

# 論文 RC 小梁の離散的な設置による既設 RC 張出しスラブの補強効果の検討

鬼頭 直希<sup>\*1</sup>・仁平 達也<sup>\*2</sup>・岡本 大<sup>\*2</sup>・黒岩 俊之<sup>\*3</sup>

**要旨** : RC ラーメン高架橋等においては、列車の高速化による騒音対策として防音壁の嵩上げが必要となる場合がある。この場合、張出しスラブに風荷重等の作用が増加し、既設張出しスラブの耐力確保が困難となる事例が散見される。本研究では、柱接合部付近に RC 小梁を新たに設置する工法を考案し、縮尺模型による載荷実験および 3 次元 FEM 解析により、RC 小梁の増設に伴う補強効果に関する検討を行った。その結果、RC 小梁の設置により、張出しスラブ全体の曲げ耐力が向上することを確認し、算定した引張突縁の有効幅を用いることで、曲げ降伏耐力を算定できることを確認した。

**キーワード** : 張出しスラブ, RC 小梁, T 形断面, 引張突縁, 曲げ降伏耐力

## 1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート（以下、RC）ラーメン高架橋等においては、老朽化に伴うリニューアルや、列車の高速化による騒音対策として防音壁の嵩上げが必要となる場合がある。その結果、図-1 に示すように、風荷重が防音壁に作用した際に RC 張出しスラブ（以下、張出しスラブ）への作用力が増加し、特に線路側から風荷重が作用した場合に、上側鉄筋の引張応力の増加に伴い耐力が不足する事例が散見される。これに関する補強工法として著者らは、柱接合部付近に離散的に RC 梁（以下、RC 小梁という）を増設し、張出しスラブ全体の耐力向上を図る工法を考案した。図-1, 2 に補強工法のイメージを示す。RC 小梁の増設により、補強後は張出しスラブを突縁とした T 形梁となる。

一方、技術基準類、例えば鉄道構造物等設計標準（コンクリート構造物）（以下 RC 標準）<sup>1)</sup>において、引張側に突縁を有する T 形梁に対しては、安全側の評価が得られるとして引張突縁を無視して取扱い、矩形断面として曲げ耐力等の算定を行っている。また、曲げ部材の耐力に関しては、引張突縁内の軸方向鉄筋が曲げ耐力に及ぼす影響に関して検討された事例がある<sup>2),3)</sup>。図-1 に示すように、風荷重が線路側から作用した場合、等分布の曲げモーメントが作用するため、耐力算定のためには、耐力性状を把握した上で引張突縁となる範囲を適切に把握する必要があると考える。

本論文では、風荷重が線路側から作用した場合の RC 小梁による補強効果の検討として、具体的には曲げ耐力および引張突縁の有効幅を検討することを目的として、載荷実験および 3 次元非線形有限要素解析（以下、FEM 解析）を実施した。

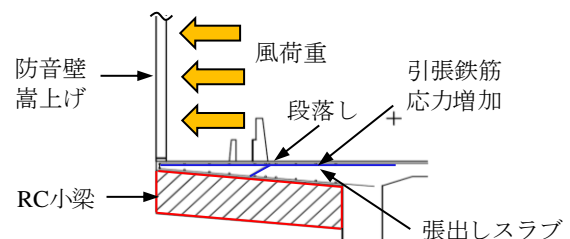


図-1 張出しスラブに作用する力の概要

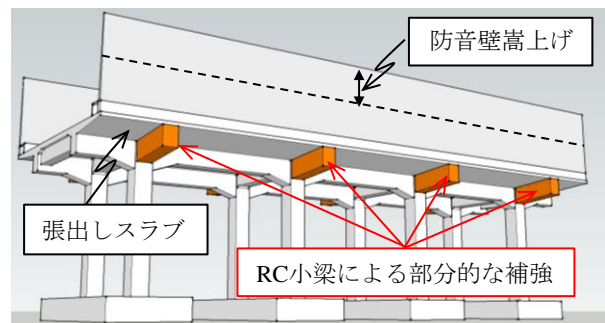


図-2 補強工法のイメージ

## 2. 載荷試験

### 2.1 防音壁の嵩上げによる曲げモーメントの変化

載荷試験を実施するにあたり、既設の RC ラーメン高架橋の張出しスラブを対象に、防音壁高さを 2.0m から 1.0m ごとに 5.0m まで変化させ、風荷重が線路側から作用した場合の曲げモーメントに対する照査を行った。防音壁に作用する風荷重は、鉄道構造物の実際の設計で用いられている  $3.0\text{kN/m}^2$ （風速約 50m/sec 相当）<sup>1)</sup>とした。また、既設張出しスラブには、図-1 に示すように、上側鉄筋が途中で段落しされている場合がある。そこで、検討した構造物は、上側鉄筋の段落しを 1 箇所、防音壁は RC 構造を想定した。図-3 に張出しスラブに作用する単位幅当たりの曲げモーメントを防音壁高さごとに示

