重伝達能力は次式によって与えられる。

$$P_b = \frac{2d^3\sigma_{sa}}{r+8.8t} \dots\dots\dots(5.19)$$

$$P_c = \frac{dr^2\sigma_{ca}}{12.5(r+1.5t)} \dots\dots\dots(5.20)$$

$$P_s = \frac{\pi}{4} d^2\tau_{sa} \dots\dots\dots(5.21)$$

ここで、P_b、P_c、P_s ; それぞれスリッパーの曲げ強さ、コンクリートの支圧強さ、スリッパーのせん断強さで伝達できる荷重 (kg)

d ; スリッパーの直径 (cm)

σ_{sa}, τ_{sa} ; スリッパーの許容引張応力度と許容せん断応力度 (kg/cm²)

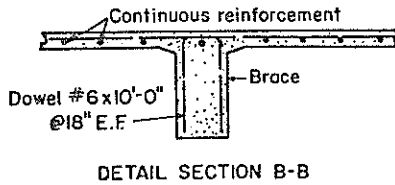
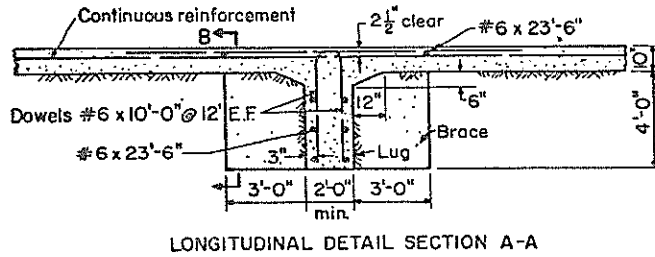
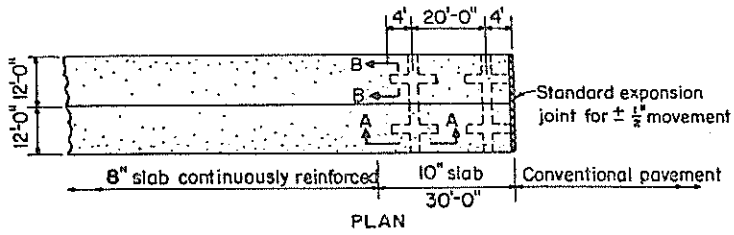
σ_{ca} ; コンクリートの許容支圧応力度 (kg/cm²)

r ; スリッパーの埋込み長さ (cm) = 全長 - t

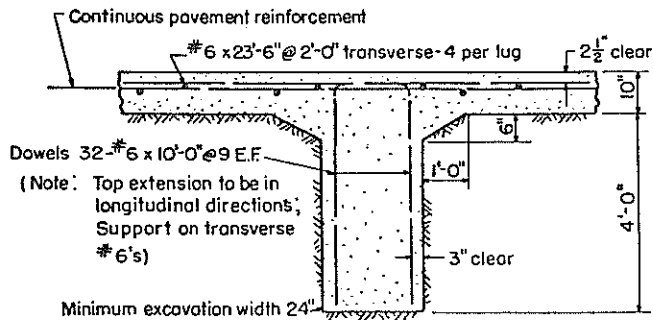
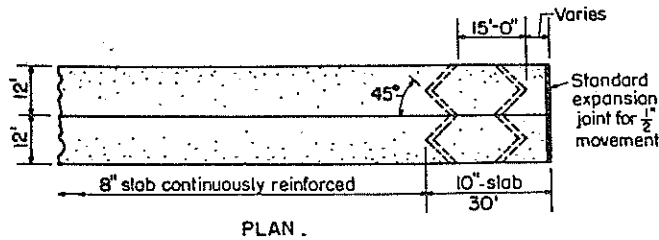
t ; 膨張目地巾 (cm)

スリッパーは常に群として用いられ、その群としての荷重伝達能力は次のような仮定によって評価される。

81) すなわち、



(A) - Knee-braced multiple lug anchorage (suggested design)[†]



(B) - Chevron pattern multiple lug anchorage (suggested design)[†]

[†]Number, spacing, reinforcement, and dimensions of lugs to vary with soil, frost depth, etc.

図-34 ACI 325 委員会の版端定着の構造案 34)

- ① 荷重直下のスリッパは能力一杯の荷重を伝達する。
- ② 輪荷重中心から剛比半径 l の 1.8 倍以上の距離にあるスリッパは荷重を伝達しない。
- ③ 輪荷重中心から $1.8l$ までのスリッパの荷重伝達能力は輪荷重中心からの距離に応じて直線的に減少する。

スリッパの設計は以上の仮定の下に行ない、最初に従来の経験を基にしてその直径を適当に選ぶ。道路舗装では直径を版厚の $(1/6 \sim 1/10)$ とする例が多いが、空港舗装では版厚が著しく厚い場合には最大直径を 38mm 程度に押え、これより太いものが必要な場合には鋼管を用いた例が多い。

次いで (5.19), (5.20) 式において, $P_b = P_c$ とすることにより

$$r = d \sqrt{\frac{25\sigma_{sn}}{\sigma_{cn}}} \sqrt{\frac{r+1.5t}{r+8.8t}} = 23.8d \sqrt{\frac{r+1.5t}{r+8.8t}} \dots\dots\dots(5.22)$$

こうして求めた r に t を加えればスリッパの所要長となる。これを基にして 1 本のスリッパの伝達能力 P_b, P_c, P_s を計算し、その最小のものが荷重伝達能力 P を決定する。このようにして得られたスリッパを目地に配置して、群としての荷重伝達能力が①~③の仮定に基づいて評価した場合に設計輪荷重の 20% 以上となるように行なう。

以上は米国ポルトランドセメント協会の空港舗装設計法 (PCA 法) 89) に規定されたスリッパの設計々算の背景を述べたものであるが、この方法では以上の根拠に基づいて版厚から配置間隔を求める図-35, 36 のような計算図表を与えている。図-37 は同法のタイバーの

