

(95) RCループ状継手を有するプレキャストPC床版接合部の疲労破壊試験

日本道路公団 名古屋建設局	森山 陽一
日本道路公団 名古屋建設局名古屋工事事務所	向井 盛夫
三菱重工業・川田工業・ピー・エス共同企業体	相場 充
三菱重工業・川田工業・ピー・エス共同企業体 正会員	○西垣 義彦

1. はじめに

現在、日本道路公団では鋼道路橋床版工の省力化工法として従来の場所打ち床版にかわるプレキャスト床版の実用化と工法の確立をめざして床版相互の継手構造に関する試験ならびに試験工事を行っている。

プレキャスト床版の実績として一般には、橋軸方向の連続性確保の観点から橋軸方向にポストテンション方式でプレストレスを与えてプレキャスト床版を一体化するPC構造が多く採用されている。これは製作および継目部の現場施工が容易でしかも耐荷性、耐久性について十分な確認が得られていることによる。しかし、従来の場所打ち床版に比較し、コスト面で割高となっているのが実状であり、建設コストのみならず、維持管理面を含めたトータルコストの低減を目指した合理的な設計と施工が必須となっている。

こうしたなかで今回、第二東海自動車道東海大府高架橋(試験工事)においては、横構を省略した鋼少数主桁にプレキャストPC床版を採用し、また橋軸方向にはプレキャスト床版相互の継手工法としてループ状鉄筋継手構造(以下、RCループ継手と略す。図-1参照)を採用している。この継手にはループ状鉄筋のフープ効果により重ね継手長が短くなり、間詰め幅を小さくすることができるメリットがあるが、継手部が一断面に集中するため橋軸方向の連続性確保と耐久性に関する信頼が課題となっている。RCループ継手に関する実験は最近、いくつか行われており、現在では上信越自動車道八木沢高架橋、磐越自動車道差塩橋など実橋としての実績もでてきたが、RCループ継手に関する規定はまだ整備されていないのが現状である。

昨年度、日本道路公団は大阪大学の輪荷重移動載荷試験装置を利用してプレキャスト床版接合部の疲労耐久性試験を実施しており、RCループ継手の十分な耐久性を確認している¹⁾。

本試験はその供試体を使用して、さらに①破壊性状の確認、②最終耐荷力の確認、③既存実験(2方向RC構造)との比較を行う目的で荷重レベルを上げながら破壊に至るまで定点繰返し載荷試験を実施したものである。試験の結果より、プレキャスト床版本体と継手部の損傷および破壊性状について顕著な差異はなく、たわみ性状からも継手部の十分な連続性と耐久性の確認が得られた。

2. RCループ継手の概要

RCループ継手は、橋軸方向のプレキャスト床版相互の継手部をループ状鉄筋の重ね継手により、床版を連続一体化する場所打ち継手工法であり、間詰めコンクリートとしては収縮補償を目的とする膨張コンクリートなどの材料選定が必要と思われる。スイス国内ではフラマト橋(1966年)、サリーン橋(1970年)、ロゼンツェ橋(1980年頃)などの実績があるが、普及するには至っていない²⁾。しかし、わが国では、今後の鋼橋床版形式となるべき有効な継手工法として最近RCループ継手が見直され、注目されてきているのである。

利点としては以下の点があげられる。

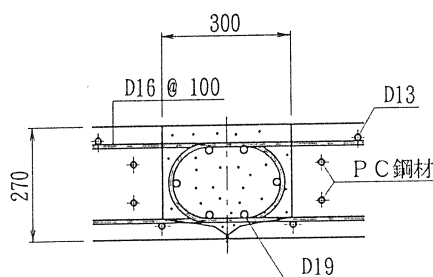


図-1 RCループ継手構造の例

- ① ループ定着の効果により、必要重ね継手長が短くなり、間詰め幅を小さくできる。
- ② 継手部だけの現場施工であり、省力化と経済性の面で大幅に向上する。
- ③ 床版接合のために与える橋軸方向プレストレスのクリープ変形に伴う影響を考慮しなくてもよい。
- ④ 損傷した床版の取り替えが容易で、維持管理面に優れる。