\*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造技術研究部 コンクリート構造 (正会員)

\*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造技術研究部 コンクリート構造 博(工) (正会員)

\*3 東急建設株式会社 技術研究所 土木研究室 博(工) (正会員)

す。また、張出しスラブの単位幅当たりの曲げ降伏耐力 ( $M_{yd}$ ) および曲げ耐力 ( $M_{ud}$ ) を併せて示す。張出しスラブおよび防音壁の自重による曲げモーメントは概ね三角形分布となるが、風荷重による曲げモーメントは等曲げモーメントとして作用する。すなわち、張出しスラブ先端に作用する曲げモーメントは風荷重が支配的となり、防音壁を 4.0m 以上に嵩上げすることにより、段落し部より先端の作用曲げモーメントが、 $M_{yd}$ 、 $M_{ud}$  を上回る事となった。図-4 に防音壁高さごとの曲げモーメントと  $M_{yd}$  の照査値を示す。防音壁高さ 2.0m の場合は照査値 0.5 程度であるが、防音壁高さが 4.0m 以上となると、照査値が 1.0 以上となり、何らかの補強を施す必要があることがわかる。

## 2.2 試験概要

表-1 に試験体諸元を示す。試験体は、無補強試験体および RC 小梁による補強試験体の 2 体とし、実構造物の 1/2 サイズとした。なお、実構造物には上側鉄筋の段落しが存在する場合があるが、本試験は RC 小梁による補強効果ならびに、設計で用いる引張突縁の有効幅を検討することを目的としているため、試験体に段落しは設けていない。また、RC 小梁は、図-2 に示すように、高架橋柱と同一の間隔で設置し、幅を高架橋柱の幅と同一、高さを縦梁の高さと同一にすることとして寸法を設定し

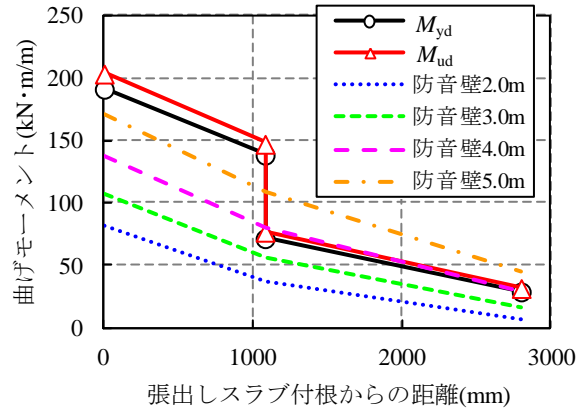


図-3 防音壁高さ変化における作用力関係

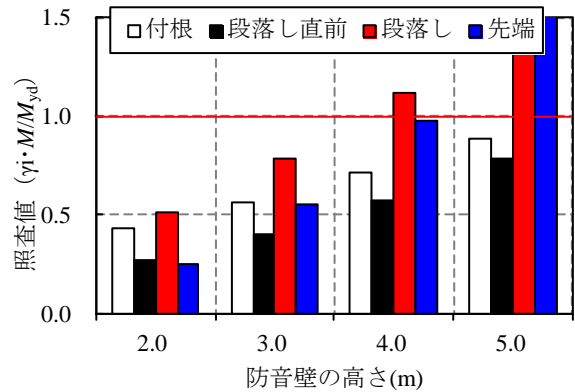


図-4 防音壁高さごとの曲げモーメントに対する照査値の関係

表-1 試験体の諸元

試験体名	部材寸法				軸方向鉄筋			せん断補強鉄筋			
	断面幅 (mm)	断面高さ		有効高さ (mm)	張出し長 (mm)	径-間隔	鉄筋規格	引張鉄筋比 (%)	径-間隔	鉄筋規格	せん断補強鉄筋比 (%)
	付根 (mm)	先端 (mm)									
No.1	5000	200	100	175	1400	D10-100	SD295	0.41	-	-	-
No.2	5000	200	100	175	1400	D10-100	SD295	0.41	-	-	-
(RC小梁)	300	600	500	575	1400	D16-80	SD345	0.35	D16-200	SD345	0.66

表-2 材料試験結果

(a) コンクリート				(b) 鉄筋				適用鉄筋		
試験体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		鉄筋径	規格	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )		降伏ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
No.1	25.2	24.5		D10	SD295	190	374	1970	527	張出しスラブ軸方向鉄筋
No.2	33.4	26.3		D16	SD345	199	399	2000	571	RC小梁軸方向鉄筋, スターラップ