DESIGN CHART FOR DOWELS For use at Expansion joints

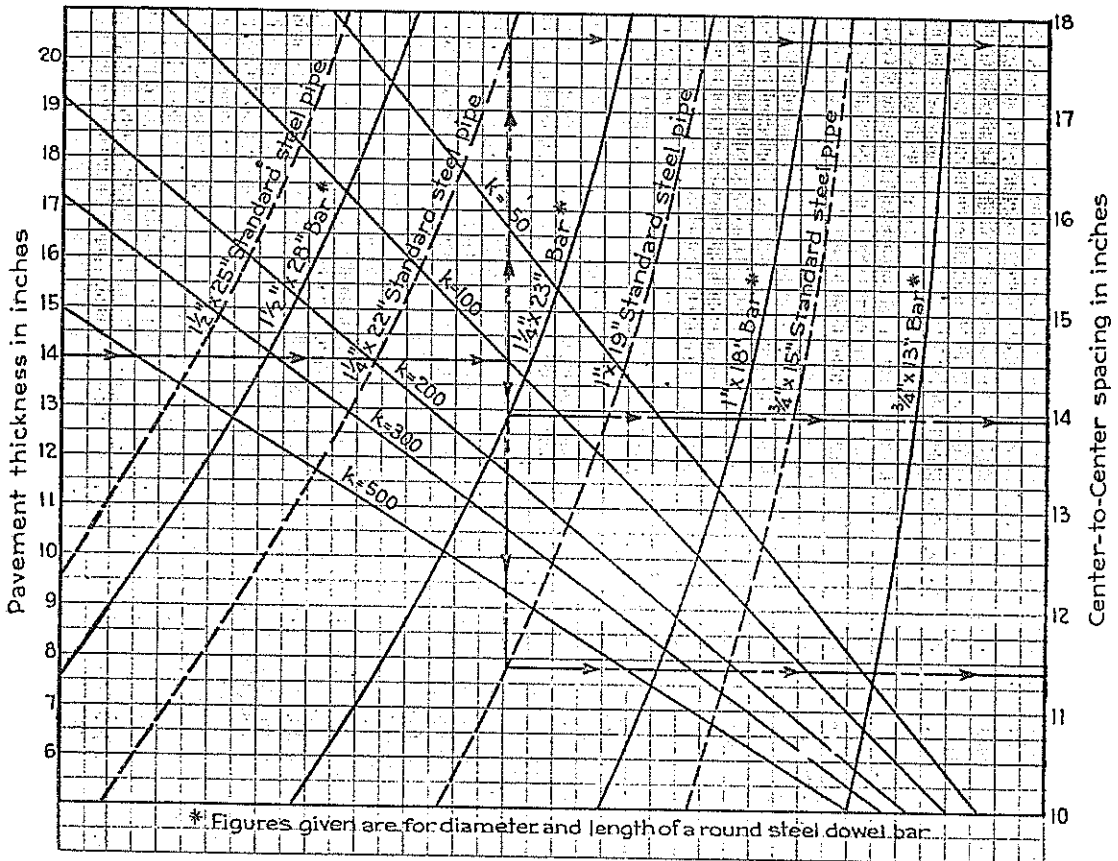


図-35 米国ポルトランドセメント協会の方法におけるスリッパ計算図表 (膨張目地用) 89)

DESIGN CHART FOR DOWELS
For use at Contraction and Construction joints

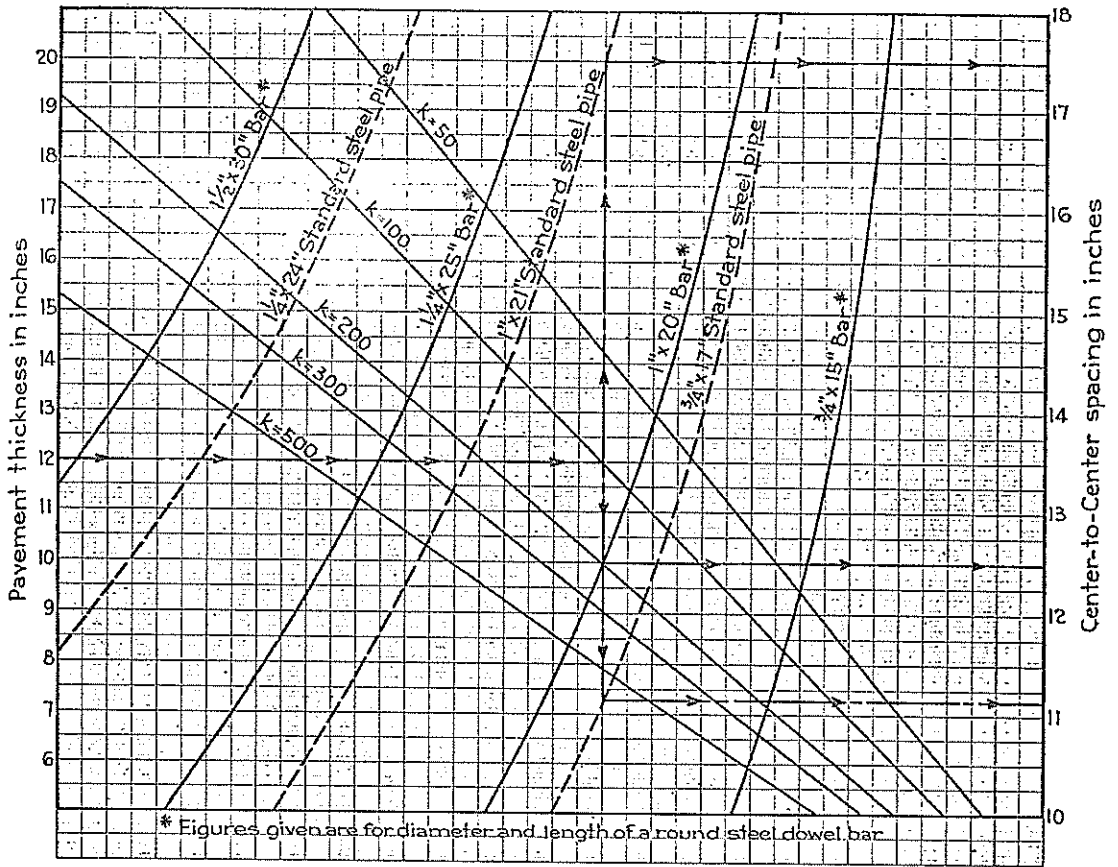


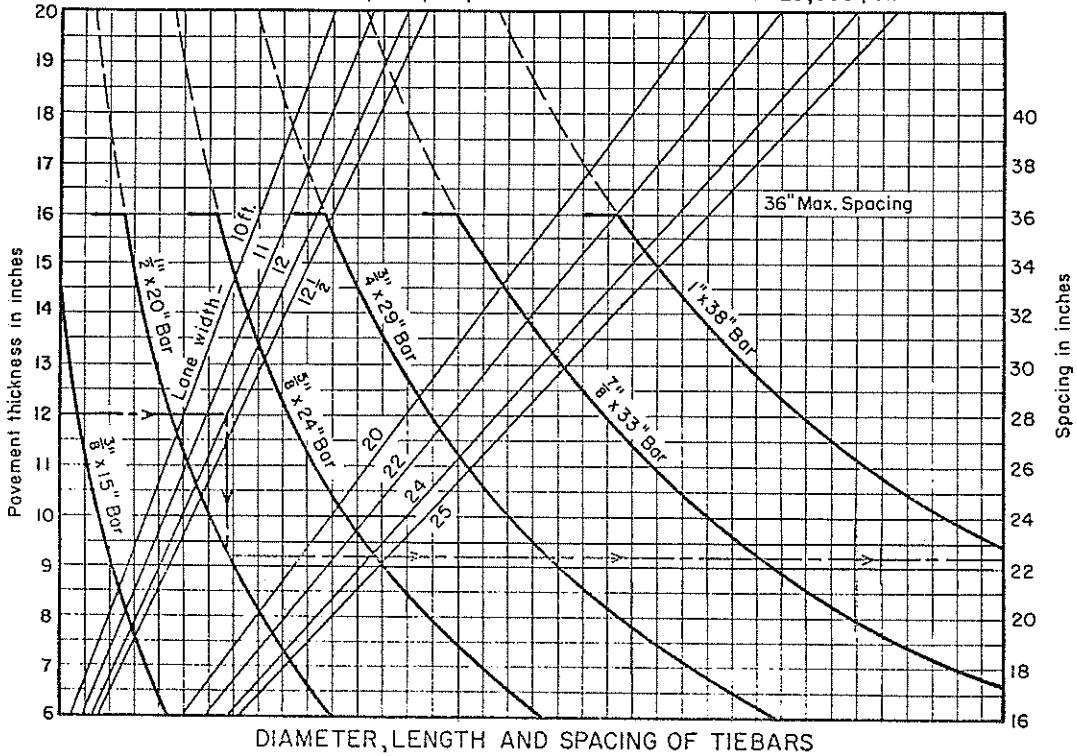
図-36 米国ポルトランドセメント協会の方法におけるスリップバー計算図表
(収縮および施工目地用) 89)