一方、課題となるのは以下に示す点である。

- ① 継手部が一断面に集中している。
- ② ループ状継手の必要重ね継手長に関する明確な規定がない。

必要重ね継手長の算出には、道路橋示方書、土木学会コンクリート標準示方書、CEB-FIP Model Code1990、DIN 1045などの規定があるが、現在のところ、考え方は統一されておらず、ループ状重ね継手に関する記述はDIN 1045にあるのみである。道路橋示方書Ⅲ.10.6.2項では、定着長と重ね継手長 L_d は同じとし、フックの効果は考慮せず、かつ 20ϕ 以上としている。コンクリート標準示方書10.6.2項では、配置鉄筋量が必要鉄筋量の2倍以上、および同一断面での継手の割合が $1/2$ 以下の場合には基本定着長 L_a 以上とし、かつ 20ϕ 以上としている。ただし、一方の条件を満足しない場合には $1.3L_a$ 以上とし、両方の条件を満足しない場合には $1.7L_a$ 以上としている。文献³⁾によれば、DIN 1045の規定においてはループの有効性は認めていないものの単なる重ね継手とはせず、半円形フック付き重ね継手長算出式と同じ条件を適用して、かつループ内側直径 d_o の1.5倍以上、 20cm 以上としている。ループ内の腹圧力に対しては横方向鉄筋の補強が必要である。

いま、ループ鉄筋をD16(SD345)、間詰めコンクリートを $\sigma_{ck}=500\text{kgf/cm}^2$ としての重ね継手長を試算すると、道路橋示方書では同一断面での重ね継手は原則として認めていないが、 $25\phi=40\text{cm}$ 、コンクリート標準示方書では $1.7 \times 28.9 = 49\text{cm}$ 、DIN 1045では継手鉄筋のずらし量に関する係数 k が2.2、定着形状による係数 f が0.5、鉄筋発生応力 1400kgf/cm^2 のときの基本定着長が 20cm で、 $2.2 \times 0.5 \times 20 = 22\text{cm}$ となる。

いずれにしても、間詰め幅としては施工性から 20cm から 30cm 程度までが目安と考えられる。

3. 実験概要

3.1 供試体

供試体構造寸法は図-2に示すとおりである。プレキャスト床版の橋軸直角方向はプレテンション方式によるPC構造である。コンクリート設計基準強度は 500kgf/cm^2 であり、間詰め部には単位膨脹材量 50kg/m^3 の膨脹コンクリートを使用した。

供試体は2体製作し、橋軸方向プレストレスの効果を調べるためRCループ継手に若干プレストレス(10kgf/cm^2)をポストテンション方式により導入した供試体DLPとプレストレスを導入しない供試体DLRとした。

プレキャスト床版橋軸直角方向のプレストレス導入量は床版支間 2.2m 、設計荷重 10tf (B活荷重)で道示式による曲げモーメントに対してほぼフルプレストレスの状態である。橋軸方向鉄筋量についても道示式に対して許容応力度を満足するように決定している。

コンクリートの圧縮強度は、プレキャスト床版部が材令28日で 686kgf/cm^2 、間詰め部が材令7日で 625kgf/cm^2 であった。間詰め部の割裂引張強度は材令38日で 48.3kgf/cm^2 で

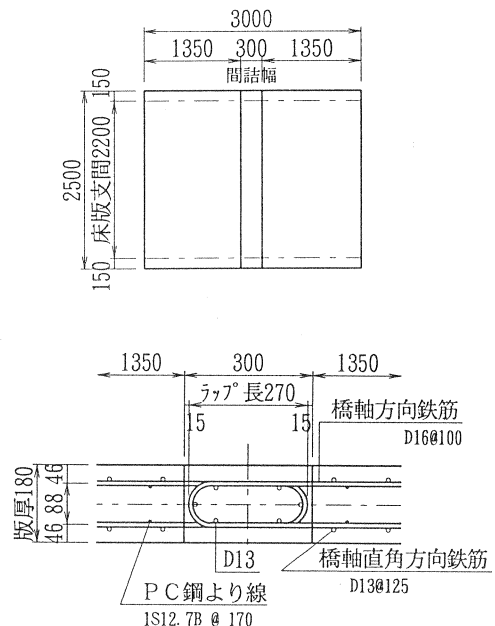


図-2 供試体構造寸法

あった。今回の定点載荷試験時のコンクリート材令は約7ヶ月を経ているが、試験終了後の採取コア平均圧縮強度試験結果は、プレキャスト床版部が671kgf/cm²、間詰め部が658kgf/cm²であった。