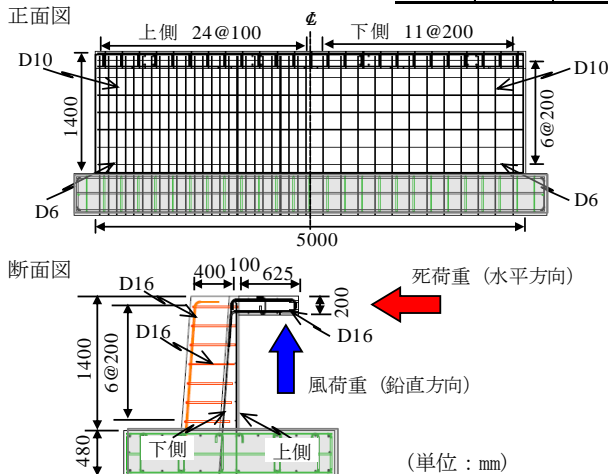


図-5 配筋状況 (No. 2 試験体)

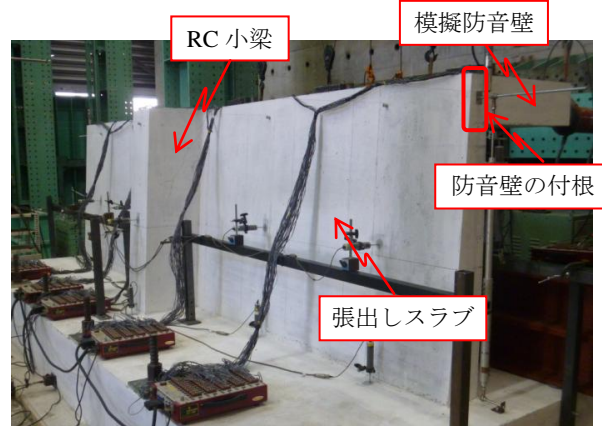


図-6 試験体状況 (No. 2 試験体)

た。表-2 に試験体に用いた材料試験結果を示す。

図-5 に試験体の配筋状況, 図-6 に全体図と载荷状況を示す。载荷装置の都合上, 張出しスラブを 90 度傾けた試験体とし, 張出しスラブ先端に RC 構造の模擬防音壁を設けた。張出しスラブおよび RC 小梁の軸方向鉄筋の定着長は, RC 標準<sup>1)</sup>に準拠し算出した。模擬防音壁は, 嵩上げ方法は様々考えられることを考慮して, 張出しスラブの破壊が先行することを想定した配筋とした。試験体は, RC 小梁と張出しスラブを一体で施工したが, 実施工においては, 張出しスラブ下面をはつり, アンカー筋により一体性を図ることが想定される。本研究は, RC 小梁による補強効果の検討を主な目的としており, RC 小梁と張出しスラブの一体化の方法については別途検討を行っている。载荷方法は, 水平ジャッキにより死荷重に相当する荷重 (以下, 死荷重) を長手方向に 1.25m 間隔で 4 点载荷した後, 鉛直ジャッキにより風荷重に相当する荷重 (以下, 風荷重) を長手方向に 1.0m 間隔で 5 点载荷した。

载荷手順は, 表-3 に示すように死荷重を载荷し一定値とした後, 風荷重を漸増した (STEP1)。ただし, 風荷重漸増中に模擬防音壁の付根 (図-6) において, ひび割れが発生し荷重が低下した。この時点で, 張出しスラブの引張鉄筋は降伏していないことを確認し, 荷重を全て除荷した後, 再度死荷重のみで载荷を行った (STEP2)。実構造物の張出しスラブに, 死荷重漸増のみにより曲げモーメントが作用するケースは考えにくい, RC 小梁の設置による張出しスラブの最終的な破壊状況および, 張出しスラブ付根の引張突縁の有効幅を検討するため, STEP2 による载荷を行った。

### 2.3 実験結果

図-7 に载荷終了後の張出しスラブ引張面 (上面) の損傷状況を示す。No.1 試験体は, 曲げひび割れが長手方向に対して並行に生じ, STEP2 により張出しスラブ付根付近のひび割れ幅が増加した。No.2 試験体は, RC 小梁を中心に, 張出しスラブ先端から斜めにひび割れが生じていることがわかる。また, STEP1 では風荷重による等曲げモーメントと死荷重による曲げモーメントにより, 断面高さが小さい先端部と曲げモーメントが最大となる付根でひび割れが観察されたが, RC 小梁設置付近の中間部 (図-7 (b) 中の箇所(a)) にひび割れは生じていない。