表-12 米国陸軍工兵隊の方法におけるスリップバー設計標準 66)

Round Dowels as Approved for Construction, Dummy, and Transverse Expansion Joints			
Pavement Thickness	Minimum Dowel Length	Minimum Dowel Spacing	Type of Dowel
Less than 8"	16"	12"	3/4" ϕ Bar
8" to 11"	16"	12"	1" ϕ Bar
12" to 15"	20"	15"	1-1/4" ϕ Bar or 1" Ex. Strength Pipe
16" to 20"	20"	18"	1-1/2" ϕ Bar or 1-1/2" Ex. Strength Pipe
21" to 25"	24"	18"	2" ϕ Bar or 2" Ex. Strength Pipe
Over 25"	30"	18"	3" ϕ Bar or 3" Ex. Strength Pipe

DESIGN CHART FOR TIEBARS BASED ON FORMULAS 1 AND 2 USING THESE VALUES

$f = 1.5$ $W = 12.5 \text{ lb. per sq. ft. per in. slab thickness}$ $S = 25,000 \text{ psi.}$



図一37 米国ポルトランドセメント協会の方法におけるタイバーの計算図表 89)

計算図表で、これは (4.24) 式において $f = 1.5$, $w = 12.5 \text{ lb/ft}^2/\text{in}$, $\sigma_s = 25,000 \text{ psi}$ として求めたものである。CE法⁶⁶⁾ ではPCA法とほぼ同様の考え方から、版厚との関係でスリップバーの設計標準を表一12のように定めているが、これは理論的根拠よりもむしろ、実際の空港舗装を用いた載荷試験の結果に基づくものである。⁷⁹⁾

6. 空港の鉄筋コンクリート舗装設計施工基準例

6.1 米国陸軍工兵隊の基準抜萃

本節は米国陸軍工兵隊の“剛性空港舗装”⁶⁶⁾ よりRC舗装関係の主要な箇所を抄訳したものである。先にも述べたように、本基準におけるRC舗装は連続RC舗装とは異なる点に注意する必要がある。

A. 適用範囲について

RC舗装は次に挙げる三通りのいずれかの場合に用いる。

a. 必ず用いねばならない場合

- (1) 不規則な形状の版に生ずるひびわれ
- (2) 隣接した舗装の目地割りが一致しない目地 (Mismatched Joints, 以下では不適合目地と表示) から隣接版に発達するひびわれ
- (3) 嵩上げ舗装において、上下層の目地割りが一致しない場合に下層の目地部分から上層に発達するひびわれ
- (4) 熱放射物を埋設した舗装に生ずるひびわれ

上述の(1)~(4)のひびわれを調節するために用いる場合である。

b. 局部的条件によって用いる場合

鉛直方向に変位差が生ずることがほぼ確実な下層材料の上に舗設された舗装に生ずるひびわれの調節を目的とする場合である。

c. 経済的な観点から用いる場合

異なる交通域 (Traffic Area) に亘って嵩上げする時、表面の平坦性を確保するためにより大きな荷

重を受ける交通域の嵩上げ舗装厚を減少する必要のある場合、およびRC舗装がNC舗装より経済的な場合である。

B. 舗装版のひびわれを調節するための鉄筋

この鉄筋はひびわれを密閉してコンクリートがひびわれの縁部で欠け落ちたり、ひびわれが隣接舗装版に転移するのを防止する作用をもち、直角2方向のそれぞれについて版断面積の0.05%の鉄筋を配置するのが原則である。

a. 不規則形状の版

一般に版の長辺が短辺の12.5%以上の場合とか目地割りが正方形ないし長方形とならない場合に図—38に示したような変形版を用い、鉄筋で補強する。

b. 不適合目地

図—38に例示したように、隣接する版の目地割りが相互に一致しない場合には、この境界に付着を妨げるような材料で境界層を設けない限り、ひびわれが隣接版に転移するので、これを防ぐため鉄筋で補強する。上下層の目地割りの一致しない嵩上げ舗装の場合も同様である。

c. 暖房用配管等を埋設せる舗装

暖房用配管等の発熱体を舗装版中に内蔵し、表面が常時ないし時折外気に曝される場合は温度が極端に変化するため表面にひびわれが生じ易く、これを防止するため配筋する。

d. サービス施設のある版

液体燃料の供給栓、排水の流入口、等のサービス施設をもつ版は等方性を欠くので、版の全面に亘って0.05%以上の鉄筋で補強する。

C. 舗装厚を減少するための鉄筋

一般にはRC舗装はNC舗装と経済的に競合し得ないが、版厚を減少しなければならない場合や、RC舗装が経済的な場合には鉄筋を用いてよい。

a. 設計方法の考え方

NC舗装としての所要版厚を最初に求め、鉄筋比に応じてこの版厚を減少するもので、版厚減少の割合は実験結果に基づいており、版厚を減少したために載荷時にひびわれが生じて鉄筋がひびわれを密閉し、ひびわれ部分の剝落や破壊を防ぎ、元の版厚のNC舗装と同等の耐用年数だけ供用し得ると云う考え方に立脚する。

b. 鉄筋比と版厚の決定

最初に設計荷重と舗装ならびに基礎の諸性質を考慮してNC舗装としての版厚(h_d)を決定する(h_d の決め方については“無筋コンクリート舗装の設計方

法に関する調査研究”参照)。次に図—32を用いて鉄筋比(S)とRC舗装としての版厚(h_r)を決める。 (S) と (h_r) は相互に関係しているため、いずれか一方の所要値を任意に決定する。たとえば、図—32を用いて (h_r) を決定するには、上述のようにして決めた h_d と S を直線で結び、これが (h_r) と交わる点の読みが求める値である。嵩上げ舗装の場合は (h_d) の代りに (h_0) とする。このようにして求めた (S) を舗装の縦横2方向のそれぞれに配筋する。