3.2 載荷方法

床版損傷の要因のひとつである水の影響を考慮して、床版上面に水を張った状態で定点繰返し載荷試験を行った。載荷位置は床版中央の継手部直上とし、50cm×20cmの長方形載荷版を使用した。床版の支持方法は長辺(橋軸)方向の2辺を丸鋼上に単純支持し、短辺(橋軸直角)方向を自由とした。隅角部は浮き上がり防止のために治具を設置した。繰返し載荷は荷重制御による正弦波で行い、試験周波数は5Hzから損傷の進行に伴い徐々に減じた。通常の疲労試験では一定荷重振幅のもとで行うが、本試験は載荷荷重を輪荷重移動載荷試験時の最大荷重21tfからスタートさせ、10tfまたは5tfピッチの荷重レベルで5万回ごとの繰返し載荷を破壊に至るまで実施した(下限荷重2.5tf)。載荷試験状況を写真-1に示す。

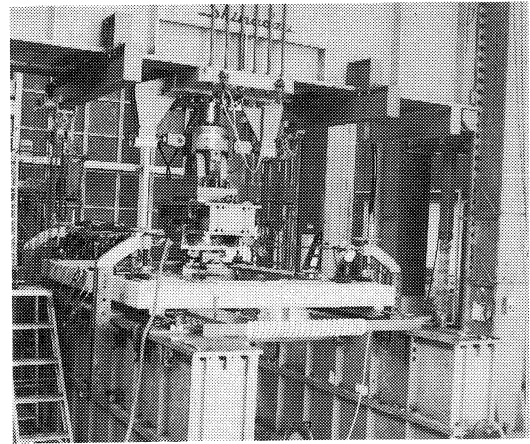


写真-1 載荷試験状況

計測および観察項目は、①載荷荷重、②たわみ、③鉄筋ひずみ、④コンクリートひずみ、⑤ひびわれの発生・進展状況、⑥漏水状況、⑦切断面状況である。なお、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみの計測箇所は、床版中央付近のみとした。静的載荷による計測は各荷重段階ごとに初期載荷時(N=1,2回)およびN=2.5万回、5万回の繰返し載荷後に実施した。

4. 実験結果

4.1 破壊までの過程

供試体DLP, DLRともに最終的に押抜きせん断破壊に近い破壊性状を示した。終局耐力にはほとんど差がなく、破壊に至るまでの性状もほぼ同じであった。載荷点直下における橋軸方向の曲げひびわれ幅が荷重の増加に伴って増大し、その位置で橋軸直角方向鉄筋が徐々に疲労破断していった。破断本数が増えるにつれ、床版のたわみが急激に増加し始め、最終的には上面が圧壊するとともに押抜きせん断破壊に至った。打継目部に起因する破壊は生じなかった。両供試体の破壊に至るまでの過程をまとめると表-1に示すとおりである。

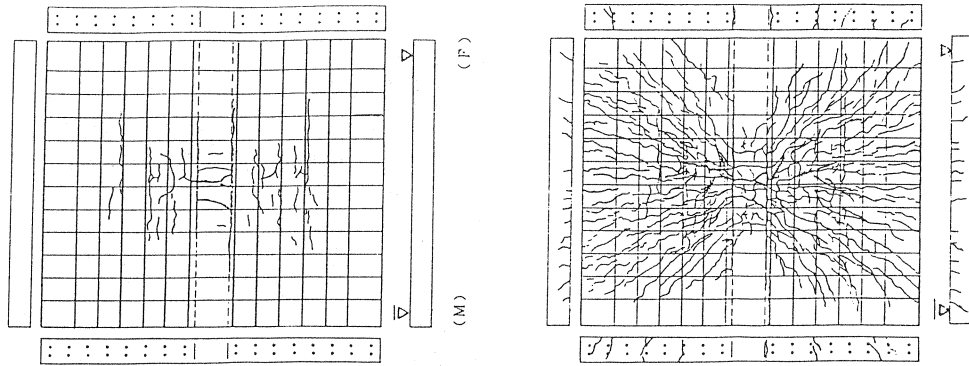
表-1 破壊までの過程

破壊までの過程		変化時点の荷重(tf)	
		供試体 DLP	供試体 DLR
1	・床版下面に放射状のひびわれが発生 ・床版のたわみが増大し始める	5.0	5.0
2	・P.C鋼より線の付着切れ抜け出しが始まる ・載荷点直下の曲げひびわれの増大	6.0	5.5
3	・床版中央付近の主鉄筋の疲労破断が始まる ・床版の中立軸の上昇	6.5	6.0
4	・床版のたわみが急増 ・コンクリート上面にひびわれ発生 ・漏水発生(DLPは破壊時)	7.0	6.5
5	・コンクリート上面の圧壊とともに押抜きせん断破壊	7.0 (2.9万回)	6.5 (4.2万回)