図-8 (a) に STEP1 による荷重-変位関係を示す。縦軸は張出しスラブ付根に生じる曲げモーメント, 横軸は試験体中央の水平方向の変位とした。No.2 は No.1 に対して初期剛性が高くなり, 曲げモーメントの最大値は 1.5 倍程度増加した。ただし, No.1 および No.2 とともに張出しスラブの軸方向鉄筋が降伏する前 (1200 $\mu$  程度) に, 図-6 に示す模擬防音壁の付根においてひび割れが生じ,

表-3 载荷手順

試験体名	STEP1		STEP2
	死荷重 (水平方向)	風荷重 (鉛直方向)	死荷重 (水平方向)
No.1	70.0kN <sup>※1</sup>	漸増	漸増
No.2	105.0kN <sup>※2</sup>	漸増	漸増

※1 高欄高さ 2.0m を想定した荷重割合より算出

※2 高欄高さ 4.0m を想定した荷重割合より算出

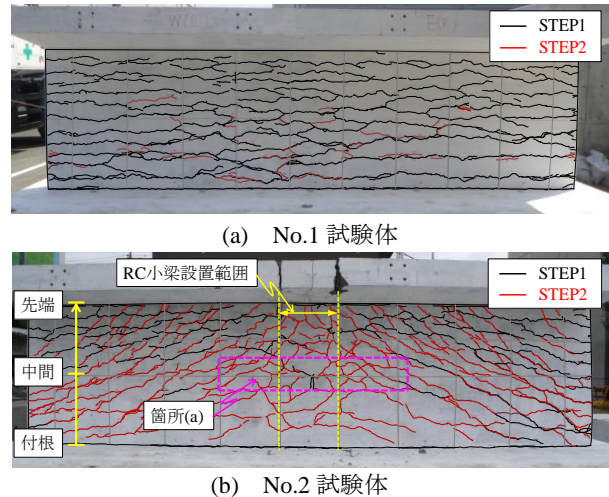
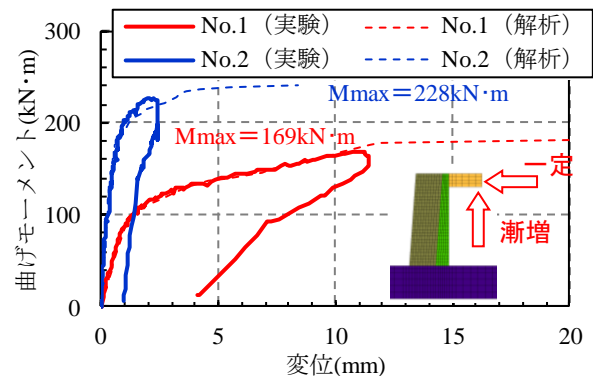
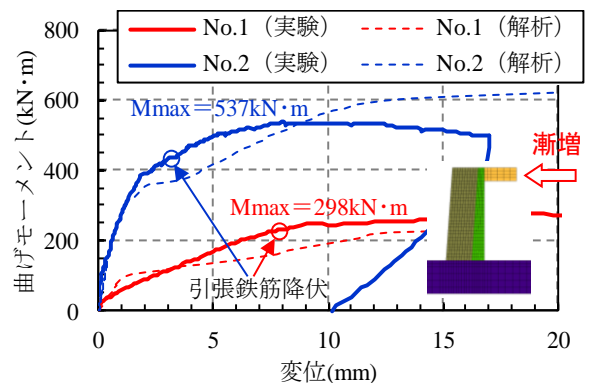


図-7 試験体の損傷状況



(a) STEP1 による結果



(b) STEP2 による結果

図-8 荷重-変位関係

荷重が低下した。

図-8 (b) に STEP2 による荷重-変位関係を示す。STEP1 の場合と同様, No.2 は初期剛性が高くなり, 荷重も増加した。曲げモーメントの最大値は No.1 で 298 kN·m に対し, No.2 は 537kN·m となり, RC 小梁設置による

補強効果を確認した。なお、RC 小梁のアンカー筋は最大荷重以降も降伏することなく、いずれの試験体も曲げ破壊形態であることを確認した。

### 3. FEM 解析による検討

#### 3.1 概要（実験および実構造物モデル）

FEM 解析は、汎用有限要素プログラム DIANA (Ver9.4.4) を用いて、2 章で示した試験体を 3 次元にモデル化し、載荷試験を再現した。コンクリートはソリッド要素とし、張出しスラブおよび RC 小梁は材料非線形性を考慮し、応力-ひずみ関係として圧縮軟化特性には Parabolic モデル、引張軟化特性には Hordijk モデルを用いた。また、防音壁およびスタブは弾性部材としてモデル化した。特に防音壁は、嵩上げ方法や防音壁付根の耐力について、別途検討すること等を前提とするためである。鉄筋は埋込み鉄筋要素とし、材料の非線形性を考慮して完全弾塑性モデルとした。なお、張出しスラブの軸方向鉄筋は、十分な定着長が確保されていることを考慮し、完全付着としてモデル化した。張出しスラブと RC 小梁は、一体化を図ることを前提に界面要素は設けていない。図-9 に No.2 をモデル化し、死荷重漸増した場合 (STEP2) における張出しスラブ上面の最大主ひずみ分布を示す。張出しスラブ上面のひずみは、図-7(b) に示すひび割れ状況と類似しており、RC 小梁を中心に張出しスラブ先端から斜め方向に卓越していることがわかる。また、図-8 に荷重-変位関係を併せて示す。荷重-変位関係は、STEP1, 2 ともに実験と概ね一致していることから、載荷試験を再現できており解析モデルとして妥当であると考えられる。