c. RC舗装版の最大寸法の決定

既設の剛性舗装の上に付着を妨げる層を設けないで直接RC舗装を嵩上げする場合、上下の舗装間には滑動がないものと考え、目地割を一致せしめるのが原則で、舗装版の最大寸法、すなわち、目地で囲まれた最大版長は、既設舗装版のそれと同一である。その他の場合の嵩上げ舗装では上下両層間には滑動が可能で、その抵抗係数と鉄筋の降伏点によってRC舗装版としての最大長が決まると考え、次式で求める。

$$L = \sqrt[3]{0.00047h_r(f_s S)^2}$$

ただし、 h_r はRC舗装版厚(in.)、 f_s は鉄筋の降伏点(psi)、 S は鉄筋比、で、最大長 L は(ft.)で与えられる。また、図—32には $f_s=50,000$ psiおよび $56,000$ psiの場合の L が与えられている。

d. 本設計法の制限事項

- (1) $S=0.05\%$ 以下の場合にはNC舗装としての版厚を減少してはならない。
- (2) $S=0.5\%$ 以上の場合でも図—32で求められる値以上に版厚を減らしてはならない(注: 図—32は $S=0.5\%$ に対して $h_r=0.7h_d$ とし、30%の減厚を許容している)。
- (3) 鉄筋比や版厚が幾らの場合でも最大版長は30m以下とする。
- (4) RC舗装の最少版厚は15cm以上とする。

D. 鉄筋

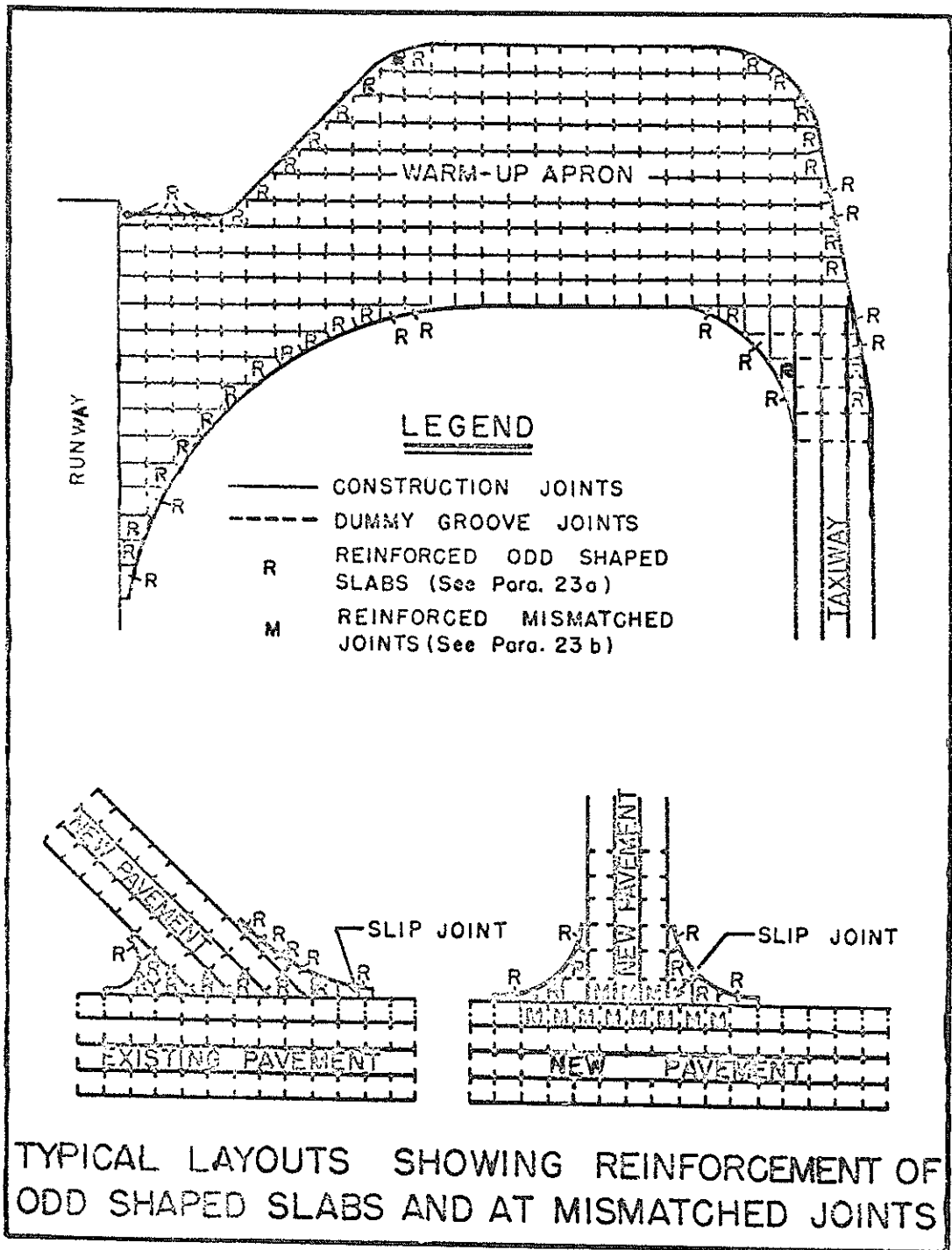
a. 鉄筋の種類

異形鉄筋ないし鉄網のいずれでもよい。異形鉄筋を用いる場合にはASTM A305~50Tに適合しなければならない。

また、材質に応じ、それぞれの規格を満足し、更に、降伏点は $3,500\sim 5,250\text{kg/cm}^2$ のものとする。

b. 配筋

舗装版表面から $(1/4h_r+2.5\text{cm})$ の深さに埋込む。所要の鉄筋量を得るために、鉄網を2枚重ねに



図—38 米国陸軍工兵隊の方法における目地配置 66)

して用いてもよいが、この時は緊結してコンクリートの打込み中に離れないようにする。重ね合わせの長さは鉄筋直径の24倍以上、もしくは、鉄網の1網目間隔以上とする。

E. 目地

原則として、NC舗装における目地の必要条件と設計方法を適用する。ただし、RC舗装版内に施工目地を設けるときは鉄筋は目地を貫通して配置し、更にタイバーを挿入する。施工目地を除くすべての目地には表-12に従ってスリップバーを必ず配置し、鉄筋は目地にできるだけ接近せしめるが、これを貫通しないように配置する。

6.2 英国公共事業省の基準抜萃

英国公共事業省の空港舗装標準仕様書 90) には、RC舗装についても規定されているが、この規定は表-13のような標準版厚に対する最少鉄筋量と配筋間隔、配筋方法、関連した目地構造、等に関するもので、版厚や鉄筋量の設計方法については触れていない。

関連資料 91) によれば、本仕様書におけるRC舗装の規定は Caltishall (1956~57) と Prestwick (1957~58) 両空港における嵩上げ舗装に用いた連続RC舗装の供用実績ならびに米国における各地の連続RC舗装の供用実績等を参考にして定められたもので、原則として