4.2 ひびわれの発生と進展状況

移動載荷試験時の床版下面のひびわれは配筋方向に沿った格子状のひびわれであった(図-3(a))。プレキャスト床版本体は橋軸直角方向のひびわれ、間詰め部は橋軸方向のひびわれであった。両供試体とも定点繰返し載荷試験の特徴でもある放射状のひびわれがPmax=50tfから進展し始めた。ひびわれ進展状況についてみると供試体DLP, DLRの相違点はあまり見られない。破壊直前(図-3(b))では載荷点直下間詰

め部の橋軸方向ひびわれが顕著となり、コンクリートのかど欠け、すり減り、かぶり部分の剥落が生じたが、打継目部の開きはわずかで、供試体DLPでは除荷時の開きは目視で確認できなかった。



(a) 移動荷重試験後 ($P_{max}=19tf, N=52.8$ 万回) (b) 定点荷重破壊直前 ($P_{max}=65tf, N=3.8$ 万回)
 図-3 床版下面のひびわれ状況 (供試体DLP)

4.3 荷重とたわみの関係

両供試体の橋軸方向断面のたわみ分布をそれぞれ図-4、図-5に示す。破壊荷重段階になると打継目のひびわれの影響により若干角折れした傾向が見られるが、両供試体ともほぼ左右対称でなめらかなたわみ分布をしていることから、継手部は連続性のある一体化した挙動を示すことが確認できた。活荷重10tf時のたわみは、破壊荷重直前まであまり変化は見られない。両供試体とも $P_{max}=50tf$ の繰返し載荷時からひびわれの進展とともにたわみの増加が大きくなっているが、荷重段階ごとのたわみ増加量についてみると約55tfまでは、初期の繰返し載荷回数までに生じており、劣化の進行はみられなかった。供試体DLPは、DLPよりも若干たわみが小さく、進行も遅く荷重分配性能がよいことがわかる。最終荷重段階では残留たわみ、活荷重たわみの急激な増加が見られ、両供試体とも、最終的にほぼ同じたわみ量 (約18mm) で破壊している。

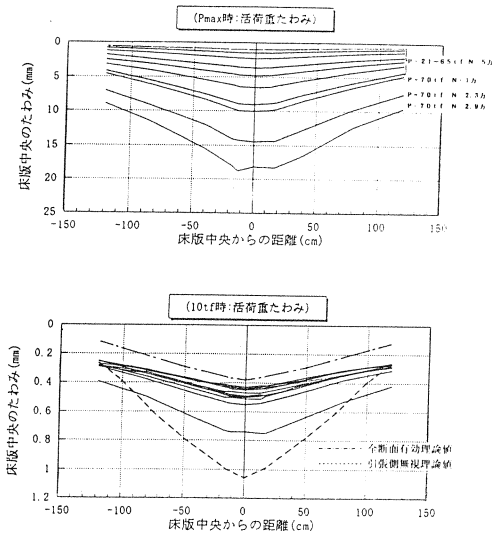


図-4 橋軸方向のたわみ分布 (供試体DLP)

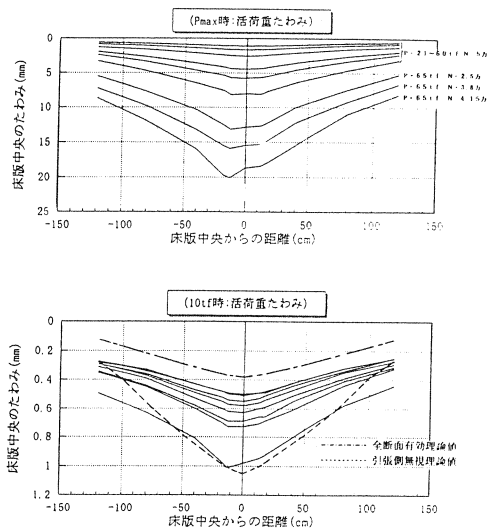


図-5 橋軸方向のたわみ分布 (供試体DLR)