そこで、本解析モデルを用いて、実構造物を 3 次元でモデル化し、検討を実施した。図-10 に解析モデルを示す。防音壁は高さ 5.0m まで嵩上げた状態を想定した。なお、コンクリートおよび鉄筋の要素は、実験モデルと同一である。解析ケースは表-4 に示すように、張出し長および柱間隔 (RC 小梁の設置間隔) をパラメータとした。実構造物を忠実に再現するため、軸方向鉄筋の段落しは 1 箇所とし、張出しスラブおよび防音壁の自重の他に、バラスト重量等を考慮した。また、いずれのケースも補強前の自重、防音壁の嵩上げおよび RC 小梁設置による重量の増分を作用させた後、風荷重もしくは死荷重を漸増した。

#### 3.2 解析結果

図-11 に柱間隔 10m としたケースの荷重-変位関係を示す。縦軸は張出しスラブ付根に生じる曲げモーメント、横軸は RC 小梁を設置した箇所における張出しスラブ先端の鉛直下方向の変位とした。図-11(a) に風荷重漸増による結果を張出し長 2.8m としたケースを例に示す。

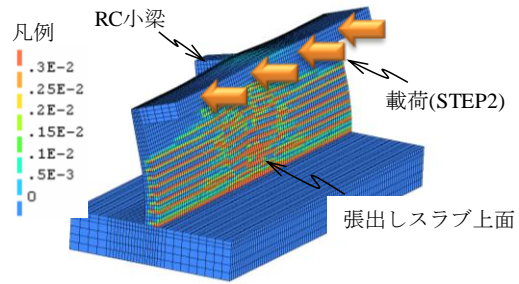


図-9 FEM 解析【実験モデル】(最大主ひずみ分布)

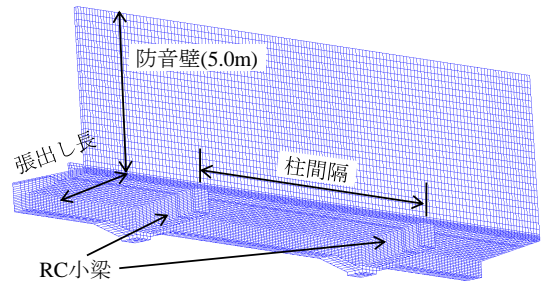
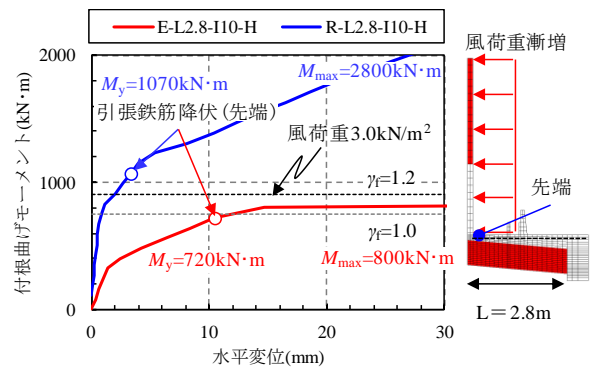


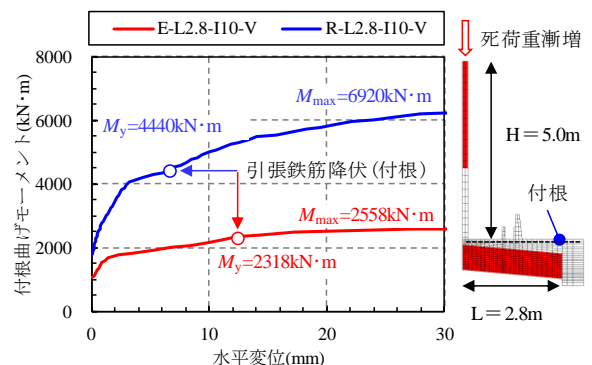
図-10 FEM 解析【実構造物モデル】

表-4 解析ケース一覧 (実構造物モデル)