- (1) 舗装版延長の長短によらず、横目地を省き
- (2) 縦方向の鉄筋は連続とし
- (3) 鉄筋比は版断面積の約 0.3% とする

ことを定めている。版厚については言及していないが、英国では道路舗装についてはNC舗装とRC舗装を同厚としていること、版厚の減少を計るには鉄筋比が過少と考えられること、等から、空港RC舗装の版厚はNC舗装としての所要厚と同等と判断してよいであろう。

(1) 鉄筋

a. 鉄筋の種類

鉄筋は、B. S. 785 に適合する鉄線ないし B. S. 1144 に適合する冷間圧延棒鋼もしくは異形棒鋼のいずれでもよいが、B. S. 1221 に従って鉄網状に組立ててその後供給する。タイバーの長さは 45cm、スリップバーの長さは 75cm とし、鉄筋比等は表-13による。

b. 配筋

鉄網の継手は溶接継手により、重ね合わせ継手は溶接継手が不可能な場合のみ認められる。配筋は機械据付けを原則とし、スプレッターとウォッシュャーをそれぞれ2台導入してコンクリートを2層打ちにする場合には人力配筋が認められる。また、壓金やスターラップを用いる時には特別の承認を必要とする。人孔やその他のサービス施設がある場合にはその周辺には表-13の規定量の他に直径 13mm の鉄筋を追加する。

(2) 目地

格納庫の床を除く版厚 15cm 以上の連続RC舗装では、隣接する舗装間の相対的変位や人孔等のサービス

表-13 英国公共事業省の空港舗装標準仕様書における連続 RC 舗装の規定

Slab thickness in inches	Schedule of Reinforcement				Dowel or Tie Bar Diameter in inches	
	Main Steel		Transverse Steel			
	Minimum Area in square inches per Foot of Width	Spacing Limits in inches	Minimum Area in square inches per Foot of Width	Spacing Limits in inches		
4	0.20	0.42%	5-7	0.14	5-7	1/2
5	0.25	0.42	5-7	0.14	5-7	5/8
6	0.25	0.35	5-7	0.08	6-9	3/4
7	0.25	0.30	5-7	0.08	6-9	7/8
8	0.30	0.31	5-7	0.08	6-9	1
9	0.30	0.28	5-7	0.08	6-9	1 1/8
10	0.35	0.29	5-7	0.08	6-9	1 1/4
11	0.39	0.30	5-7	0.08	6-9	1 3/8
12	0.39	0.27	5-7	0.08	6-9	1 1/2

施設等のために必要とする場合を除き、横目地は設けないものとし、必要とする場合でも目地最小配置間隔が30m以上となるように配置する。

a. 膨脹目地

人孔等の固定物の周辺や既設舗装と接する版端部等に設ける。目地は巾 25~40mmの突合わせ目地とするもので、用いるべき場所によって構造が標準化されている。

b. 施工目地

突合わせ目地として、鉄筋は目地を貫通して延長するが、コンクリートの打継ぎに先立って、旧コンクリートの目地面をはつって新旧コンクリートの間における骨材の噛み合わせを計る。

c. 収縮目地

格納庫の床等特定の場所にだけ、9 m以下の間隔で設ける。めくら目地とし、鉄筋は目地底で 25mmのかぶりがあるように予め押下げて置く。

d. 縦目地

版厚 15cm未満の場合には突合わせ目地としてタイバーを挿入し、版厚 15cm以上の場合には噛合わせ目地とする。いずれも、巾 6 mm、深さ 25mmの溝を設け、目地材を注入する。

6.3 参考資料：米国道路局の道路舗装基準の概要

米国道路局では国内の各種の連続R C舗装供用実績と研究成果に基づいて、国道 (Federal Roads) の設計基準を定めており、これを要約すると以下の通りである。

(1) 重交通の場合

版厚は20cm (8 in.) とし、縦方向連続鉄筋は0.6%とする。鉄筋は最小降伏点が4, 200kg/cm²以上のもので、異形鉄筋もしくは鉄網のいずれでもよく、表面から6.4cm (2.5 in.) の深さに埋設する。また、路盤は縦縁部のポンピングを防ぐため粒状材料を用いた7.5~15cm厚のものとする。

(2) 比較的軽交通の場合

版厚18cm (7 in.)、鉄筋比0.7%を用い、路盤は(1)と同様とする。

6.4 参考資料：第13回国際道路会議報告書の概要

1967年11月に東京で開催された第13回国際道路会議では第4議題剛性舗装について13ヶ国から報告書が提出された。⁹²⁾ これら13ヶ国のうち、ソイルセメントにおける凝結遅延剤の影響を論じたオーストラリアと混和剤の性質がコンクリートの諸性質におよぼす影響を論じたトルコを除く11ヶ国の報告書はコンクリート舗装の設計に言及し、その多くはR C舗装について報告している。これらの報告書から各国のR C舗装に関する取扱い方を要約

すると次の通りである。

(1) 西ドイツ

R C舗装の強さは収縮目地間隔によって決まり、目地間隔が5 m以下の場合には鉄筋を用いなくともよい。損傷せる旧コンクリート舗装の嵩上げにR C舗装を用いる場合には版厚を16cmとしてよく、構造設計の詳細については“Richtlinien der Forschungs Gesellschaft für das Strassen Wesen”に規定されている。鉄筋としては高張力鋼の鉄網を用いる。

(2) ベルギー

損傷した既設コンクリート舗装の嵩上げに連続R C舗装を適用した2施工例のいずれも良好な供用実績を挙げている。一例は延長 3,800m、巾 5.25×2 m、厚さ18cm、のもので、鉄筋は降伏点が4, 200 kg/cm²の冷間圧延の高張力鋼を0.7%使用した。他の例は延長1 km、巾 3×2 m、厚さ18cm、のもので鉄筋比は上述と同様である。この場合には他の既設舗装との境界部に突起式版端定着を設けた。現時点までの供用実績 (1965年舗設) は良好である。

(3) スペイン

総延長 3,505mに及ぶP C、R CおよびN C舗装の比較試験を行なっている。N C舗装にはすべて軽度の鉄網を入れて補強し、R C試験舗装には0.5%の縦方向鉄筋を挿入している。

(4) フランス

道路舗装では版厚を25もしくは28cmのいずれかとし、空港舗装の版厚は通常30~40cmである。いずれの場合にも鉄筋は用いないのが普通である。

(5) イギリス

道路舗装では経験的な方法により、たとえば、重交通に対しては標準版厚 23, 25.5, 28cmのいずれかを用いるが、この版厚はN C舗装とR C舗装の両方に共通である。R C舗装では4.9 kg/m²の鉄筋の使用により膨脹目地および収縮目地を大巾に減少することができる。一方、連続R C舗装では鉄筋比を5.7 kg/m²とし、横目地は一切省き、版厚は20, 23, 25 cmのいずれかとするが、厚さ9 cmの歴青表層を設けることを前提としている。