4. 4 荷重とひずみの関係

ループ鉄筋のひずみ測定から、両供試体とも降伏は認められず、破壊近傍箇所ひずみは供試体D L Pが約1300 μ 、D L Rが約1150 μ であった。破壊荷重直前では、版剛性の低下とともに間詰め部内とプレキャスト床版部内と同程度のひずみとなり応力伝達が良好に行われている状況が判断できた。ループ鉄筋の上側は供試体D L Pの場合60tf、D L Rの場合50tfから引張域に移行しており、中立軸深さは供試体D L Pの場合、7cmから3cmへ、D L Rの場合、7cmから1cm程度へと上縁に変化していったことが推測できる。

一方、橋軸直角方向鉄筋は、ループ鉄筋継手内側の下側鉄筋が、まず疲労破断し、続いてプレキャスト床版部の下側鉄筋が疲労破断している。疲労破断する前に生じた最大ひずみ振幅は、供試体D L Pで約1500~2500 μ 、供試体D L Rで約1500~2100 μ であった。鉄筋が破断した位置はひびわれ発生位置と同じである。なお、コンクリート標準示方書から鉄筋の設計疲労強度を求めると、異形鉄筋D13の場合、鉄筋の変動応力が2000kgf/cm²で約140万回、3000kgf/cm²(ひずみ約1500 μ 相当)で約5万回の繰返し回数に相当する。ループ鉄筋内側の直角方向鉄筋がプレキャスト床版部より有効高さが小さいにもかかわらず、先に疲労破断した主な原因は、ループ鉄筋の外側に直角方向鉄筋が配置されていないため、載荷点直下の橋軸方向のひびわれ幅が大きくなり、その位置に応力が集中したためと考えられる。

4. 5 切断面の観察結果

切断面のひびわれ状況を図-6に示す。橋軸方向の切断面をみると、両供試体ともにほぼ左右対称に押抜きせん断破壊しており、打継目部に破壊の要因となるようなひびわれは見られなかった。このことから橋軸方向の連続性および一体化が確認できた。橋軸方向のせん断破壊面の角度は、供試体D L Pが約15°、D L Rが約20°~25°であり、D L Pの方が橋軸方向プレストレスの効果により幾分緩やかな角度であった。一方、R C床版のせん断破壊面の角度は通常45°前後となることから、一方P C床版の場合でもプレストの効果によりせん断破壊面は、R C構造に比べて緩やかであることが確認できた。

さらに、内部の鉄筋破断状況を調べた結果、床版下面のひびわれが大きかった箇所の橋軸直角方向鉄筋が疲労破断していた。供試体D L Pは、プレキャスト床版左右合計7本、間詰め部内4本、供試体D L Rについてはプレキャスト床版左右合計9本、間詰め部内6本が破断していた。P C鋼より線T12.7Bの破断は認められなかった。