CASE	張出し長 m	柱間隔 m	補強梁 高さ m	防音壁 高さ m	載荷 方法
E-L2.8-I6-V	2.8	6.0	—	2.0	死荷重 漸増
R-L2.8-I6-V			0.7	5.0	
E-L2.8-I10-V		10.0	—	2.0	
R-L2.8-I10-V			0.7	5.0	
E-L2.8-I6-H	2.8	6.0	—	2.0	風荷重 漸増
R-L2.8-I6-H			0.7	5.0	
E-L2.8-I10-H		10.0	—	2.0	
R-L2.8-I10-H			0.7	5.0	
R-L2.3-I6-H	2.3	6.0	0.7	5.0	
R-L2.3-I10-H		10.0	0.7	5.0	



(a) 張出し長 2.8m, 風荷重漸増



(b) 張出し長 2.8m, 死荷重漸増

図-11 荷重-変位関係 (実構造物モデル)

張出しスラブの引張鉄筋のうち、断面高さが小さい張出しスラブ先端付近が最も早く降伏した。引張鉄筋降伏時の曲げモーメント ( $M_y$ ) は、無補強モデル (E-L2.8-I10-H) で  $720\text{kN}\cdot\text{m}$  に対し、補強モデル (R-L2.8-I10-H) で  $1070\text{kN}\cdot\text{m}$  と概ね 1.5 倍程度増加した。図中には防音壁高さ 5.0m に風荷重  $3.0\text{kN}/\text{m}^2$  が作用した際の曲げモーメントを併せて示しており、作用係数  $\gamma_f=1.2$  は安全性の曲げ耐力の照査、 $\gamma_f=1.0$  は復旧性の曲げ降伏耐力の照査に用いる係数で乗じた値を示している。いずれも RC 小梁を設置することにより、 $M_y$  以下となり風荷重作用時において、有効であることが確認された。

図-11 (b) に死荷重漸増による結果を示す。引張鉄筋は曲げモーメントが最も大きくなる張出しスラブ付根の鉄筋が最も早く降伏した。 $M_y$  は無補強モデル (E-L2.8-I10-V) で  $2318\text{kN}\cdot\text{m}$  に対し、補強モデル (R-L2.8-I10-V) は  $4440\text{kN}\cdot\text{m}$  となり、補強効果が確認された。

#### 4. 引張突縁の有効幅の検討

##### 4.1 検討方法の概要

2, 3 章で載荷実験と FEM 解析を実施してきたが、RC 小梁を設置した張出しスラブの曲げ耐力および曲げ降伏耐力の算定のためには、長手方向 (線路平行方向) のひずみ分布を考慮した上で、引張突縁の有効幅を検討する必要がある。以下において、載荷実験ではひずみゲージを離散的に添付したこと等を考慮し、FEM 解析による鉄筋のひずみ分布で検討することとした。具体的には、試

験体および実構造物モデルについて、4.2 節で引張鉄筋のひずみ分布の検討を行い、4.3 節において引張突縁の有効幅  $be'$  を算定し、曲げ降伏耐力と FEM 解析値との比較を行った。

##### 4.2 引張鉄筋のひずみ分布の検討

図-12 (a), (b) に試験体および実構造物モデルの風荷重漸増時における長手方向の張出しスラブ上側の鉄筋ひずみ分布を示す。着目位置は、引張鉄筋が最も早く降伏する張出しスラブ先端とし、この位置のひずみが  $500\mu$ ,  $1000\mu$ ,  $1500\mu$  程度時の分布を示している (ただし、図-12 (a) は STEP1 終了時の  $1200\mu$ )。RC 小梁に近いほどひずみの値が大きくなっており、ひずみが大きくなるとその傾向が顕著に表れている。このことから、RC 小梁付近が主に荷重を負担し、応力度分布は RC 小梁付近を上へ凸とした山形の分布形状となることが考えられる。

さて、断面高さが大きい張出しスラブ付根の引張鉄筋のひずみは、先端のひずみが  $1500\mu$  程度時の作用モーメントではほとんど応答していない。そこで、付根の曲げモーメントが大きくなる死荷重漸増時において、付根の引張鉄筋ひずみに着目した結果を図-12 (c), (d) に示す。風荷重漸増時と同様に、RC 小梁付近を上へ凸とした分布形状を示している。先端に着目した図-12 (b) と、付根に着目した図-12 (d) を比較すると、RC 小梁付近を凸とした範囲は、先端の方が小さくなっていることがわかる。すなわち、先端ほど、RC 小梁による補強効果が小さくなっていることが示唆される。