(6) イタリア

道路舗装の版厚は15~22cmで、R C舗装に関しては2.1 kg/m²の鉄筋を挿入した試験舗装が施工されている。

(7) 日本

道路舗装の版厚は交通量に応じて、20, 23, 25cm

のいずれかとし、1964年以降は 3 kg/m^2 の鉄網を用いることを原則としている。また、連続RC舗装に関しては郡山や大阪において試験工事が行なわれ、現在までの所、良好な挙動を示している。

(8) オランダ

一般の道路舗装では版厚を 23 cm としているが、交通量と荷重の増加を考慮してこれを 25 cm に引上げることを検討中である。非常に軟弱な地盤の Schiphol 空港では旧コンクリート舗装の嵩上げに 18 cm 厚のPC舗装を用いた。

(9) ルーマニア

一般の道路舗装では版厚を $18 \sim 20 \text{ cm}$ とし、鉄筋を用いないのが普通であって、技術的および経済的に正当な理由のある場合にのみ 1.6 kg/m^2 (min) の鉄網を用いる。

(10) チェコスロバキア

NCおよびRC舗装の比較試験を行なった結果、空港舗装の嵩上げには版厚 9 cm 、鉄筋量 2 kg/m^2 が適当なことが判明した。

(11) ソ連

公道は交通量に応じて1, 2, 3級に格付けし、版厚はそれぞれ $24, 22, 20 \text{ cm}$ とする。鉄筋はひびわれの用心鉄筋としてのみ用い、 2.5 kg/m^2 の鉄網を表面より $5 \sim 6 \text{ cm}$ の深さに挿入する。また、版の載荷能力を決定する新しい理論的な解析方法を提案している。

7. 結 論

鉄筋コンクリート舗装設計基準に関する提案

2～6の検討結果を要約すると、空港舗装のための連続RC舗装の設計は次の基準によって行なうのが適当と思われる。

(1) 路盤

路盤支持力係数 K_{rs} が 5 kg/cm^3 以上となるように路盤を作ること。

(2) 舗装版の厚さ

連続RC舗装の設計版厚は想定した航空機荷重(例：D-8-63)に対して無筋コンクリート舗装版として設計した厚さの85%以上とする。ただし、舗装版の容積変化を拘束することによって生ずる内部応力については考慮しない。

(3) 鉄筋

保証降伏点が 40 kg/mm^2 以上の JIS G-3112 に適合する棒鋼を用いた鉄網ないし異形鉄筋網を用い、

縦方向鉄筋比は(2)で求めた連続RC舗装版断面積の0.6%以上、横方向鉄筋比はその断面積の0.08%以上とする。鉄筋の埋込み深さは版厚の中央よりやや上とする。

(4) 目地構造：横目地

施工目地、版端部および他の構造物周辺以外に横目地を設ける必要はない。施工目地は突合わせ目地とし、縦方向鉄筋を十分に延長するか、これと同量以上のタイバーを挿入する。他の舗装版ないし構造物と境界を接する版端部には突起式版端拘束を設け、更にスリップバーで補強せる膨脹目地を挿入する。人孔や給排水口等の固定物や建築物の周辺には膨脹目地を設け、目地に沿って0.05%以上の鉄筋を挿入して補強する。

(5) 目地構造：縦目地

突合わせ目地とし、タイバーを挿入する。タイバーはスリップバーとしての所要断面積をもつように設計するのが望ましい。

参 考 文 献

- 1 運輸省港湾技術研究所, “米国およびカナダにおける空港土木の現況”, 視察報告, pp. 1～52, 付表および付図 pp. 1～144, 1967年1月
- 2 赤塚雄三, “東京国際空港エプロンのコンクリート舗装施工に関する調査報告”, 運輸省第二港湾建設局, 横浜調査設計事務所, pp. 1～52, 1966年3月
- 3 竹下春見, 岩間 滋, “道路舗装の設計”, 東京, オーム社, 254 pp. 1960年6月
- 4 荒木 実, 福田 正, “郡山国道における連続鉄筋コンクリート舗装”, 土木技術資料, 6—5, pp. 198—201, 1964年5月
- 5 荒木 実, 福田 正, 月成 稔, “郡山国道連続鉄筋コンクリート舗装の交通開放一年後の経過報告”, 土木技術資料, 7—5, pp. 219—220, 1965年5月
- 6 月成 稔, 飯島 尚, “連続鉄筋コンクリート舗装の観測結果”, 土木技術資料, 9—2, pp. 28～33, 1967年2月
- 7 伊東茂富, 他6名, “連続鉄筋コンクリート舗装の視察”, 土木学会空港舗装研究委員会議事録, コンクリート舗装部会, 設計分科会資料No. 8, pp. 1～3, 1967年8月
- 8 建設省土木研究所, “コンクリート舗装の破壊に関する研究”, 第18回建設省技術研究発表会, pp. 1～