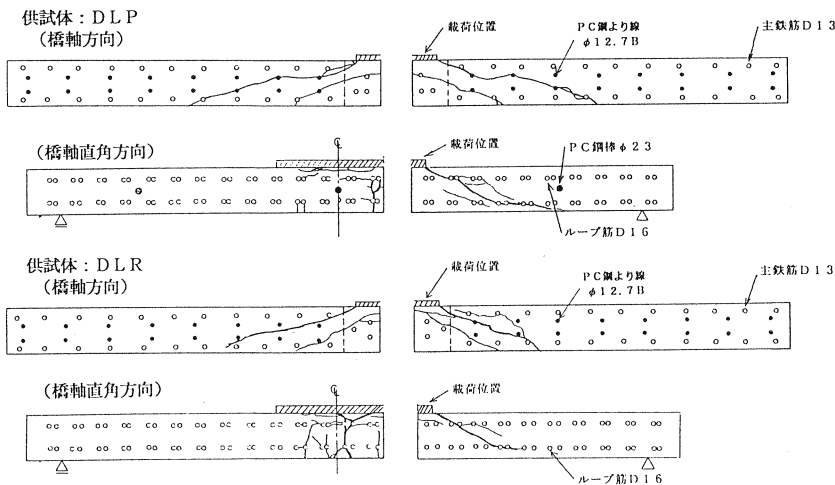


図-6 切断面のひびわれ状況

4. 6 P C 鋼より線の付着性状

大きな荷重下でのP C 鋼より線とコンクリートとの付着切れによる引込みが供試体D L Pでは60tf, D L Rは50tfから確認された。破壊直前における両端部引込み量は供試体D L Pで3~10mm, D L Rで5~12mmに達した。プレストレス導入時の鋼材全伸び量が約18mmとすると引張力の減少は最大の鋼材で50%以上になったものと推測できる。一般的にP C 構造はP C 鋼材, 鉄筋の応力変動は小さいが, コンクリートの引張強度が高いほど, 補強鉄筋量が少ないほどひびわれが生じた後の引張部に作用する力は急激にP C 鋼材に移行することになるので, その意味では, 鉄筋はひびわれの急激な上昇とP C 鋼材の付着切れを防ぐ効果を持つ。

表-2 押抜きせん断耐力値

	押抜きせん断耐力値 (tf)	
	$\sigma_{ck} = 50.0$	$\sigma_{ci} = 65.0$
土木学会式 45°	68.7	78.3
上式準用仮定 30°	80.8	92.1
前田・松井提案式	88.0	92.8

注) 材料安全係数 $\gamma_b = 1.0$ とした。
 σ_{ci} は供試体コンクリート強度を示す。

4. 7 供試体の設計押抜きせん断耐力

供試体は, 橋軸直角方向引張側鉄筋の破断による有効高さの減少に伴い, 押抜きせん断破壊が起きたものと推測される。静的な押抜きせん断耐力を土木学会コンクリート標準示方書式と前田・松井の提案式⁴⁾から計算した値を表-2に示す。両式はR C 面部材を基本としており, せん断破壊面に対するプレストレスの効果は考慮されていない。押抜きせん断疲労耐力は, N=5万回で66%に低下する。

5. おわりに

試験結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 供試体D L Pは70tf, N=4.2万回, D L Rは65tf, N=2.9万回の繰返し載荷で押抜きせん断に近い性状で破壊した。両供試体とも現行の設計輪荷重10tfに対して6~7倍の耐荷力を有していた。
- ② 今回の破壊に至る挙動について, D L PとD L Rの両供試体の有意差は少なく, R C ループ継手の連続性, 一体性および耐荷力は十分確保できることが確かめられた。
- ③ 水張り試験による漏水は, 破壊時点または破壊直前に起き, 疲労に与える影響はなかった。
- ④ 両供試体ともループ鉄筋の降伏, 疲労破断およびループ内コンクリートの圧壊は認められなかった。
- ⑤ P C 床版は, ひびわれ進展以降もP C 鋼材の付着抵抗と応力再分配が良好で, 急激な破壊は生じなかった。R C 床版に比較して弾性的な変形性能が十分にあった。
- ⑥ ひびわれの進展に伴い, プレテンション方式によるP C 鋼材の付着力の減少を防ぐため, 下側に直角方向鉄筋を配置し, ひびわれ幅を制限する必要がある。
- ⑦ 継手下面のひびわれ性状から, ループ外側に直角方向鉄筋を配筋する方が効果的と考える。

6mを超える長支間床版への適用にあたり, R C ループ継手の検討課題と安全性, 信頼性を確認するため, 実物大の輪荷重移動載荷試験を実施する予定である。

最後に本試験の実施にあたり, 適切なご指導およびご協力を頂いた大阪大学工学部松井繁之教授ならびに(社)日本建設機械化協会建設機械化研究所のみなさまに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森山, 松井, 梶川, 橘, 牛島, 大沢: ループ状継手を有するプレキャスト床版接合部の疲労耐久試験, 土木学会第50回年次学術講演概要集, 1995.9
- 2) (財)高速道路調査会: 平成5年度 欧州橋梁調査団報告書 pp.123~135, 1994.3
- 3) F・レオンハルト, E・メニヒ(横道英雄 監訳): 鉄筋コンクリートの配筋(レオンハルトのコンクリート講座3), 鹿島出版会, pp.63~70, 1985.4
- 4) 前田, 松井: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式, 土木学会論文集, 第348号/V-1 pp.133~141, 1984.8