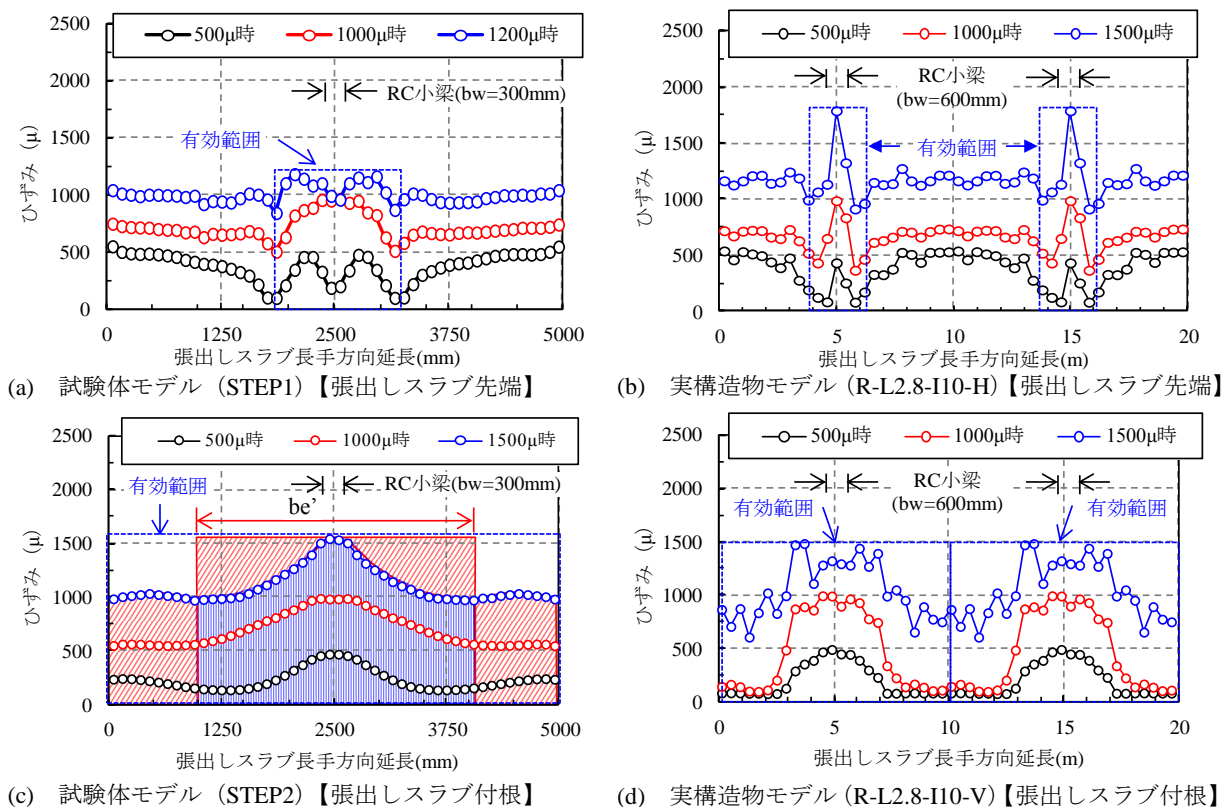


図-12 FEM 解析による張出しスラブ長手方向の引張鉄筋ひずみ分布

### 4.3 引張突縁の有効幅の算定方法

引張鉄筋のひずみ分布から、引張突縁有効幅  $be'$  を算定する。 $be'$  は、T 形断面の圧縮突縁を有する梁の照査に用いる有効幅  $be$  の算定<sup>1)</sup>と同様に、図-12(c)に示す有効範囲において、幅  $be'$  の突縁が一様に働くと考え算定した。この幅  $be'$  を引張突縁有効幅として、 $be'$  の境界線の左右にあるハッチ部分のひずみの面積が等しくなる幅として定義した。張出しスラブ先端と付根のひずみ分布は、RC 小梁付近を凸とした範囲が異なっており、明確なひずみ分布の変曲点が得られた点までを範囲とした。

実構造物の設計においては、図-4 に示すように、張出しスラブ付根や先端、段落し箇所において照査を行う必要があるため、張出し長方向に対して  $be'$  を算出した。図-13(a), (b) に算定結果を示す。これらの図において、横軸は実験モデルと実構造物モデルの寸法の影響を排除するため張出し長を無次元化したもので、縦軸は  $be'$  を RC 小梁の幅  $bw$  (実験モデルは  $bw=300\text{mm}$ , 実構造物モデルは  $bw=600\text{mm}$ ) で除して  $bw$  の倍数とした。なお、風荷重漸増時は張出しスラブ先端、死荷重漸増時は張出しスラブ付根の引張鉄筋のひずみが  $1500\mu$  時に達した際の曲げモーメントから算定した。ただし、ひずみの値が小さくなる箇所については参考値とした。