- 59, 1964年11月
- 9 岩間 滋, "コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究(1)", 土木研究所報告109号の1, pp. 1~37, 1960年7月
 - 10 岩間 滋, "コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究(2)", 土木研究所報告112号の1, pp. 1~97, 1961年7月
 - 11 岩間 滋, "コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究(3)", 土木研究所報告117号の1, pp. 1~124, 1961年12月
 - 12 国分正胤, 岡村 甫, "コンクリートに対する異形鉄筋の付着性状に関する研究", 土木学会コンクリートライブラリーNo. 14, pp. 1~19, 1965年12月
 - 13 ACI Committee 325, "Continuous Reinforcement in Highway Pavements," ACI Proc., Vol. 55, pp. 669-678, December 1958.
 - 14 Earl C. Sutherland and Sanford W. Benham, "Experiments with Continuous Reinforcement in Concrete Pavements," Public Roads, Vol. 20, No. 11, pp. 205-214, January 1940.
 - 15 Harry D. Cashell and Willmer E. Teske, "Continuous Reinforcement in Concrete Pavements," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 34, pp. 34-56, 1955.
 - 16 Harry D. Cashell and Willmer E. Teske, "Continuous Reinforcement in Concrete Pavements After 15 1/2 Years," Public Roads, Vol. 28, No. 6, pp. 127-141, February 1955.
 - 17 H. W. Russell and J. D. Lindsay, "Three Year performance Report on Experimental Continuously Reinforced Concrete Pavement in Illinois," Proceeding, Highway Research Board, Vol. 30, pp. 45-61, 1950.
 - 18 J. D. Lindsay and H. W. Russel, "Illinois Experimental Continuously Reinforced Concrete Pavement after Four Years," Proceedings, ACI, Vol. 48, pp. 653-660, April 1952.
 - 19 J. D. Lindsay, "Ten-Year Report on the Illinois Continuously Reinforced Pavement," Highway Research Board, Bulletin 214, pp. 22-40, 1959.
 - 20 William Van Breemen, "Preliminary Report on Current Experiment with Continuous Reinforcement in New Jersey," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 27, 1947.
 - 21 William Van Breemen, "Report on Experiment with Continuous-Reinforcement in Concrete Pavement -New Jersey," Proceeding, Highway Research Board, Vol. 30, 1951.
 - 22 J. R. Schuyler and Ralph Stelljes, "Performance of Concrete Pavements as Related to Subgrades, Subbases and Structural Design," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 36, pp. 433-442, 1957.
 - 23 William Van Breemen, "Ten-Year Report on Experimental Continuously-Reinforced Concrete Pavements in New Jersey," Highway Research Board, Bulletin 214, pp. 41-75, 1959.
 - 24 T. E. Stanton, "Reports on Experiments with Continuous-Reinforcement in Concrete Pavement-California," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 30, 1951.
 - 25 Bailey Tremper, "Continuously-Reinforced Concrete Pavement in California After Eight Years Service" Highway Research Board, Bulletin 214, pp. 76-79, 1959.
 - 26 M. D. Shelby and B. F. McCullough, "Experience in Texas with Continuously Reinforced Concrete Pavement," Highway Research Board, Bulletin 274, pp. 1-29, 1960.
 - 27 Benjamin F. McCullough and William B. Ledbetter, "LTS Design of Continuously Reinforced Concrete Pavement," Proceedings, ASCE, Vol. 86, No. HW 4, pp. 1-24, December 1960.
 - 28 B. F. McCullough and W. B. Ledbetter, "Closure of Discussion of a Paper by McCullough and Ledbetter, "LTS Design of Continuously Reinforced Concrete Pavement," Proceedings, ASCE, Vol. 88, No. HW 1, pp. 73-75, 1962.
 - 29 R. L. Shiffman, I. J. Taylor and W. J. Eney, "Continuously Reinforced Pavement Research in Pennsylvania," Highway Research Board, Bulletin 181, pp. 5-20, 1958.
 - 30 I. J. Taylor and W. J. Eney, "First-Year Performance Report on Continuously Reinforced Concrete Pavements in Pennsylvania," Highway Research Board, Bulletin 214, pp. 98-113, 1959.
 - 31 F. C. Witkoski and R. K. Shaffer, "Continuously-Reinforced Concrete Pavement in Pennsylvania," Highway Research Board, Bulletin 214, pp. 80-97, 1959.
 - 32 F. C. Witkoski and R. K. Shaffer, "Continuously-Reinforced Concrete Pavement in Pennsylvania," Highway Research Board, Bulletin 238, pp. 1-20, 1960.
 - 33 I. J. Taylor and W. J. Eney, "Observations on the Behavior of Continuously Reinforced Concrete Pavement in Pennsylvania," Highway Research Board, Bulletin 238, pp. 23-38, 1960.
 - 34 ACI Committee 325, "Second Progress Report-Continuously Reinforced Concrete Pavements," Proceedings, ACI, Vol. 59, pp. 1569-1586, November 1962.
 - 35 Harry D. Cashell, "Trends in Concrete Pavement Design," Proceedings, ACI, Vol. 60, pp. 501-504, April 1963.
 - 36 Gene R. Gudney, "An Experimental Continuously-Reinforced Concrete Pavement in Michigan," Highway Research Board, Bulletin 274, pp. 30-56, 1960.
 - 37 Allan Lee, "Maryland Continuously-Reinforced Concrete Test Pavements," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 40, pp. 235-281, 1961.
 - 38 Silvio Spigolon, "Behavior of Experimental Conti-

- nously-Reinforced Concrete Pavements in Mississippi," Highway Research Board, No. 60, pp. 140-153, 1964.
- 39 M. D. Shelby and W. B. Ledbetter, "Experience in Texas with Terminal Anchorage of Concrete Pavement," Highway Research Board, Bulletin 332, pp. 26-39, 1962.
 - 40 J. Thomlinson, "Temperature Variations and Consequent Stresses Produced by Daily and Seasonal Temperature Cycles in Concrete Slabs," Concrete and Constructional Engineering, Vol. 35, No. 6, pp. 298-307, June 1940 and No. 7, pp. 352-360, July 1940.
 - 41 S. Timoshenko and J. N. Goodier, "Theory of Elasticity," McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 2nd Ed. pp. 399-437, 1951.
 - 42 H. M. Westergaard, "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis," Public Roads, Vol. 7, No. 2, pp. 22-35, April 1926.
 - 43 H. M. Westergaard, "Analysis of Stresses in Concrete Roads," Vol. 8, No. 3, pp. 54-60, May 1927.
 - 44 E. F. Kelley, "Application of Results of Research to the Structural Design of Concrete Pavements," Public Roads, Vol. 20, July 1939.
 - 45 M. J. Gutzwiller and J. L. Waling, "Stresses and Deflections in Concrete Pavements Continuously Reinforced with Welded Wire Fabric," Highway Research Board, Bulletin 238, pp. 48-63, 1960.
 - 46 Yuzo Akatsuka, "Behavior of Tensile and Flexural Cracks in Reinforced Concrete Members," Report of Port & Harbour Research Institute, No. 1, pp. 1-27, February 1963.
 - 47 Martin J. Gutzwiller and J. L. Waling, "Crack Formations in Continuously-Reinforced Pavements," Highway Research Board, Bulletin 238, pp. 64-77, 1960.
 - 48 H. D. Cashell, "Experiments with Continuous Reinforcement in Concrete Pavements-10 Year Report," Highway Research Board, Proceedings, Vol. 29, 1949.
 - 49 William Zuk, "Bond and Transflexural Anchorage Behavior of Welded Wire Fabric," Highway Research Board, Bulletin 238, pp. 78-93, 1960.
 - 50 Arthur P. Clark, "Bond of Concrete Reinforcing Bars," Proceedings, ACI, Vol. 46, pp. 161-184, November 1949.
 - 51 Martin J. Gutzwiller and Joseph L. Waling, "Continuous Deformed Bar Reinforcement for Concrete Pavement," Proceedings, ACI, Vol. 60, pp. 901-925, July 1963.
 - 52 Chester McDowell, "Interrelationship of Load, Volume Change, and Layer Thickness of Soils to the Behavior of Engineering Structures," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 35, 1956.
 - 53 C. P. Vetter, "Stresses in Reinforced Concrete due to Volume Changes," Transactions, ASCE, Vol. 98, pp. 1039-1053, 1933.
 - 54 Bengt F. Friberg, "Frictional Resistance under Concrete Pavements and Restraint Stresses in Long Reinforced Slabs," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 33, pp. 167-182, 1954.
 - 55 Vedat A. Yerlici, "Reinforcement in Continuous Concrete Pavements," Proceeding, ASCE, Vol. 84, No. HW 3, pp. 1799-1 to 1799-8, October 1958.
 - 56 William Zuk, Howard Newlon Jr., R. A. Michell and Bengt F. Friberg, "Discussion of a paper by McCullough and Ledbetter: LTS Design of Continuously Reinforced Concrete Pavement," Proceedings, ASCE, Vol. 87, No. HW 2, pp. 31-40, 1961.
 - 57 Gerald Pickett, "Design of Continuously Reinforced Concrete Pavements" Bulletin 1, CRST Committee on Continuously Reinforced Concrete Pavement, Chicago, Illinois, pp. 1-12, December 1960.
 - 58 Gerald Pickett, "A Look at the Record of Continuously Reinforced Concrete Pavements," CRST Committee on Continuously Reinforced Concrete Pavement, Chicago, Illinois, pp. 1-32, 1959.
 - 59 William Zuk, "Analysis of Specil Problems in Continuously-Reinforced Concrete Pavements" Highway Research Board, Bulletin 214, pp. 1-21, 1959.
 - 60 ACI Committee 325, "Design Considerations for Concrete Pavement Reinforcement for Crack Control" Proceedings, ACI, Vol. 53, pp. 337-362, October 1956.
 - 61 Bengt F. Friberg, "Discussion of a paper by Yerlici: Reinforcement in Continuous Concrete Pavement," Proceedings, ASCE, Vol. 85, No. HW 2, pp. 13-17, 1959.
 - 62 H. D. Cashell and S. W. Benham, "Experiments With Continuous Reinforcement in Concrete Pavements," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 29, pp. 44-80, 1949.
 - 63 William Zuk, "Discussion of a paper by Yerlici: Reinforcement in Continuous Concrete Pavements," Proceedings, ASCE, Vol. 85, No. HW 1, pp. 43-44, 1959.
 - 64 I. J. Taylor, "Discussion of a paper by McCullough and Ledbetter: LTS Design of Continuously Reinforced Concrete Pavements," Proceeding, ASCE, Vol. 87, No. HW 3, pp. 33-34, 1961.
 - 65 ACI Committee 325, "Recommended Practice for Design of Concrete Pavements (ACI 325-458)," Proceedings, ACI, Vol. 55, pp. 17-51, July 1958.
 - 66 "Rigid Airfield Pavements (Airfield other than Army)," Department of the Army, Technical Manual TM5-824-3, pp. 1-84, February 1958.
 - 67 "Report on Service Behavior Tests on Apron Pavement at Godman Field, Fort Knox, Kentucky," War Department, Corps of Engineers, September 1942.
 - 68 "Final Report: Service Behavior Tests on Completed Concrete Pavements at Camp Forrest Airfield, Tullahoma, Tennessee," War Department, Corps of Engineers, October 1942.
 - 69 "Certain Requirements for Flexible Pavement Design for B-29 Planes," U. S. Waterways Experiment

- Station, Vicksburg, Mississippi, August 1945.
- 70 "Final Report : Investigation of Concrete Pavements on Different Subgrades," War Department, Corps of Engineers, U. S. Army, Ohio River Division Laboratory, Mariemont, Ohio, January 1946.
 - 71 "Lockbourne No. 1 Test Truck: Final Report," War Department, Corps of Engineers, U. S. Army, Ohio River Division Laboratories, Mariemont, Ohio, March 1946.
 - 72 "Final Report : Lockbourne No. 2; Experimental Mat" Corps of Engineers, U. S. Army, May 1950.
 - 73 "Final Report : Lockbourne No. 2 ; Modification" Corps of Engineers, U. S. Army June 1950.
 - 74 R. L. Hutchinson, "Basis of Rigid Pavement Design for Military Airfield," Department of the Army, Ohio River Division Laboratories, Corps of Engineers, Cincinnati, Ohio, pp. 1-74, May 1966.
 - 75 H. M. Westergaard, "Analytical Tools for Judging Results of Structural Tests of Concrete Pavements," Public Roads, Vol. 14, No. 10, pp. 185-188, December 1933.
 - 76 L. D. Childs, B. E. Colley and J. W. Kapernick, "Tests to Evaluate Concrete Pavement Subbase," Proceedings, ASCE, Vol 83, July 1957.
 - 77 L. D. Childs and J. W. Kapernick, "Tests of Concrete Pavement on Gravel Subbases" Proceedings, ASCE, Vol. 84, No. HW 3, October 1958.
 - 78 W. H. Jacobs, "Survey and Correlation Report on Continuously Reinforced Pavements without Joints," Rail Steel Bar Association, 1953.
 - 79 William Van Breemen and E. A. Finney, "Design and Construction of Joint in Concrete Pavements," with a supplement of Thomas B. Pringel, "Structural Design of Joints for Airport Pavements," Proceedings, ACI, Vol 46, pp. 789-819, June 1950.
 - 80 H. M. Westergaard, "Spacing of Dowels," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 8, 1928.
 - 81 B. F. Friberg, "Design of Dowels in Transverse Joints of Concrete Pavements," Proceedings, ASCE, Vol. 64, pp. 1809-1828, November 1938.
 - 82 J. W. Kushing and W. O. Fremont, "Design of Load Transfer Joints in Concrete Pavements," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 20, 1940.
 - 83 H. W. Giggin, "Transverse Joints in the Design of Heavy Concrete Pavements," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 23, 1943.
 - 84 L. W. Teller, "Spacing of Dowels," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 25, 1945.
 - 85 E. A. Finney and W. O. Fremont, "Progress Report on Load Deflection Tests Dealing with and Size of Dowels," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 27, 1947.
 - 86 Henri Marcus, "Investigation of Dowels and Other Load-Carrying Devices for Transverse Joint of Concrete Pavements," Report to the Bureau of Yard and Docks, U. S. Navy, February 1950.
 - 87 Henri Marcus, "Load Carrying Capacity of Dowels at Transverse Pavement Joints," Proceedings, ACI, Vol. 48, pp. 169-184, October 1951 (Discussion : pp. 184-1 to 184-4)
 - 88 R. D. Bradbury, "Design of Joints in Concrete Pavements," Proceedings, Highway Research Board, Vol. 12, pp. 105-136, 1932.
 - 89 "Design of Concrete Airport Pavement" Portland Cement Association, Illinois, U. S. A., pp. 1-47, 1955, Partial Revision and Supplement in March 1960.
 - 90 "General Specification No. 201 : Airfield Pavements," Ministry of Public Building & Works, United Kingdom, pp. 1-142, October 1965
 - 91 "A Note on the Construction of Reinforced Concrete Airfield Pavements," 4 pp., a part of "Airfield Pavement Reports," Published by Ministry of Public Building & Works, United Kingdom, May 1964.
 - 92 "Reports on Question IV : Rigid Pavements," XIIIth Permanent International Association of Road Congresses, Tokyo, November 1967, IV-1 Germany 29 pp., IV-2 Australia 20 pp., IV-3 Belgium 26 pp., IV-4 Spain 12 pp., IV-5 France 28 pp., IV-6 Great Britain 33 pp., IV-7 Italy 12 pp., IV-8 Japan 29 pp., IV-9 Netherlands 19 pp., IV-10 Roumania 14 pp., IV-11 Czechoslovakia 39 pp., IV-12 Turkey 9 pp., and IV-13 U. S. S. R. 31 pp.

港湾技研資料 No. 46

1968年3月

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 誠文堂印刷工業株式会社
川崎市苅宿531-2