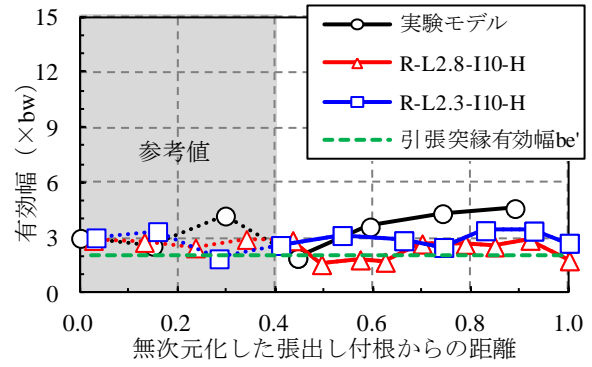
図-13(a) に風荷重漸増による結果を示す。実験モデルおよび実構造物モデルの張出し長 (2.8m, 2.3m) に関わらず傾向は一致しており、張出し長に対し概ね  $be'=2bw$  と一定の有効幅になった。図-13(b) は死荷重漸増による結果を示す。実験モデルおよび RC 小梁の設置間隔 (6m, 10m) に関わらず、張出しスラブ先端に向かうほど有効幅 ( $\times bw$ ) は小さくなる傾向を示した。柱間隔 6m と 10m を比較すると、柱間隔 10m の場合は全体的に有効幅 ( $\times bw$ ) が小さくなる傾向を示している。張出しスラブ付根では  $be'=10bw$  程度となった。

そこで、算定した  $be'$  内の軸方向鉄筋を全て考慮した矩形断面として曲げ耐力を算定し ( $M_{ycal}$ )、引張鉄筋が降伏ひずみに達した際の曲げモーメント ( $M_y$ ) と比較した結果を表-5 に示す。先端は有効幅を  $2bw$ 、付根は有効幅を  $10bw$  とすることで  $M_y$  と概ね一致し、張出しスラブを引張突縁とした T 形梁として曲げ降伏耐力を評価できることを把握した。

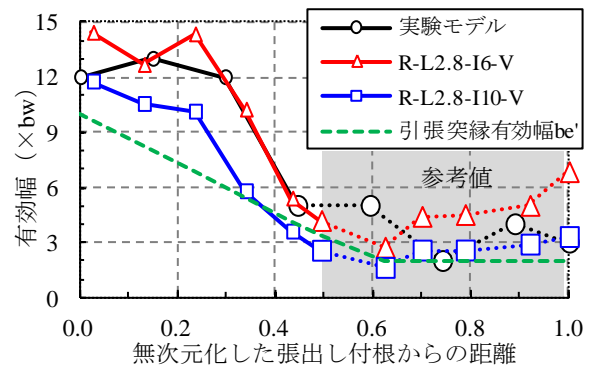
### 5. まとめ

本研究では、RC 小梁を離散的に設置した張出しスラブの補強工法を考案し、載荷実験および FEM 解析により以下の知見を得た。

- (1) 防音壁に線路側の風荷重が作用する場合を想定した載荷実験の結果、RC 小梁の設置により張出しスラブ全体の曲げ耐力が向上することを確認した。



(a) 風荷重漸増による有効幅の分布



(b) 死荷重漸増による有効幅の分布

図-13 引張突縁有効幅  $be'$  の算定結果

表-5  $be'$  により算定した曲げ耐力の比較

CASE	照査位置	$M_{ycal}$	$M_y$	有効幅 ( $\times bw$ )	$M_{ycal}/M_y$
		$\text{kN}\cdot\text{m}$	$\text{kN}\cdot\text{m}$		
R-L2.8-I10-H	先端	498	535	2	0.93
R-L2.3-I10-H	先端	498	535	2	0.93
R-L2.8-I6-V	付根	2042	1884	10	1.08
R-L2.8-I10-V	付根	2042	2220	10	0.92

- (2) 実構造物に本工法を適用した結果、高さ 5.0m の防音壁に線路側から風荷重が  $3.0\text{kN/m}^2$  で作用した場合でも、十分な曲げ降伏耐力、曲げ耐力が確保できることを確認した。
- (3) 張出しスラブを引張突縁とした T 形梁として引張突縁有効幅を算定し、その有効幅内における軸方向鉄筋を考慮して曲げ降伏耐力を評価できることを把握した。

### 参考文献

- 1) 財団法人 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物)，丸善，2004
- 2) 藤田郁美，渡邊忠朋，佐藤勉，谷村幸裕：RC 梁の引張突縁が曲げ性能へ及ぼす影響に関する実験的研究，土木学会第 57 回年次学術講演会，Vol.57, 5-627, pp.1253-1254, 2002.9
- 3) 蘆谷讓，岡本大，谷村幸裕，酒谷弘行：引張突縁を有する RC 梁の曲げ特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.2, pp.265-270, 2006